



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA  
Especialidad Mecánica

**Caracterización de la resistencia a agentes  
químicos abrasivos de probetas de material  
composite TPE y TPU producidas mediante  
fabricación aditiva**

Autor: Daniel Valdés Blas

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Julio 2019



---

# **CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA A AGENTES QUÍMICOS ABRASIVOS DE PROBETAS DE MATERIAL COMPOSITE TPE Y TPU PRODUCIDAS MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA**

**Autor: Valdés Blas, Daniel.**

**Director: Jiménez Calzado, Mariano.**

**Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.**

**Entidad Colaboradora: Lupeon, S. L.**

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

### **I. Introducción**

Este trabajo ha sido realizado como un proyecto de colaboración entre la Universidad Pontificia Comillas ICAI y la empresa Lupeon S.L. dedicada al desarrollo de proyectos de ingeniería y fabricación de piezas para la industria mediante fabricación aditiva.

Actualmente el desarrollo de la fabricación aditiva y los materiales a emplear permite la obtención de modelos funcionales con propiedades y geometrías adaptadas a cada caso particular sin suponer esto un mayor coste o tiempo de fabricación. Concretamente la impresión 3D mediante deposición de hilo fundido (FDM) que opera con polímeros, es una de las más extendidas y populares. entre los materiales disponibles destacan los polímeros elastómeros, que en su composición base se encuentra poliuretano lo que permite obtener piezas flexibles y con buena resistencia mecánica y química.

El poliuretano es empleado en el recubrimiento de cables, la fabricación de láminas aislante y la fabricación de tubos y mangueras. En la industria automovilística, sector en el que Lupeon opera actualmente, se emplea en la fabricación de componentes del chasis, el habitáculo y conductos y recubrimientos para tanques y conducción de combustible y aceite.

El objetivo de este trabajo es comprobar los efectos que presentan este tipo de fluidos sobre probetas fabricadas en dos de los filamentos elastómeros empleados en la impresión 3D, el TPU y el TPE. Para ello se analizarán algunas de las propiedades físicas y mecánicas principales de estos materiales sometido las probetas a distintos periodos de inmersión en un agente químico. En este proceso es necesario profundizar previamente en el funcionamiento de la fabricación aditiva, especialmente la tecnología FDM con los materiales a estudiar, considerando las diferentes opciones de configuración de las probetas que existen y como afectan a las propiedades finales de la pieza.

## II. Estado del arte

### Fabricación aditiva

La fabricación aditiva surge en 1976 con el desarrollo de las impresoras de inyección de aglutinante (BJ) cuyo funcionamiento era similar al de una impresora 2D; sobre una superficie de polvo se inyectaba un adhesivo que permitía la unión de las partículas conformando así las distintas capas en que se dividía el objeto. En la década posterior se desarrollan las que actualmente son las principales tecnologías de fabricación aditiva; la fabricación mediante deposición de hilo fundido, la estereolitografía y la sinterización por láser selectiva. A partir de estas se han desarrollado posteriormente nuevas formas de fabricación aditiva como la fundición por láser selectiva, fundición por haz de electrones o impresión mediante DLP que han permitido la fabricación de modelos en materiales muy diversos y con multitud de aplicaciones en la industria.

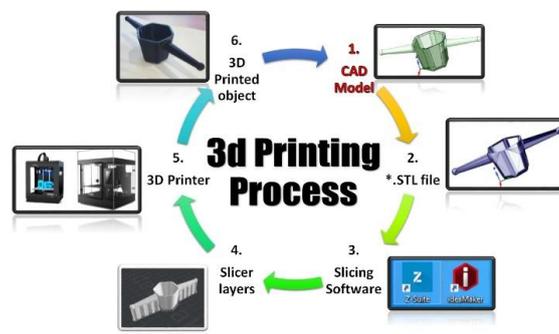


Figura 1. Proceso de impresión 3D

El proceso de impresión 3D se inicia con el diseño de un modelo 3D empleando para ello un software tipo CAD. Una vez se dispone del modelo que se desea imprimir, debe crearse un archivo STL que descompone el modelo en un mallado de tantos triangulados. Este tipo de archivos son interpretados por los programas de asistencia a la impresión 3D que permite identificar y corregir posibles daños, así como establecer una serie de preferencias en cuanto al proceso de impresión como son la temperatura de calentamiento, el grado de relleno de la pieza o la velocidad de impresión. Finalmente, el archivo generado con toda esa información es enviado a la impresora que lleva a cabo la fabricación del modelo.

En la actualidad, los tipos de fabricación aditiva existentes son:

- Deposición de filamento fundido (FDM): como su nombre indica el material de aporte empleado se presenta en forma de filamento, habitualmente un polímero, que es calentado hasta su temperatura de fusión para ser depositado en una superficie generando las distintas capas que conforman el modelo.
- Estereolitografía (SLA): el material empleado es una resina líquida que solidifica en las distintas capas por acción de un láser o rayo ultravioleta.
- Sinterizado por láser selectivo (SLS): esta tecnología emplea un material de aporte en estado de polvo. Un láser incide sobre las partículas que se unen al calentarse sin llegar a producirse la fusión.
- Procesamiento digital de luz (DLP): el proceso es similar al empleado en la tecnología SLA, empleando una máscara generada por un proyector DLP en lugar de un haz láser para la solidificación de la resina.

- Fusión selectiva por láser (SLM): el proceso es similar al indicado en tecnología SLS con la excepción de que el polvo es calentado hasta producirse la fusión. Este proceso se emplea en metales principalmente.
- Fusión por haz de electrones (EBM): variante a su vez del SLS, los polvos son fusionados en condiciones de vacío por un haz de electrones.
- Fabricación mediante laminado de objetos (LOM): la fabricación del modelo se produce al depositar sucesivas láminas de material que se adhieren entre sí por acción de un rodillo caliente y sobre las que un láser o cuchillar corta la geometría del modelo.
- Inyección de aglutinante (BJ): sobre las distintas capas de polvo que conforman el modelo se inyecta un aglutinante que permite la unión de las partículas. A diferencia del resto de tecnologías, permite la impresión a todo color de modelos.

## **Polímeros**

Los materiales empleados en la fabricación aditiva son principalmente polímeros, especialmente en la tecnología FDM empleada en este trabajo. Los polímeros son largas cadenas de unidades más pequeñas denominadas monómeros que se agrupan en el proceso de polimerización. Los procesos de polimerización pueden clasificarse en base a si se generan otros subproductos como polimerización por adición o por condensación. Así mismo si se emplea como criterio el proceso de formación de polímeros existen la polimerización en cadena y por etapas.

Los polímeros pueden ser clasificados atendiendo a distintos criterios, no obstante, el más común es el referido a su comportamiento a altas temperaturas, dividiéndose en:

- Termoplásticos: son aquellos que al calentarse se vuelven deformable y flexibles pudiéndose llegar a fundir. Son empleados en la fabricación aditiva debido a sus propiedades físicas y la posibilidad de ser combinados con fibras de otros materiales.
- Termoestables: poseen una estructura reticulada que les confiere excelentes propiedades mecánicas, pero impide su fusión.
- Elastómeros: presentan su estructura ligeramente reticulada les confiere su alta flexibilidad frente a cargas. Según su estructura pueden presentar un comportamiento termoplástico o termoestable.

Los materiales estudiados son ambos elastómeros termoplásticos dado que para la fabricación de probetas mediante FDM se requiere poder fundirlos. Ambos materiales presentan propiedades mecánicas y químicas similares siendo el TPU originalmente el que posee una mayor resistencia frente a abrasivos químicos, combustibles y aceites.

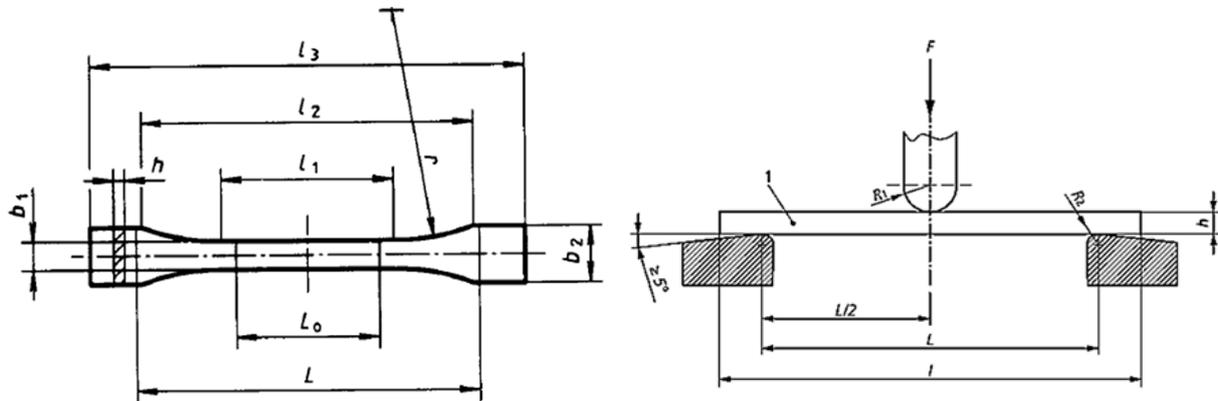
## **III. Proceso experimental**

### **Diseño y fabricación de probetas**

Para el estudio de los efectos de abrasivos químicos sobre los materiales objeto de estudio es preciso establecer el alcance del trabajo seleccionando el número de químicos, así como de propiedades de los materiales estudiados. En vista del plazo disponible y la aplicación en la industria de estos materiales se analizan los efectos de gasolina 98 en la dureza, masa y comportamiento tanto a tracción

como a flexión del TPE y el TPU para tres periodos de exposición distintos que se comparan con las propiedades de ambos materiales en condiciones estándar.

En el proceso de diseño de las probetas necesarias para llevar a cabo el estudio, para aquellos ensayos en los que existen normativa internacional tipo ISO se emplean las dimensiones de probeta establecidas. Es el caso de los ensayos de tracción ISO 527 y flexión ISO 178 mostradas.



Tipo de probeta	Medidas en milímetros		The dimensions, in millimetres, of the preferred test specimen are
	1BA	1BB	
$l_3$ Longitud total			length, $l$ : $80 \pm 2$
$l_1$ Longitud de la zona paralela estrecha	$\geq 75$	$\geq 30$	width, $b$ : $10,0 \pm 0,2$
$r$ Radio	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$	thickness, $h$ : $4,0 \pm 0,2$
$l_2$ Distancia entre zonas paralelas anchas	$\geq 30$	$\geq 12$	
$b_2$ Anchura en los extremos	$58 \pm 2$	$23 \pm 2$	
$b_1$ Anchura en la zona estrecha	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$	
$h$ Espesor	$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$	
$L_0$ Distancia entre marcas	$\geq 2$	$\geq 2$	
$L$ Distancia inicial entre mordazas	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$	
	$l_1 \pm 0$	$l_1 \pm 0$	

Figura 2. Probetas para ensayos de tracción y flexión

En el caso de las probetas empleadas en los ensayos de dureza y estudio de la masa, la normativa ISO 868 solo se establece un espesor mínimo de 4 mm, así como realizar las medidas de dureza en puntos alejados al menos 9 mm de los bordes. El diseño mostrado permite la realización de sucesivas medidas en la misma probeta a fin de garantizar la obtención de valores fiables.

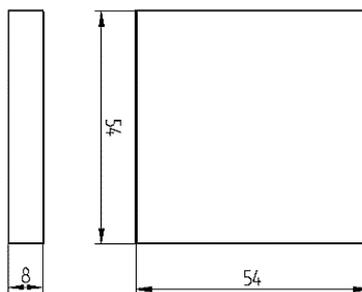
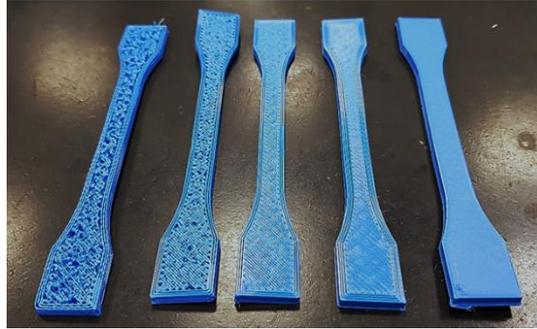


Figura 3. Probetas para ensayos de dureza

Establecidos los diseños de cada una de las probetas a emplear, resulta necesario determinar unas condiciones de impresión que permitan extrapolar los resultados de los ensayos a cualquier configuración de los parámetros de impresión que se empleen posteriormente en un modelo. Para cada uno de los ensayos y periodos de envejecimiento estudiados se emplean probetas con un relleno interlineado de 5%, 20%, 50% y 80% en volumen y un contorno exterior sólido de tres capas.

Para la fabricación del total de probetas requeridas, cinco por condición de relleno, ensayo, tiempo de envejecimiento y material se emplean tres equipos distintos adaptados a la impresión mediante FDM de materiales flexibles.



**Figura 3. Resultados de calibración de equipos de impresión**

Las impresoras utilizadas disponen de una configuración preestablecida para trabajar con estos materiales por lo que mediante un pequeño ajuste del parámetro de temperatura se obtienen resultados satisfactorios.

### **Proceso de envejecimiento**

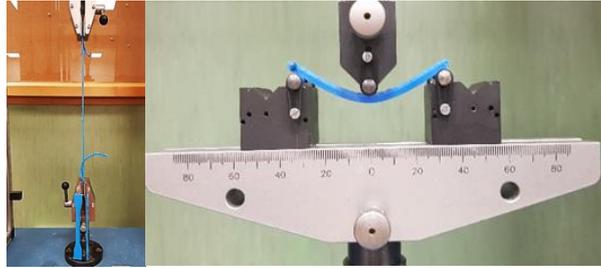
En la realización de los procesos de envejecimiento se emplea la normativa ISO 175 correspondiente los métodos para identificar los efectos de sumergir plásticos en fluidos químicos. Las probetas son introducidas en recipientes con cierre hermético en los que se añade gasolina hasta sumergir completamente las probetas. Los recipientes se almacenan durante el proceso de envejecimiento en una cámara con control de temperatura y extracción de aire para evitar la posible acumulación de vapores procedentes de la gasolina. Los periodos de envejecimiento establecidos son de 24 horas y una semana correspondiente a un estudio a corto y medio plazo según norma, además de un tiempo de exposición adicional de un mes. La norma establece para el estudio a largo plazo un periodo de envejecimiento de 16 semanas, no obstante, no se dispone de plazo suficiente para llevarse a cabo.

### **Proceso de caracterización**

La caracterización de propiedades mecánicas para las distintas condiciones de relleno y envejecimiento estudiadas tienen lugar en el laboratorio de la Universidad Pontificia Comillas – ICAI empleando en cada caso los equipos correspondientes.

Para la realización de los ensayos de dureza se emplea el durómetro Shore A para la obtención de un total de 8 medidas por probeta acorde a la normativa anteriormente mencionada. Una vez se ha secado la superficie de la probeta, se posiciona en el banco de ensayos y se deja caer el durómetro sobre ella evitando que golpee. Transcurridos 15 segundos desde el contacto, se toma el valor mostrado. Finalizada la toma de medidas, la probeta se sitúa sobre una báscula y se anota su masa.

Los ensayos de tracción y flexión se realizan en la Máquina universal de ensayos EUROTTEST ELIB20 con la célula de carga de 2kN empleando según correspondiese al ensayo realizado las mordazas de tracción o el puente de flexión. El control de los parámetros en los que se realiza el ensayo, así como la toma de datos tiene lugar mediante el programa Wintest.



**Figura 4. Mordazas y puente de flexión empleados**

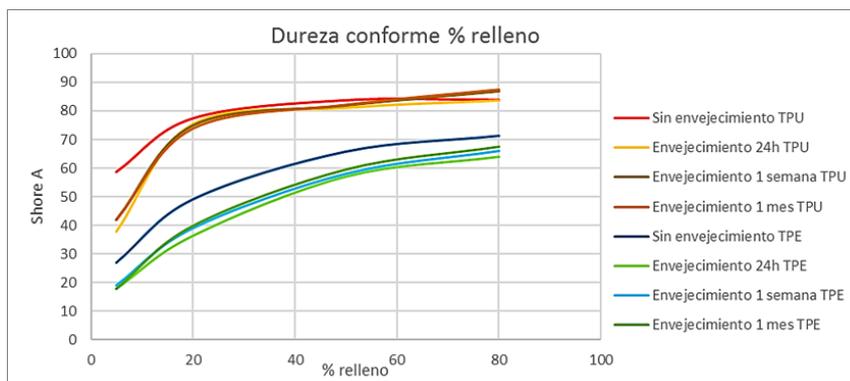
Durante los ensayos de tracción y flexión, el programa proporciona los datos correspondientes a la fuerza ejercida y el desplazamiento hasta producirse la rotura de las probetas. Para obtener las curvas de tensión-deformación y el módulo de elasticidad de cada una de las probetas se requiere aplicar las ecuaciones recogidas en la norma.

La realización de los ensayos tiene lugar de manera habitual empleando un extensómetro que proporciona la deformación exacta en un tramo de la probeta. Debido a la alta flexibilidad y deformación que presentan estos materiales, no es posible el uso de extensómetros hasta alcanzar el punto de rotura. En su defecto una de las probetas correspondientes a cada caso es sometida al ensayo de tracción con extensómetro hasta donde estelo permite.

#### **IV. Análisis de los resultados**

Para cada uno de los ensayos realizados se analiza en primer lugar de manera comparativa los resultados obtenidos en ambos materiales en condiciones estándar (sin haberse expuesto a la gasolina) a fin de poder determinar las diferencias que presentan. Posteriormente, se analiza los efectos del proceso de envejecimiento para cada uno de ellos en las distintas condiciones de relleno.

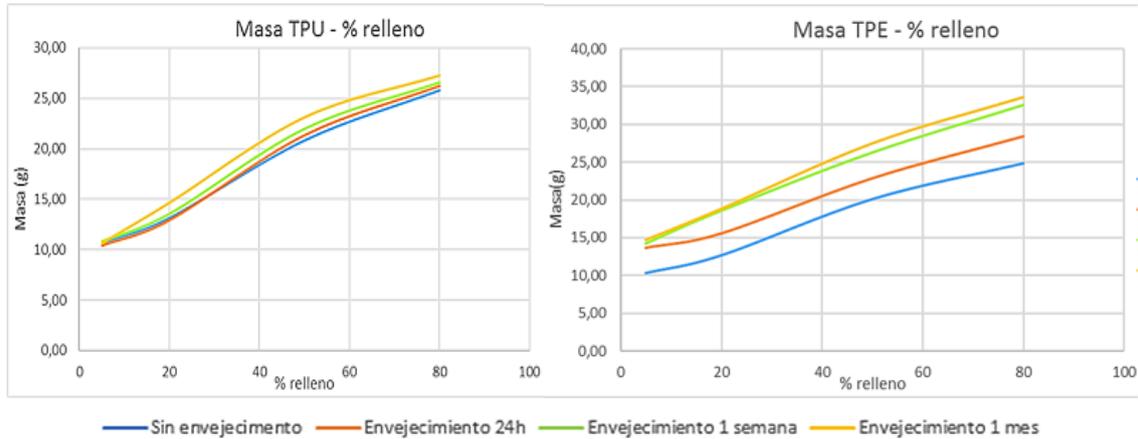
En la tabla mostrada a continuación, se muestran las curvas de dureza para los distintos periodos de exposición en ambos materiales. Han sido obtenidas a partir de las medidas realizadas en las condiciones de relleno estudiadas. En primer lugar, puede apreciarse que ambos materiales presentan valores de dureza muy distintos.



**Figura 5. Resultados de dureza**

En relación a la dureza presentada por las probetas de TPU, son aquellas que contienen un 80% de relleno las presentan valores más altos. No obstante, no existen grandes diferencias con condiciones de relleno menores por encima del 20%. Así mismo, la exposición a gasolina durante los diversos periodos no afecta de forma notable a la dureza del material cuando se supera el 20% de relleno en las probetas.

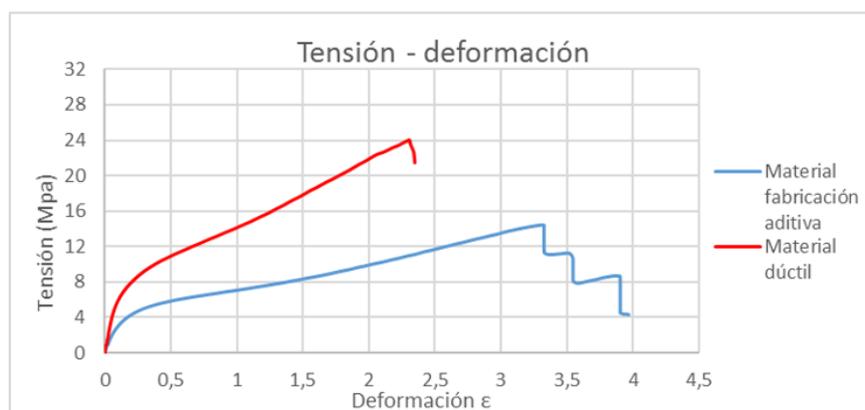
Las probetas de TPE muestran un aumento progresivo de la dureza conforme se aumenta el relleno de las probetas que parece a estabilizarse a partir de un 70% de relleno. A diferencia de como sucede en el TPU, la exposición a gasolina produce un descenso brusco de los valores de dureza en las primeras 24 horas que no incrementa conforme se prolonga el tiempo de exposición.



**Figura 5. Resultados de la variación de la masa**

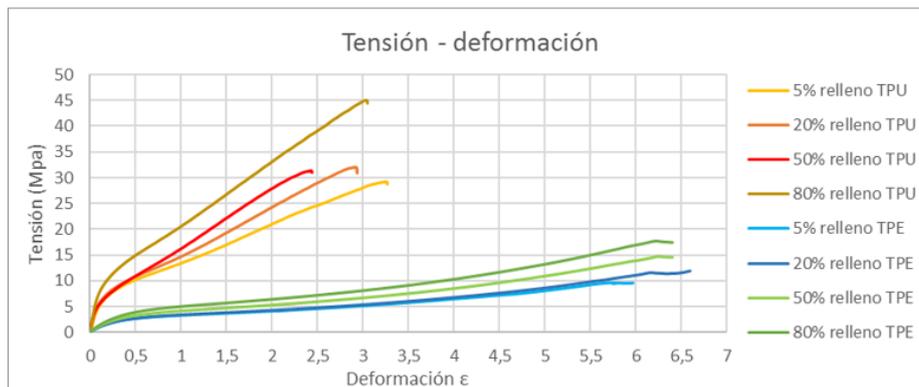
Respecto a la variación de la masa de las probetas tras los distintos periodos de envejecimiento, se observa que las probetas presentan un peso mayor a medida que se prolonga la exposición a gasolina. Esto se debe a la capacidad de absorción del material y la interacción química de las cadenas de polímeros con el fluido. Este fenómeno se produce de manera más acusada en el TPE, existiendo diferencias considerables durante la primera semana de envejecimiento.

Como se ha mencionado anteriormente, durante la realización de los ensayos de tracción solo fue posible alcanzar la rotura en las probetas fabricadas en TPU. De forma adicional la rotura en las probetas fabricadas mediante impresión 3D no se produce de manera uniforme en toda la sección. En su lugar las fibras se rompen de forma sucesiva como se muestra en la gráfica mostrada a continuación. Se considera la rotura de la pieza cuando en la gráfica se genera el primero de los escalones.



**Figura 6. Rotura de probetas de material composite**

De forma similar a como sucede en los resultados de dureza obtenidos, TPU y TPE presentan unos valores de tensión y deformación muy diferenciados para las distintas condiciones estudiadas.

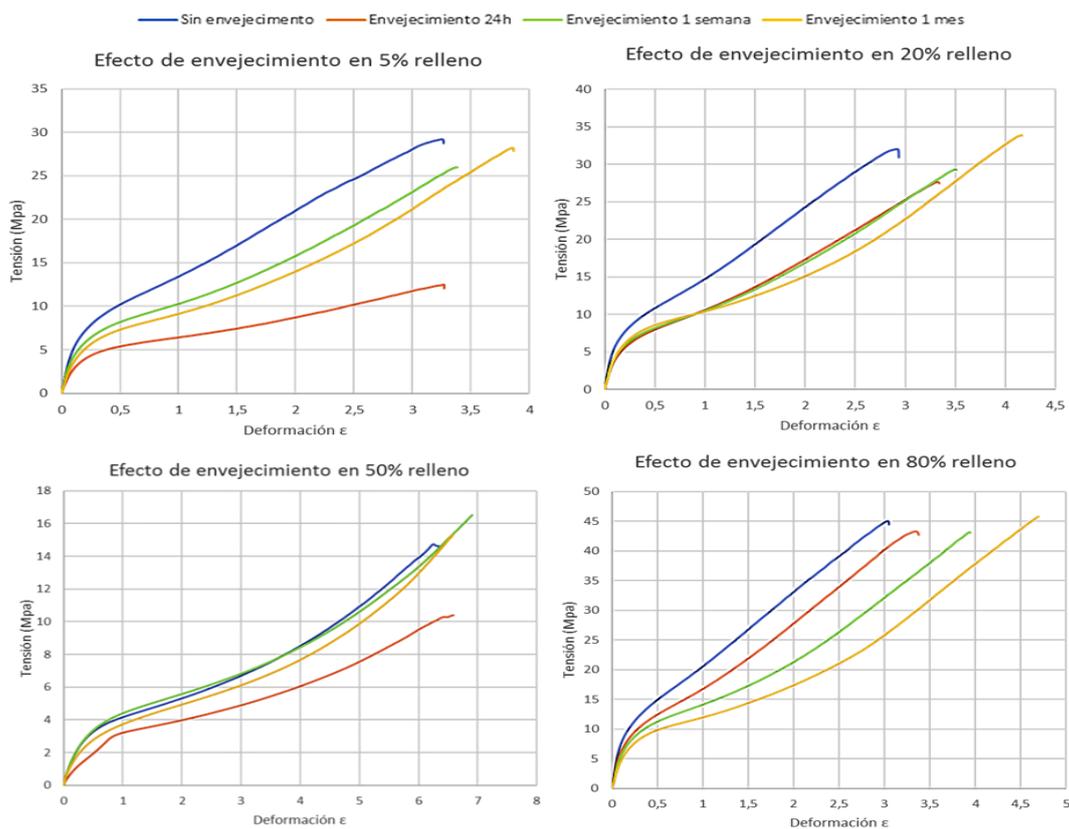


**Figura 6. Comparación de resultados a tracción de TPE y TPU**

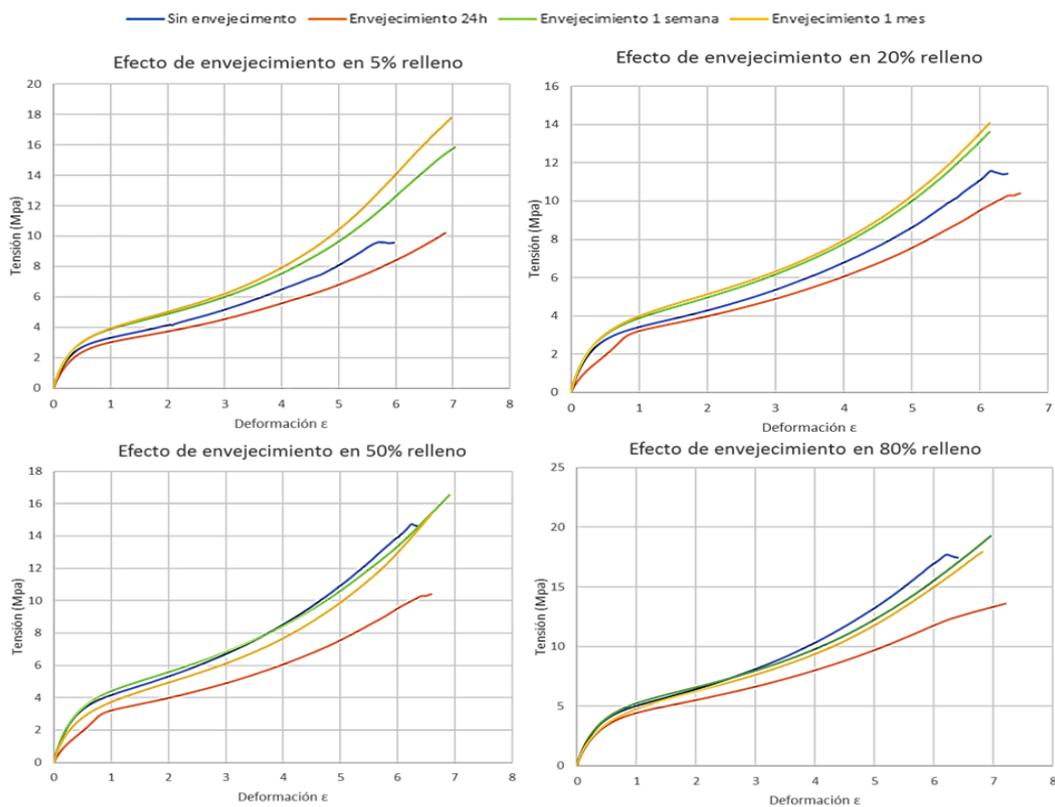
El TPU presenta una mayor resistencia a la tracción y es capaz de soportar valores de tensiones mucho mayores que el TPE antes de romperse. Por el contrario, el TPE presenta una capacidad de deformación muy superior, que como se recuerda, no ha podido medirse en su totalidad. En consonancia con los resultados de dureza obtenidos, los valores máximos de tensión alcanzados se corresponden con las probetas que presentan un mayor % de relleno. No obstante, la deformación máxima del TPU se ve reducida conforme aumenta el relleno de las probetas a excepción de las que presentan un 80% de relleno cuya deformación es contraria a esta tendencia. Esto se debe a la capacidad de orientarse de las fibras internas de la probeta. Cuanto menor es el relleno, mayor facilidad existe para la alineación de las fibras sin interferir unas con otras. En el caso de la probeta con un 80% de relleno la unión entre fibras es prácticamente absoluta, provocando que la probeta se comporte como una fibra única.

Analizando los efectos del envejecimiento en gasolina durante los tiempos estudiados para los distintos rellenos mostrados en las gráficas a continuación, se observa una tendencia común. A causa de la filtración de la gasolina hacia el interior de las probetas, en el transcurso de las primeras 24 horas las probetas presentan una disminución drástica de la tensión de rotura y módulo de elasticidad, conservando unos valores de deformación máxima muy similares. Posteriormente, en los resultados correspondientes a 1 semana y 1 mes de envejecimiento se observa una recuperación parcial de las propiedades y un incremento de la capacidad de deformación del material con respecto a la mostrada antes de exponerse a gasolina. En el caso de las probetas con un 80% de relleno, dada la imposibilidad de infiltración de gasolina, el deterioro de las propiedades es mínimo, al igual que el aumento en la deformación máxima mostrado.

En el caso de las probetas fabricadas en TPE la tendencia mostrada es muy similar a la anteriormente vista. Los resultados del envejecimiento a corto plazo muestran una resistencia máxima alcanzable y un módulo de elasticidad inferiores. No obstante, para los periodos de exposición superiores estudiados, las propiedades del material no solo se recuperan, sino que además se alcanzan valores de tensión superiores.



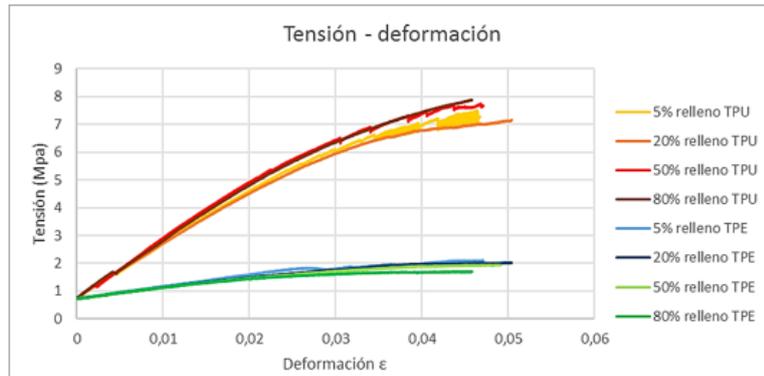
**Figura 7. Resultados a tracción de TPU para distintos rellenos y envejecimientos**



**Figura 8. Resultados a tracción de TPE para distintos rellenos y envejecimientos**

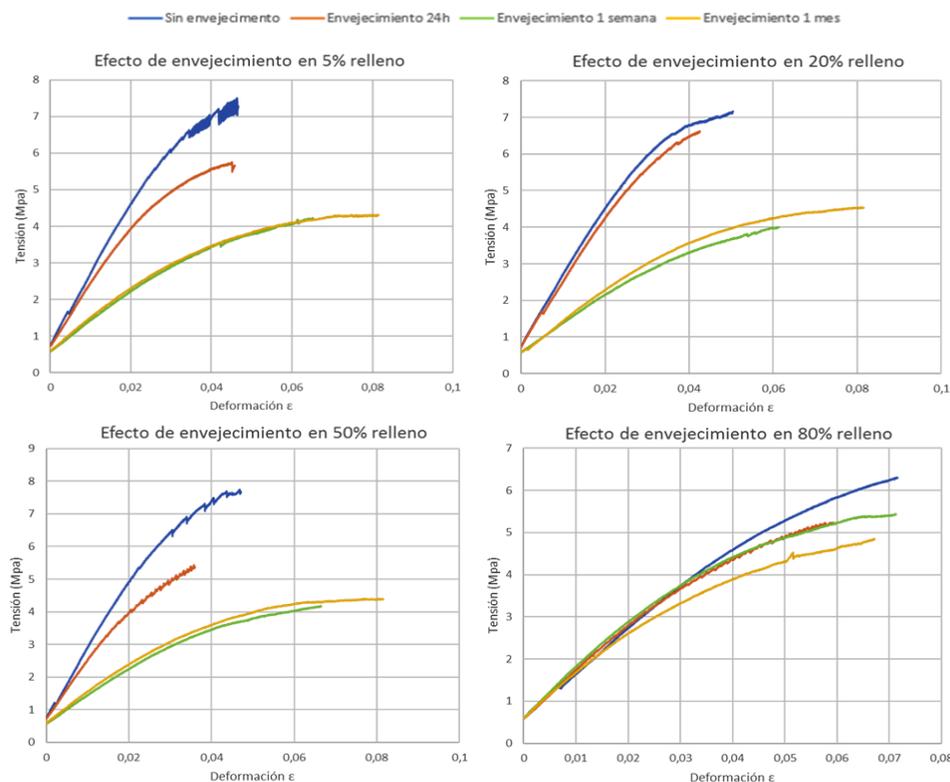
Estos resultados sugieren por tanto que la interacción entre gasolina y los polímeros consta de dos fases: inicialmente la gasolina debilita la estructuras y enlaces presentes en las probetas para posteriormente dar lugar a la aparición de nuevas uniones que permiten recuperar o mejorar las propiedades que presenta el material.

Los resultados del ensayo de flexión obtenidos presentan una variación similar de las propiedades a la observada en los ensayos a tracción. En primer lugar, se analiza de forma comparativa el comportamiento que presentan uno y otro material.



**Figura 9. Comparación de resultados flexión de TPE y TPU**

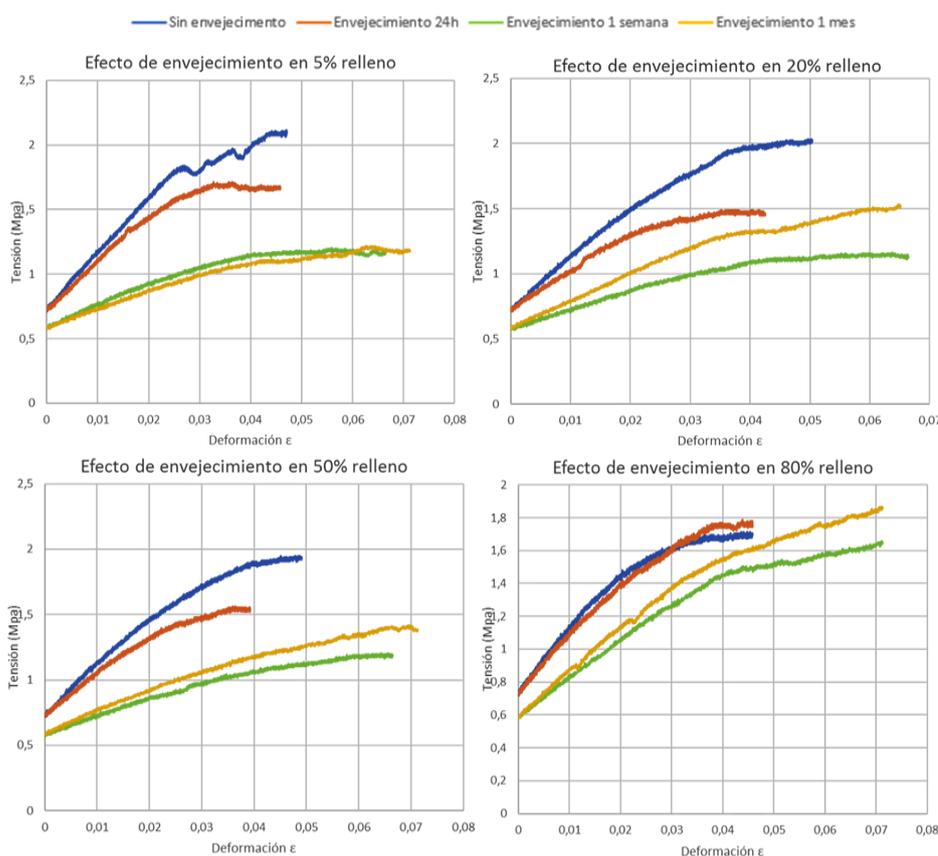
Con respecto a los valores obtenidos, las tensiones y deformaciones registradas, así como el módulo de resistencia a flexión que presentan ambos materiales son 10% de los observados en los ensayos de tracción. De manera análoga, los valores que presenta el TPU son muy superiores a los del termoplástico elastómero. Los valores de fuerza y desplazamiento recogidos durante los ensayos en TPE no gozan de la precisión deseada. Debido a la alta flexibilidad del material, durante el comienzo del ensayo, el equipo empleado no detectaba fuerza de oposición al movimiento del travesaño, por lo que la toma de datos no se inicia hasta un tiempo después.



**Figura 10. Resultados a flexión de TPU para distintos rellenos y envejecimientos**

Los resultados de los ensayos de tracción en TPU mostrados en la figura anterior permiten determinar el efecto de los periodos de envejecimiento en las distintas condiciones de relleno. La tendencia mostrada en los distintos casos es similar. La exposición a gasolina provoca a corto plazo un deterioro de las probetas que se refleja en una menor resistencia a flexión y una menor capacidad de deformación (algo que no sucede en los ensayos a tracción). Los resultados proporcionados por las probetas sometidas a un envejecimiento de una semana muestran una reducción mayor de la tensión máxima y el módulo de resistencia a flexión, aumentando en este caso la deformación presentada por las probetas. Observándose finalmente los resultados para una exposición a gasolina de un mes, el valor de la tensión máxima obtenido resulta semejante al anteriormente obtenido habiéndose incrementado la deformación. Este efecto es apreciable en menor medida para las probetas con un 80% de relleno en las que la gasolina solo afecta a la superficie exterior.

Las curvas obtenidas en los ensayos de probetas de TPE pese a no tener gran precisión permiten el estudio y comparación de los efectos de la gasolina para los distintos casos.



**Figura 11. Resultados a flexión de TPE para distintos rellenos y envejecimientos**

Para las distintas condiciones de relleno estudiadas conforme aumenta el periodo de exposición a la gasolina, el TPE presenta una menor tensión máxima y módulo de resistencia a flexión. La variación de la deformación presentada por las probetas muestra un proceso idéntico al observado en el TPU. Tras las primeras 24 horas, las probetas muestran una mayor rigidez que antes de ser sumergida. En los resultados correspondientes a los periodos de envejecimiento posteriores, las probetas muestran una capacidad de deformación superior con respecto a los originales muy similares entre sí. Esto parece de indicar una estabilización en el comportamiento del material.

## V. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado el efecto de la gasolina 98 como abrasivo químico sobre piezas fabricadas en TPE y TPU mediante fabricación aditiva a fin de establecer los efectos de este producto sobre las principales propiedades mecánicas de ambos materiales ante distintos periodos de exposición. El propósito de este estudio es analizar la viabilidad de estos materiales en la industria, concretamente, en el desarrollo de componentes automovilísticos destinados a operar con dicho fluido.

En vista de los medios y el plazo disponible para la realización de dicho análisis, ha sido necesario determinar en primer lugar, aquellos ensayos que pudiesen proporcionar una mayor información al respecto. Por lo que se opta por realizar los ensayos de tracción, flexión y dureza. Para la adecuada impresión de las probetas fue necesario realizar diversas modificaciones en los parámetros de impresión en ambos materiales.

Para el análisis de los efectos de envejecimiento en gasolina de los materiales el estudio ha sido realizado corto y medio plazo, acorde a la norma ISO-175, llevando a cabo un tercer periodo de envejecimiento de 1 mes a fin de predecir de forma alguna el comportamiento a largo plazo de las propiedades estudiadas en ambos materiales.

Tras la realización de los ensayos establecidos y el análisis de los resultados proporcionados por cada uno de ellos se ha podido establecer lo siguiente:

Con respecto a las propiedades presentadas por los filamentos de ambo materiales, se observa una reducción considerable de la tensión máxima, la capacidad de deformación (en el caso del TPE no fue posible comprobarse el alargamiento a rotura) y la dureza. Esta diferencia es acusada en mayor medida cuanto menor es el relleno que presentan las probetas estudiadas, presentando propiedades algo más parecidas al material de origen aquellas con un relleno del 80% en volumen.

Los resultados de envejecimiento a corto plazo muestran en los distintos ensayos una considerable variación de las propiedades; la dureza, la tensión máxima y el módulo de elasticidad se reducen en gran medida. Así mismo, el peso de las probetas estudiadas resulta inferior al presentado antes de ser sometidas a este proceso. Transcurridos los periodos de envejecimiento posteriores establecidos se observa una recuperación de estas, obteniéndose valores similares a los registrados por aquellas probetas que no habían sido expuestas a la acción de la gasolina. En algunos casos las probetas de TPE presentaban mejores propiedades tras el máximo envejecimiento estudiado que antes de ser sometidas al mismo.

Ante este comportamiento repetido para los distintos rellenos estudiados, se contempla la hipótesis en la que la interacción entre la gasolina y estos polímeros que poseen base de poliuretano consta de dos fases. Primeramente, la gasolina provoca la ruptura de algunas de las cadenas que conforman el polímero provocando la pérdida de masa y el deterioro de las propiedades que presenta. Finalizado este proceso, esas cadenas tienden a unirse nuevamente o a formar nuevas cadenas que permiten reforzar nuevamente la estructura de las probetas recuperando en parte sus propiedades. Teniendo lugar en un menor tiempo en el caso del TPE. Esto no ha sido posible confirmarlo dada la falta de medios y tiempo, no obstante, se trata de un aspecto fundamental para poder comprender el motivo por el que las propiedades de estos materiales describen este comportamiento.

# **CHARACTERIZATION OF THE RESISTANCE TO ABRASIVE CHEMICAL AGENTS OF TEST SPECIMENS OF COMPOSITE MATERIAL TPE AND TPU PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURE**

## **ABSTRACT**

### **I. Introduction**

This study has been carried out as a collaborative project between the Universidad Pontificia Comillas ICAI and the company Lupeon S.L. dedicated to the development of engineering projects and manufacture of parts for the industry through additive manufacturing.

Currently the development of additive manufacturing and the materials to be used allows the obtaining of functional models with properties and geometries adapted to each case without supposing greater cost or time of manufacture. Specifically, 3D printing by means fused deposition modeling (FDM) that operates with polymers, is one of the most widespread and popular. Among the available materials, the most important ones are the elastomeric polymers, which in its base composition is polyurethane, which allows to obtain flexible pieces with good mechanical and chemical resistance.

Polyurethane is used in wires coating, the manufacture of insulating sheets and the manufacture of tubes and hoses. In the automotive industry, sector in which Lupeon currently operates, it is used in the manufacture of chassis and passenger compartment components and ducts and coatings for tanks and fuel and oil hoses.

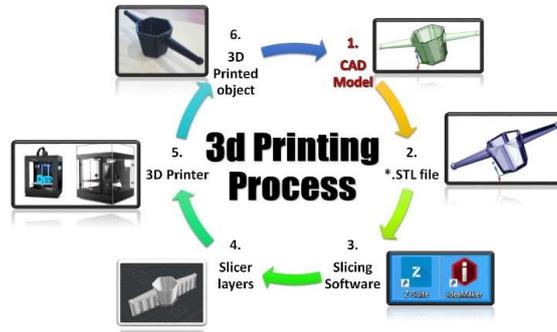
The objective of this work is to verify the effects of this type of fluids on specimens made of two of the elastomeric filaments used in 3D printing, TPU and TPE. To do this, some of the main physical and mechanical properties of these materials will be analyzed, and the test pieces will be subjected to different periods of immersion in a chemical agent. In this process it is necessary to previously deepen the operation of the additive manufacturing, especially the FDM technology with the materials to be studied, considering the different options of configuration of the specimens that exist and how they affect the final properties of the piece.

### **II. Background**

#### **Additive manufacturing**

Additive manufacturing emerged in 1976 with the development of binder injection printers (BJ) operates like a 2D printer, on a powder surface an adhesive was injected allowing the union of the particles thus forming the different layers in which the object was divided. In the following decade, what are currently the main additive manufacturing technologies were developed; fused deposition modeling, stereolithography and selective laser sintering. From these, new forms of additive manufacturing have been developed, such as selective laser casting, electron beam casting or DLP

printing, which have allowed the manufacture of models in very diverse materials and with a multitude of applications in the industry.



**Figure 1. 3D printing process**

The 3D printing process starts with the design of a 3D model using CAD software. Once the model to be printed is available, an STL file must be created that decomposes the model into a mesh of triangulated pieces. This type of files is interpreted by the assistance programs to 3D printing that allows identifying and correcting possible damages, as well as establishing a series of preferences regarding the printing process such as the heating temperature, the degree of filling of the piece or the printing speed. Finally, the file generated with all that information is sent to the printer that carries out the manufacture of the model.

Nowadays, the types of additive manufacturing that exist are:

- Fused deposition modeling (FDM): as its name indicates the material of contribution used is in the form of a filament, usually a polymer, which is heated up to its melting temperature to be deposited on a surface generating the different layers that make up the model.
- Stereolithography (SLA): the material used is a liquid resin that solidifies in the different layers by the action of a laser or ultraviolet ray.
- Selective laser sintering (SLS): this technology uses a filler material in a powder state. A laser impinges on the particles that are joined when it is heated without melting.
- Digital light processing (DLP): the process is similar to that used in the SLA technology, using a mask generated by a DLP projector instead of a laser beam for solidification of the resin.
- Selective laser fusion (SLM): the process is similar to that indicated in SLS technology with the exception that the powder is heated until melting occurs. This process is mainly used in metals.
- Electron beam fusion (EBM): variant of the SLS, the powders are fused in vacuum conditions by an electron beam.
- Manufacturing by means of lamination of objects (LOM): the manufacture of the model is produced by depositing successive sheets of material that adhere to each other by the action of a hot roller and on which a laser or knife cuts the geometry of the model.
- Injection of binder (BJ): on the different layers of powder that make up the model, a binder is injected that allows the union of the particles. Unlike other technologies, it allows the full-color printing of models.

## **Polymers**

The materials used in additive manufacturing are mainly polymers, especially in the FDM technology, used in this project. Polymers are long chains of smaller units called monomers that are grouped in the polymerization process. The polymerization processes can be classified based on whether other byproducts are generated as addition or condensation polymerization. Likewise, if the polymer formation process is used as a criterion, there is chain and step polymerization.

Polymers can be classified according to different criteria, however, the most common is the one referred to their behavior at high temperatures, divided into:

- Thermoplastics: those that when warmed become deformable and flexible and can melt. They are used in additive manufacturing due to their physical properties and the possibility of being combined with fibers of other materials.
- Thermostable: they have a reticulated structure that gives them excellent mechanical properties but prevents their fusion.
- Elastomers: they present their slightly reticulated structure, giving them their high flexibility against loads. Depending on their structure, they may have a thermoplastic or thermostable behavior.

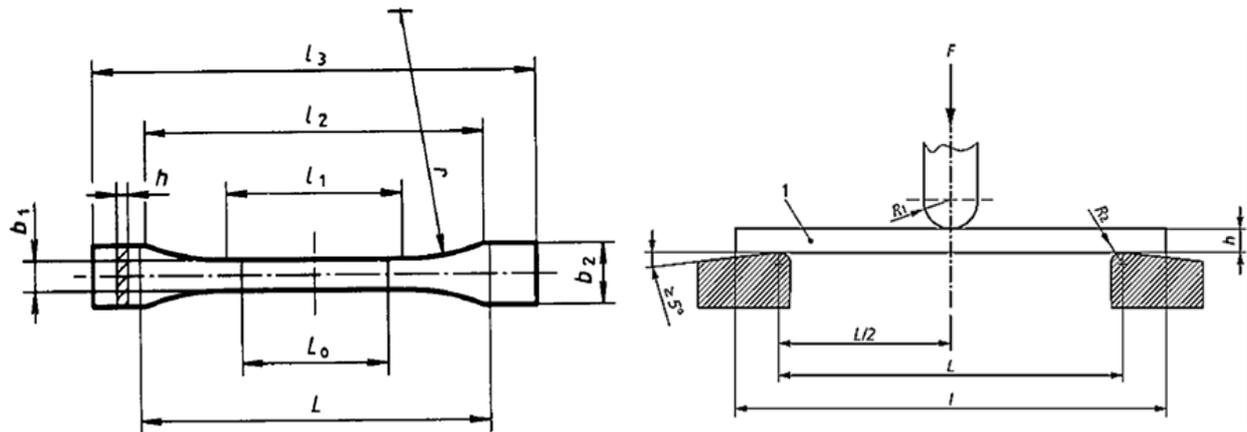
The materials studied are both thermoplastic elastomers since it is required to melt them for the manufacture of specimens by means of FDM. Both materials have similar mechanical and chemical properties, with the TPU originally having the highest resistance to chemical abrasives, fuels and oils.

### **III. Project management**

#### **Designing and manufacturing specimens process**

For the study of the effects of chemical abrasives on the materials under study, it is necessary to establish the scope of the work by selecting the number of chemicals, as well as the properties of the materials studied. Based on the time available and the application in the industry of these materials are analyzed the effects of petrol 98 on the hardness, mass and both traction and bending behavior of the TPE and TPU for three different exposure periods that are compared with the properties of both materials under standard conditions.

In the process of designing the specimens necessary to carry out the study, for those tests in which ISO international standards exist, the established specimen dimensions are used. This is the case of the ISO 527 and ISO 178 bending tests shown.



Tipo de probeta	Medidas en milímetros		The dimensions, in millimetres, of the preferred test specimen are	
	1BA	1BB	length, <i>l</i> :	$80 \pm 2$
<i>l</i> <sub>3</sub> Longitud total			width, <i>b</i> :	$10,0 \pm 0,2$
<i>l</i> <sub>1</sub> Longitud de la zona paralela estrecha	$\geq 75$	$\geq 30$	thickness, <i>h</i> :	$4,0 \pm 0,2$
<i>r</i> Radio	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$		
<i>l</i> <sub>2</sub> Distancia entre zonas paralelas anchas	$\geq 30$	$\geq 12$		
<i>b</i> <sub>2</sub> Anchura en los extremos	$58 \pm 2$	$23 \pm 2$		
<i>b</i> <sub>1</sub> Anchura en la zona estrecha	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$		
<i>h</i> Espesor	$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$		
<i>L</i> <sub>0</sub> Distancia entre marcas	$\geq 2$	$\geq 2$		
<i>L</i> Distancia inicial entre mordazas	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$		
	$l: \begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}$	$l: \begin{smallmatrix} +1 \\ 0 \end{smallmatrix}$		

Figura 2. Specimens por tensile and bending test

In the case of the test specimens used in the tests of hardness and study of the mass, the ISO 868 standard only establishes a minimum thickness of 4 mm, as well as making the hardness measurements in points at least 9 mm away from the edges. The design shown allows the realization of successive measurements in the same specimen in order to guarantee the obtaining of reliable values.

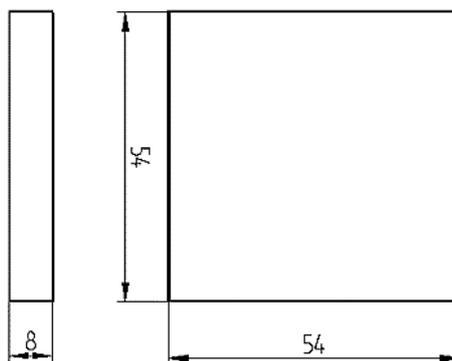
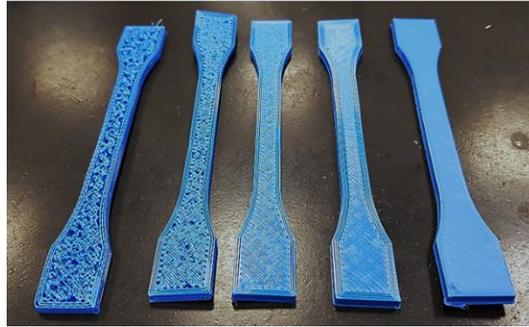


Figura 3. Hardness test specimens

Once the designs of each of the specimens to be used have been established, it is necessary to determine printing conditions that allow the results of the tests to be extrapolated to any configuration of the printing parameters that are subsequently used in a model. For each of the tests and aging periods studied, specimens with an interline insert of 5%, 20%, 50% and 80% by volume and a solid outer contour of three layers are used.

For the fabrication of the total number of test pieces required, five for the filling condition, the test, the aging time and the material, three different equipment adapted to the FDM printing of flexible materials are used.



**Figure 3. Results of calibration of printing equipment**

The printers used have a pre-set configuration to work with these materials so by a small adjustment of the temperature parameter satisfactory results are obtained.

### **Aging process**

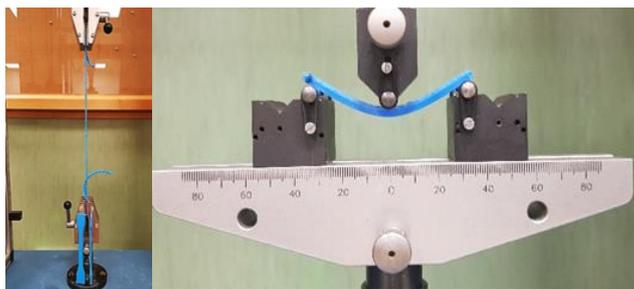
When carrying out aging processes, the corresponding ISO 175 standard is used to identify the effects of immersing plastics in chemical fluids. The specimens are placed in sealed containers in which petrol is added until the test pieces are completely submerged. The containers are stored during the aging process in a chamber with temperature control and air extraction to avoid the possible accumulation of vapors from petrol. The established aging periods are 24 hours and a week corresponding to a short and medium period study according to the standard, in addition, another one-month period aging is carried out. The norm establishes for the long period study an aging period of 16 weeks, however, there is not enough time to carry it out.

### **Characterization process**

The characterization of mechanical properties for the different filling and aging conditions studied take place in the laboratory of the Universidad Pontificia Comillas - ICAI, using the equipment in each case.

To perform the hardness tests, the Shore A durometer is used to obtain a total of 8 measurements per test piece according to the regulations. Once the surface of the specimen has dried, it is positioned in the test bench and the durometer is dropped on it, preventing it from hitting. After 15 seconds from the contact, the displayed value is taken. Once the measurements have been taken, the test piece is placed on a scale and its mass is noted.

The tensile and bending tests are carried out on the EUROTTEST ELIB20 universal test machine with the 2kN load cell, using the tension clamp or bending bridge as required. The control of the parameters in which the test is carried out, as well as the data collection takes place through the Wintest program.



**Figure 4. Clamps and bending bridge used during the test**

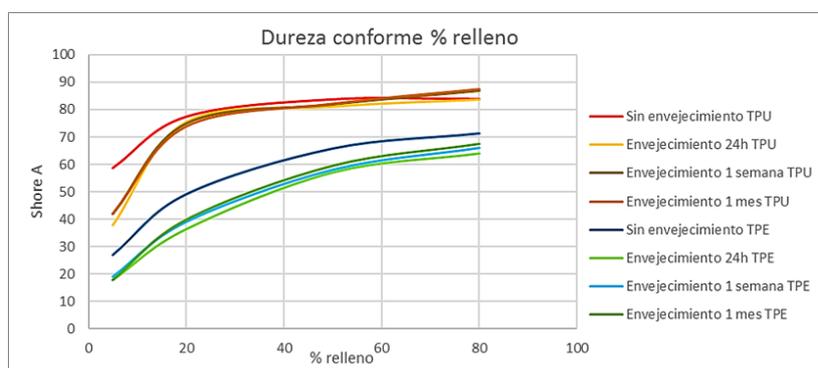
During the tensile and bending tests, the program provides the data corresponding to the force exerted and the displacement until the breakage of the test pieces occurs. To obtain the stress-strain curves and the modulus of elasticity of each of the test pieces, the equations included in the standard must be applied.

The tests are carried out in a customary manner using an extensometer that provides the exact deformation in a section of the specimen. Due to the high flexibility and deformation that these materials present, it is not possible to use extensometers until reaching the breaking point. Failing this, one of the specimens corresponding to each case is subjected to tensile testing with an extensometer as far as it is permitted.

#### **IV. Results analysis**

For each of the tests carried out, the results obtained in both materials are analyzed in a comparative manner under standard conditions (without having been exposed to petrol) in order to be able to determine the differences they present. Subsequently, the effects of the aging process are analyzed for each one of them in the different filling conditions.

In the graph below, the hardness curves for the different exposure periods in both materials are shown. They have been obtained from the measurements made under the filling conditions studied. First, both materials have very different hardness values.



**Figura 5. Hardness test results**

According to the hardness shown by the TPU specimens, those that contain 80% filler have the highest values. However, there are no major differences with lower filling conditions above 20%. Likewise, the exposure to petrol during the different periods does not significantly affect the hardness of the material when it exceeds 20% filling in the specimens.

The TPE specimens show a progressive increase in hardness as the filling of the specimens increases, which seems to be stabilized from a 70% filler. Unlike the TPU, the exposure to petrol produces a sharp drop in hardness values in the first 24 hours that does not increase as the exposure time is extended.

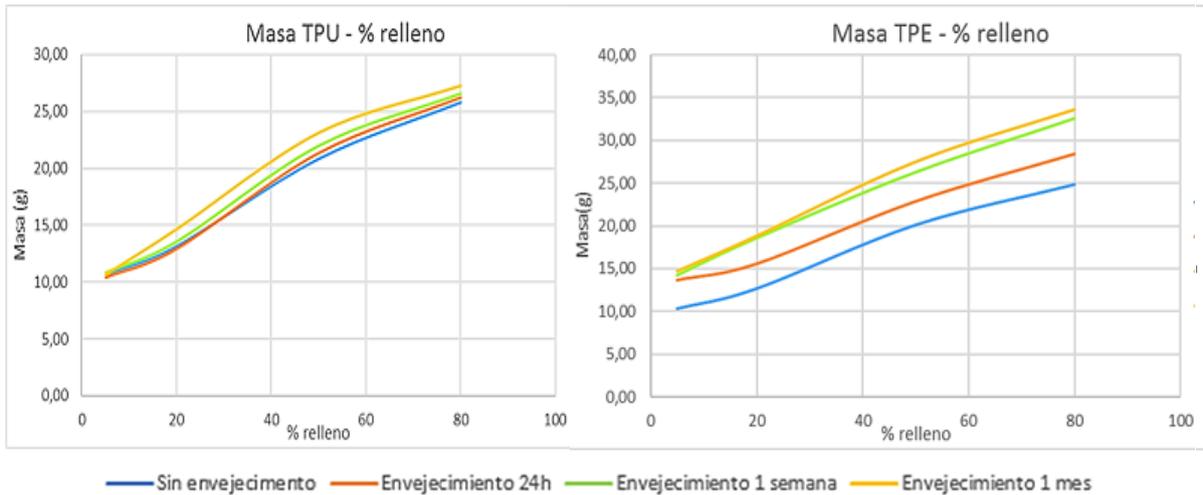


Figure 5. Mass variation results

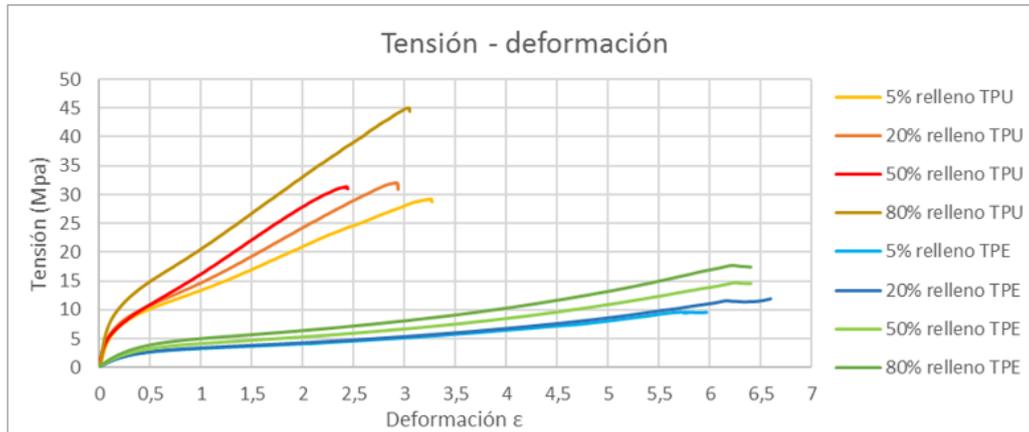
Regarding the variation of the mass of the specimens after the different periods of aging, it is observed that the specimens have a greater weight as the exposure to petrol is prolonged. This is due to the absorption capacity of the material and the chemical interaction of the polymer chains with the fluid. This phenomenon occurs more markedly in the TPE, there being considerable differences during the first week of aging.

As mentioned above, during the performance of the tensile tests it was only possible to achieve breakage in the specimens made of TPU. Additionally, the break in the test pieces manufactured by 3D printing does not occur uniformly throughout the section. Instead the fibers break successively as shown in the graph shown below. The break of the piece is considered when the first step is generated in the graph.



Figura 6. Composite materials break behavior

Similar to what happens in the hardness results obtained, TPU and TPE have very different stress and strain values for the different conditions studied.



**Figure 6. Tensile test results for TPE and TPU**

The TPU has a higher tensile strength and is able to withstand stress values much higher than the TPE before breaking. On the other hand, the TPE has a much higher deformation capacity, which, as it is remembered, could not be measured in its entirety. In line with the hardness results obtained, the maximum values of tension reached correspond to the specimens that present a higher% fill. However, the maximum deformation of the TPU is reduced as the filling of the specimens increases, with the exception of those with 80% filler whose deformation is contrary to this tendency. This is due to the ability to orient the internal fibers of the specimen. The smaller the filling, the easier it is to align the fibers without interfering with one another. In the case of the specimen with 80% filling, the union between fibers is practically absolute, causing the specimen to behave like a single fiber.

Analyzing the effects of aging in petrol during the times studied for the different fillings shown in the graphs below, a common trend is observed. Because of the leakage of petrol into the test specimens, during the first 24 hours the specimens show a drastic reduction in the tensile stress and modulus of elasticity, keeping very similar maximum deformation values. Subsequently, in the results corresponding to 1 week and 1 month of aging there is a partial recovery of the properties and an increase in the capacity of deformation of the material with according to that shown before being exposed to petrol. In the case of test tubes with 80% filling, given the impossibility of infiltration of petrol, the deterioration of the properties is minimal, as well as the increase in the maximum deformation shown.

In TPE specimens the trend shown is very similar to that previously seen. The short-term aging results show a maximum achievable resistance and a lower modulus of elasticity. However, for the higher exposure periods studied, the properties of the material are not only recovered, but also higher voltage values are achieved.

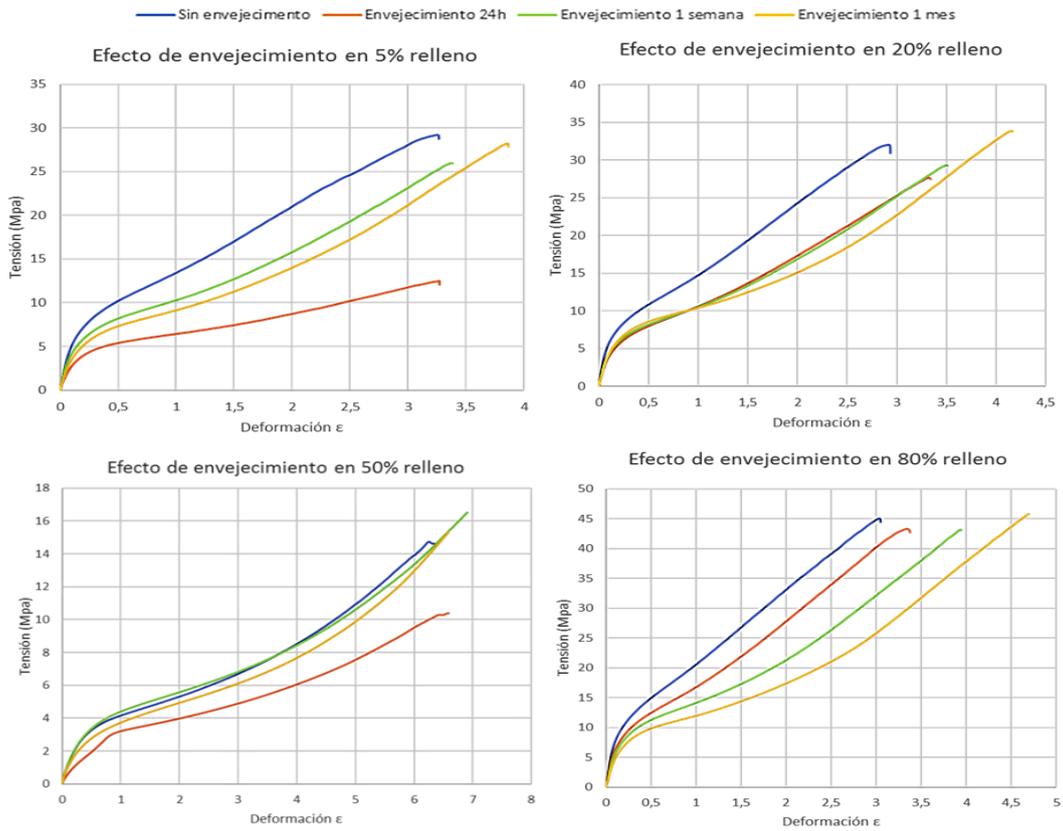


Figure 7. Tensile test result from TPU with different infill and aging

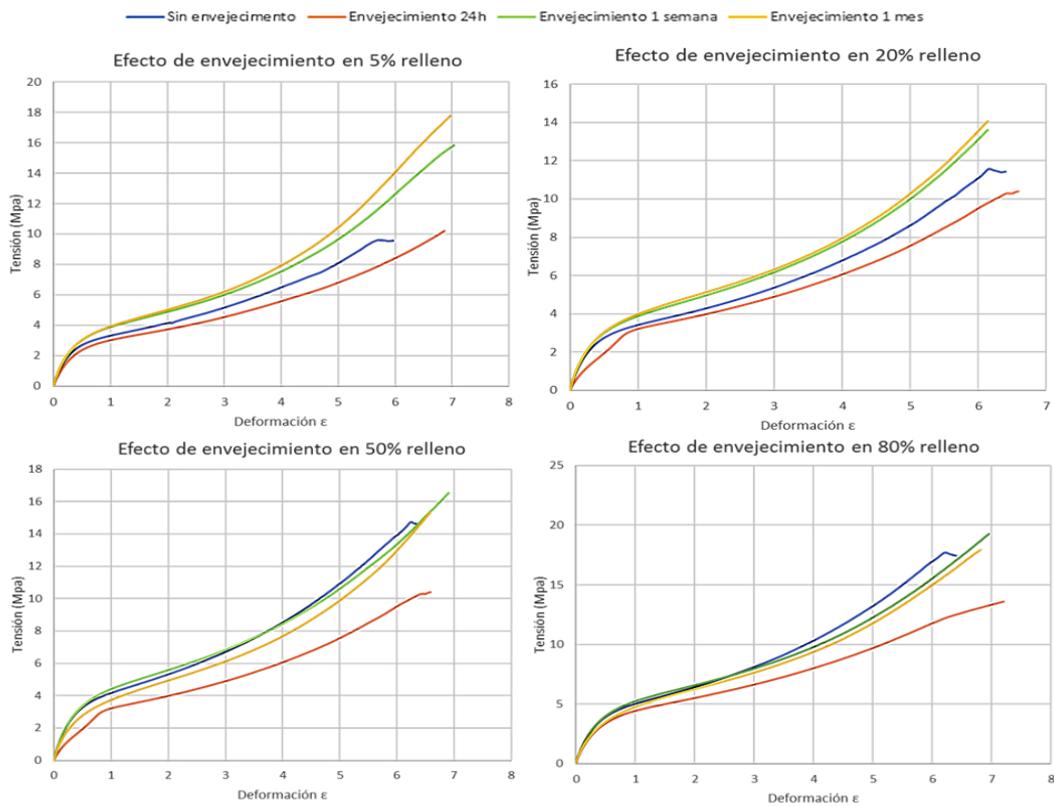


Figure 8. Tensile test result from TPE with different infill and aging

These results therefore suggest that the interaction between petrol and polymers consists of two phases: initially, petrol weakens the structures and bonds present in the specimens, and subsequently leads to the appearance of new unions that allow recovering or improving the properties shown by the petrol. material.

The results of the bending test obtained show a similar variation of the properties to that observed in the tensile tests. First, the behavior of both materials is analyzed comparatively.

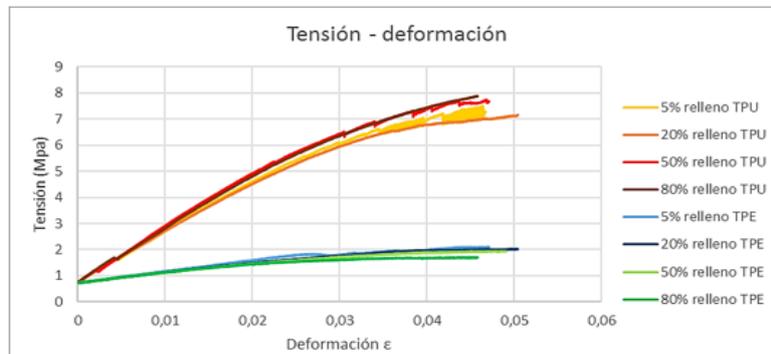


Figura 9. Bending test results for TPE and TPU

According to the values obtained, the stresses and deformations recorded, as well as the modulus of flexural strength shown by both materials are 10% of those observed in tensile tests. Analogously, the values shown by the TPU are much higher than those of the elastomer thermoplastic. The force and displacement values collected during the TPE tests do not enjoy the desired precision. Due to the high flexibility of the material, during the beginning of the test, the equipment used did not detect force opposing the movement of the crossbar, so that the data collection does not start until a later time.

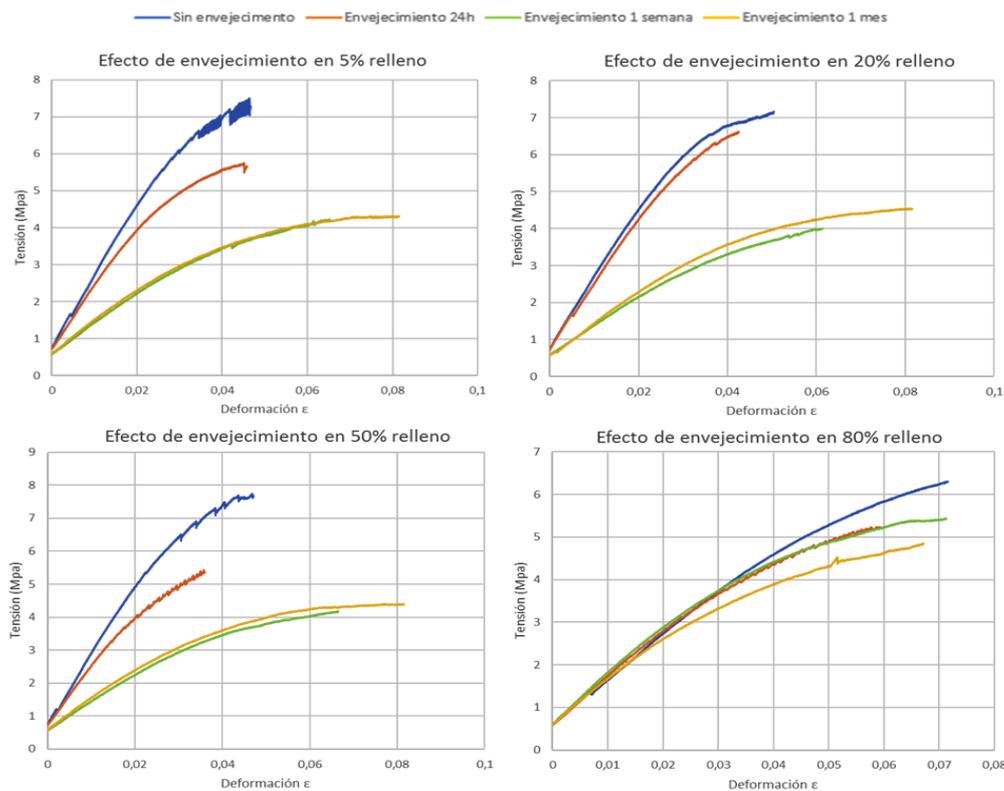
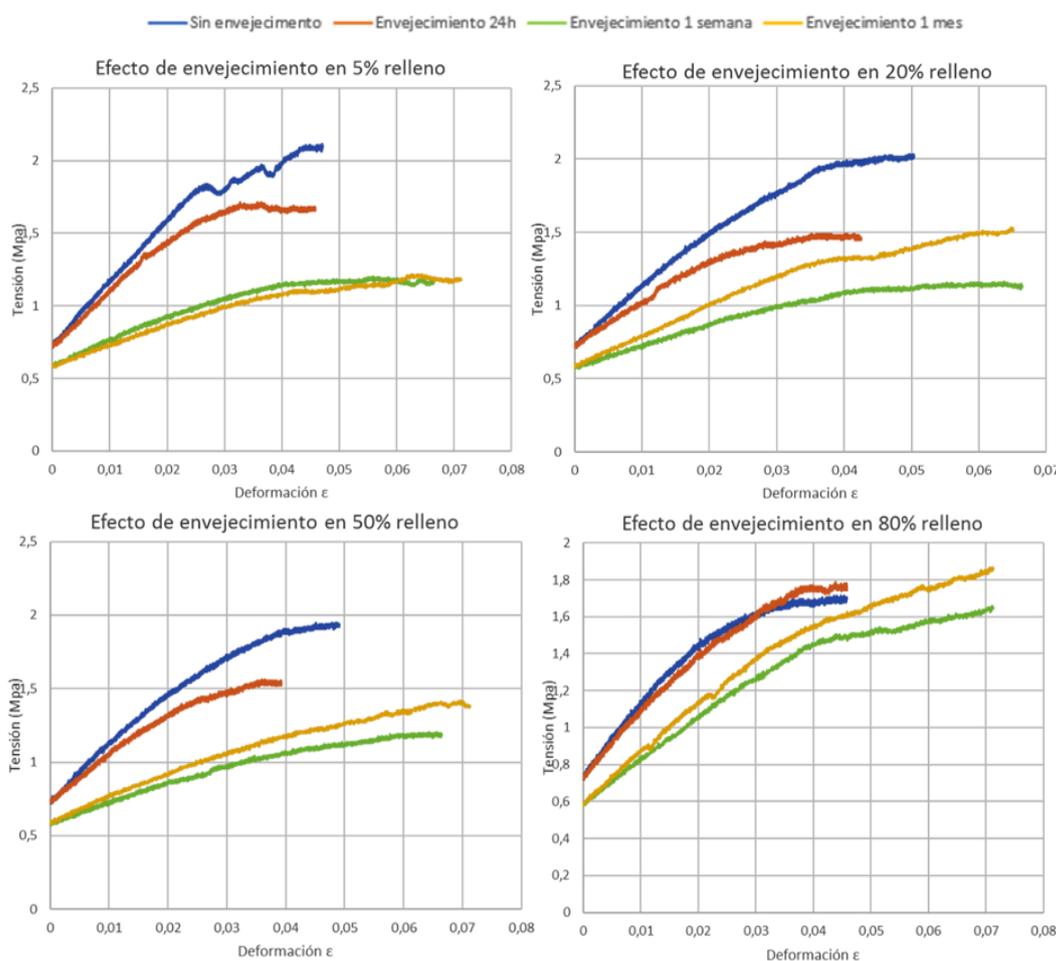


Figure 10. Bending test result from TPU with different infill and aging

The results of the tensile tests in TPU shown in the previous figure allow to determine the effect of the aging periods in the different filling conditions. The trend shown in the different cases is similar. Exposure to petrol causes short-term deterioration of the specimens, which is reflected in a lower resistance to bending and a lower deformation capacity (something that does not happen in tensile tests). The results provided by the samples subjected to an aging of one week show a greater reduction of the maximum tension and the modulus of resistance to flexion, increasing in this case the deformation shown by the specimens. Finally, observing the results for a one-month petrol exposure, the value of the maximum tension obtained is similar to that previously obtained, the deformation having increased. This effect is noticeable to a lesser extent for the test pieces with 80% filler in which petrol only affects the outer surface.

The curves obtained in the tests of TPE specimens despite not having great precision allow the study and comparison of the effects of petrol for different cases.



**Figure 11. Bending test result from TPE with different infill and aging**

For the different filling conditions studied as the period of exposure to petrol increases, the TPE has a lower maximum tension and modulus of flexural strength. The variation of the deformation shown by the specimens shows a process identical to that observed in the TPU. After the first 24 hours, the specimens show greater rigidity than before being submerged. In the results corresponding to the subsequent aging periods, the specimens show a higher deformation capacity with according to the originals, which are very similar to each other. This seems to indicate a stabilization in the behavior of the material.

---

## V. Conclusions

In this project has been studied the effect of petrol 98 as a chemical abrasive on parts manufactured in TPE and TPU by additive manufacturing in order to establish the effects of this product on the main mechanical properties of both materials before different periods of exposure. The purpose of this study is to analyze the viability of these materials in the industry, specifically, in the development of automotive components intended to operate with said fluid.

In view of the means and the time available for carrying out such analysis, it has been necessary to determine, in the first place, those trials that could provide more information in this regard. Therefore, it is decided to perform tensile, bending and hardness tests. For the adequate printing of the test pieces it was necessary to make several modifications in the printing parameters in both materials.

For the analysis of the effects of aging in petrol of the materials, the study has been carried out in the short and medium term, according to ISO-175, carrying out a third aging period of 1 month in order to predict in any way the long-term behavior of the properties studied in both materials.

After carrying out the established tests and analyzing the results provided by each of them, it has been possible to establish the following:

According to the properties shown by the filaments of both materials, a considerable reduction of the maximum tension, the capacity of deformation (in the case of the TPE it was not possible to check the elongation at break) and the hardness. This difference is bigger when the infill is lower in the samples studied, showing properties somewhat more like the original material those with a filling of 80% in volume.

The results of short-time aging show a considerable variation of the properties in the different tests; The hardness, the maximum tension and the modulus of elasticity are greatly reduced. Likewise, the weight of the studied samples are lowers than the ones shown before being subjected to this process. Once the established aging periods have elapsed, a recovery of these is observed, obtaining values similar to those registered by test specimens that had not been exposed to the action of petrol. In some cases, the TPE specimens showed better properties after the maximum aging studied than before being subjected to it.

Due to this repeated behavior for the different fillings studied, the hypothesis is contemplated in which the interaction between gasoline and these polymers that have a polyurethane base consists of two phases. Firstly, gasoline causes the rupture of some of the chains that make up the polymer, causing the loss of mass and the deterioration of the properties it presents. After this process, these chains tend to join again or to form new chains that allow to reinforce the structure of the specimens again, partially recovering their properties. Taking place in a shorter time in the case of the TPE. This has not been possible to confirm given the lack of means and time, nevertheless, it is a crucial aspect to be able to understand the reason why the properties of these materials describe this behavior.

# Índice de contenido

	Pág. nº
<b>ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....</b>	<b>36</b>
<b>MEMORIA.....</b>	<b>37</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>38</b>
1. Marco del proyecto.....	38
2. Alcance del proyecto.....	38
3. Objetivos.....	39
<b>II. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>40</b>
1. Fabricación aditiva.....	40
1.1. Proceso de fabricación en impresión 3D.....	41
1.2. Tecnologías de fabricación aditiva.....	43
1.2.1. Modelado por deposición fundida (FDM).....	43
1.2.2. Estereolitografía (SLA).....	45
1.2.3. Procesamiento digital de luz (DLP).....	46
1.2.4. Sinterizado selectivo por láser (SLS).....	46
1.2.5. Fusión selectiva por láser (SLM).....	47
1.2.6. Fusión por haz de electrones (EBM).....	48
1.2.6.1. Sistemas basados en polvo metálico.....	48
1.2.6.2. Sistemas basados en alambre de metal.....	48
1.2.7. Fabricación mediante laminado de objetos (LOM).....	48
1.2.8. Inyección de aglutinante (BJ).....	49
1.3. Defectos en la fabricación aditiva.....	50
2. POLÍMEROS.....	51
2.1. Elastómero termoplástico (TPE).....	53
2.2. Poliuretano termoplástico (TPU).....	53
<b>III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>55</b>
1. Fabricación de probetas: Procesos y equipos empleados.....	55

---

1.1.	Materiales empleados .....	55
1.1.1.	TPU 98-A .....	55
1.1.2.	FILAFLEX ULTRASOFT 70-A.....	57
1.2.	Equipo de fabricación aditiva empleado .....	58
1.2.1.	Impresora Zmorph 2.0 SX .....	58
1.2.2.	Dynamical Tools DT600 .....	59
1.2.3.	Prusa i3 MK3.....	59
1.3.	Proceso de diseño e impresión de probetas .....	60
2.	Envejecimiento: Procesos y equipos empleados .....	68
3.	Caracterización: Procesos y equipos empleados.....	69
3.1.	Ensayo de dureza y masa.....	69
3.2.	Ensayo de Tracción y flexión.....	71
<b>IV.</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
1.	Resultado de los ensayos de dureza y peso .....	77
1.1.	Resultados ensayo de dureza .....	77
1.1.1.	Dureza del TPU 98-A.....	78
1.1.2.	Dureza del TPE FILAFLEX ULTRASOFT 70-A.....	79
1.2.	Resultados del análisis de la variación de la masa .....	80
1.2.1.	Masa TPU 98-A .....	80
1.2.2.	Masa TPE FILAFLEX ULTRASOFT 70-A.....	81
2.	Resultado del ensayo de tracción .....	83
2.1.	Resultados de tracción en TPU 98-A .....	85
2.2.	Resultados de tracción en TPE FILAFLEX ULTRASOFT 70-A .....	87
3.	Resultado del ensayo de flexión .....	90
3.1.	Resultados de flexión en TPU 98-A.....	90
3.2.	Resultados de flexión en TPE FILAFLEX ULTRASOFT 70-A .....	92
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>94</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>96</b>
<b>VI.</b>	<b>ANEXO 1: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA.....</b>	<b>97</b>

---

---

1. Mediciones de dureza en TPU.....	97
2. Mediciones de dureza en TPE.....	102
<b>VII. ANEXO 2: RESULTADOS DE ENSAYO DE TRACCIÓN .....</b>	<b>108</b>
1. Ensayo de tracción en TPU.....	108
2. Ensayo de tracción en TPE .....	116
<b>VIII. ANEXO 3: RESULTADOS DE ENSAYO DE FLEXIÓN .....</b>	<b>125</b>
1. Ensayo de Flexión en TPU.....	125
2. Ensayo de Flexión en TPE .....	133
<b>IX. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>142</b>

# Índice de figuras

Figura 1. Ingresos anuales generados por la fabricación aditiva en el entorno de la industria .....	40
Figura 2. Ajuste de resolución en archivos STL.....	41
Figura 3. Preprocesado de archivo STL para su impresión.....	42
Figura 4. Fabricación aditiva de piezas complejas.....	42
Figura 5. Generación de residuos en la fabricación. image by 3natives.com .....	42
Figura 6. Partes de una impresora 3D tipo FDM .....	43
Figura 7. Esquema del proceso de impresión 3D mediante SLA .....	45
Figura 8. Esquema del proceso de impresión DLP .....	46
Figura 9. Esquema de funcionamiento de la impresión SLS.....	47
Figura 10. Piezas fabricadas mediante EBM.....	48
Figura 11. Proceso de fabricación mediante LOM .....	49
Figura 12. Proceso de fabricación mediante BJ.....	49
Figura 13. Defectos de capa al realizar impresión en FDM .....	50
Figura 14. Defectos superficiales por temperatura en FDM .....	50
Figura 15. Defectos en filamentos y extrusor en FDM .....	51
Figura 16. Fórmula del poliuretano termoplástico (TPU).....	53
Figura 17. Impresora ZMORPH 2.0 SX .....	58
Figura 18. Impresora DYNAMICAL TOOLS DT600.....	59
Figura 19. Impresora PRUSA I3 MK3 .....	60
Figura 20. Dimensiones de probetas para ensayo a flexión según norma ISO-178 .....	60
Figura 21. Dimensiones de probetas para ensayo a tracción tipo 1A y 1B según norma ISO-527.....	61
Figura 22. Dimensiones de probetas empleadas en los ensayos de dureza .....	61
Figura 23. Interfaz de inicio de Simplify3D .....	62
Figura 24. Configuración de extrusor dentro de un proceso en Simplify3D .....	63
Figura 25. Configuración de capas dentro de un proceso en Simplify3D.....	63
Figura 26. Configuración de relleno dentro de un proceso en Simplify3D .....	64
Figura 27. Configuración de temperatura dentro de un proceso en Simplify3D .....	64
Figura 28. Configuración de velocidades dentro de un proceso en Simplify3D.....	65
Figura 29. Estructura de relleno correspondiente a las distintas condiciones estudiadas .....	65
Figura 30. Defectos en la impresión en DYNAMICAL TOOLS DT600 .....	66
Figura 31. Configuración de la impresión en DYNAMICAL TOOLS DT600 .....	66
Figura 32. Atasco de material en el tornillo extrusor de la ZMORPH 2.0 SX.....	67
Figura 33. Modificación de extrusor de la ZMORPH 2.0 SX.....	67
Figura 34. Acabado superficial para distintas velocidades de impresión de la ZMORPH 2.0 SX.....	67
Figura 35. Recipientes empleados para procesos de envejecimiento .....	69
Figura 36. Equipo para medición de dureza Shore A .....	70
Figura 37. Balanza de precisión Cobos SJ-420CE Standard .....	70
Figura 38. Software Win-test para la realización de ensayos a tracción y flexión .....	71
Figura 39. Deformación de las probetas durante el ensayo y tras rotura.....	72
Figura 40. Extensómetro 3542-050M-050-ST .....	72
Figura 41. Curvas en ensayo de tracción .....	74
Figura 42. Puente para ensayo de flexión .....	74
Figura 43. Curvas de ensayo a flexión .....	76
Figura 44. Comparativa de valores de dureza de TPU y TPE .....	77

Figura 45. Dureza en TPU ante el tiempo de envejecimiento en las condiciones de relleno estudiadas .....	78
Figura 46. Dureza en TPE ante el tiempo de envejecimiento en las condiciones de relleno estudiadas .....	80
Figura 47. Masa de TPU ante el tiempo de envejecimiento para distinto % de relleno .....	81
Figura 48. Masa de TPU ante el tiempo de envejecimiento para distinto % de relleno .....	82
Figura 49. Comportamiento de probetas por fabricación aditiva frente a un material dúctil.....	83
Figura 50. Rotura incompleta de probeta tras ensayo a tracción .....	83
Figura 51. Ensayo de tracción TPU y TPE en condiciones estándar .....	84
Figura 52. Ensayo de tracción TPU para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento	85
Figura 53. Detalle de la superficie de probeta TPU con un 5% de relleno .....	86
Figura 54. Módulo de elasticidad del TPU para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento .....	86
Figura 55. Ensayo de tracción TPE para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento	88
Figura 56. Módulo de elasticidad del TPE para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento .....	88
Figura 57. Ensayo de flexión TPU y TPE en condiciones estándar.....	90
Figura 58. Ensayo de flexión TPU para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento .	91
Figura 59. Módulo de flexión del TPU para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento .....	92
Figura 60. Ensayo de flexión TPE para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento..	93
Figura 61. Módulo de flexión del TPE para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento .....	93
Figura 62. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno sin envejecimiento .....	108
Figura 63. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	109
Figura 64. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	109
Figura 65. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	110
Figura 66. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno sin envejecimiento .....	110
Figura 67. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	110
Figura 68. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	111
Figura 69. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	112
Figura 70. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno sin envejecimiento .....	112
Figura 71. Ensayo de tracción TPU 50% relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	113
Figura 72. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	113
Figura 73. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	113
Figura 74. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno sin envejecimiento .....	114
Figura 75. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	114
Figura 76. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	115
Figura 77. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	115
Figura 78. Ensayo de tracción TPE 5% de relleno sin envejecimiento .....	116
Figura 79. Ensayo de tracción TPE 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98.....	116
Figura 80. Ensayo de tracción TPE 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	117
Figura 81. Ensayo de tracción TPE 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	117
Figura 82. Ensayo de tracción TPE 20% de relleno sin envejecimiento .....	118
Figura 83. Ensayo de tracción TPE 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98.....	118
Figura 84. Ensayo de tracción TPE 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	119
Figura 85. Ensayo de tracción TPE 20% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	119
Figura 86. Ensayo de tracción TPE 50% de relleno sin envejecimiento .....	120
Figura 87. Ensayo de tracción TPE 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98.....	120
Figura 88. Ensayo de tracción TPE 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	121

---

Figura 89. Ensayo de tracción TPE 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	121
Figura 90. Ensayo de tracción TPE 80% de relleno sin envejecimiento .....	122
Figura 91. Ensayo de tracción TPE 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98.....	122
Figura 92. Ensayo de tracción TPE 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	123
Figura 93. Ensayo de tracción TPE 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	123
Figura 94. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno sin envejecimiento .....	125
Figura 95. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	126
Figura 96. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	126
Figura 97. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	127
Figura 98. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno sin envejecimiento .....	127
Figura 99. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	128
Figura 100. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	128
Figura 101. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	129
Figura 102. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno sin envejecimiento .....	129
Figura 103. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	130
Figura 104. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	130
Figura 105. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	131
Figura 106. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno sin envejecimiento .....	131
Figura 107. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	132
Figura 108. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	132
Figura 109. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	133
Figura 110. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno sin envejecimiento.....	133
Figura 111. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	134
Figura 112. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	134
Figura 113. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	135
Figura 114. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno sin envejecimiento.....	135
Figura 115. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98.....	136
Figura 116. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	136
Figura 117. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	137
Figura 118. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno sin envejecimiento.....	137
Figura 119. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98.....	138
Figura 120. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	138
Figura 121. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	139
Figura 122. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno sin envejecimiento.....	139
Figura 123. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98.....	140
Figura 124. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	140
Figura 125. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	141

# Índice de tablas

Tabla 1. Principales propiedades del filamento TPU 98-A según fabricante .....	56
Tabla 2. Principales propiedades del filamento TPU 98-A según proveedor .....	56
Tabla 3. Parámetros de impresión del filamento TPU 98-A según fabricante .....	56
Tabla 4. Parámetros de impresión del filamento TPU 98-A según proveedor.....	56
Tabla 5. Principales propiedades del filamento TPU 98-A según fabricante .....	57
Tabla 6. Principales propiedades del filamento TPU 98-A según proveedor .....	57
Tabla 7. Parámetros de impresión del filamento TPU 98-A según fabricante .....	57
Tabla 8. Parámetros de impresión del filamento TPU 98-A según proveedor.....	57
Tabla 9. Dureza Shore A medida en TPU conforme % relleno y periodo de envejecimiento .....	78
Tabla 10. Dureza Shore A medida en TPE conforme % relleno y periodo de envejecimiento.....	79
Tabla 11. Masa de probetas para ensayo dureza de TPU conforme % relleno y periodo de envejecimiento	80
Tabla 12. Masa de probetas para ensayo dureza de TPE conforme % relleno y periodo de envejecimiento	82
Tabla 13. Alargamiento a rotura (%) de TPU conforme relleno y periodo de envejecimiento.....	87
Tabla 14. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno sin someter a envejecimiento.....	97
Tabla 15. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98....	97
Tabla 16. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	98
Tabla 17. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.	98
Tabla 18. Dureza Shore A medida en TPU con 20% de relleno sin someter a envejecimiento.....	98
Tabla 19. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98....	99
Tabla 20. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	99
Tabla 21. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.	99
Tabla 22. Dureza Shore A medida en TPU con 50% de relleno sin someter a envejecimiento.....	100
Tabla 23. Dureza Shore A medida en TPU con 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina .....	100
Tabla 24. Dureza Shore A medida en TPU con 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	100
Tabla 25. Dureza Shore A medida en TPU con 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	101
Tabla 26. Dureza Shore A medida en TPU con 80% de relleno sin someter a envejecimiento.....	101
Tabla 27. Dureza Shore A medida en TPU con 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98	101
Tabla 28. Dureza Shore A medida en TPU con 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	102
Tabla 29. Dureza Shore A medida en TPU con 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	102
Tabla 30. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno sin someter a envejecimiento .....	102
Tabla 31. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98...	103
Tabla 32. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	103
Tabla 33. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98	103
Tabla 34. Dureza Shore A medida en TPE con 20% de relleno sin someter a envejecimiento .....	104
Tabla 35. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98...	104
Tabla 36. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	104

Tabla 37. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98	105
Tabla 38. Dureza Shore A medida en TPE con 50% de relleno sin someter a envejecimiento .....	105
Tabla 39. Dureza Shore A medida en TPE con 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina.....	105
Tabla 40. Dureza Shore A medida en TPE con 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	106
Tabla 41. Dureza Shore A medida en TPE con 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	106
Tabla 42. Dureza Shore A medida en TPE con 80% de relleno sin someter a envejecimiento .....	106
Tabla 43. Dureza Shore A medida en TPE con 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98.	107
Tabla 44. Dureza Shore A medida en TPE con 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	107
Tabla 45. Dureza Shore A medida en TPE con 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	107
Tabla 46. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno sin envejecimiento .....	108
Tabla 47. Ensayo de tracción TPU 5% relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	109
Tabla 48. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	109
Tabla 49. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	110
Tabla 50. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno sin envejecimiento .....	110
Tabla 51. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	111
Tabla 52. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	111
Tabla 53. Ensayo de tracción TPU 20% relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	112
Tabla 54. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno sin envejecimiento .....	112
Tabla 55. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	113
Tabla 56. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	113
Tabla 57. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	114
Tabla 58. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno sin envejecimiento .....	114
Tabla 59. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	115
Tabla 60. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	115
Tabla 61. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	116
Tabla 62. Ensayo de tracción TPE 5% de relleno sin envejecimiento.....	116
Tabla 63. Ensayo de tracción TPE 5% tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	117
Tabla 64. Ensayo de tracción TPE 5% tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	117
Tabla 65. Ensayo de tracción TPE 5% tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	118
Tabla 66. Ensayo de tracción TPE 20% sin envejecimiento .....	118
Tabla 67. Ensayo de tracción TPE 20% tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	119
Tabla 68. Ensayo de tracción TPE 20% tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	119
Tabla 69. Ensayo de tracción TPE 20% tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	120
Tabla 70. Ensayo de tracción TPE 50% sin envejecimiento .....	120
Tabla 71. Ensayo de tracción TPE 50% tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	121
Tabla 72. Ensayo de tracción TPE 50% tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	121
Tabla 73. Ensayo de tracción TPE 50% tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	122
Tabla 74. Ensayo de tracción TPE 80% sin envejecimiento .....	122
Tabla 75. Ensayo de tracción TPE 80% tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	123
Tabla 76. Ensayo de tracción TPE 80% tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	123
Tabla 77. Ensayo de tracción TPE 80% tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	124
Tabla 78. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno sin envejecimiento .....	125
Tabla 79. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98.....	126
Tabla 80. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	126

---

Tabla 81. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	127
Tabla 82. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno sin envejecimiento .....	127
Tabla 83. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98.....	128
Tabla 84. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	128
Tabla 85. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	129
Tabla 86. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno sin envejecimiento .....	129
Tabla 87. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98.....	130
Tabla 88. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	130
Tabla 89. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	131
Tabla 90. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno sin envejecimiento .....	131
Tabla 91. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98.....	132
Tabla 92. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98 .....	132
Tabla 93. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98 .....	133
Tabla 94. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno sin envejecimiento .....	133
Tabla 95. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	134
Tabla 96. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	134
Tabla 97. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	135
Tabla 98. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno sin envejecimiento .....	135
Tabla 99. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	136
Tabla 100. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	136
Tabla 101. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	137
Tabla 102. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno sin envejecimiento .....	137
Tabla 103. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	138
Tabla 104. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	138
Tabla 105. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	139
Tabla 106. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno sin envejecimiento .....	139
Tabla 107. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98 .....	140
Tabla 108. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98.....	140
Tabla 109. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98.....	141

---

## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

---

$\epsilon$	Deformación
$\sigma_R$	Tensión de rotura
ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
AM	Fabricación aditiva
BJ	Inyección de aglutinante
CAD	Diseño asistido por ordenador
CNC	Corte por control numérico
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
DLP	Procesamiento digital de luz
E	Módulo de elasticidad/Módulo de Young
E'	Módulo de resistencia a flexión
EBM	Fusión por haz de electrones
FDM	Modelado por deposición fundida
ISO	Organización internacional de estandarización
LOM	Fabricación por laminado de objetos
PBT	Polibutilen tereftalato
PCB	Policarbonato
PET	Tereftalato de polietileno
PLA	Ácido Poliláctico
PPS	Polietilen sulfona
SLA	Estereolitografía
SLM	Fusión selectiva por láser
SLS	Sinterizado selectivo por láser
STL	Lenguaje triangular estándar
TPE	Elastómero termoplástico
TPU	Poliuretano termoplástico
UV	Ultravioleta

# MEMORIA

---

---

# I. INTRODUCCIÓN

---

## 1. MARCO DEL PROYECTO

El correspondiente trabajo de fin de grado se ha realizado en el departamento de Ingeniería de diseño y fabricación de la Universidad Pontificia Comillas ICAI en colaboración con la empresa Lupeon, empresa dedicada a la fabricación bajo demanda, el desarrollo de soluciones y proyectos de ingeniería para la industria actual y basados en la fabricación aditiva. Este proyecto de colaboración surge como respuesta a la investigación de la viabilidad de uso de piezas fabricadas en plásticos elastómeros mediante tecnología 3D en la industria, concretamente en presencia de abrasivos químicos.

## 2. ALCANCE DEL PROYECTO

Actualmente existe una amplia gama de materiales para la fabricación mediante impresión 3D, especialmente plásticos, con muy diversas propiedades y aplicaciones. Con el propósito de poder dar respuesta a algunos problemas actuales de la industria empleando piezas obtenidas mediante fabricación aditiva es preciso poder conocer las propiedades finales de las piezas obtenidas en función de los distintos parámetros configurables.

El desarrollo de las distintas tecnologías existentes dentro de la fabricación aditiva y los posibles materiales a emplear durante la última década han permitido la fabricación de piezas funcionales y no solo modelos. Particularmente, la tecnología FDM se ha convertido en una herramienta de fabricación dotada de gran versatilidad que requiere de escasos conocimientos técnicos y cuyo precio permite su acceso a un amplio público. La deposición de hilo fundido dispone actualmente de una amplia gama de materiales plástico con propiedades muy diversas adaptados para la fabricación de modelos 3D. Entre estos materiales se encuentran los filamentos flexibles con material base poliuretano que ofrecen que presentan cierta variedad en sus propiedades elásticas y mecánicas entre los distintos tipos disponibles.

El poliuretano presenta buenas propiedades frente a aceites, combustibles y abrasivo lo que permite su aplicación en la industria automovilística, no obstante, debe comprobarse que materiales como el TPU y el TPE conservan estas propiedades. Para dar respuesta a esta situación se lleva a cabo este trabajo. Mediante el uso de software CAD 3D se diseñan las probetas que posteriormente se imprimen para la caracterización de los materiales mencionados acorde a la normativa ISO. Los ensayos que se realizan tienen lugar para distintas configuraciones de las probetas, así como ante periodos de inmersión en gasolina que permiten estudiar el efecto que tiene en los materiales con el transcurso del tiempo.

Los resultados obtenidos de este trabajo resultan de interés para las distintas partes involucradas en la fabricación aditiva como solución industrial. En primer lugar, la (no)degradación de estos materiales por acción de la gasolina permite analizar su viabilidad para la fabricación de piezas expuestas a algún combustible. Con respecto a las empresas como Lupeon, dedicadas a la fabricación mediante AM, proporciona una mayor información del comportamiento de estos materiales y la variación de sus propiedades, permitiendo optimizar los parámetros de impresión para cumplir con las necesidades que se exigen en sus modelos y ofrecer a sus clientes soluciones de calidad y avaladas por los datos obtenidos de estudios como este.

### 3. OBJETIVOS

El principal objetivo que se persigue en la realización de este trabajo es determinar el efecto de un abrasivo químico sobre los materiales elastoméricos empleados en la fabricación aditiva TPE y TPU. La selección de dicho abrasivo deberá basarse en las propiedades químicas y mecánicas que presentan los materiales de estudio y su campo de aplicación.

Otros objetivos derivados del proyecto son:

- El estudio de las diversas técnicas de fabricación aditiva destacando a tecnología FDM empleada en la elaboración de probetas para el trabajo, su principio de funcionamiento, ventajas e inconvenientes de cada una, así como materiales compatibles.
- Documentación sobre los polímeros, su clasificación y propiedades, profundizando en los elastómeros que se emplean en este trabajo.
- Conocer los procedimientos estandarizados recogidos en las distintas normas internacionales, así como los equipos requeridos para para determinar las distintas propiedades mecánicas de los materiales y el efecto del químico empleado que se van a estudiar.

## II. ESTADO DEL ARTE

### 1. FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva es el proceso mediante el cual se obtiene un objeto físico mediante la adición capa por capa de material a partir de un modelo digital 3D. La fabricación aditiva emplea diversos materiales como plástico, resina, metal, papel o arena. Comúnmente se hace referencia a la fabricación aditiva como impresión 3D. El término impresión 3D hace referencia en concreto a la fabricación mediante FDM (modelado por deposición fundida) siendo esta la más común y de fácil acceso al público. Otras denominaciones empleadas para la fabricación aditiva son prototipado rápido, fabricación 3D, fabricación por adición de capas, E-Manufacturing o fabricación digital directa entre otros.

El origen de esta tecnología se remonta a 1976 con la invención de la impresora de inyección de tinta aglutinante (BJ). El material de fabricación empleado por esta impresora era un polvo permeable el cual se compactaba al emplear una tinta aglutinante. Una peculiaridad de estas impresoras era la posibilidad de imprimir en varios colores. No fue hasta mediados de la década de los 80 cuando surgen otras formas de fabricación aditiva como son la estereolitografía (SLA) cuyo material de aporte son resinas líquidas que se solidifican en sucesivas capas por acción de un láser ultravioleta (UV), el sinterizado selectivo por láser (SLS) basado en la fusión de polvo y el modelado por deposición fundida (FDM) que extruye filamento plástico calentado hasta su punto de fusión. Estos procesos no tuvieron un alto impacto comercial debido a los altos costes y que los prototipos fabricados no eran funcionales. Debido a ello, los usuarios de estas tecnologías pertenecían principalmente a los sectores médico y aeronáutico/aeroespacial. En los sucesivos años se desarrollaron nuevas formas de fabricación aditiva basadas en las ya existentes como el laminado de objetos (LOM), fusión selectiva por láser (SLM) o la fusión por haz de electrones (EBM). No fue hasta el año 2007 cuando salen al mercado las primeras impresoras comerciales con un precio inferior a los 10.000 dólares. Durante la última década el mercado de fabricación aditiva se ha ido segmentando en función de los distintos materiales, tecnologías y el uso por parte de los compradores finales. Actualmente, esta tecnología permite la producción de una amplia gama de piezas para las más diversas industrias lo cual se refleja en los ingresos generados, alcanzando los 9,3 mil millones de dólares de ingresos junto con un crecimiento del 18% a finales de 2018.

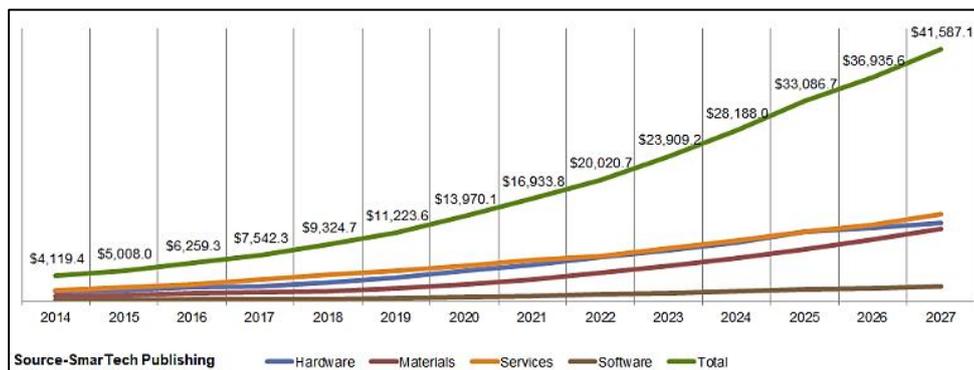


Figura 1. Ingresos anuales generados por la fabricación aditiva en el entorno de la industria

Tal y como se recoge en el portal web *Interempresas* "El número de plataformas de fabricación aditiva (AM) listas para la producción que se envían cada año se multiplicará por más de 10 para el año 2030, a medida que el uso de la tecnología en aplicaciones comerciales estructurales y de misión crítica se haga realidad. De acuerdo con un nuevo informe publicado por ABI Research, firma consultora que ofrece

orientación estratégica sobre las tecnologías de transformación más atractivas, estos sistemas producirán más de 360.000 millones de dólares en piezas y productos finales cada año y casi 2.000 millones de dólares (unos 1.757 millones de euros, aproximadamente) en total para finales de la próxima década.” Esto refleja el trascendental papel de la fabricación aditiva en la denominada industria 4.0 o cuarta revolución industrial junto con otras nuevas tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, la nanotecnología o la robótica. Este nuevo modelo de industria se basa en la automatización de procesos productivos y la intercomunicación entre unidades productivas. De este modo, se pretende ofrecer nuevas respuestas a las exigencias del cliente final, brindando una gran calidad en el producto, reduciendo costes y optimizando los tiempos de producción.

## 1.1. PROCESO DE FABRICACIÓN EN IMPRESIÓN 3D

El proceso de fabricación se inicia a partir de la creación de un modelo 3D mediante un programa de modelado, también llamado software CAD (Computer Aided Design), entre estos programas podemos encontrar Solidworks, CREO, AutoCAD, SolidEdge... Otra posibilidad es la de obtener un diseño disponible en alguna de las plataformas de acceso libre como Thingiverse, que disponen de un amplio repositorio de modelos cuyo acceso es gratuito. En caso de que la pieza a fabricar ya exista (es el caso de piezas dañadas o sobre las que se desea realizar alguna modificación) mediante ingeniería inversa, es posible hacer un escaneado 3D de la misma que se pueda manejar en los programas CAD. Una vez que se ha realizado/obtenido el modelo de la pieza se guarda como un archivo STL, que resulta compatible con los programas empleados en fabricación aditiva. El formato STL (Lenguaje triangular estándar) define la forma de un objeto mediante una malla de triángulos cerrada. La resolución del fichero final depende del número de triángulos, así como del tamaño de los mismos; lo cual está directamente relacionado con el peso del fichero, por lo que se recomienda siempre una solución de compromiso entre la resolución y el peso del fichero.

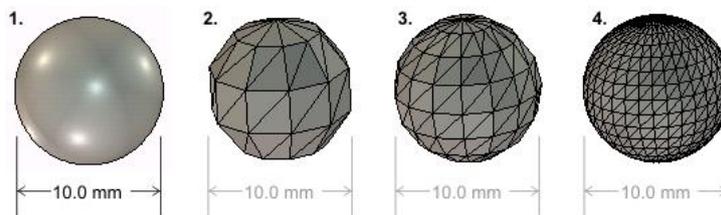


Figura 2. Ajuste de resolución en archivos STL

Una vez se dispone de un archivo STL se procede al preprocesado del modelo. Para ello se emplea un software específico para la fabricación aditiva que dispone de las características de equipo o “impresora” que se empleará. En ocasiones dicho programa es proporcionado por el mismo proveedor y se encuentra limitado a los equipos de la propia marca. Este tipo de programa nos permite las siguientes funciones:

- Comprobar que el archivo introducido no se encuentre dañado o el modelo presente defectos que impidan su correcta fabricación. El programa descompone el archivo en capas superpuestas acorde al grosor de capa deseado y que nos permita el equipo empleado y analiza la interferencia entre superficies, la existencia de paredes delgadas o la existencia de elementos en voladizo, para cuya fabricación pueda ser necesaria la creación de soportes adicionales.
- Configurar las características del proceso de impresión. Es posible modificar propiedades muy diversas del modelo como son el número de capas de contorno, el porcentaje de volumen de relleno deseado, la temperatura de los distintos componentes de la impresora, la velocidad de desplazamiento... todo ello a fin de obtener un resultado final óptimo.

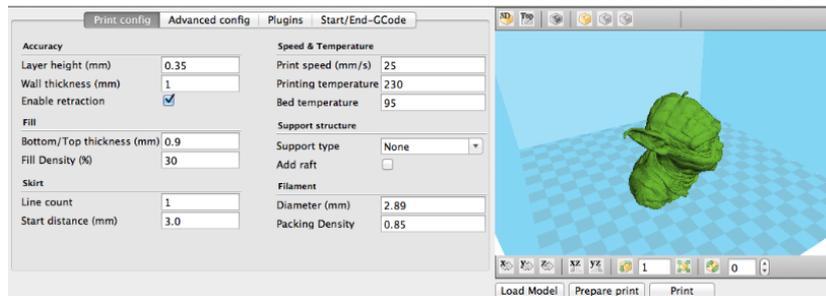


Figura 3. Preprocesado de archivo STL para su impresión

Una vez configurado el proceso de fabricación el programa crea un fichero que contiene dicha información y el cual es leído por la impresora 3D ya sea mediante un conector USB o empleando una tarjeta de almacenamiento SD. Finalmente tiene lugar la fabricación de la pieza en sucesivas capas acorde a las instrucciones establecidas por el usuario.

Finalizada la fabricación del modelo tiene lugar un postprocesado. Es habitual que la pieza/s resultantes contengan restos de material y soportes o se desee un determinado acabado superficial. En ese caso existen múltiples maneras dependiendo de la tecnología y el material empleados.

Con respecto a las tecnologías de fabricación consideradas como tradicionales la fabricación aditiva presenta las siguientes ventajas:

1. Permite reproducir prácticamente cualquier geometría. Aquellos componentes que constan de partes intrincadas, pequeñas o tubulares, pueden beneficiarse de los procesos de fabricación aditiva ya que la fabricación de estos no requiere de tiempo adicional o la modificación de la herramienta empleada. Así mismo, permite combinar distintos materiales en una misma pieza, confiriéndole mejores propiedades en vista a la aplicación de la misma.



Figura 4. Fabricación aditiva de piezas complejas

2. Reduce la cantidad de residuos generados. La fabricación aditiva genera significativamente menos desperdicio que los métodos de fabricación tradicionales. Al agregar material capa por capa, solo se emplea la cantidad de material requerido para la fabricación de la pieza final y elementos constructivos adicionales como soportes. De esta manera, la fabricación aditiva puede reducir los costes de materiales desperdicio hasta en un 90% con una generación de desperdicios mínima que en muchos casos resulta posible su reciclaje.

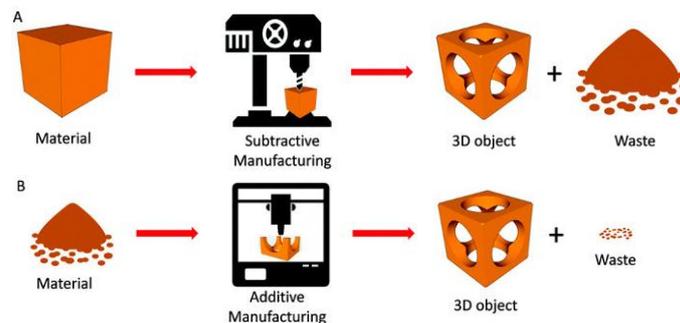


Figura 5. Generación de residuos en la fabricación. image by 3natives.com

- Se reducen costes de energía. Debido a la necesidad de menor materia prima y la eliminación de las distintas operaciones requeridas en el proceso de producción, que en ocasiones requieren de más de un equipo. Ejemplo de ello es un informe reciente del Departamento de Energía de California: “El motor a reacción LEAP de General Electric y Snecma incorpora boquillas de combustible impresas con sinterización láser. El proceso de fabricación convencional suelda 20 piezas para producir la boquilla de combustible, mientras que AM produce una sola pieza que es un 25% más liviana, cinco veces más duradera y reduce el consumo de combustible en un 15%.

Debido a ello, el sector de fabricación aditiva ha experimentado un crecimiento destacado en los últimos años debido a la rapidez, precisión y ahorro que permite. De hecho, según un estudio de mercado elaborado a partir de los datos del Wohlers Report 2013 y cifras de Roland Berger y Frost & Sullivan, el mercado mundial de la manufactura aditiva mueve cerca de 3.500 millones de dólares anuales. Cifra que se espera continúe creciendo hasta superar los 6.000 millones en tres o cuatro años.

## 1.2. TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA

Actualmente la fabricación aditiva se encuentra en su máximo desarrollo siendo posible trabajar una amplia gama de materiales con propiedades muy diversas. Esto es posible gracias a que dentro del campo que abarca la fabricación aditiva encontramos distintas tecnologías, cada una de ellas con sus ventajas y desventajas. Principalmente podemos encontrar las siguientes:

### 1.2.1. MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)

Se trata del método más común de fabricación aditiva, siendo un método que requiere escasos conocimientos técnicos y que permite hacer uso de esta tecnología a un gran número de usuarios con las denominadas “Impresoras 3D de escritorio”. La fabricación en FDM está basada en la presencia de tres elementos fundamentales: una cama o placa de impresión, superficie sobre la que se imprime la pieza; una bobina de filamento, habitualmente un polímero termoplástico, que resulta el material de fabricación y un extrusor responsable de fundir el material y depositarlo en aquellos puntos establecidos. Dicho extrusor se mueve por toda la superficie depositando las sucesivas capas hasta conformar el modelo deseado.

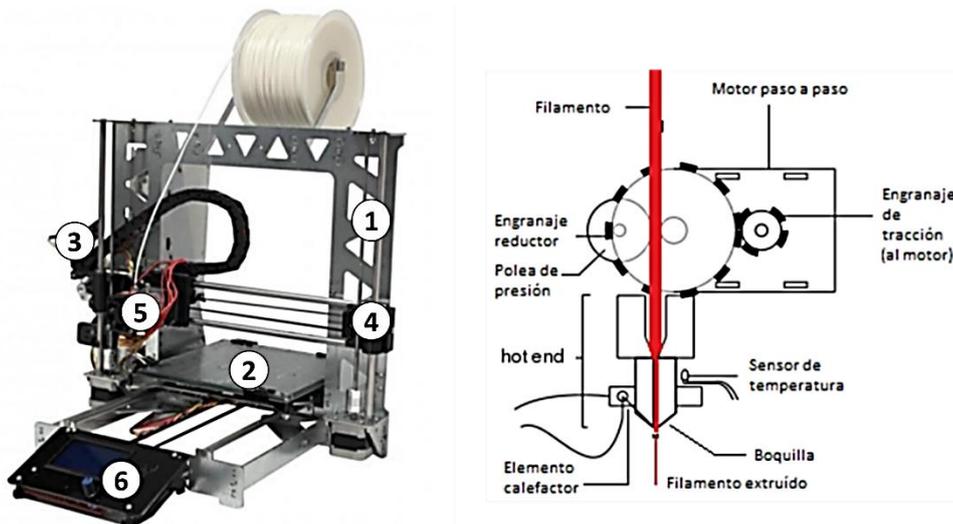


Figura 6. Partes de una impresora 3D tipo FDM

Acorde a como se muestra en la Figura 6. **Partes de una impresora 3D tipo FDM** Una impresora tipo FDM presenta las siguientes partes que la caracterizan y hacen posible su funcionamiento:

1. Estructura: Fabricada principalmente en acero o fundición, confiere rigidez a la impresora, absorbe las vibraciones generadas durante el funcionamiento y actúa como soporte del resto de elementos. Aquellas impresoras más avanzadas y de carácter profesional presenta una carcasa exterior de metal o plástico que protege los distintos componentes de la impresora y actúa como cámara calefactable, permitiendo una atmosfera controlada en el área de trabajo que mantienen unas condiciones una temperatura y humedad que favorecen la impresión de prototipos.
2. Placa de impresión o cama: Se trata de la superficie en la que se genera el prototipo. Habitualmente dispone de una resistencia en la parte inferior que permite calentar la superficie de la misma. Esto permite una mejor adhesión del material a la cama durante la impresión y evita la aparición de defectos en el prototipo al enfriarse sucesivamente las capas impresas. Principalmente se fabrican en aluminio con una superficie de silicona en la cara donde se realiza la impresión o de policarbonato (PCB) siendo ambos materiales buenos conductores térmicos y resistentes a las tensiones que se generan tras el enfriamiento y contracción de las piezas.
3. Componentes electromecánicos: Se trata del conjunto de motores, rodamientos, varillas, correas, poleas, acopladores y sensores que permiten en definitiva el funcionamiento en general de la impresora. Su mantenimiento es crucial a fin de obtener un producto final satisfactorio y debe seguirse las instrucciones del fabricante al respecto.
4. Ejes de desplazamiento: La mayoría de las impresoras tipo FDM emplean un sistema de coordenadas cartesiano XYZ, no obstante, podemos encontrar modelos como la *BCN 3D-R* cuyo funcionamiento está basado en coordenadas polares. Los desplazamientos durante la fabricación a lo largo de dichos ejes pueden tener lugar de distintas maneras: puede moverse el extrusor en las 3 direcciones, puede ser la cama la que se desplace mientras el extrusor permanece en un punto fijo, o como en la mayoría de los modelos, una combinación de desplazamientos entre el extrusor y la cama que permiten optimizar los desplazamientos y tiempos de fabricación.
5. Extrusor: Se trata del elemento más importante y característico de una impresora FDM, funde el material empleado y lo deposita en las coordenadas establecidas. En el detalle de la Figura 6. se muestran los distintos componentes que conforman el extrusor y permiten su funcionamiento:
  - El motor paso a paso: permite el empuje del filamento desde la entrada del extrusor hasta la boquilla donde se funde antes de ser depositado.
  - Engranaje y tornillo de tracción: disponen de dientes que permiten traccionar el filamento para desplazarlo según sea necesario.
  - Engranaje reductor: este componente no se encuentra en todas las impresoras FDM. Se encuentra unido al tornillo de tracción y permite generar una mayor fuerza de arrastre en el filamento.
  - Guía del filamento: pieza metálica que conduce del filamento desde el tornillo de tracción hasta el hotend. Su diámetro se encuentra estandarizado según el filamento que emplee la impresora ( $\varnothing$  1,75 mm o  $\varnothing$  3 mm).
  - Hotend: responsable de calentar el filamento y fundirlo de forma que al ser impulsado hacia la boquilla se encuentre suficientemente líquido para una adecuada impresión.
  - Boquilla: deposita el material en las sucesivas capas y se sitúa en el extremo inferior del extrusor. Se trata de un elemento intercambiable y presenta diferente diámetro de salida, siendo el más habitual 0,4 mm.
  - Sistema de refrigeración: permite controlar la temperatura del motor y el filamento. Así mismo, algunos modelos de impresora FDM disponen de un sistema de enfriamiento

adicional destinado a enfriar el filamento una vez depositado a fin de evitar deformaciones y defectos en la pieza.

Cabe destacar que algunas impresoras disponen de más de un extrusor, lo que permite trabajar de forma simultánea con dos materiales, ya sea para crear un modelo con distintas partes que requieran de características específicas distintas, combinar ambos materiales a fin de combinar las propiedades que ambos ofrecen o, el caso más frecuente, emplear un material para la creación del modelo y otro, que resulte fácil de disolver, para la fabricación de los soportes.

6. Pantalla de control: Dispone de un conector USB o un lector de tarjeta SD. Permite controlar algunas funciones de la impresora como desplazamientos manuales de los ejes y el extrusor, variación de la temperatura, velocidad de impresión... A su vez, durante la impresión autónoma nos permite acceder a información del proceso como su configuración, tiempo estimado o el % realizado del trabajo en marcha.

### 1.2.2. ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA)

En la fabricación aditiva mediante tecnología SLA se emplea una resina líquida fotosensible. En ella se sumerge una plataforma sobre la cual un rayo UV incide siguiendo el patrón establecido. Debido al rayo, la resina se endurece conformando la primera capa, acto seguido, un elemento denominado barredor o la propia plataforma se desplaza a fin de eliminar el exceso de resina sobrante. Finalizada la retirada de material, la plataforma asciende o desciende dependiendo del modelo de impresora para repetir el proceso y generar así las capas sucesivas.

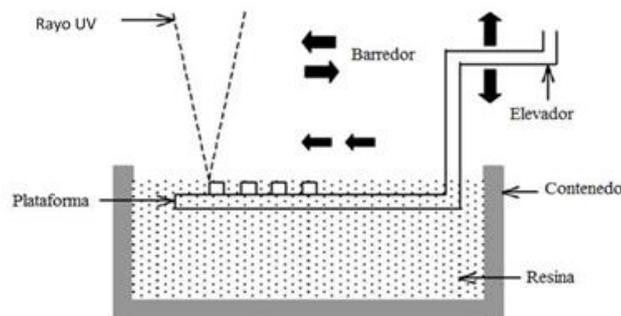


Figura 7. Esquema del proceso de impresión 3D mediante SLA

Cabe destacar que, de igual modo que ocurre con la tecnología FDM, aquellos modelos que presentan salientes o partes en voladizo requieren de la creación de soportes adicionales. Así mismo, una vez finalizada la pieza, esta se sumerge en algún disolvente como puede ser alcohol a fin de eliminar los restos de resina líquida presentes en el modelo. Posteriormente, es posible introducir el modelo en una cámara de rayos UV a fin de obtener un mayor endurecimiento y mejor acabado.

La impresión mediante SLA se distingue por la capacidad de fabricar objetos de escaso tamaño, con gran detalle y un acabado superficial mucho más uniforme y liso que el resto de tecnologías. Así mismo, las piezas obtenidas mediante SLA resultan no porosas, por lo que no requieren de un tratamiento de sellado posterior en caso de que las condiciones de trabajo de la pieza lo requiriesen. Por el contrario, las piezas obtenidas mediante SLA se pueden ver afectadas gravemente por la humedad y la exposición prolongada al Sol u otra fuente de rayos UV, por lo que si deben emplearse en estas condiciones requieren de tratamientos adicionales.

### 1.2.3. PROCESAMIENTO DIGITAL DE LUZ (DLP)

La tecnología DLP es una variante desarrollada a partir de la SLA. Al igual que ocurre en la estereolitografía, el material empleado es un fotopolímero en estado líquido que es endurecido, en este caso, al recibir la luz proveniente de un proyector DLP. En el caso de la tecnología SLA el rayo incidente en la plataforma recorre el contorno del modelo en la capa correspondiente, la fabricación DLP en su lugar proyecta toda la superficie sólida correspondiente a la capa que se está imprimiendo.

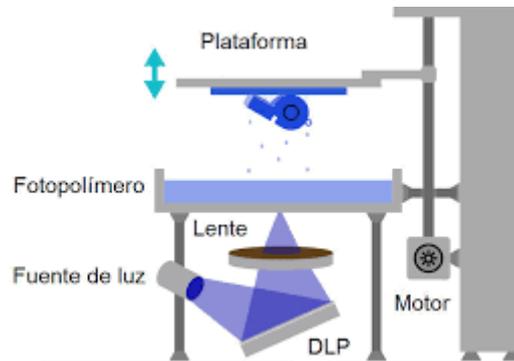


Figura 8. Esquema del proceso de impresión DLP

Al igual que sucede en el caso de la tecnología SLA, las piezas obtenidas poseen gran nivel de detalle y precisión y un excelente acabado superficial, no obstante, el tiempo de fabricación es aún menor. Como inconvenientes del uso de impresoras tipo DLP es la degradación de los prototipos ante humedad o exposición prolongada a luz UV. A fin de mitigar dichos efectos, las piezas obtenidas pueden someterse a postratamiento como en el caso de las piezas fabricadas por SLA.

### 1.2.4. SINTERIZADO SELECTIVO POR LÁSER (SLS)

En la fabricación aditiva mediante SLS el material de partida se encuentra en forma de polvo el cual se deposita en sucesivas capas sobre las que incide un láser que lo calienta por debajo del punto de fusión uniéndolo a las partículas. Se trata de una de las tecnologías AM que presenta mayor productividad y menor coste por pieza. Además, dado que la gama de materiales que permite emplear es muy amplia, es posible trabajar metales además de polímeros, se trata de una de las formas de fabricación aditiva más empleada cuya aplicación está presente en industrias muy diversas.

Para la fabricación mediante SLS se requiere de un láser de alta potencia, especialmente en el caso de trabajar con metales, siendo habitual el láser de CO<sub>2</sub>. El desarrollo de esta tecnología ha sido fundamental durante los últimos 10 años y ha sido el principal motivo de su éxito. Con el desarrollo de generadores láser de mayor potencia ha sido posible no solo ampliar el rango de materiales adaptables a esta tecnología sino también una reducción en los tiempos de fabricación, dado que se ha podido reducir el tiempo de incidencia necesario por parte del láser para unir las partículas de polvo.

El proceso de fabricación mediante sinterizado láser es similar al que tiene lugar en la estereolitografía. Una vez seleccionado el modelo y creado el archivo correspondiente para su fabricación se inicia el proceso de fabricación extendiendo una fina capa de polvo sobre el área de trabajo procedente de la cuba de almacenamiento. A continuación, en la cámara de trabajo se precalienta el polvo hasta alcanzar una temperatura ligeramente inferior al de la materia prima que se esté empleando. Esto permite alcanzar la temperatura necesaria para la unión por parte del láser en menor tiempo en aquellos puntos donde se requiere. Una vez alcanzada dicha temperatura, el láser traza la sección del modelo correspondiente a la

capa en que se encuentra trabajando, calentando el polvo por debajo de su punto de fusión y permitiendo la unión mecánica de las partículas. Finalizado el proceso, la plataforma desciende para iniciar a continuación la capa siguiente del modelo.

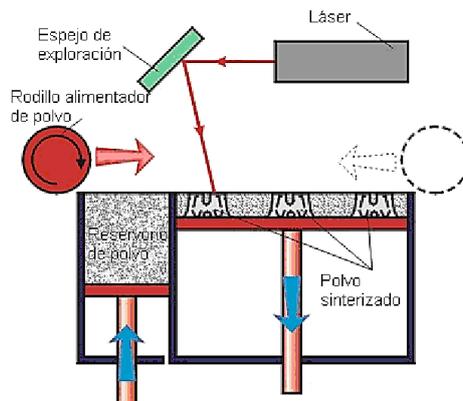


Figura 9. Esquema de funcionamiento de la impresión SLS

Es relevante mencionar que la tecnología SLS a diferencia de como ocurre en FDM o SLA no requiere de la fabricación de soportes adicionales para aquellas partes del modelo que sobresalen o se encuentran en voladizo. El material que no se solidifica dado que no incide en este el láser sirve de apoyo y soporte para dichas partes o piezas completas. Esto permite emplear la totalidad del volumen de trabajo disponible en caso de ser necesario, motivo por el cual se abaratan costes y tiempos de producción. Otra gran ventaja de la tecnología SLS es la obtención de modelos cuyas propiedades mecánicas son muy similares a las del material de partida empleado.

### 1.2.5. FUSIÓN SELECTIVA POR LÁSER (SLM)

En ocasiones se considera como una subcategoría de las impresoras SLS. La tecnología SLM emplea un rayo láser de alta potencia que a diferencia de lo que ocurre en el sinterizado, funde por completo las partículas de polvo (habitualmente metálicos) dando lugar a modelos sólidos tridimensionales. El funcionamiento es el mostrado en la Figura 9. Y resulta idéntico al empleado en SLS con la excepción de que la temperatura que debe alcanzarse debe ser superior a la de fusión del material empleado.

Las aleaciones actualmente disponibles para la fabricación mediante esta técnica son acero inoxidable 17-4 y 15-5, acero de marcado, cromo cobalto, inconel 625 y 718, aluminio AlSi10Mg, y titanio Ti6Al4V. Respecto a las propiedades mecánicas de los modelos obtenidos, estas resultan similares a las obtenidas utilizando un proceso de fundición siendo en algunas ocasiones, como es en el AlSi10Mg, ligeramente superiores, lo que se atribuye a una microestructura muy fina.

Todo ello combinado con la posibilidad que ofrece la fabricación aditiva de obtener geometrías complejas, con canales y paredes delgadas en un tiempo mucho menor y sin necesidad de intervenir en el proceso distintos equipos de fabricación ha dado lugar a que sea una de las técnicas de AM con mayor aceptación y éxito en la industria. Actualmente pueden encontrarse piezas obtenidas por SLM en el sector aeroespacial, empresas como la NASA o SpaceX ya ha implementado esta tecnología; en medicina, para el desarrollo de prótesis en fase experimental debido a los altos requisitos legales; o en la fabricación de herramientas e insertos de diversa aplicación industrial.

## 1.2.6. FUSIÓN POR HAZ DE ELECTRONES (EBM)

Esta tecnología proviene a su vez de la fabricación aditiva SLS y permite exclusivamente la fabricación de piezas metálicas. La materia prima empleada se sitúa en una cámara en condiciones de vacío donde se calienta mediante un haz de electrones hasta alcanzarse la fusión que permite obtener un modelo completamente sólido. Existen dos variantes de esta tecnología dependiendo del estado en que se encuentra la materia prima.

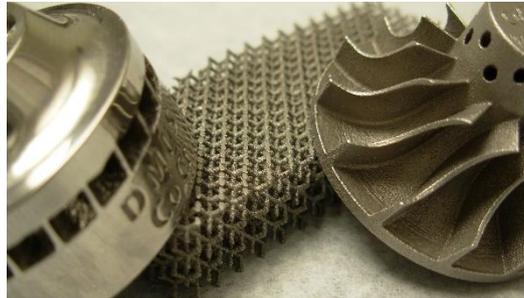


Figura 10. Piezas fabricadas mediante EBM

### 1.2.6.1. Sistemas basados en polvo metálico

El proceso guarda gran parecido con el que tiene lugar en SLS y SLM; el material en polvo se deposita en sucesivas capas sobre las que se funde la superficie del modelo, siendo el responsable de dicha fusión un haz de electrones en lugar de laser empleado en las otras técnicas. El resultado obtenido con esta técnica son piezas completamente densas con propiedades muy similares al material de partida. Dado que el proceso tiene lugar en condiciones de vacío, resulta adecuado para fabricar piezas en materiales reactivos que presentan una alta afinidad por el oxígeno como es el caso del titanio.

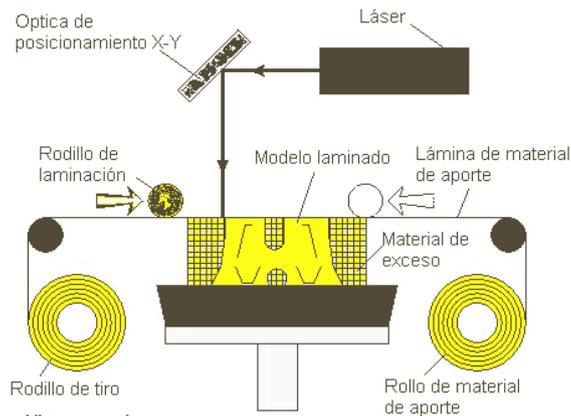
### 1.2.6.2. Sistemas basados en alambre de metal

El proceso consiste en emplear un haz de electrones para fundir un alambre de soldadura sobre una superficie para construir el modelo de forma similar a como tiene lugar la fabricación en FDM empleando en su lugar materiales metálicos. El haz de electrones resulta una fuente de energía altamente eficiente, dado que puede enfocarse y desviarse con gran precisión empleando para ello bobinas electromagnéticas. Una de las principales ventajas que ofrece esta tecnología es que no requiere el uso de gases inertes adicionales y no genera contaminación alguna.

## 1.2.7. FABRICACIÓN MEDIANTE LAMINADO DE OBJETOS (LOM)

En la fabricación de prototipos mediante esta tecnología se disponen capas de papel revestido con adhesivo, plástico o laminas metálicas que adhieren sucesivamente y son cortadas para obtener la forma deseada empleando una cuchilla o cortador láser.

El proceso completo para la conformación de objetos se inicia con la disposición y adherencia de la lámina a un sustrato mediante rodillo calentado. A continuación, la cuchilla o laser traza la figura del prototipo, trazando trayectorias que favorecen la posterior eliminación del material sobrante. Finalizada la capa, la plataforma desciende y se dispone de una nueva lámina repitiendo nuevamente el proceso.

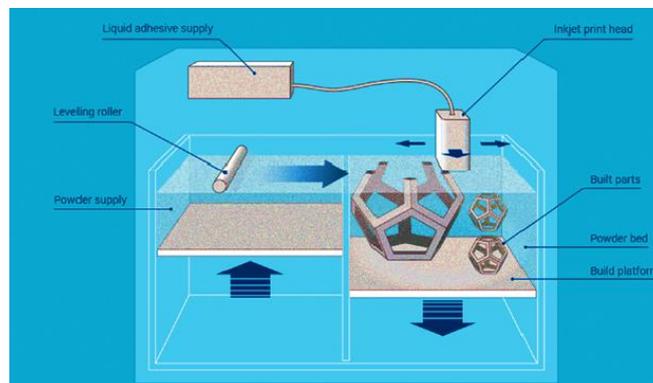


**Figura 11. Proceso de fabricación mediante LOM**

Con respecto a otras tecnologías, los modelos obtenidos con esta técnica pueden modificarse mediante maquinado o taladrado adicional una vez finalizada su impresión. Se trata de una tecnología de muy bajo coste que permite obtener modelos de calidad cuya precisión depende del elemento de corte y material empleados.

### 1.2.8. INYECCIÓN DE AGLUTINANTE (BJ)

Para la impresión mediante a inyección de aglutinante se emplean dos materiales: un material base en forma de polvo (metal, arena, plástico o cerámica) y un agente adhesivo, responsable de la unión de las capas. El proceso tiene lugar de forma similar a como sucede en una impresión en 2D con tinta normal repitiéndose este proceso en las sucesivas capas hasta finalizarse la pieza.



**Figura 12. Proceso de fabricación mediante BJ**

La principal ventaja de la tecnología BJ respecto a cualquier otra forma de fabricación aditiva es la posibilidad de imprimir a todo color. Esto se realiza agregando pigmentos al aglutinante empleado de forma similar a como ocurre con la tinta a color de las impresoras 2D tradicionales. Este aspecto permite que la fabricación de modelos mediante inyección de aglutinante tenga un gran éxito en las industrias automotriz, médica y aeroespacial. No obstante, tienen como inconveniente que presenta este método es la escasa resistencia de los modelos y una resolución baja en comparación con otras tecnologías de AM. Actualmente existe un gran desarrollo de esta tecnología para mejorar las propiedades finales del modelo, así como para implementar nuevos materiales.

### 1.3. DEFECTOS EN LA FABRICACIÓN ADITIVA

En la fabricación aditiva de modelos pueden surgir distintos tipos de defectos en función de la tecnología empleada. En el caso de aquellos medios de impresión 3D que emplean como material de aporte resinas en estado líquido los defectos habituales son la aparición de burbujas dentro del modelo, el desprendimiento del propio modelo de la superficie de impresión o la falta de resolución en los detalles. Estos defectos son posibles de evitar mediante una buena conservación de las resinas en entornos controlados, así como un correcto seguimiento de la guía de mantenimiento y limpieza del equipo empleado. Los defectos habituales cuando el material de partida empleado se encuentra en forma de polvos son a su vez la falta de resolución en la pieza final y la aparición de grietas que pueden provocar la rotura del modelo. Las causas de estos defectos son principalmente el mal estado del material empleado (habitualmente a causa de la humedad o temperatura ambiente) y la falta de fusión de las partículas de material, por lo que se recomienda en estos casos revisar la configuración del láser ya sea regulando la potencia o velocidad de desplazamiento de este. En caso de que el material de aporte empleado sea filamento, existen una gran variedad de defectos con muy diversas causas dada la diversidad de equipos y materiales que operan con esta tecnología. Los más relevantes y sencillos de identificar son los siguientes:

- Separación y división de capas: en ocasiones al construir el modelo las capas no se unen de manera adecuada, presentando pequeñas acanaladuras el modelo en su capa exterior. Este defecto surge principalmente a causa de una configuración de altura de capa excesiva que reduce la superficie de contacto entre capas o debido a una baja temperatura de extrusión que dificulta la cohesión de las capas.

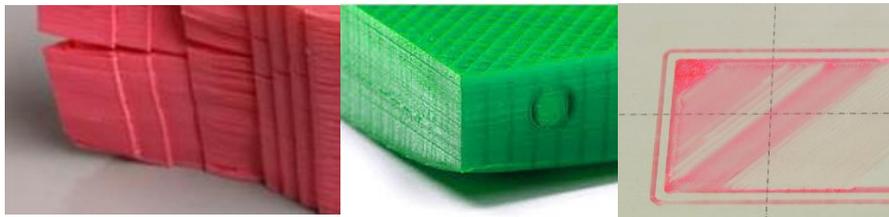


Figura 13. Defectos de capa al realizar impresión en FDM

- Pandeo de la capa inferior: este defecto se produce de forma habitual en piezas de gran tamaño, las capas inferiores, que se adhirieron correctamente durante la impresión, comienzan a curvarse y deformarse debido a las contracciones producidas en el material por el descenso de la temperatura. Esto no sucede en todos los materiales y en aquellos susceptibles de dar lugar a este defecto se recomienda el uso de una superficie calefactable.
- Problema de extrusión a comienzos de la impresión: en algunos casos al iniciarse la impresión de un modelo no se imprime la primera capa o lo hace solo parcialmente. Los motivos porque esto puede suceder son la falta de material en el extrusor, la existencia de un posible atasco, una insuficiente temperatura para la fusión del material o la excesiva proximidad entre boquilla y superficie de impresión.

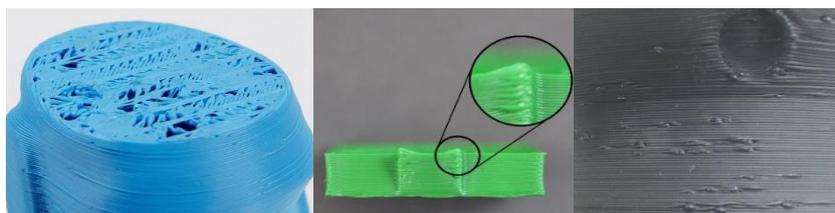


Figura 14. Defectos superficiales por temperatura en FDM

- Defectos superficiales en el modelo: en ocasiones los modelos presentan brechas, aberturas, pegotes y burbujas o la geometría deformada. La existencia de agujeros o falta de unión entre los filamentos que componen las capas se debe habitualmente a una falta de temperatura, exceso de velocidad de impresión y desplazamiento o flujo de material insuficiente. Por el contrario, la presencia de burbujas o hilos en el material, así como la deformación de esquinas se debe a un exceso de temperatura o velocidad insuficiente.
- Aparición de marcas dentadas en el filamento: Dado que el material es impulsado por el tornillo extrusor, en ocasiones aparecen defectos en el filamento llegándose a ocasionar la rotura del mismo. Esto se debe generalmente a un apriete excesivo, aunque la falta de temperatura, una excesiva velocidad de impresión o la retracción brusca pueden dar lugar a este fenómeno.

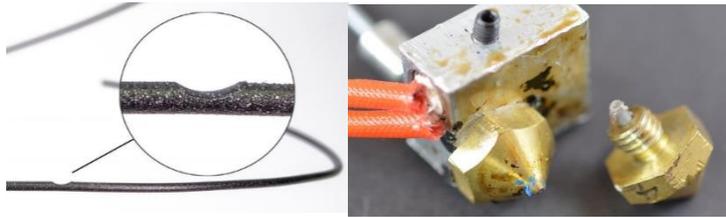


Figura 15. Defectos en filamentos y extrusor en FDM

- Obstrucción del extrusor: debido al uso prolongado de diversos materiales o defectos en el filamento empleado, puede producirse un atasco en la boquilla que impide la salida de material. Ante esta situación se aconseja alimentar manualmente el extrusor con un material rígido que permita el empuje del posible atasco mientras la boquilla se encuentra a una temperatura superior a la de fusión de los materiales que hayan podido emplearse. En ocasiones no es posible eliminar el atasco y es necesario un cambio de boquilla.

## 2. POLÍMEROS

Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión de varias unidades más sencillas denominadas monómeros mediante enlaces covalentes que terminan por formar cadenas. La mayor parte de los polímeros son orgánicos, formados principalmente por átomos de carbono unidos entre sí, aunque pueden presentar otros elementos como el hidrógeno, el oxígeno o el nitrógeno entre otros. Son la base de algunos materiales naturales como el almidón, el ADN o la seda y su aplicación a lo largo de la historia ha sido fundamental en el desarrollo de la sociedad humana pese a desconocerse su composición y la forma de ser sintetizados artificialmente. Es a mediados del siglo XIX cuando surgen los primeros polímeros sintéticos que se obtienen a partir de algunos naturales con el propósito de mejorar sus propiedades. No obstante, no es hasta principios del siglo XX cuando se empiezan a conocer las estructuras de los diversos polímeros existentes lo que permite el desarrollo de la polimerización y la obtención de nuevos materiales a mediados de siglo.

La polimerización es el proceso químico a través del cual los monómeros se agrupan formando polímeros en forma de cadenas o estructuras tridimensionales. Según las condiciones en que los monómeros se agrupan para formar esos grupos se pueden clasificar los procesos de polimerización en base a distintos criterios. En caso de analizarse la variación del número de átomos que conforma los monómeros se encuentran:

- Polimerización por adición: durante la conformación de cadenas no existe pérdida de átomos por parte de los monómeros, siendo la composición química del polímero resultante la suma de las composiciones de cada uno de los monómeros a partir de los cuales se forma.
- Policondensación: en la formación de los polímeros se produce una pérdida de átomos generándose subproductos como el agua.

Según el proceso de conformación de los polímeros existen:

- Polimerización por crecimiento en cadena: los monómeros polimerizan en presencia de otros compuestos denominados iniciadores responsables de generar centros de a los que se sucesivamente los monómeros.
- Polimerización por crecimiento en etapas: la formación de polímeros se inicia con la unión de varios monómeros entre sí formando diversas cadenas ya sean dímeros, trímeros u oligómeros que se unen entre sí formando cadenas cada vez mayores

El gran éxito de los polímeros en la industria es debido a sus muy diversas propiedades, destacando con respecto a otros materiales tradicionales por su baja densidad, sus propiedades como aislantes térmicos y eléctricos o su facilidad para ser adaptados y modificados para diversos procesos de fabricación. Por el contrario, algunos de los inconvenientes que presentan estos materiales son su escaso rango de temperatura de operación, su baja resistencia a la deformación y ante abrasivos y su alta inflamabilidad.

Los materiales poliméricos pueden ser clasificados empleando distintos criterios como su aspecto o propiedades. La clasificación más habitual es la referida al comportamiento que presentan al elevar su temperatura, dividiéndose así en tres grandes grupos:

- Termoplásticos: Son aquellos polímeros que al exponerse a altas temperaturas se vuelven deformables y flexibles pudiéndose fundir si se calientan lo suficiente. Así mismo, presentan una temperatura de transición por debajo de la cual son duros y frágiles, y por encima son suaves y flexibles. Estas propiedades permiten que sea posible su reciclaje ya que pueden ser recalentados para conformar otros objetos. No obstante, la repetición sucesiva de ciclos de calentamiento y enfriamiento termina por deteriorar los enlaces lo que afecta a sus propiedades. Algunos de los termoplásticos más habituales son el policarbonato, el polietileno (PE), el nylon, el teflón, el policloruro de vinilo (PVC), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el polimetilmetacrilato (PMMA) y el politereftalato de etileno (PET).

Dentro de la fabricación aditiva los termoplásticos como el PLA o el ABS son empleados debido a su bajo punto de fusión, versatilidad y bajo coste en la fabricación mediante FDM. Así mismo estos materiales son susceptibles de ser combinados con trazas o partículas de otros como pueden ser hierro o madera a fin de obtener unas propiedades específicas.

- Termoestables: la estructura que presentan estos polímeros resulta altamente reticulada que les confiere a estos materiales una alta resistencia mecánica y flexibilidad, convirtiéndolos en materiales frágiles. Por este mismo motivo no es posible su fusión o disolución. Entre los más utilizados se encuentran la baquelita y las resinas epoxi (RE) utilizadas como adhesivos y en plásticos reforzados.
- Elastómeros: presentan una estructura ligeramente reticulada que les confiere su alta elasticidad y flexibilidad frente a cargas antes de fracturarse o romperse. En función de la distribución y unión de los polímeros, pueden presentar un comportamiento termoestable o termoplástico. Algunos de los más comunes son el neopreno, los poliuretanos o las siliconas.

## 2.1. ELASTÓMERO TERMOPLÁSTICO (TPE)

Se trata de un grupo de polímeros obtenidos por la mezcla de polímeros (habitualmente un caucho y un plástico) que poseen propiedades termoplásticas y elastoméricas. El entrecruzamiento de las cadenas que lo conforman hace posible que los elastómeros presenten cierta elasticidad, no obstante, impiden su reciclaje. Los elastómeros termoplásticos disponen de un entrecruzamiento reversible que permiten su fusión y reciclaje al contrario de como sucede en la mayoría de los elastómeros.

Existen seis grandes clases de TPE comerciales: copolímeros estirénicos en bloque, las mezclas de poliolefinas elastoméricas, aleaciones (TPE-V o TPV), los poliuretanos termoplásticos, copoliéster termoplástico y poliamidas termoplásticas. Todos ellos presentan propiedades elásticas características de cauchos, no requieren de aditivos previos a su transformación, pueden colorearse con facilidad. Así mismo, presentan por lo general una baja resistencia química y al calor además de una peor recuperación al someterse a carga. Si se funden a una temperatura superior a la especificada se corre el riesgo de que pierdan su comportamiento elástico.

Su aplicación en la industria depende las propiedades específicas de cada tipo, encontrándose en piezas antivibratorias, partes antideslizantes, manguitos, perfilera de ventanas y puertas, tubos, o cableado eléctrico entre otros.

## 2.2. POLIURETANO TERMOPLÁSTICO (TPU)

Se trata de un polímero lineal y por tanto termoplástico, perteneciente al grupo de los poliuretanos. El TPU es un copolímero formado por secuencias alternas de segmentos duros y blandos, lo que le confiere una gran capacidad de adaptación. Puede procesar por los métodos de conformados empleados para los termoplásticos, moldeo por inyección, soplado y extrusión. En cualquiera de los casos las propiedades del TPU son ligeramente distintas de las que presentan los termoplásticos habituales, por lo que es necesario realizar modificaciones en tales procesos.

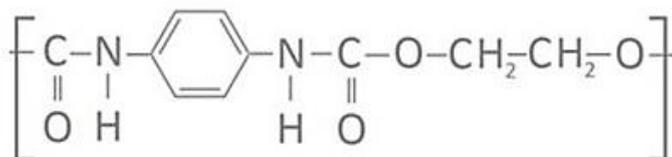


Figura 16. Fórmula del poliuretano termoplástico (TPU)

Mediante la manipulación de la proporción de segmentos es posible obtener una amplia variedad de dureza. En general, el TPU presenta una buena resistencia a la abrasión y a impactos, así como dureza y flexibilidad. De forma adicional, algunas variantes del material también presentan resistencia a las fisuras por tensión a partir de aguas saladas, así como frente a los combustibles y aceites. En lo que respecta a las propiedades térmicas, soporta altas temperaturas y son más resistentes al envejecimiento por calor que la mayoría de los elastómeros.

Su resistencia química depende principalmente del tipo y del tiempo de exposición ante el ataque químico, de la temperatura, de la cantidad y de la concentración del producto químico que ataca. La exposición a hidrocarburos saturados como el gasóleo, provoca un hinchamiento reversible casi los valores mecánicos originales y son especialmente resistente a grasas y aceites. Las cetonas y alcoholes, por el contrario, son disolventes parciales para el TPU, deteriorando en gran medida sus propiedades mecánicas.

Algunas de las aplicaciones más comunes de estos poliuretanos son el recubrimiento de cables, la fabricación mangueras, tubos y perfiles flexibles para uso industrial, así como componentes para automóvil, tanto para el habitáculo como piezas del chasis y compartimento motor, laminas y películas aislantes y filamentos de impresión 3D para tecnología FDM.

---

## III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

---

### 1. FABRICACIÓN DE PROBETAS: PROCESOS Y EQUIPOS EMPLEADOS

La fabricación de las probetas requeridas para el trabajo tiene lugar en la Universidad Pontificia Comillas ICAI y en el laboratorio de producción de Lupeon. Una vez establecido que impresora o impresoras se van a utilizar, es necesario verificar si las condiciones de trabajo sugeridas por fabricantes y proveedores permiten obtener el resultado deseado. En caso contrario, deben modificarse algunos de los parámetros configurables para corregir la aparición de los posibles defectos.

Existen un gran número de configuraciones posibles en la impresión 3D de modelos mediante FDM. Algunos de los principales parámetros modificables que pueden afectar a las propiedades finales de la pieza son el % de volumen de relleno establecido, el número de capas de contorno o la dirección en que se disponen los hilos que conforman las capas pieza. Es por tanto necesario establecer una muestra que permita el estudio del abrasivo químico empleado dentro del plazo y con los medios disponibles cuyos resultados sean extrapolables al conjunto de configuraciones por las que se optará.

Tras analizarse la cuestión con el profesorado de la universidad responsables del área de materiales, a causa de las propiedades que presentan ambos materiales, aquellos ensayos que pueden proporcionar una mayor información sobre los efectos de la inmersión en gasolina son los ensayos de tracción, de flexión y dureza de los que se dispone del equipo y normativa necesarios. Así mismo, tras consultar la bibliografía existente sobre la realización previa de alguno de estos ensayos en materiales de fabricación aditiva se establece el estudio de probetas que poseen una misma disposición de las capas y espesor del contorno en 4 condiciones de relleno distintas; 5%, 20%, 50% y 80% que permiten obtener modelos predictivos de curvas que poseen la suficiente precisión.

#### 1.1. MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales que estudiar en este trabajo son el TPE y el TPU en formato de filamento para impresión 3D mediante tecnología FDM. Para la fabricación de las probetas y posterior realización de los ensayos se empleará el TPU 98-A del fabricante FILLAMENTUM y FILAFLEX ULTRASOFT 70-A del fabricante RECREUS obtenidos a través del proveedor FILAMENT2PRINT.

##### 1.1.1. TPU 98-A

Se trata de un material flexible con cierta elasticidad al cual se han implementado propiedades como la resistencia a grasas, aceites y disolventes a fin de una mayor utilidad en el sector industrial. Con respecto a otros materiales flexibles presenta una mayor rigidez, lo que posibilita su impresión en aquellos equipos que no disponen de un extrusor adaptado al trabajo con materiales flexibles. Las propiedades del material que se indican son las siguientes:

Propiedad	Valor típico	Método de ensayo	Condiciones de ensayo
Densidad del material	1,23 g/cm <sup>3</sup>	-	-
Tensión de rotura	53,7 MPa	DIN 53504	en rotura, 200 mm/min
Esfuerzo a tracción	12,1 MPa	DIN 53504	10% alargamiento, 200 mm/min
	22,1 MPa	DIN 53504	50% alargamiento, 200 mm/min
	28,4 MPa	DIN 53504	100% alargamiento, 200 mm/min
	37,8 MPa	DIN 53504	300% alargamiento, 200 mm/min
Alargamiento a rotura	318 %	DIN 53504	200 mm/min
Dureza	98 Shore A	ISO 7619-1	-

Tabla 1. Principales propiedades del filamento TPU 98-A según fabricante

Propiedad	Valor típico	Método de ensayo	Condiciones de ensayo
Densidad del material	1,23 g/cm <sup>3</sup>	-	-
Tensión de rotura	53,7 MPa	DIN 53504	en rotura, 200 mm/min
Alargamiento a rotura	318 %	DIN 53504	200 mm/min
Módulo de tracción	444 MPa	ISO 6721	200 mm/min
Dureza	98 Shore A	ISO 7619-1	-
Tª reblandecimiento	90°C	ASTM E2092	-
Temperatura de fusión	215°C	-	-

Tabla 2. Principales propiedades del filamento TPU 98-A según proveedor

Parámetro de impresión	Recomendada
Temperatura de impresión	220 – 240 °C
Temperatura de cama	50 – 60 °C
Adhesivo para cama	Magigoo

Tabla 3. Parámetros de impresión del filamento TPU 98-A según fabricante

Parámetro de impresión	Recomendada
Temperatura de impresión	200 – 220 °C
Temperatura de cama	30 – 50 °C
Velocidad de impresión	20-30 mm/s

Tabla 4. Parámetros de impresión del filamento TPU 98-A según proveedor

No obstante, se advierte que estos valores deben tomarse como referencia y deben de adaptarse al equipo empleado y las condiciones en que vaya a tener lugar la impresión a fin de obtener un resultado adecuado.

### 1.1.2. FILAFLEX ULTRASOFT 70-A

Se trata del filamento más flexible del mercado actualmente cuya composición básica es poliuretano. Se trata de un material no tóxico que no desprende olores ni gases tóxicos, sin embargo, su uso no está aprobado para el sector médico o alimenticio. Presenta a su vez una buena resistencia frente a abrasivos, acetona y combustibles, aunque su resistencia a tracción y temperatura de reblandecimiento son bajas.

Propiedad	Unidad	Valor	Método de ensayo
Densidad del material	g/cm <sup>3</sup>	1.08	- DIN EN ISO 1183-1-A
Resistencia a tracción	MPa	32	DIN 53504-S2
Esfuerzo a tracción	MPa	1.7	20% alargamiento, DIN 53504-S2
	MPa	3.6	100% alargamiento, DIN 53504-S2
	MPa	6.6	300% alargamiento, DIN 53504-S2
Alargamiento a rotura	%	900	DIN 53504-S2
Dureza	Shore A	71	- DIN ISO 7619-1 (3s)

Tabla 5. Principales propiedades del filamento TPU 98-A según fabricante

Propiedad	Unidad	Valor	Método de ensayo
Densidad del material	g/cm <sup>3</sup>	1.08	- DIN EN ISO 1183-1-A
Resistencia a tracción	MPa	32	DIN 53504-S2
Alargamiento a rotura	%	900	DIN 53504-S2
Dureza	Shore A	70	- DIN ISO 7619-1 (3s)
Tª reblandecimiento	°C	90	ASTM E2092
Temperatura de fusión	°C	195	-

Tabla 6. Principales propiedades del filamento TPU 98-A según proveedor

Parámetro de impresión	Recomendada
Temperatura de impresión	215 – 235 °C
Temperatura de cama	40 °C
Velocidad de impresión	20-40 mm/s
Altura de capa óptima	0,2 mm
Diámetro de boquilla mínimo	0,4 mm o mayor
Parámetros de retracción	3,5-6,5 mm (velocidad 20-160 mm/s)

Tabla 7. Parámetros de impresión del filamento TPU 98-A según fabricante

Parámetro de impresión	Recomendada
Temperatura de impresión	215 – 235 °C
Temperatura de cama	40 °C
Velocidad de impresión	20-40 mm/s
Altura de capa óptima	0,2 mm
Diámetro de boquilla mínimo	0,4 mm o mayor
Parámetros de retracción	3,5-6,5 mm (velocidad 20-160 mm/s)

Tabla 8. Parámetros de impresión del filamento TPU 98-A según proveedor

Se trata de un material difícil de manejar ya que en caso de no disponer de extrusores adaptados a este tipo de materiales es posible que el filamento se enrolle en el tornillo de tracción o se doble antes de alcanzar el Hotend, impidiendo su impresión. Por este motivo este material se recomienda exclusivamente a usuarios avanzados o que disponen de un extrusor adaptado para filamentos elásticos. Destacar que los valores mostrados en las tablas son orientativos y deberán ajustarse al equipo de trabajo y condiciones en que este se desarrolle.

## 1.2. EQUIPO DE FABRICACIÓN ADITIVA EMPLEADO

La fabricación de las probetas se distribuye entre los equipos disponibles acorde a las propiedades que presentan ambos materiales. Debido a la elasticidad y alta capacidad de deformación que poseen las bobinas de filamento tanto de TPU como de TPE, este último en mayor medida, no es posible emplear cualquier impresora 3D de tecnología FDM. A fin de garantizar un buen resultado final se considera que los equipos empleados deben poseer un extrusor adaptado a la fabricación de materiales elásticos. Del equipo disponible en el laboratorio de fabricación aditiva de la universidad se emplean las impresoras Zmorph 2.0 SX y Dynamical Tools DT600. Así mismo del equipo disponible en Lupeon se emplean impresoras Prusa i3 MK3 que dispone de un cabezal compatible con materiales elásticos.

### 1.2.1. IMPRESORA ZMORPH 2.0 SX

Se trata de una impresora multiusos que permite la fabricación más allá de la impresión 3D, disponiendo de herramientas para prototipado, fresado por CNC o grabado láser entre otros que permiten una fabricación rápida de bajo volumen. Este equipo se encuentra dirigido tanto a profesionales de la industria como usuarios sin una alta formación, permitiendo una alta calidad y versatilidad en una máquina de escritorio.

Entre sus características principales se encuentran una estructura compuesta por aluminio de acero y PET que otorgan gran ligereza (tiene un peso de 20 kg) con un diseño innovador que permiten conservar su rigidez y resistencia, absorbiendo las vibraciones generadas y dotándola de gran precisión. El volumen de la impresora es de 530 x 555 x 480 mm, disponiendo de un área de trabajo de 250 x 235 x 165 mm posible de aumentarse hasta un máximo (eliminando tapas de apertura/cierre) de 300 x 235 x 165 mm. Dispone a su vez de mesas de trabajo intercambiables adaptada para cada uno de los módulos existentes.



Figura 17. Impresora ZMORPH 2.0 SX

Con respecto a los modelos anteriores dispone de una pantalla táctil LCD a color que permite controlar la impresora sin necesidad de estar conectada a un ordenador. Así mismo, dispone de una ranura de expansión en el carro X con un sistema de montaje magnético que permite la conexión de complementos, como ventiladores adicionales, en caso de que sean necesarios.

Para la fabricación de las probetas se emplea el equipo básico de impresión 3D compuesto por el cabezal intercambiable “Extrusor de plástico de 1,75 mm” y la mesa de trabajo climatizado mostrados en la figura Figura 17. El extrusor posee un tamaño de 135 x 115 x 55 mm y posee un cuadro de aluminio de 3 mm de espesor de alta calidad. Posee boquilla intercambiable ZMorph 1.75 con opción de distintos diámetros 0.2, 0.3, 0.4 mm que permite una resolución de capa de 0.025-0.4 mm y un rango de temperaturas de 0-255 °C que permite trabajar con materiales como ABS, PLA, HIPS y materiales Flex entre otros. La mesa de trabajo climatizada se encuentra fabricada en templado de vidrio de 5 mm y dispone de un calentador de silicona de 140 W que permite alcanzar temperaturas de hasta 120 °C.

### 1.2.2. DYNAMICAL TOOLS DT600

Fabricada por Dynamic Tools, empresa con sede en España, la Dynamical Tools DT600 es una impresora 3D de gran volumen, versátil y potente que permite trabajar con varios materiales técnicos, incluidos materiales flexibles y materiales con propiedades mecánicas avanzadas. A su vez, posee una serie de características que dinamizarán el concepto de los procesos productivos.

Esta impresora dispone de un volumen de trabajo de 600 x 450 x 450 mm, siendo una de las mayores disponibles en el mercado. Así mismo, dispone de un cabezal doble que alcanza una temperatura de 500 °C permitiendo trabajar con diferentes materiales avanzados en una sola pieza, como PETG, Nylon, Fibra de Carbono o materiales solubles en los soportes. Además, estos cabezales permiten fabricar un componente híbrido mezclando diferentes materiales ofreciendo un acabado limpio y preciso. Otra función destacada de la DT 600 es la fabricación dos piezas simultáneamente gracias a su cabezal doble, acelerando así el proceso de producción.



Figura 18. Impresora DYNAMICAL TOOLS DT600

Otras de las características más destacadas que presenta esta impresora son los sistemas de cambio de filamento automático y almacenamiento de filamentos con calefacción, la cámara a bordo que permite el control a distancia de las impresiones realizadas o las notificaciones tras completarse una impresión. Dispone a su vez de una cama de aluminio que permite alcanzar temperaturas de 150 °C en la base además de un sistema de recuperación que permite reanudar impresiones después de cortes de energía, todo ello permitiendo un máximo rendimiento y capacidad de producción.

### 1.2.3. PRUSA I3 MK3

Se trata del último modelo de la tradicional Prusa i3 y dispone de un volumen de impresión 250 x 210 x 200 mm y es posible adaptar una bandeja de impresión calefactada. Su principal novedad respecto a los modelos anteriores es el nuevo cabezal diseñado extremadamente silencioso en modo silencio, en el que

se ha aumentado la velocidad de impresión hasta de 200 mm/s y que permite trabajar con materiales de gran complejidad técnica.



Figura 19. Impresora PRUSA i3 MK3

Otras características destacables son el rediseño del eje Y en aluminio y un chasis optimizado para añadir 10 mm de altura en Z, con un total de 210mm, un sensor que permite detectar la interrupción de la electricidad y posterior recuperación en caso de apagón, así como una nueva cama caliente magnética que posee una base reemplazable de acero con una superficie de PEI.

### 1.3. PROCESO DE DISEÑO E IMPRESIÓN DE PROBETAS

Para la realización de los ensayos se establece un número de 5 probetas para cada uno de los casos estudiados. De este modo para cada material es necesario fabricar en cada una de las condiciones de relleno establecidas (5%, 20%, 50% y 80%) 20 probetas de tracción y de flexión acorde a la norma correspondientes para dichos ensayos. A su vez, para el estudio de las propiedades de dureza y efecto sobre la masa del abrasivo empleado, se fabrican un total de 5 probetas por condición de relleno y material. El total de probetas por material requerido finalmente resulta de 180 entre los distintos tipos, optándose por repartir su producción entre los dos laboratorios disponibles. A fin de obtener probetas con características comparables se destina la fabricación de las probetas de un mismo material en cada laboratorio. Dado la mayor complejidad que presenta el TPE FILAFLEX ULTRASOFT 70-A para su impresión y la experiencia en el manejo de este material por parte de la empresa Lupeon, las probetas de este material se fabrican en su totalidad por las impresoras Prusa i3 MK3. De este modo, la fabricación de las probetas en TPU queda destinada a las impresoras ZMORPH 2.0 SX y DT 600 disponibles en el laboratorio de fabricación aditiva de la universidad.

Las modelos de las probetas empleados para los ensayos de tracción y flexión son obtenidos a través del repositorio online Thingiverse verificándose que sus dimensiones se corresponden con las indicadas en la normativa ISO correspondiente. Las dimensiones de las probetas empleadas en el ensayo deflexión son las recomendadas en la norma ISO 178 correspondiente a la determinación de las propiedades a flexión de plásticos.

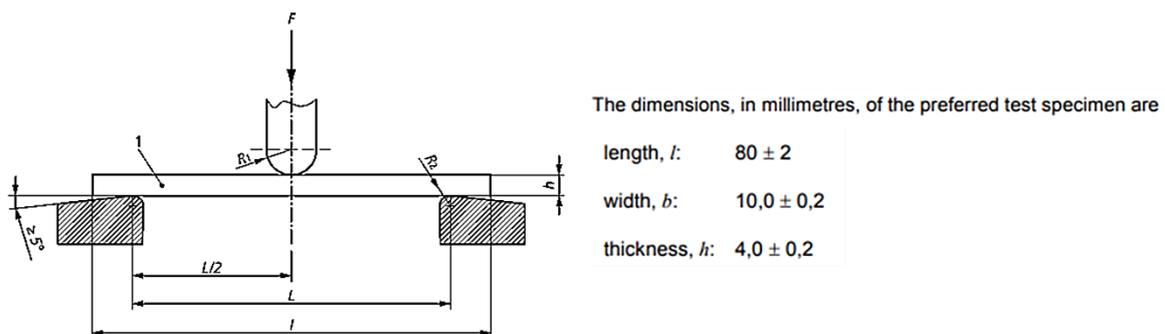
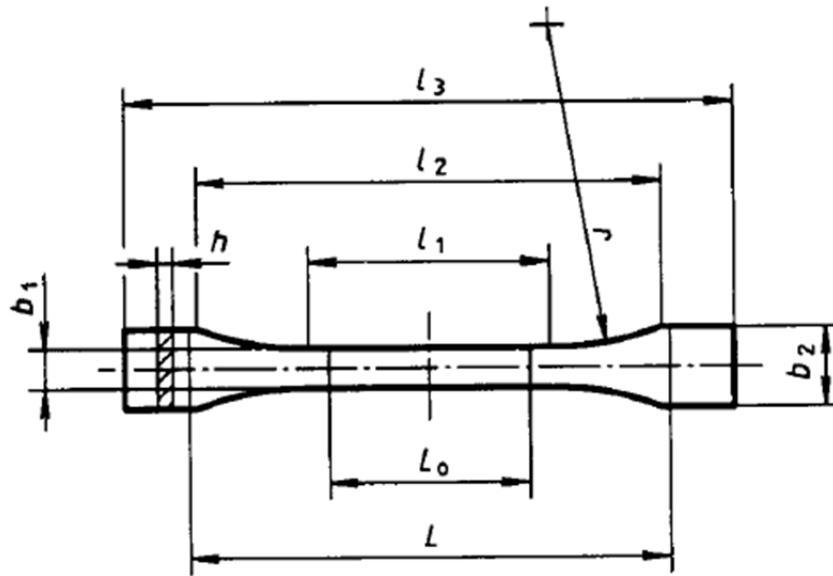


Figura 20. Dimensiones de probetas para ensayo a flexión según norma ISO-178

Así mismo, las probetas empleadas en los ensayos a tracción corresponden al modelo 1A de la norma ISO 527-2:1997 mostrada en la figura a continuación.



Tipo de probeta

Medidas en milímetros

	1BA	1BB
$l_3$ Longitud total		
$l_1$ Longitud de la zona paralela estrecha	$\geq 75$	$\geq 30$
$r$ Radio	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$
$l_2$ Distancia entre zonas paralelas anchas	$\geq 30$	$\geq 12$
$b_2$ Anchura en los extremos	$58 \pm 2$	$23 \pm 2$
$b_1$ Anchura en la zona estrecha	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
$h$ Espesor	$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
$L_0$ Distancia entre marcas	$\geq 2$	$\geq 2$
$L$ Distancia inicial entre mordazas	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
	$l_2 \begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}$	$l_2 \begin{smallmatrix} +1 \\ 0 \end{smallmatrix}$

Figura 21. Dimensiones de probetas para ensayo a tracción tipo 1A y 1B según norma ISO-527

Para la realización de los ensayos de dureza la norma ISO 868 establece que la probetas deben presentar un espesor mínimo de 4 mm y sus dimensiones suficientes para realizar mediciones a una distancia de al menos 9 mm de los bordes.

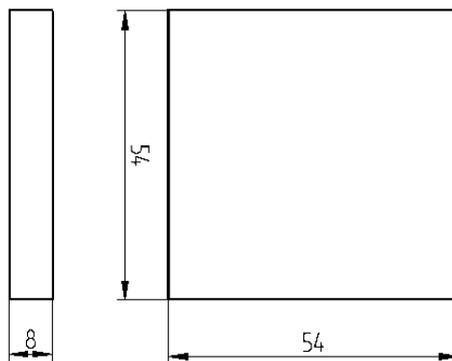


Figura 22. Dimensiones de probetas empleadas en los ensayos de dureza

Debido a la posible falta de uniformidad que se prevé al obtener las medias, se opta por diseño mostrado en la Figura 22. que cumple con lo establecido en la norma y permite la realización de varias medidas en cada probeta y la obtención de este modo de unos valores medios de dureza fiables.

El software empleado en la creación de ordenes de trabajo para cada una de las impresoras especificando los modelos a imprimir y las características deseadas en cada caso es el Simplify3D. Se trata de un software compatible con numerosos modelos de impresoras 3D pertenecientes a compañías diferentes de todo el mundo en los cuales se ha optimizado el proceso de fabricación.

Al acceder al programa se muestra la interfaz reflejada en la Figura 23. Que consta de cuatro bloques fundamentales. En el cuadro 1 muestran los modelos activos en el programa. Su vez se encuentran las opciones de importar un nuevo modelo, eliminar uno que se encuentra activo en ese momento y la opción centrar y organizar todos los modelos introducidos para optimizar la impresión de los mismos.

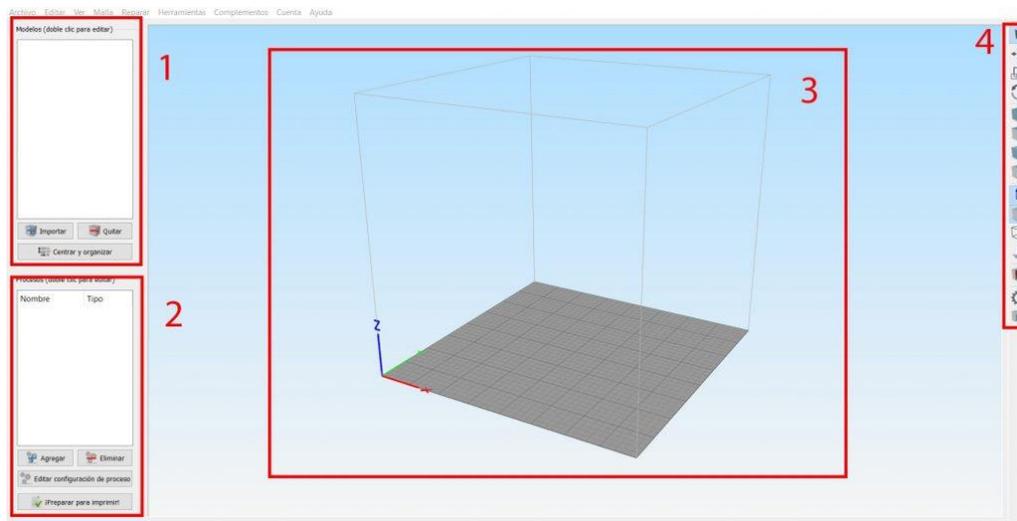


Figura 23. Interfaz de inicio de Simplify3D

En el recuadro 2 se indican los procesos de fabricación activos. Un proceso de fabricación contiene toda la información en relación a los distintos parámetros que puede modificar el usuario. A diferencia de otros softwares de impresión 3D, Simplify3D permite establecer dentro de una misma impresión más de un proceso simultaneo. Esto permite la impresión simultanea de varios modelos en caso de emplearse equipos con cabezal múltiple o la impresión de un conjunto de piezas con distintas configuraciones para cada una de ellas. El bloque 3 corresponde al espacio de trabajo; las dimensiones de este dependen del equipo de impresión empleado, que debe haber sido indicado con anterioridad. La barra de herramientas ubicada en el recuadro correspondiente al número 4 se encuentran algunas opciones básicas como el desplazamiento y rotación de modelos y vistas, así como la configuración de soportes adicionales y la conexión mediante USB a la impresora empleada.

Una vez se seleccionadas las probetas a imprimir se accede a la configuración de procesos para su impresión. Inicialmente se introducen los parámetros sugeridos por el fabricante de los filamentos empleados.

Al acceder a la configuración de procesos se muestra un menú con varias pestañas cada una de las cuales hace referencia a los distintos grupos en los que se agrupan los parámetros modificables. La primera pestaña corresponde a la configuración del extrusor o extrusores empleados. Como se aprecia en la Figura 24. puede indicarse la boquilla empleada, el flujo de material o el ancho del hilo depositado. Otras opciones disponibles en este apartado son la configuración de distancia de rodaje y retracción que permiten un control avanzado de los movimientos del extrusor y que son empleadas en la fabricación con materiales técnicamente avanzados como lo son el TPE y el TPU.

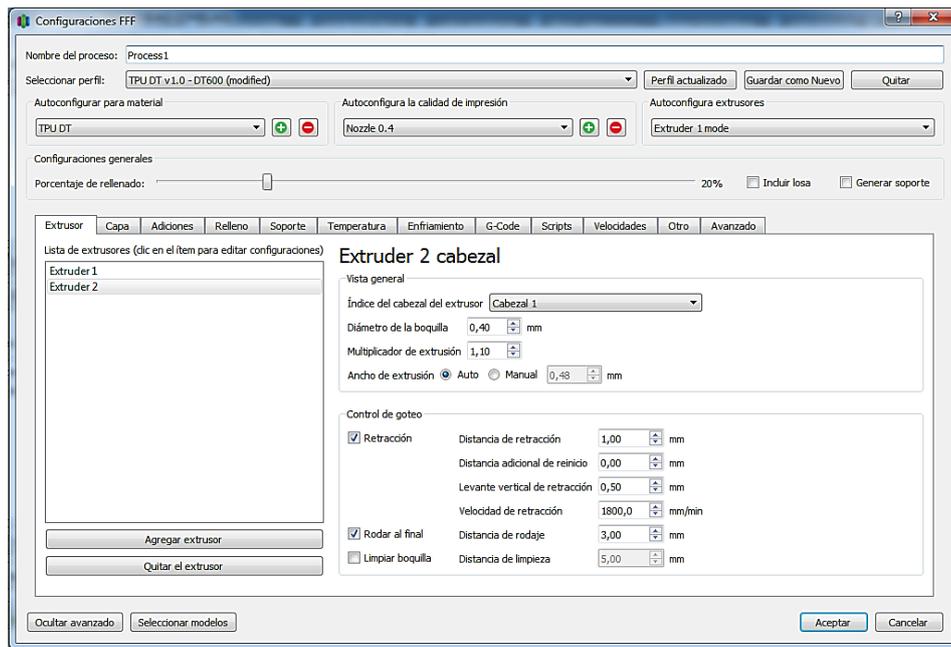


Figura 24. Configuración de extrusor dentro de un proceso en Simplify3D

La segunda ventana existente corresponde a la configuración de capas, estableciéndose el espesor y altura de estas; prestando especial atención en la impresión de la primera capa, pudiéndose modificar su altura y ancho respecto al resto de la pieza además de establecer una velocidad de impresión específica.

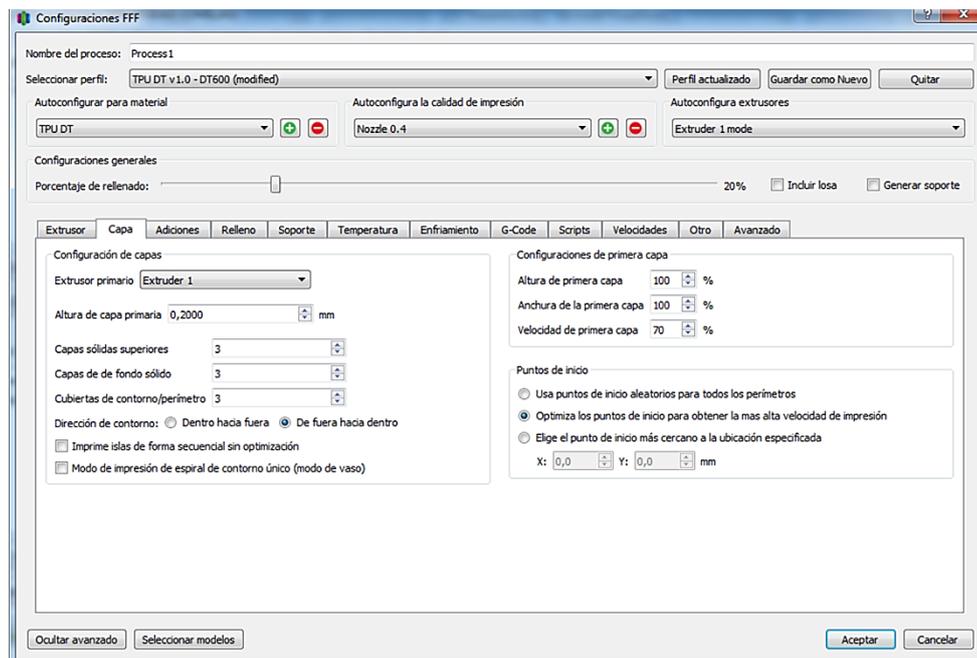


Figura 25. Configuración de capas dentro de un proceso en Simplify3D

La siguiente ventana cuyos parámetros resultan relevantes en el resultado final de la impresión contiene la información correspondiente a las condiciones de relleno mostrada en la Figura 26. Entre las opciones disponibles destacan la elección del patrón (rectilíneo, panal de abeja, cuadrícula...), el porcentaje de volumen de relleno, la superposición entre contorno y relleno para una correcta unión entre ambas partes. Así mismo es posible determinar el ancho de los hilos depositados en el relleno de la pieza y la dirección de las distintas capas en los ejes XY.

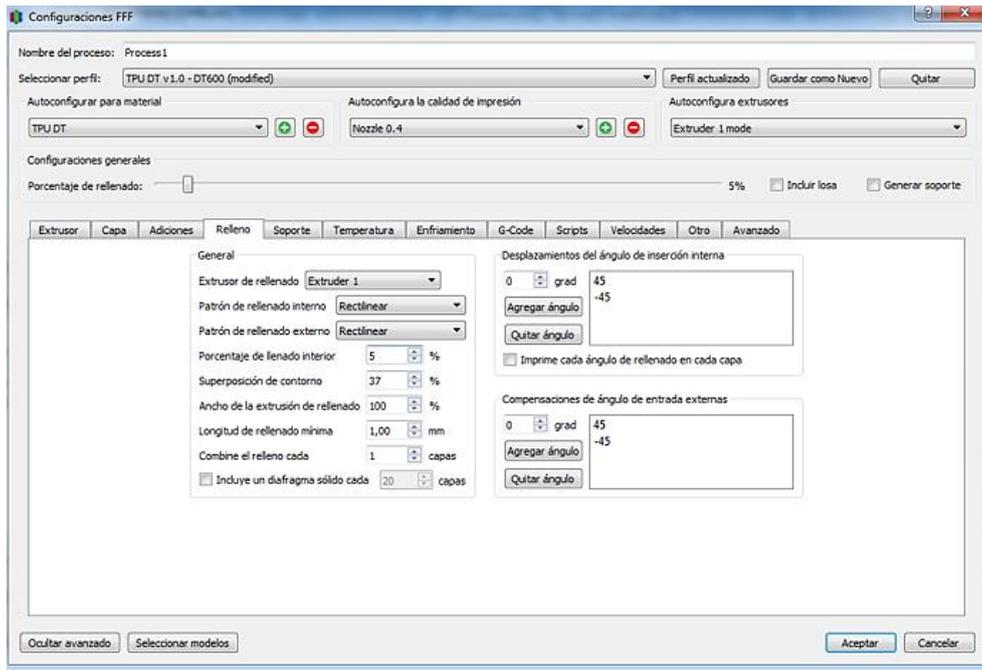


Figura 26. Configuración de relleno dentro de un proceso en Simplify3D

En la siguiente ventana se establecen las temperaturas de impresión alcanzadas por el extrusor o extrusores para la impresión, así como la temperatura de la cama y la cámara de trabajo en caso de que la impresora empleada disponga de ellas, como es el caso de la impresora empleada Dynamical Tools DT600.

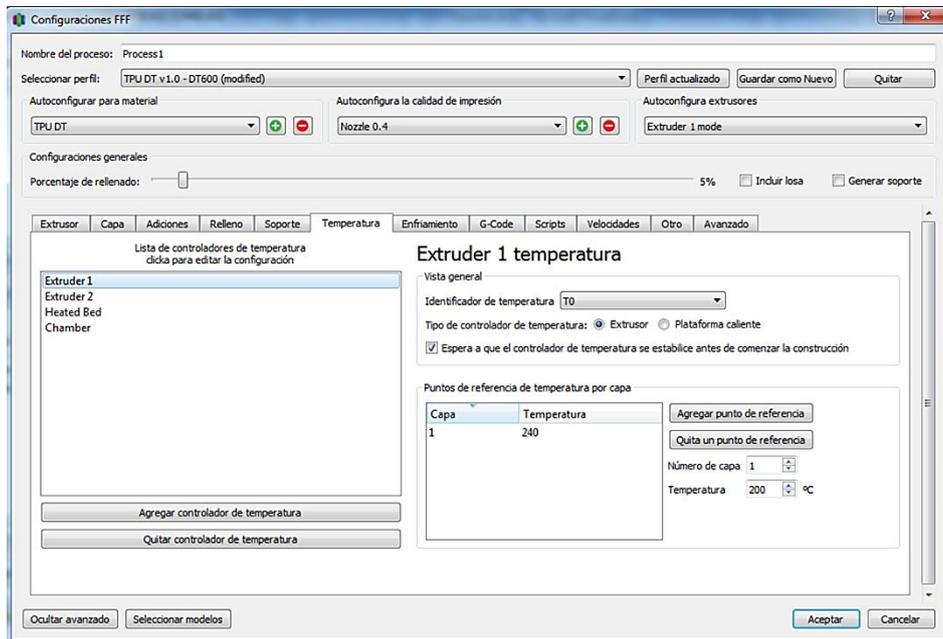


Figura 27. Configuración de temperatura dentro de un proceso en Simplify3D

La ventana que contiene los parámetros respecto a la velocidad de impresión resulta una de las más susceptibles de ser modificada a fin de obtener un mejor resultado final. Es posible establecer los valores de velocidad de impresión del conjunto de la pieza, pudiendo especificarse modificaciones para los contornos, los soportes o el relleno, además de la velocidad de los desplazamientos del extrusor.

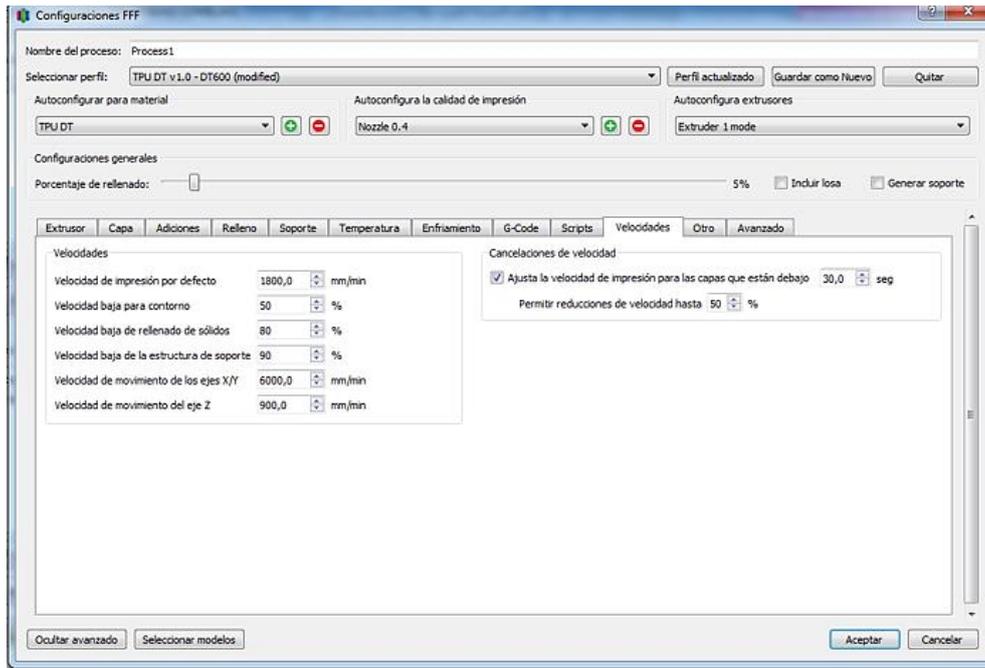


Figura 28. Configuración de velocidades dentro de un proceso en Simplify3D

Mencionarse que existen otras configuraciones adicionales avanzadas de carácter técnico cuyo estudio excede el alcance de este trabajo. Por tanto, como criterio común en los distintos casos de relleno estudiados se establece un numero de capas de contorno, superiores e inferiores igual a 3 así como un relleno interlineado que presenta por defecto una dirección de capas de 45º y -45º, considerando en cada material las recomendaciones de velocidad y temperatura del fabricante de los filamentos.

Establecidas las condiciones de impresión deseadas, Simplify3D permite un análisis de las mismas previo a la impresión. De este modo es posible conocer el tiempo y material requeridos, así como analizar capa a capa cada una de las piezas a imprimir. En la Figura 29. se muestra el relleno obtenido en las probetas de tracción impresas para los rellenos del 5%, 20%, 50% y 80% estudiados y las diferencias en la estructura interna existentes entre ellos.

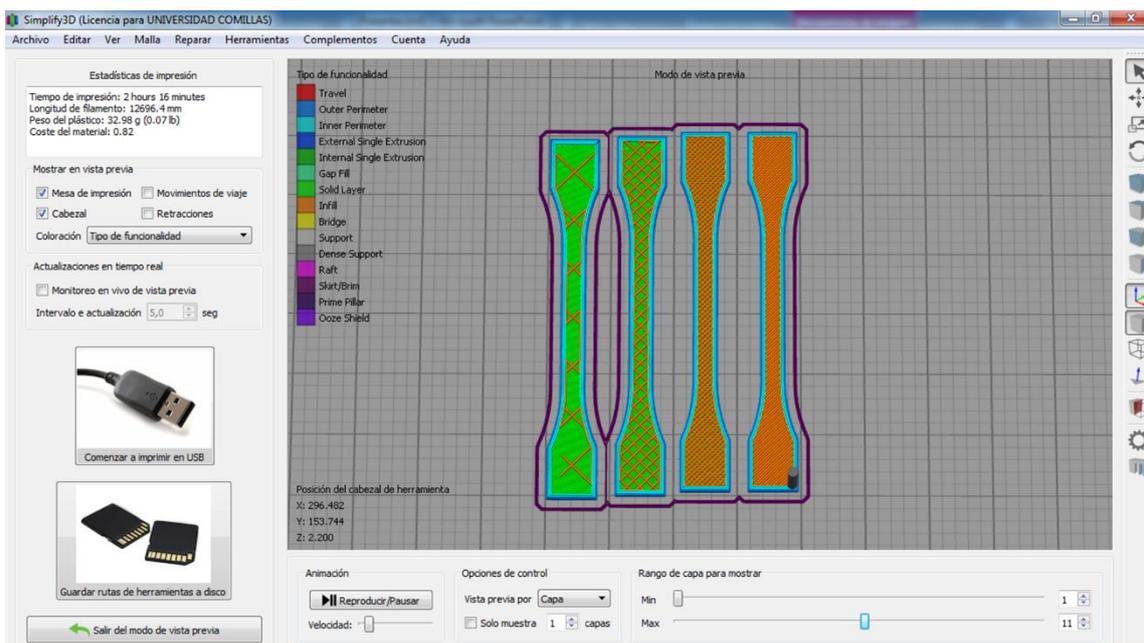


Figura 29. Estructura de relleno correspondiente a las distintas condiciones estudiadas

A continuación, se preparan los equipos para la impresión de las probetas empleando inicialmente la configuración sugerida por fabricante y proveedor. En las impresoras Prusa i3 MK3 empleadas para la fabricación de las probetas en TPE se emplea la configuración habitual establecida en la empresa y adaptada a este modelo en la que se incorporan las características de relleno y capa establecidas. En los equipos correspondientes al laboratorio de fabricación aditiva de la universidad al no haberse manejado con anterioridad estos materiales se carece de una configuración previa.

En la impresora DYNAMICAL TOOLS DT600, dentro del material proporcionado con la impresora se incluye una carpeta con las configuraciones preestablecidas para el manejo de materiales avanzados como PET, PLA con fibra de carbono o TPU. Partiendo pues de esta configuración en la que varían parámetros fundamentales, recomendándose una temperatura de 225 °C y una velocidad de impresión de 1800 mm/min, se realiza la impresión de un primer modelo sin modificar ninguno de estos. Antes de la finalización del mismo es necesario detener la impresión a causa de la formación de madejas de filamento que impiden la correcta deposición de las capas sucesivas.



Figura 30. Defectos en la impresión en DYNAMICAL TOOLS DT600

Tras consultar la guía de defectos habituales en la impresión de modelos mediante FDM se establece que las posibles causas de la falta de unión entre los hilos depositados pueden ser la falta de temperatura, el exceso de velocidad o una incorrecta distancia entre extrusor y superficie de impresión. Dado la sencillez y escasa repercusión en la fabricación del total de probetas, se modifica en primer lugar la temperatura que se aumenta 5 °C.

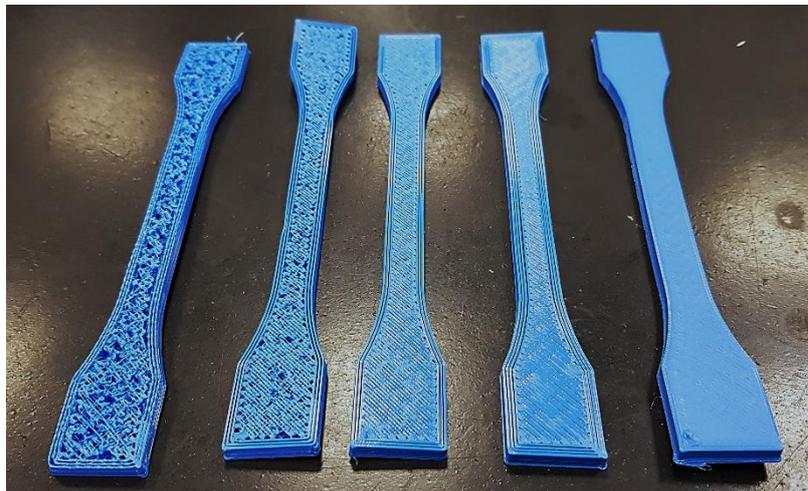


Figura 31. Configuración de la impresión en DYNAMICAL TOOLS DT600

La fabricación de un nuevo modelo tras el cambio permite su acabado siendo no obstante el acabado superficial no del todo satisfactorio especialmente en las capas inferiores. Por ello se realizan 2 modificaciones sucesivas adicionales; un incremento adicional de temperatura hasta los 235 °C y un leve ajuste de la altura entre extrusor y cama tras los cuales se obtienen los resultados deseados mostrados en la Figura 31. Por lo que se establece como configuración para la impresión de piezas en TPU para el trabajo.

En la impresora ZMORPH 2.0 SX el proceso de configuración comienza con el uso de los parámetros del fabricante ante los cuales no es posible que el material sea extruido provocando un atasco como se aprecia en la Figura 32. en el tornillo y engranajes responsables de impulsar el material.

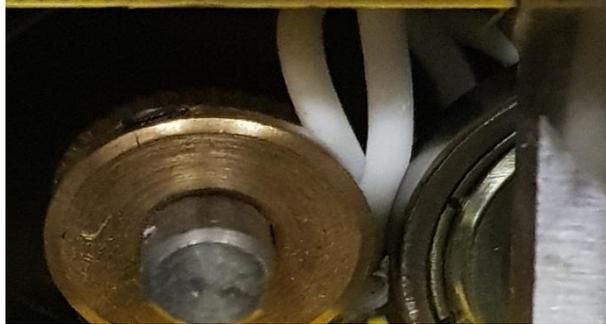


Figura 32. Atasco de material en el tornillo extrusor de la ZMORPH 2.0 SX

En vista de lo ocurrido anteriormente en la impresora DYNAMICAL TOOLS DT600, se procede a aumentar la temperatura de impresión a 235 °C y se imprime una pieza de escaso tamaño que permita verificar el correcto funcionamiento. La nueva configuración permite la impresión de las primeras capas del modelo, no obstante, durante la impresión, el filamento se desplaza de la zona dentada del engranaje de extrusión provocando nuevamente un atasco. Tras consultar las causas y soluciones de este fenómeno se establece la necesidad de añadir en la entrada del extrusor un conducto plástico como el de la Figura 33. que impida la flexión del filamento a la entrada del hotend, motivo por el cual se habían producido los atascos anteriores.

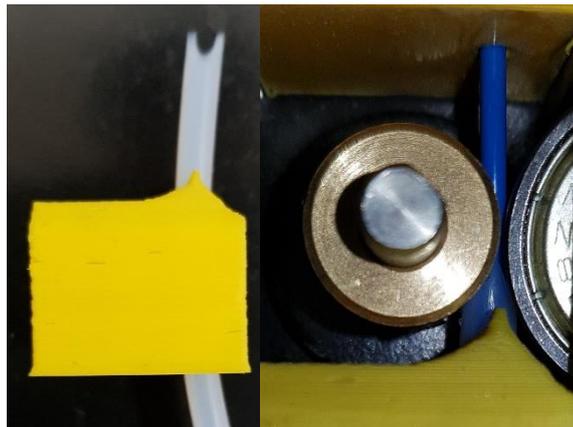


Figura 33. Modificación de extrusor de la ZMORPH 2.0 SX

Estas modificaciones permiten la impresión de piezas completas en TPU sin sufrir atascos, no obstante, el acabado superficial dista del deseado presentando números hilos. Estos hilos pueden deberse a un exceso de temperatura o velocidad y dado que la temperatura empleada es la mínima necesaria para fundir suficientemente el material debe modificarse la velocidad de impresión.

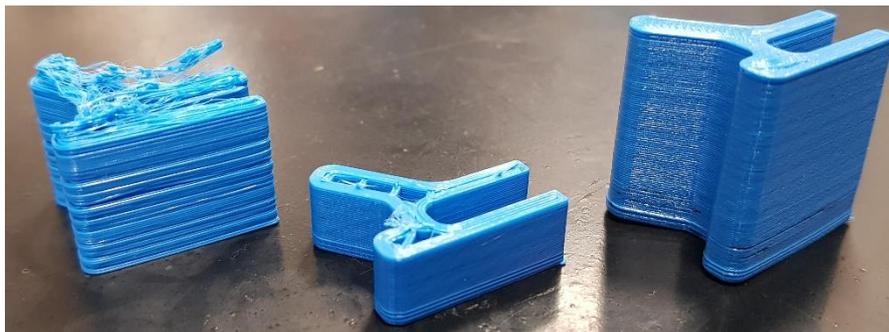


Figura 34. Acabado superficial para distintas velocidades de impresión de la ZMORPH 2.0 SX

En la impresión de las piezas sucesivas se reduce la velocidad hasta alcanzar un acabado correcto para una velocidad de 500 mm/min, menos de un tercio de la velocidad de impresión empleada en la DT600 y que supone un tiempo de fabricación medio por probeta de dos horas.

Debido a los excesivos tiempos de fabricación requeridos, la falta de idoneidad en el acabado superficial de las probetas y el riesgo existente de atascos que puedan provocar el desperdicio de material y tiempo, así como comprometer el funcionamiento de la impresora, se descarta el uso de este equipo para la fabricación de las probetas que se deriva en su totalidad a la impresora DYNAMICAL TOOLS DT600.

## 2. ENVEJECIMIENTO: PROCESOS Y EQUIPOS EMPLEADOS

Los distintos procesos de envejecimiento llevados a cabo se realizan conforme a la norma ISO 175 en la que se indican los métodos para determinar los efectos de la inmersión de plásticos en fluidos químicos.

Bajo la acción de un líquido, un material plástico puede verse sometido a varios efectos de manera simultánea. La absorción del líquido, la extracción de constituyentes solubles en este o posibles reacciones químicas producen en ocasiones cambios significativos en las propiedades de los plásticos.

El comportamiento que presenten los plásticos solo es posible determinarlo en condiciones previamente fijadas que permitan su comparación. Acorde a la normativa mencionada las probetas que se desean estudiar deben encontrarse plenamente sumergidas en unas condiciones de temperatura, tiempo y tipo de fluido controladas permanentemente.

Dada la gran aplicación de la fabricación aditiva de la industria automovilística, las buenas propiedades que presentan ambos materiales frente a abrasivos y aceites, se opta por emplear como fluido químico gasolina 98. Los principales materiales empleados en piezas para los sistemas de combustibles deben cumplir una serie de requisitos como no sufrir degradación en un plazo superior a diez años, ser estables dimensionalmente, retener sus propiedades mecánicas de forma que soporten cargas físicas y vibracionales y evitar la aparición de fisuras en presencia de distintos combustibles. Algunos de los plásticos empleados en la actualidad son las poliamidas, copolímeros y homopolímeros acetálicos, el polietileno de alta densidad, el poliuretano (TPU), el polibutilen tereftalato (PBT) o el Polietilen sulfona (PPS).

En lo referente a las condiciones de envejecimiento, la normativa empleada recomienda como temperaturas preferentes 23 °C y 70 °C, contemplándose la posibilidad de estudiarse los efectos de otras temperaturas en caso de que el material fuese a trabajar en ellas. Para este trabajo solo se estudian los efectos de la gasolina a una temperatura de 23 °C.

Con respecto a los periodos de inmersión la norma establece como periodos estándar 24 horas para estudios a corto plazo, 1 semana para estudios a medio plazo y 16 semanas para estudios a largo plazo. En caso de requerirse para estudios de evolución en el tiempo de distintos parámetros y la obtención de curvas, se contemplan periodos de inmersión adicionales. Dado el plazo disponible para la realización del trabajo se realizan los estudios a corto y medio plazo (24 horas y 1 semana) llevándose a cabo un periodo de inmersión adicional de 1 mes a fin de predecir de forma alguna el comportamiento a largo plazo.



Figura 35. Recipientes empleados para procesos de envejecimiento

Para la realización de los procesos de envejecimiento, las probetas se introducen en los recipientes mostrados en la Figura 35. que disponen de juntas en las tapas para evitar la evaporación de la gasolina y una etiqueta en la que se indica el tipo de probetas contenidas (material y condiciones de relleno), el periodo de inmersión llevado a cabo y la fecha de inicio del mismo. En algunas de las probetas de menor relleno no era posible su inmersión total debido a su baja densidad, lo que provocaba que flotasen. En estos casos fueron empleadas mallas con pesos para revertir el problema. De forma adicional, los recipientes se sitúan en una cámara con control de temperatura y extracción de aire para evitar la acumulación de vapores generados por la gasolina.

Durante el proceso de envejecimiento de 1 mes, debido a la evaporación de la gasolina y de acuerdo a la normativa, semanalmente se reemplazaba parcialmente la gasolina de los recipientes garantizando la inmersión total de las probetas.

Finalizado el periodo de envejecimiento, las probetas se secan, empleando para ello papel absorbente, y se introducen en bolsas de cierre hermético que contienen a su vez papel absorbente hasta el momento de su ensayo.

### 3. CARACTERIZACIÓN: PROCESOS Y EQUIPOS EMPLEADOS

Para analizar los efectos de la gasolina sobre las propiedades mecánicas establecidas como objeto de estudio para los materiales TPE y TPU se requiere hacer uso de equipos homologados que permiten realizar los ensayos acordes a la normativa empleada. Estos equipos deben proporcionar la información necesaria para el posterior análisis de los resultados, comparando los valores obtenidos en cada uno de los casos estudiados.

#### 3.1. ENSAYO DE DUREZA Y MASA

Para la realización de los ensayos de dureza llevados a cabo se han empleado el banco de pruebas BS-61 II para el montaje de comprobadores de dureza SHORE HP-A y HP-D analógicos y el durómetro Shore A pertenecientes al fabricante BAREISS.



Figura 36. Equipo para medición de dureza Shore A

El proceso de obtención de medidas seguido en cada una de las probetas ensayadas es el siguiente. Una vez se han secado los posibles restos de gasolina mediante papel absorbente, se dispone la probeta en el banco de pruebas, en el que previamente se ha conectado el durómetro, y se ajusta la altura hasta hacer contacto con la probeta. A continuación, se descubre el penetrador del durómetro cuyas dimensiones se indican en la norma ISO 868 y se procede con las mediciones. Para cada una de las probetas analizadas, en cada caso se realizan un total de 8 medidas, la mitad de ellas en cada una de las plantas de la probeta.

Cada una de estas medidas se realiza acorde al proceso indicado en la norma ISO 868, en puntos alejados más de 9 mm de los bordes se deja caer el pie de apoyo sin golpear la probeta y se esperan 15 segundos antes de la lectura, permitiendo en dicho tiempo que el valor de dureza indicado se haya estabilizado.



Figura 37. Balanza de precisión Cobos SJ-420CE Standard

Para determinar la masa de cada una de las probetas se emplea una balanza de precisión Cobos SJ-420CE Standard con capacidad de 2200 g y una precisión de 0,01 g.

### 3.2. ENSAYO DE TRACCIÓN Y FLEXIÓN

Para la realización de los ensayos de tracción y de flexión se ha empleado la Máquina universal de ensayos EUROTTEST ELIB20 con la célula de carga de 2kN empleando según correspondiese al ensayo realizado las mordazas de tracción o el puente de flexión. La configuración de los ensayos se realiza mediante software Win-test mostrado en la Figura 38. La interfaz del programa al iniciarse permite establecer el tipo de ensayo a realizar, la velocidad del mismo y las propiedades de las probetas empleadas. A su vez, si se accede al menú de opciones avanzadas es posible configurar aspectos específicos para los ensayos realizados como son la selección de extensómetros en caso de usarse o la modificación de la velocidad del ensayo al pasar de un comportamiento elástico a plástico de las probetas ensayadas.

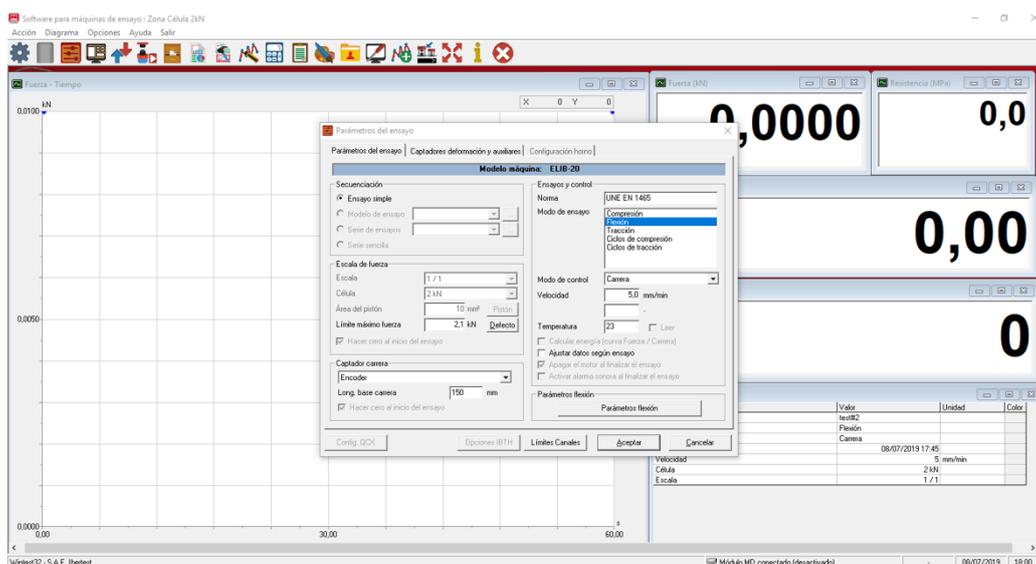


Figura 38. Software Win-test para la realización de ensayos a tracción y flexión

Durante los ensayos el programa proporciona en tiempo real la variación de parámetros de ensayo como el tiempo, la fuerza o la carrera que pueden ser representados gráficamente acorde a las preferencias del usuario.

La realización de los ensayos de tracción tiene lugar conforme a la norma ISO 527 correspondiente a la realización de ensayos de tracción en plásticos. El estudio de las probetas durante los ensayos de tracción consta de 2 partes, para cada uno de los casos estudiados se dispone de un total de 5 probetas; dado el alto alargamiento antes de rotura que presenta el material de partida, tanto el TPE como el TPU, no se dispone de extensómetros que puedan situarse en las probetas durante la totalidad del ensayo. Por este motivo, para cada caso se realiza el ensayo hasta rotura de 4 de las probetas en ausencia de extensómetro; en la probeta restante se realiza el ensayo dentro de los límites del extensómetro disponible que permite la obtención de un mayor número de datos.



Figura 39. Deformación de las probetas durante el ensayo y tras rotura

El ensayo de las probetas se realiza a una velocidad de 50 mm/min en todos los casos ya que estos materiales, como sucede con la mayoría de los polímeros, pueden sufrir pequeñas variaciones en sus propiedades en función de la velocidad a la que se realiza el ensayo. La disposición de las probetas en las mordazas se realiza garantizando la alineación de los ejes verticales de mordazas y probetas. A su vez se dispone en las mordazas los 35 mm de cada extremo, existiendo una distancia entre las mordazas igual a la longitud de la zona paralela estrecha de las probetas, aumentando la superficie de agarre. Esto permite un estudio de los resultados más preciso en aquellas probetas dado que reduce la posibilidad de que esta resbale y el tramo en la que tiene lugar el alargamiento presenta una sección constante, garantizando una deformación similar a lo largo del mismo.

El uso del extensómetro se debe principalmente a la necesidad de garantizar que las deformaciones medidas en los ensayos, obtenidas a partir de la carrera recorrida por las mordazas, permiten la obtención del módulo de Young con precisión en los casos estudiados sin extensómetro.



Figura 40. Extensómetro 3542-050M-050-ST

El extensómetro empleado es el mostrado en la Figura 40. que presenta una longitud inicial de 50 mm pudiendo medir deformaciones no superiores a 25 mm en un rango de temperaturas de -40°C a 100 °C.

Dado que durante el ensayo el programa proporciona los valores de fuerza y carrera medidos para cada instante es necesario la realización de los siguientes cálculos:

La tensión sobre área de la sección transversal de la probeta:

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

Ecuación 1. Cálculo de la tensión en ensayo de tracción

Siendo:

“ $\sigma$ ” la tensión en (MPa)

“F” la carga aplica en (N)

“A” la sección transversal de la probeta ( $\text{mm}^2$ ), en todos los casos estudiados se toma como  $40 \text{ mm}^2$

La deformación sobre la longitud base de la probeta:

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

**Ecuación 2. Cálculo de la deformación en ensayo de tracción**

Siendo:

“ $\varepsilon$ ” la deformación

“ $\Delta L$ ” la variación de longitud entre los puntos de referencia (mm)

“L” la longitud en cada instante entre los puntos de referencia (mm)

“ $L_0$ ” la longitud de referencia (mm), en ausencia de extensómetro se emplean 80 mm, en caso de usarse  $L_0$  tiene un valor de 50 mm.

El módulo de elasticidad se calcula como:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

**Ecuación 3. Cálculo del módulo de elasticidad en ensayo de tracción**

Siendo:

“E” el módulo de elasticidad en tracción (MPa)

“ $\sigma_1$ ” la tensión en (MPa) para  $\varepsilon_1=0,0005$

“ $\sigma_2$ ” la tensión en (MPa) para  $\varepsilon_2=0,0025$

Definidos estos parámetros, es posible estudiar la relación entre tensión y deformación que presentan los materiales estudiados en cada uno de los casos. Las posibles curvas que se obtiene por medio de este ensayo se corresponden con las mostradas en la Figura 41. cuyas formas dependen de la naturaleza y propiedades del material.

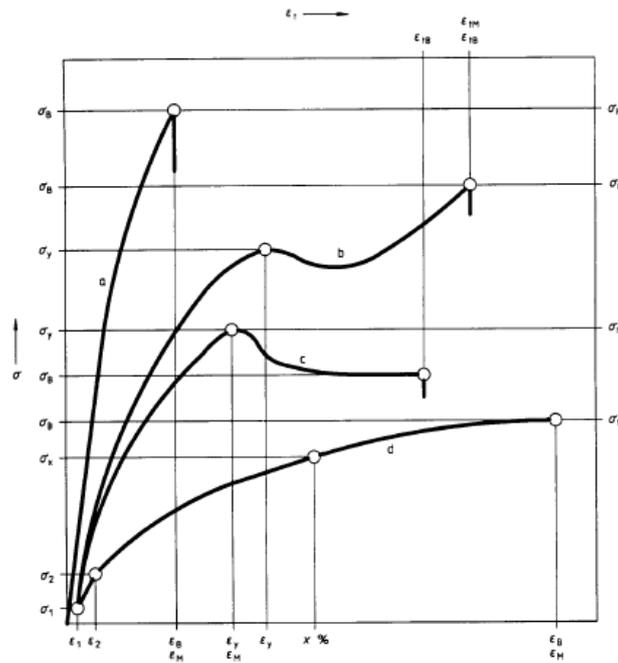


Figura 41. Curvas en ensayo de tracción

Siendo:

- Curva a      Materiales frágiles;
- Curvas b y c      Materiales dúctiles con punto de fluencia;
- Curva d      Materiales dúctiles sin punto de fluencia;

Los ensayos de flexión se realizan conforme a la norma ISO 178 empleando para ello el puente de flexión mostrado en la Figura 42. en el que se sitúa la probeta y se ejerce una fuerza a una velocidad constante de 5 mm/min. Durante el procedimiento se mide la fuerza aplicada, así como la flecha en el centro de la probeta.

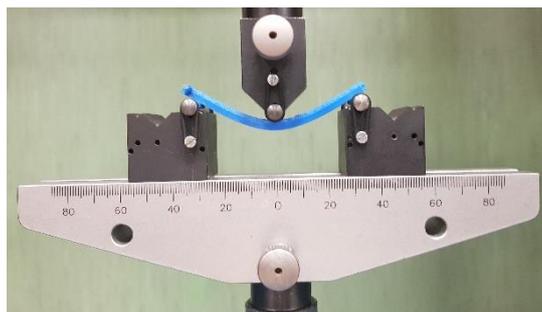


Figura 42. Puente para ensayo de flexión

La distancia entre los apoyos establecida es de 64 mm y se obtiene a partir de la ecuación:

$$L = (16 \pm 1)h$$

Ecuación 4. Cálculo de la distancia entre apoyos para ensayo a flexión

Siendo:

- “L” la distancia entre apoyos (mm)
- “h” la altura o espesor de la probeta empleada (mm)

Dada la alta elasticidad que presentan los materiales ensayados en ningún caso se alcanza la rotura por flexión, en su lugar, de la probeta comienza a deslizar sobre los puntos de apoyo. El ensayo se considera finalizado una vez se alcanza esta situación. Para la obtención de las gráficas de tensión-deformación a partir de los datos de fuerza y flecha es necesario realizar los siguientes cálculos:

El esfuerzo a flexión producido:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

**Ecuación 5. Cálculo del esfuerzo a flexión**

Siendo:

“ $\sigma_f$ ” el esfuerzo a flexión (MPa)

“ $F$ ” la fuerza aplicada (N)

“ $L$ ” la distancia entre soporte (mm)

“ $b$ ” el ancho de la probeta (mm)

“ $h$ ” el espesor de la probeta (mm)

La deformación provocada en la probeta:

$$\varepsilon_{fl} = \frac{6sh}{L^2}$$

**Ecuación 6. Cálculo de la deformación a flexión**

Siendo:

“ $\varepsilon_{fl}$ ” la deformación a flexión.

“ $s$ ” es la flecha máxima alcanzada por la probeta, puede tomarse como el desplazamiento del travesaño de la máquina de ensayos (mm).

El módulo de elasticidad se calcula como:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

**Ecuación 7. Cálculo del módulo de elasticidad en flexión**

Siendo:

“ $E$ ” el módulo de elasticidad en flexión (MPa)

“ $\sigma_1$ ” la tensión en (MPa) para  $\varepsilon_1=0,0005$

“ $\sigma_2$ ” la tensión en (MPa) para  $\varepsilon_2=0,0025$

A partir de los resultados de tensión y deformación obtenidos es posible la obtención de las gráficas. En la Figura 43. se muestran los distintos tipos de curva que pueden obtenerse al realizar el ensayo en materiales plásticos.

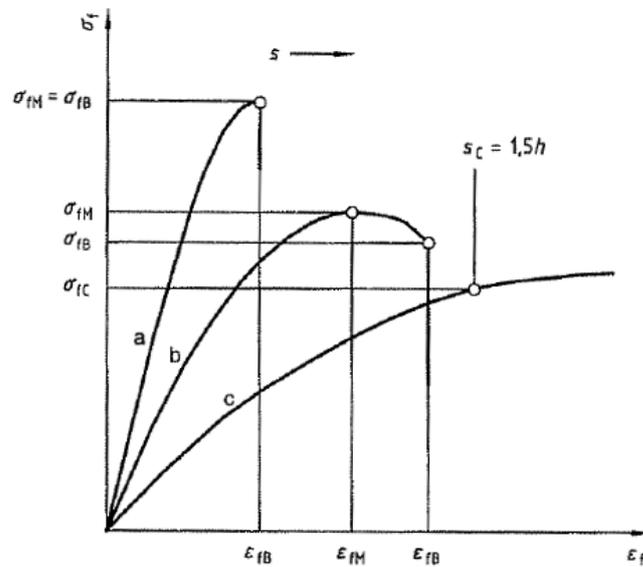


Figura 43. Curvas de ensayo a flexión

Siendo:

Curva a Probeta que rompe antes de la fluencia

Curva b Probeta que muestra un máximo y rompe antes de la flecha convencional

Curva c Probeta que no muestra un máximo ni rompe antes de la flecha convencional

Siendo la curva c la obtenida para los ensayos realizados en las distintas condiciones.

## IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis de los resultados se encuentra dividido en tres subapartados correspondientes a los ensayos realizados. En cada uno de estos apartados se estudiarán en los dos materiales empleados (TPU 98-A y TPE 70-A) en primer lugar y de manera comparativa las propiedades de uno y otro material a fin de determinar si poseen campos de aplicación similares. Posteriormente se estudia de forma individual el efecto del proceso de envejecimiento en gasolina 98 sobre las distintas propiedades anteriormente establecidas como objeto de estudio, mostrándose en cada uno de los casos el efecto del tiempo de exposición para las condiciones de relleno ensayadas.

### 1. RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE DUREZA Y PESO

De acuerdo a lo mencionado en el apartado “Caracterización: Procesos y equipos empleados” dado que los ensayos de dureza y estudio del peso son no destructivos el estudio de ambas propiedades se realiza empelando las mismas probetas siguiendo la metodología expuesta.

#### 1.1. RESULTADOS ENSAYO DE DUREZA

La realización de estos ensayos muestra la variación de la dureza de ambos materiales conforme a los distintos porcentajes de relleno empleados en su fabricación, así como el efecto provocado por la inmersión prolongada en gasolina 98 de este material. En la Figura 44. Se muestran los diferentes valores de dureza recogidos en ambos materiales, que como se puede apreciar distan mucho unos de otros.

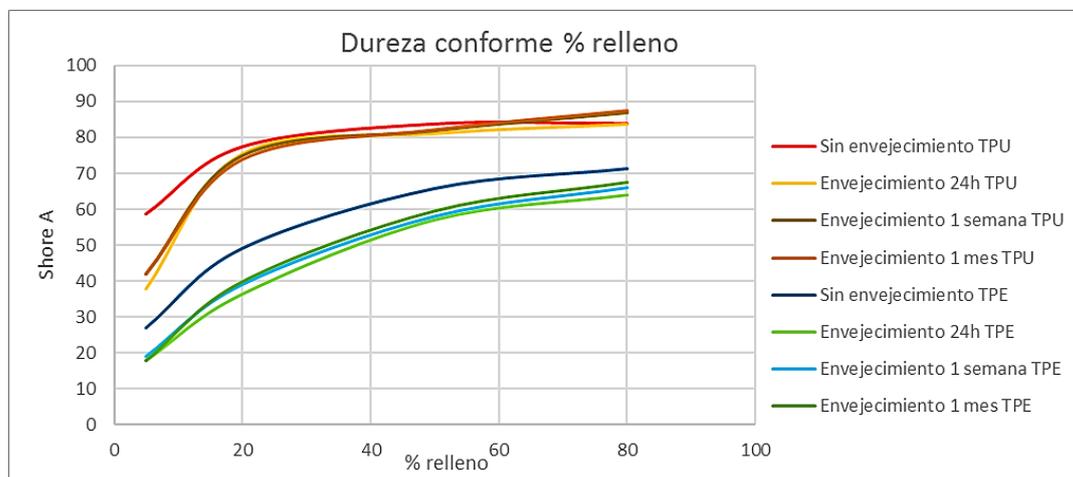


Figura 44. Comparativa de valores de dureza de TPU y TPE

Esto era de esperar pues acorde a las propiedades del material en filamento el TPU presenta una dureza de 98 Shore A mientras que el TPE presenta una dureza máxima de 71 Shore A. No obstante, resulta de interés comprobar si las piezas fabricadas pueden en algún caso presentar valores similares a los del material en forma de filamento. En el caso del TPU, tal y como se aprecia en la gráfica el valor máximo se alcanza con un 80% de relleno siendo el más alto estudiado y en cuyas condiciones se obtiene una dureza máxima de 85 Shore A que resulta bastante inferior con respecto a la mostrada por el filamento. Por el contrario, el TPE en estas mismas condiciones si presenta valores semejantes de dureza, en torno a 70 Shore A.

### 1.1.1. DUREZA DEL TPU 98-A

A continuación, se recogen en la Tabla 9. los valores de dureza promedios obtenidos para cada uno de los % de relleno estudiados y periodos de inmersión establecidos. Estos valores se han obtenido a partir de las mediciones llevadas a cabo y recogidas en el ANEXO 2: RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA

		Envejecimiento (días)			
		0	1	7	30
Relleno (%)	5	59	38	42	42
	20	77	75	75	74
	50	84	81	82	82
	80	84	84	87	87

o se encuentra el origen de la referencia..

Tabla 9. Dureza Shore A medida en TPU conforme % relleno y periodo de envejecimiento

En primer lugar, debe destacarse que las lecturas recogidas en una misma probeta presentan menor uniformidad cuanto menor es el porcentaje de relleno, obteniéndose mediciones que presentan una desviación superior al  $\pm 20\%$  del valor medio final, como en el caso de las probetas fabricadas con un relleno del 5%. La principal causa de este fenómeno es la existencia/ausencia de soportes internos en el punto donde se realizan las mediciones. En caso de existir en dicho punto material de relleno, este actúa como soporte y opone una resistencia que es detectada por el durómetro. Por el contrario, en aquellas mediciones realizadas en puntos que se encuentran en voladizo, son los puntos de anclaje de las fibras del material en los soportes próximos lo que desarrollan dicha resistencia, la cual resulta mucho menor. Al aumentar el porcentaje de relleno, las superficies en voladizo son cada vez menos y de menor tamaño lo que termina por mitigar este efecto y dando lugar a valores de dureza más homogéneos.

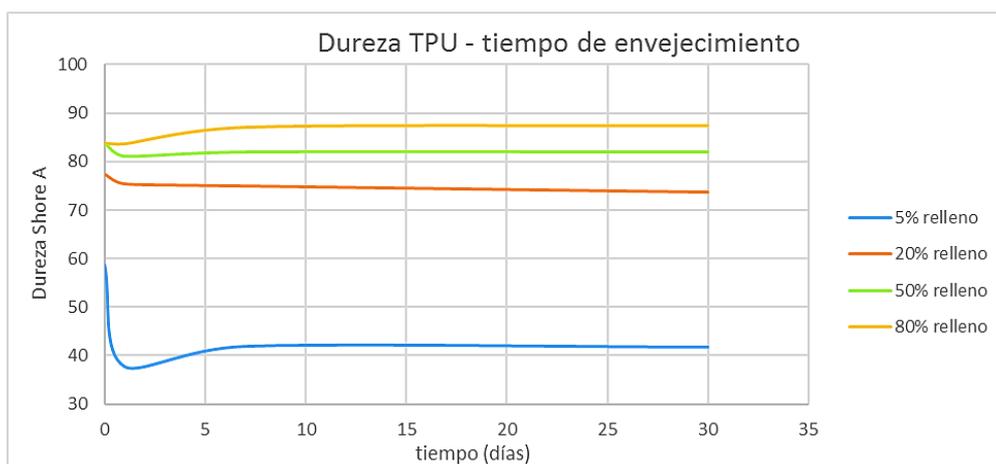


Figura 45. Dureza en TPU ante el tiempo de envejecimiento en las condiciones de relleno estudiadas

En la Figura 45. se aprecia el efecto que tiene sobre la dureza del TPU la presencia de gasolina. Inicialmente, antes de someterse a envejecimiento alguno, los valores de dureza material resultan muy similares para los rellenos iguales o superiores al 20% estudiados, siendo más acusada la diferencia con respecto a las probetas con un 5% de relleno.

Durante la realización de los ensayos se aprecia que, debido a la falta de soportes suficientes durante su fabricación, las probetas que poseen un 5% de relleno presentan una cohesión menor entre los hilos de

material que conforman las capas superiores, lo cual ha permitido que la gasolina se filtre al interior de las probetas empleadas. Debido a la penetración de la gasolina en el interior de las muestras, la interacción orgánica polímero-combustible tiene lugar en toda la probeta, afectando a las paredes interiores y los soportes además de la superficie exterior, como ocurre de forma exclusiva en las otras condiciones de relleno analizadas. Por este motivo, el efecto adverso de la gasolina sobre el poliuretano se aprecia con mayor facilidad en este caso tal y como se muestra en la gráfica.

Respecto a los periodos de envejecimiento establecidos, destaca una mayor reducción de la dureza en el transcurso de las primeras 24 horas, alcanzándose en esas condiciones los valores mínimos para las distintas condiciones de relleno. Esto se debe a la interacción de las cadenas que conforman el polímero con la gasolina, que en un principio hace suponer que provoca el deterioro de las mismas. Conforme aumenta el tiempo de exposición se observa que las probetas muestran unos valores de dureza cada vez más estables con variaciones muy pequeñas en el tiempo, encontrándose en algunos casos que con respecto a los valores medidos tras las primeras horas la dureza aumenta. Del mismo modo que a corto plazo se ha supuesto las cadenas de polímeros que conforman el poliuretano se rompen por la presencia de la gasolina, cabe la posibilidad que dichas cadenas se reagrupan o se generan nuevas cadenas a consecuencia de distintos procesos químicos que disminuyen o detienen la degradación progresiva del material.

### 1.1.2. DUREZA DEL TPE FILAFLEX ULTRASOFT 70-A

Siguiendo el mismo procedimiento, se han obtenido las medidas que se recogen en el ANEXO 2: RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA a partir de las cuales se han obtenido los valores promedio de dureza en este material para las distintas condiciones estudiadas.

		Envejecimiento (días)			
		0	1	7	30
Relleno (%)	5	27	18	19	18
	20	49	36	39	40
	50	66	57	58	60
	80	71	64	66	68

Tabla 10. Dureza Shore A medida en TPE conforme % relleno y periodo de envejecimiento

Observando los valores mostrados en la Tabla 10. dentro de un mismo periodo de envejecimiento el valor de la dureza aumenta de forma progresiva conforme al % de relleno que poseen las probetas sin apreciarse cambios repentinos. La dispersión de medidas obtenidas durante la realización de los ensayos ha sido similar a la observada en el TPU. Aquellas probetas que presentaban mayor relleno (80% y 50%) presentaban unos valores de dureza homogéneos, con desviaciones inferiores a  $\pm 5\%$  del valor medio final. No obstante, para las probetas estudiadas con un 5% de relleno se han obtenido medidas que presentan desviaciones de hasta un 50% respecto al valor medio obtenido. Dada la extrema flexibilidad que presenta este material y su alta capacidad de deformación, los valores de dureza obtenidos difieren en gran parte dependiendo del punto donde se realice la medición. Analizando las probetas con menor relleno estudiado, si la medida era tomada en un punto suficientemente interior, alejado de los soportes, la punta del durómetro llegaba a hacer contacto con la superficie de apoyo en la que se ubicaban las piezas durante el ensayo, dando lugar a lecturas no válidas.

El efecto de proceso de envejecimiento sobre el TPE en lo que a dureza se aprecia en la Figura 15. Es a corto plazo cuando el efecto de la gasolina sobre polímero es mayor, dando lugar a un descenso brusco en los valores de dureza medidos para cualquier condición de relleno.

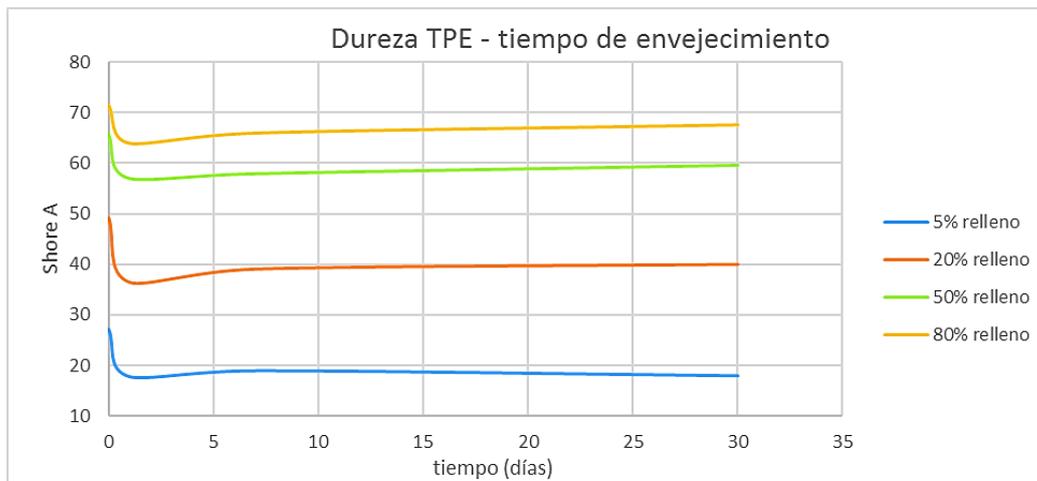


Figura 46. Dureza en TPE ante el tiempo de envejecimiento en las condiciones de relleno estudiadas

Posteriormente, conforme se prolonga la exposición, los valores de dureza recogidos son muy similares entre sí y con respecto a lo obtenido pasadas las primeras 24 horas, denotando cierta tendencia a estabilizarse, pudiendo variar la dureza en  $\pm 2$  Shore A. Con ello puede suponerse que la dureza de este material no variará de forma notable en caso de continuarse la exposición al producto empleado. En caso de que la hipótesis de la interacción entre los polímeros y la gasolina fuese acertada, al igual que sucede en el caso del TPU, el FILAFLEX ULTRASOFT 70-A es capaz, tras la degradación inicial, de crear nuevos enlaces que eviten un deterioro prolongado en el tiempo.

## 1.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA MASA

De forma paralela al ensayo de dureza, se ha estimado oportuno estudiar que efectos tiene sobre la masa de las probetas la inmersión en gasolina durante los distintos periodos establecidos. Para realizar dicha comparación se tienen en cuenta el peso teórico que deben presentar las probetas, el cual es proporcionado por el software SIMPLIFY3D empleado para la impresión de las mismas.

### 1.2.1. MASA TPU 98-A

A continuación, se recogen en la Tabla 11. los valores de dureza correspondientes a las probetas fabricadas en TPU para las distintas condiciones de relleno y envejecimiento.

		Envejecimiento (días)				
		Teórico	0	1	7	30
Relleno (%)	5	11,55	10,69	10,42	10,82	10,69
	20	15,27	13,18	12,95	13,55	14,69
	50	22,69	20,84	21,36	21,98	23,16
	80	30,05	25,79	26,25	26,57	27,30

Tabla 11. Masa de probetas para ensayo dureza de TPU conforme % relleno y periodo de envejecimiento

En primer lugar, se aprecia que la masa que presentan las probetas fabricadas resulta ligeramente menor que lo establecido teóricamente por el programa. No obstante, la diferencia es mínima y condiciona de manera alguna los resultados. Al comparar las variaciones de la masa tras un envejecimiento de 24 horas se dan dos circunstancias: en las probetas que presentan un relleno del 5% y 20% se produce un descenso de la misma. Por el contrario, aquellas fabricadas con mayor relleno (50% y 80%) experimentan un aumento en la masa. Cabe mencionar nuevamente que las probetas correspondientes a las dos configuraciones de relleno más bajas, al ser extraídas del recipiente donde se llevaba a cabo el proceso de envejecimiento contenían en su interior cierta cantidad de gasolina que se había filtrado. Para los procesos de envejecimiento posteriores, todas las probetas estudiadas experimentan un aumento de la masa progresivo.

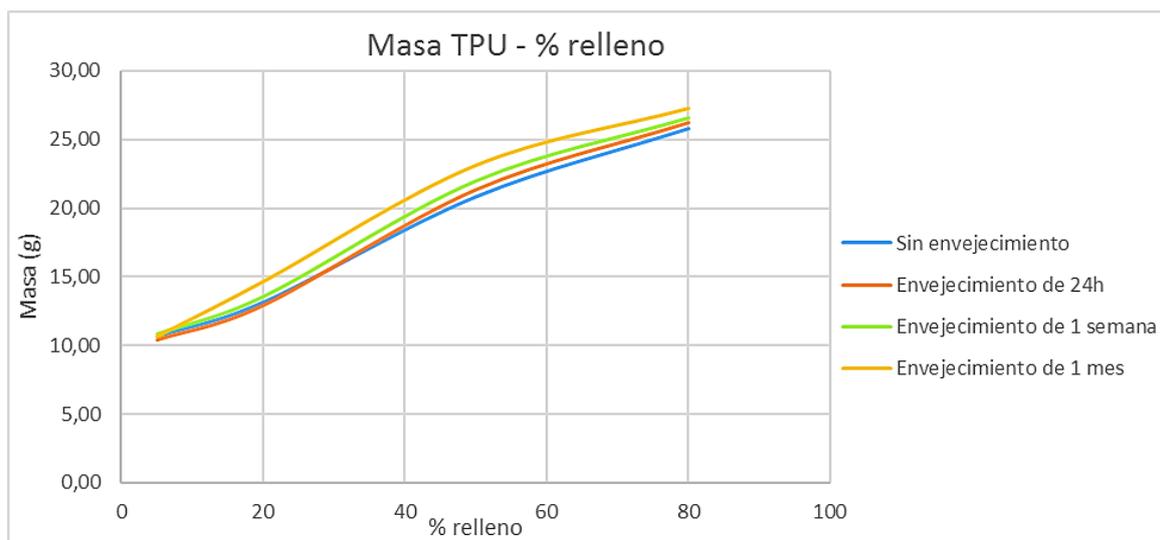


Figura 47. Masa de TPU ante el tiempo de envejecimiento para distinto % de relleno

Este efecto es analizado en la Figura 47. Masa de TPU ante el tiempo de envejecimiento para distinto % de relleno donde se analiza el comportamiento de la masa para las diferentes condiciones de relleno que se pueden establecer. Puede que la pérdida de masa en el poliuretano se produce para porcentajes de relleno inferiores al 30%. En estas condiciones, la porosidad de las piezas es suficiente para que el fluido en el que se encuentra inmerso penetre en el interior y afecte a la totalidad de la estructura de la pieza. En condiciones de relleno superiores este efecto es cada vez menor al asemejarse la pieza conforme aumenta el relleno a un elemento sólido macizo. Retomando la hipótesis expuesta en el Resultados ensayo de dureza, la rotura de las cadenas de polímeros por acción de la gasolina justificaría la pérdida de masa que se aprecia en las primeras horas de exposición. Del mismo modo, la adhesión de nuevas cadenas a causa de la gasolina junto a las pequeñas filtraciones en las piezas explicaría el aumento de la masa y la dureza a medida que la exposición se prolonga.

### 1.2.2. MASA TPE FILAFLEX ULTRASOFT 70-A

Los datos mostrados en corresponden a los valores de la masa obtenidos de las probetas destinadas a medir la dureza del TPE para las condiciones de relleno y envejecimiento establecidas. Del mismo modo en que sucedía al contrastar los pesos teóricos y medidos tras fabricar las probetas, existen ligeras diferencias que de cara a la cuestión estudiada no resultan condicionantes.

		Envejecimiento (días)				
		Teórico	0	1	7	30
Relleno (%)	5	10,14	10,32	13,64	14,19	14,64
	20	13,41	12,67	15,55	18,55	18,78
	50	19,92	20,11	22,84	26,26	27,50
	80	26,39	24,84	28,37	32,57	33,63

Tabla 12. Masa de probetas para ensayo dureza de TPE conforme % relleno y periodo de envejecimiento

Tras las primeras 24 horas de envejecimiento los resultados obtenidos difieren de los obtenidos en el TPU. En todas las condiciones analizadas, la masa de las probetas muestra un incremento conforme aumenta el periodo de exposición a la gasolina. Dicha tendencia de las probetas de TPE se muestra en la Figura 48. **Masa de TPU ante el tiempo de envejecimiento para distinto % de relleno** en la que se aprecia como esta variación se produce en gran medida durante la primera semana en presencia de la gasolina. transcurridas las primeras 24 horas, la masa de las distintas probetas se ve aumentada alrededor de un 20% del peso original y tras un periodo de 7 días, se obtienen unos pesos 1,4 veces mayores que los medidos en las probetas inmediatamente después de su fabricación.

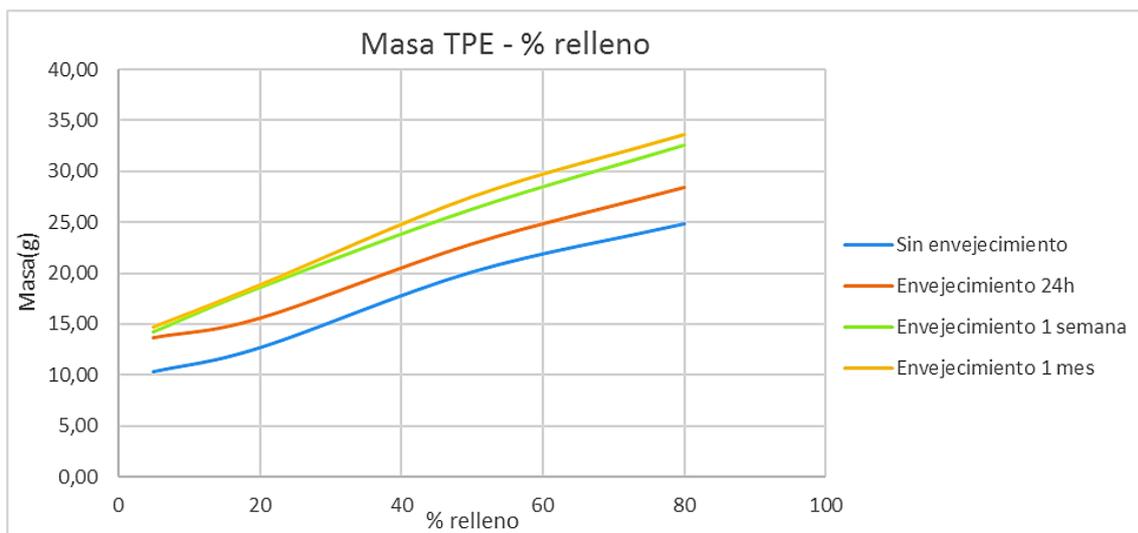


Figura 48. Masa de TPU ante el tiempo de envejecimiento para distinto % de relleno

Posteriormente, como puede apreciarse en los datos correspondientes a un periodo de envejecimiento de un mes, esta tendencia parece desaparecer, aumentando cada vez el peso de las probetas en menor medida hasta alcanzarse, como es de suponer, un valor máximo. Dado que esta tendencia tiene lugar para todas las condiciones de fabricación estudiadas, resulta factible la posibilidad que esta variación de la masa es debida, en primer lugar, a la gran capacidad absorción del material ante este reactivo, y posteriormente, a la interacción química que tiene lugar entre ambos, cuyos efectos pueden ser apreciados en la variación de algunas de sus propiedades mecánicas, como es en el caso de la dureza.

## 2. RESULTADO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

Mediante la realización de los ensayos de tracción se obtienen las curvas tensión-deformación mostradas en el ANEXO 3: RESULTADOS DE ENSAYO DE TRACCIÓN correspondiente a las probetas fabricadas para cada una de las condiciones de relleno y tiempo de envejecimiento estudiadas. En cada uno de los casos analizados se emplearon un total de 5 probetas, de las cuales se obtuvo la curva tensión-deformación en 4 de ellas, empleando la probeta restante para obtener el módulo de Young. Esto es debido a que la capacidad de deformación del material excede la máxima deformación que puede ser medida con los extensómetros disponibles en el laboratorio, por lo que no puede disponerse de estos para la obtención de la curva completa.



Figura 49. Comportamiento de probetas por fabricación aditiva frente a un material dúctil

En la realización de los ensayos de tracción con materiales dúctiles las curvas obtenidas se asemejan a la mostrada en la Figura 49. reflejándose el punto de rotura de la probeta en la gráfica como un escalón ante el cual se detiene el ensayo al dejarse de detectar fuerzas de oposición al desplazamiento de las mordazas. Pese a que ambos materiales empleados presentan un comportamiento dúctil, la forma en que se han fabricado afecta a las curvas de tensión-deformación generadas durante los ensayos.

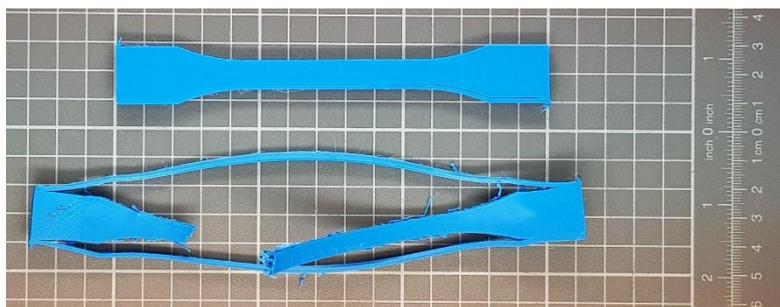


Figura 50. Rotura incompleta de probeta tras ensayo a tracción

En algunos casos, la rotura de la probeta no se produce de forma absoluta, como se aprecia en la Figura 50. el fallo se produce de forma sucesiva en las diversas capas que componen la probeta dando lugar a los escalonamientos mostrados en la gráfica anterior. Ante esta situación, se considera la rotura de la probeta en el instante en que se produce el primer salto en la gráfica generada durante el ensayo.

Durante la realización de los ensayos solo fue posible alcanzar el punto de rotura en las probetas fabricadas en TPU pudiéndose apreciar con mayor claridad el comportamiento que presenta este material para los distintos rellenos. Las probetas de TPE presenta durante el ensayo una capacidad de deformación superior a la carrera del equipo empleado por lo que el ensayo se considera finalizado cuando el indicador

de carrera supera los 550 mm, o como sucede en algunos casos, el desprendimiento de entre las mordazas de la probeta debido a la deformación transversal sufrida. Por este motivo, en los ensayos realizados a las probetas de TPE no es posible determinar la tensión de rotura y la deformación a rotura, pudiéndose comprara exclusivamente las tensiones y deformaciones máximas producidas durante los ensayos recogidas en el ANEXO 3: ENSAYO DE TRACCIÓN EN TPE.



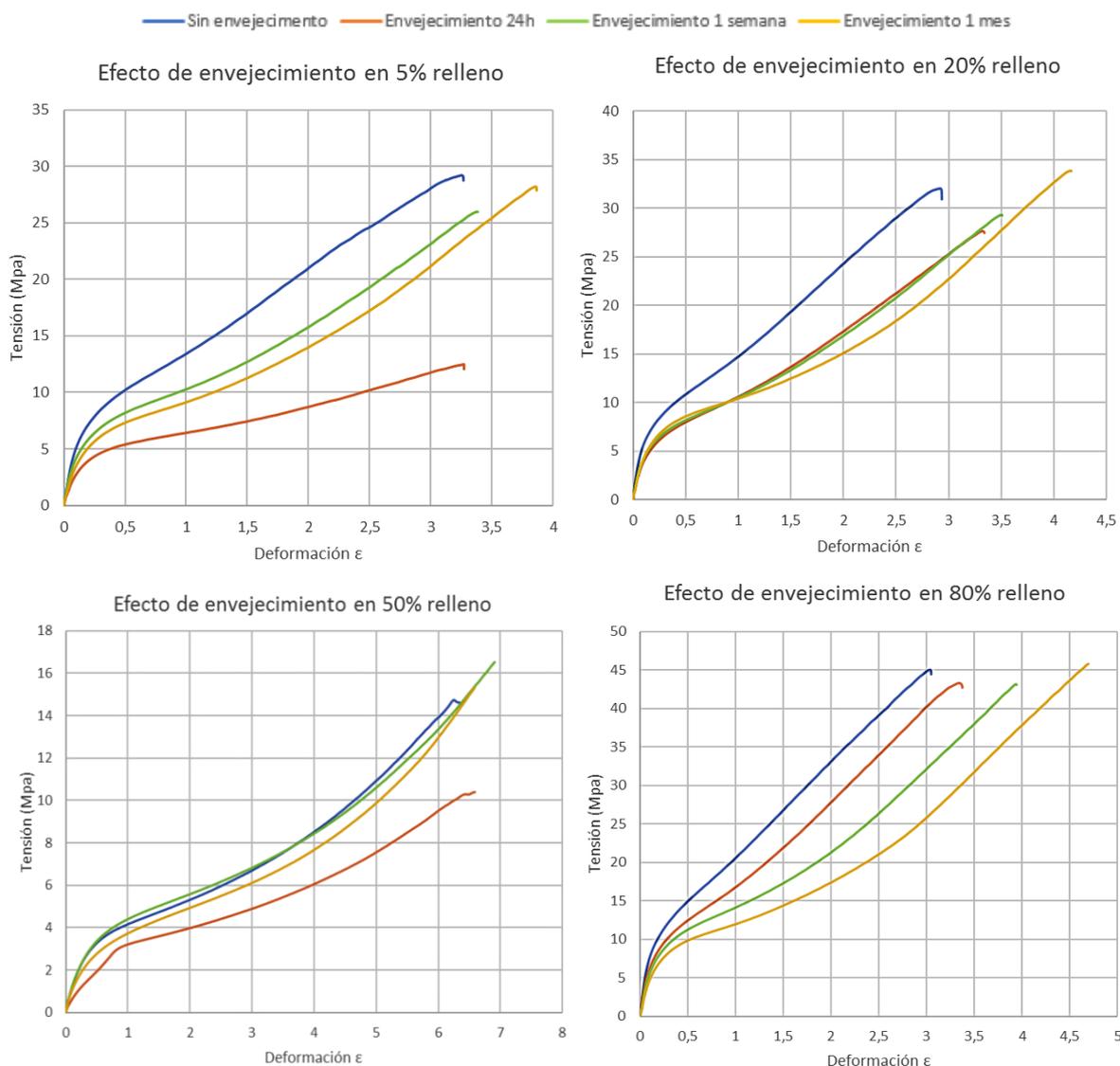
Figura 51. Ensayo de tracción TPU y TPE en condiciones estándar

En relación a los resultados mostrados en la Figura 51. se puede apreciar como en ambos materiales cuanto mayor es el % relleno de las probetas es posible alcanzar valores de tensión mayores antes de que se produzca la rotura. Las tensiones máximas soportadas por ambos materiales son muy distintas entre sí, siendo muy superiores las mostradas por el TPU para cualquier condición de relleno. En relación a la deformación máxima obtenidas, el TPE alcanza en las distintas condiciones de fabricación aproximadamente un 700% de alargamiento antes de detener el ensayo, lo que sugiere que tras el proceso de fabricación el material presenta similar capacidad de deformación al filamento de origen, que posee un 900% de alargamiento a rotura. En las probetas de TPU ensayadas dado que se alcanza el punto de rotura, es posible analizar de manera más detallada el comportamiento del material conforme varía el % de relleno de las muestras ensayadas.

La tendencia inicial refleja que conforme el volumen de material en el interior de la probeta aumenta, el área efectiva de material que soporta las fuerzas es mayor por lo que es posible que soporte fuerzas superiores, produciéndose en su defecto una disminución de la capacidad de deformación. Esta disminución es debida a la capacidad de orientación de las fibras en la dirección de la fuerza; en condiciones de relleno del 5%, las fibras que componen el relleno disponen de una amplia movilidad debido a gran distancia que existe entre ellas permitiendo una mayor facilidad para orientarse y deformarse en dirección axial a la fuerza. Conforme aumenta el % de relleno, las superficies de unión entre las fibras son cada vez mayores dando lugar a diversas fuerzas internas durante el desarrollo del ensayo. A consecuencia de dichas tensiones internas, la capacidad de orientación y deformación de las fibras que componen la pieza se ve reducida, dando lugar a una deformación final total menor. Es pues relevante que, en contra de esta tendencia, las probetas que presentan un relleno del 80% presenten una deformación mayor a aquellas con un relleno del 20% y el 50% y semejante a aquellos con un relleno mínimo. Esto es debido a la unión entre las distintas fibras que se encuentran en el interior de la pieza, la cual se produce en prácticamente la totalidad de su superficie. Consecuencia de ello es el comportamiento de la probeta como una única fibra que posee unas tensiones internas despreciables y permite por tanto una mayor deformación axial antes de la rotura.

## 2.1. RESULTADOS DE TRACCIÓN EN TPU 98-A

A continuación, se exponen las curvas de tensión-deformación obtenidas en cada una de las condiciones de relleno en que han sido fabricadas las probetas, estudiando en cada uno de los casos el efecto de los distintos periodos de envejecimiento estudiados.



**Figura 52. Ensayo de tracción TPU para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento**

Tras los distintos periodos de exposición a gasolina, las probetas de TPU ensayadas presentan un desplazamiento a la derecha de la curva con respecto a aquellas obtenidas en ausencia de envejecimiento en las distintas condiciones de relleno estudiadas. Transcurridas las primeras 24 horas, se aprecia en la

Figura 52. que, a la par que se produce el aumento de la deformación, la tensión de rotura que presentan las probetas resulta menor y esta diferencia es más acusada cuanto menor es el relleno de las mismas. La interacción de la gasolina con las cadenas del polímero parece indicar una rotura o degradación de estas, permitiendo apreciarse a través del ensayo de tracción la pérdida de propiedades mecánicas del material, obteniéndose en este caso una menor resistencia y una mayor deformabilidad.

Conforme aumenta el periodo de exposición, las probetas presentan una mayor deformación, no obstante, a diferencia de como sucedía durante la exposición a corto plazo, la resistencia a rotura que presentan las probetas se encuentra en valores similares a los obtenidos de manera previa al proceso de envejecimiento.

Con respecto a la resistencia a tracción medida en cada uno de los casos estudiados y tomándose como referencia las presentadas por el material en filamento, se aprecia una reducción considerable para todo ellos, más acusada cuanto menor es el % de relleno empleado.



Figura 53. Detalle de la superficie de probeta TPU con un 5% de relleno

La causa debida a la cual este efecto es apreciable en mayor medida cuanto menor es el relleno que presentan las probetas es el mencionado al analizar los resultados de dureza obtenidos. Las probetas con relleno del 5% poseen en ocasiones orificios y aberturas (como se aprecia en la Figura 53. ) que permiten la infiltración de la gasolina en la probeta afectando no solo a las capas más exteriores, como en el caso de las probetas que poseen un 80% de relleno, sino deteriorando a su vez la estructura interior.

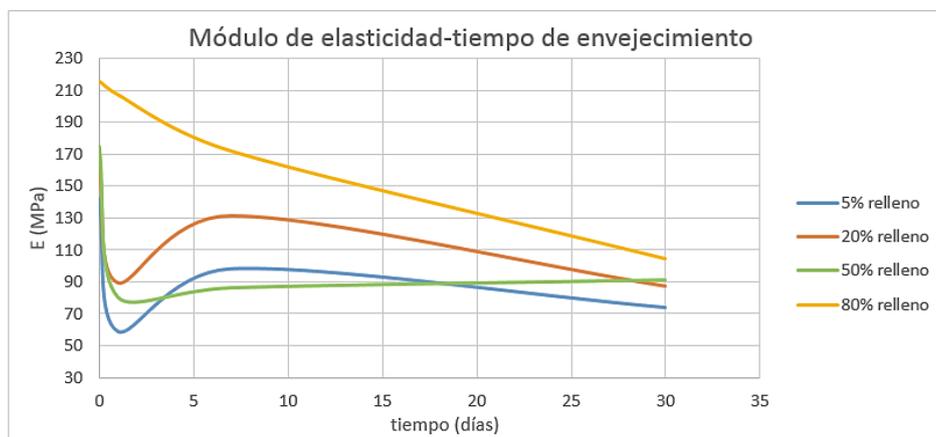


Figura 54. Módulo de elasticidad del TPU para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento

Con respecto a los valores medidos para el módulo de elasticidad en las distintas condiciones estudiadas se observa; en primer lugar, una disminución drástica con respecto al que presenta el filamento (444 MPa) que, en condiciones previas al proceso de envejecimiento, para el 80% de relleno se alcanza su máximo en 215 MPa.

El efecto de sumergir las probetas en gasolina da lugar a una reducción constante del módulo de elasticidad en los distintos rellenos estudiados que no se estabiliza dentro del periodo estudiado. De forma similar a como sucede en las propiedades anteriormente estudiadas, es en las primeras 24 horas de exposición cuando el efecto de la gasolina es más acusado, provocando como se aprecia en la Figura 54. un salto más abrupto cuanto menor es el relleno que presentan las probetas. Posteriormente tiene lugar una leve recuperación que precede a una disminución progresiva del módulo de elasticidad conforme aumenta el periodo de exposición a la gasolina. El estudio a largo plazo permitiría apreciar el tiempo durante el que se prolonga este efecto, así como los valores finales alcanzados.

El alargamiento a rotura que presentan las probetas estudiadas en los distintos casos y se recoge en la Tabla 13 se encuentra relacionado con la deformación sufrida durante la realización de los ensayos. Observándose las gráficas obtenidas correspondientes a la

Figura 52. se aprecia como la parte de la curva correspondiente a la deformación elástica apenas sufre variación alguna tras los diversos periodos de envejecimiento. Es, por tanto, que dado que las deformaciones alcanzadas son mayores conforme aumenta la exposición y dichas deformaciones son plásticas, los valores de alargamiento a rotura obtenidos aumentarían de forma equivalente. Destaca particularmente el caso de las probetas que contienen un 5% de relleno, las cuales presentan, a diferencia de los otros casos estudiados, el mayor valor de alargamiento a rotura transcurrido un periodo de envejecimiento de 24 horas sin alcanzarse en dicho tiempo la máxima deformación medida.

**Tabla 13. Alargamiento a rotura (%) de TPU conforme relleno y periodo de envejecimiento**

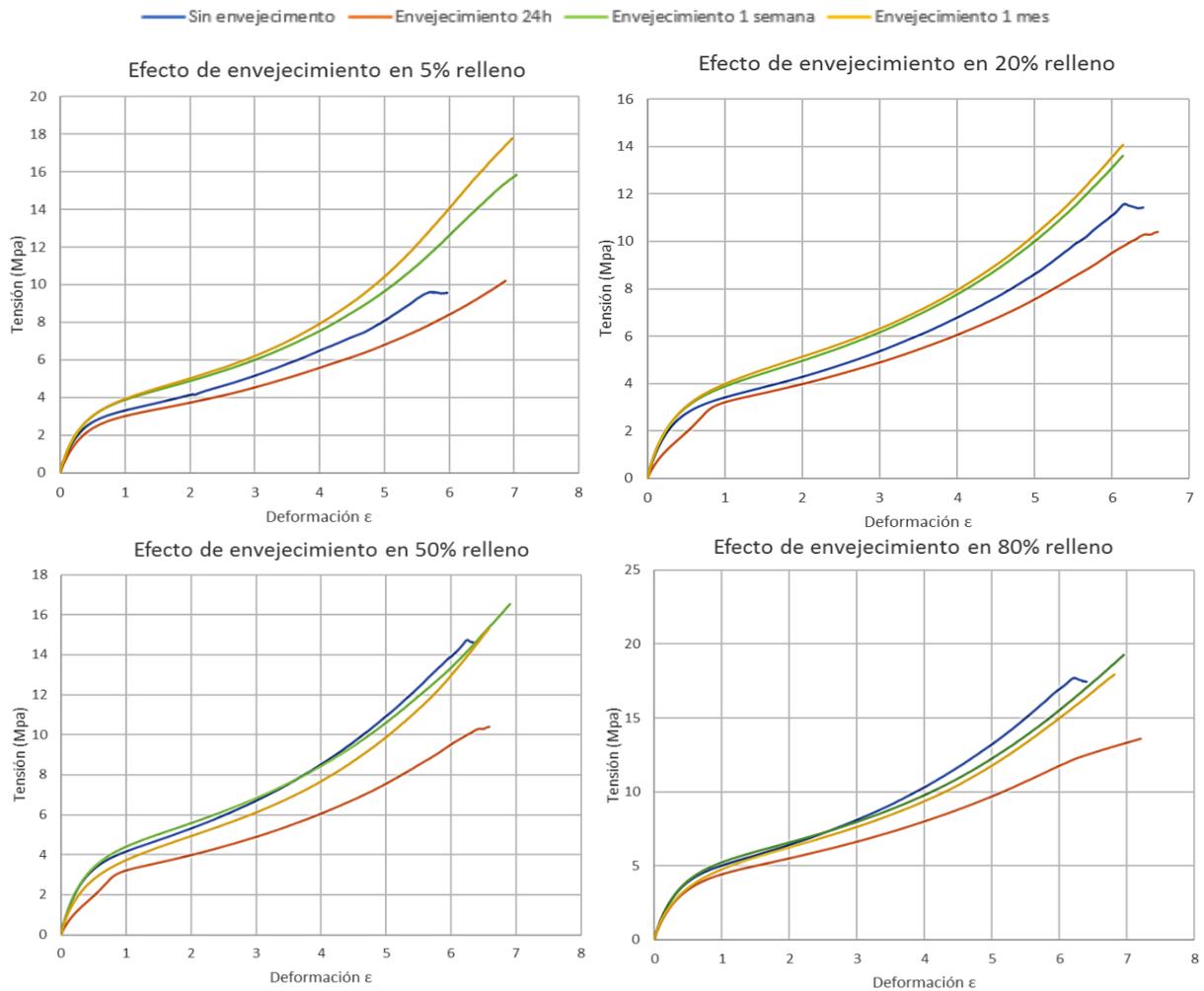
La posible reagrupación y formación de cadenas del polímero a consecuencia de las reacciones químicas que tienen lugar por acción de la gasolina parecen nuevamente plausibles. Este suceso permitiría un refortalecimiento de las estructuras de las probetas que anteriormente se habían visto dañadas provocando una recuperación de las propiedades que presentaban originalmente.

## **2.2. RESULTADOS DE TRACCIÓN EN TPE FILAFLEX ULTRASOFT 70-A**

En las gráficas mostradas a continuación se recogen los resultados obtenidos en los distintos porcentajes de relleno los efectos provocados por la inmersión de las probetas de este material durante los periodos de envejecimiento establecidos. Debe destacarse que durante la realización de los ensayos no ha sido posible alcanzar el punto de rotura del material activándose durante los ensayos la alerta de seguridad de límite de carrera del equipo empleado. Los ensayos recogen pues los datos obtenidos hasta alcanzar dicho punto.

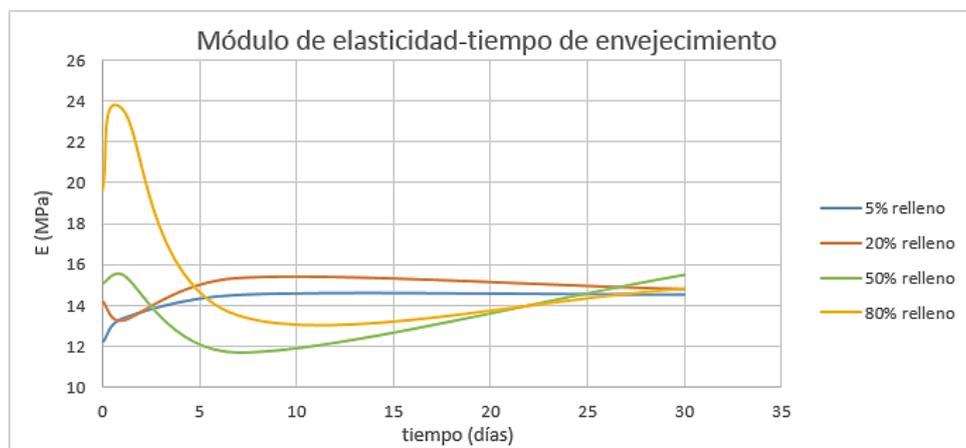
El comportamiento mostrado por el TPE difiere de lo visto anteriormente en el TPU para los distintos periodos de inmersión. Los resultados obtenidos tras un envejecimiento de 24 horas muestran un deterioro de las probetas, que presentan para los distintos rellenos estudiados una reducción de la tensión máxima registrable de hasta un 40%. De forma contraria a como sucede en el poliuretano-98A, esta disminución es mayor conforme aumenta el % de relleno de las probetas ensayadas.

Analizando los periodos de envejecimiento posteriores se aprecia en este caso una tendencia similar a la vista en las probetas de TPU, los valores de tensión máxima aumentan, alcanzándose los valores obtenidos en las condiciones previas a envejecimiento para los rellenos del 50% y el 80%. Resulta novedoso que en los casos con rellenos del 5% y 20% las tensiones máximas registradas tras un periodo de inmersión de 1 semana supera los valores mostrados antes de exposición, y pasado un periodo de envejecimiento de 1 mes este valor continúa aumentando.



**Figura 55. Ensayo de tracción TPE para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento**

La interacción entre la gasolina y el polímero sugiere que el proceso que tiene lugar en el TPU se replica en el TPE a una mayor velocidad; durante las primeras 24 horas la degradación y rotura de cadenas tiene lugar para posteriormente dar lugar a la reagrupación de cadenas y aparición de nuevos enlaces que otorgan al material una mayor resistencia. De este modo aquellas probetas de menor relleno, por las que se infiltra la gasolina con mayor facilidad, para un mismo periodo de inmersión se encuentran en un estado más avanzado de este proceso y, por el contrario, aquellas más macizas a causa del mayor % de relleno presentan un estado anterior en el proceso de recuperación.



**Figura 56. Módulo de elasticidad del TPE para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento**

La evolución observada en los valores del módulo de elasticidad en las probetas fabricadas en TPE diverge en gran medida con lo observado en el TPU98-A. Tras la impresión, las probetas presentan valores de en torno a un 50% del indicado por el fabricante en el filamento, existiendo gran semejanza entre las distintas condiciones de relleno, a excepción de aquellas con un 80%, que divergen en mayor medida.

Al proceder con los procesos de envejecimiento pueden apreciarse distintos efectos a medida que aumenta el periodo de exposición. Tras la exposición durante 24 el módulo de elasticidad aumenta para los distintos rellenos, notándose un salto mayor para los rellenos del 50% y 80%. Transcurrido este periodo y conforme aumenta el tiempo de exposición tienen lugar dos situaciones distintas: aquellas probetas con rellenos del 5% y 20% muestran un aumento progresivo en el valor del módulo de elasticidad, que tras un envejecimiento de 1 mes parece estabilizarse en valores muy similares a los observados antes de someterse a envejecimiento. La curva descrita para los rellenos del 50% y 80% es algo distinta; tras el gran aumento visto al trascurso de un día tiene lugar un descenso igualmente brusco hasta alcanzar valores del 50% de lo medidos antes de envejecimiento. En el tiempo transcurrido hasta alcanzarse el mes de envejecimiento la tendencia del material es a aumentar nuevamente, sin llegarse a alcanzar los valores originales y mostrando tendencia a seguir aumentando. Con la realización del estudio a largo plazo resultaría posible determinar si el comportamiento descrito para las probetas con mayor solidez es el mismo que el visto en las probetas con menor relleno y finalmente se alcanza un valor estable similar al de origen. Con este mismo propósito, el análisis de puntos intermedios entre el inicio del envejecimiento hasta alcanzar las 24 horas podría permitir apreciar si los bruscos ascensos y descensos en los valores del módulo de elasticidad para porcentajes de relleno elevados se replican en un lapso de tiempo menor para las probetas con menor relleno.

Dado que no se ha alcanzado el punto de rotura en el TPE las deformaciones obtenidas no permiten realizar comparación de ningún tipo al ser todas ellas similares. Lo único que se puede establecer en base al manejo de las probetas es la apariencia de ser más fácilmente deformables.

### 3. RESULTADO DEL ENSAYO DE FLEXIÓN

La realización de los ensayos de flexión permite obtener la información mostrada en las tablas y gráficas mostradas en el ANEXO 4: RESULTADOS DE ENSAYO DE FLEXIÓN. En cada uno de los casos analizados se emplearon un total de 5 probetas a partir de las cuales se analiza la tensión máxima registrada, la deformación de la probeta en dicho punto y el módulo de resistencia a flexión. Esto permite obtener unos valores medios orientativos que posibilita el análisis sobre las propiedades a flexión de los materiales ensayados tras ser expuestos a gasolina.

Como se menciona en el apartado *Caracterización: Procesos y equipos empleados*, durante la realización de los ensayos no se produce la rotura del material, resbalando la probeta de los puntos de apoyo a superarse cierta flecha. Esta situación se aprecia en las gráficas obtenidas como una sucesión de escalones ante los cuales se considera finalizado el ensayo.

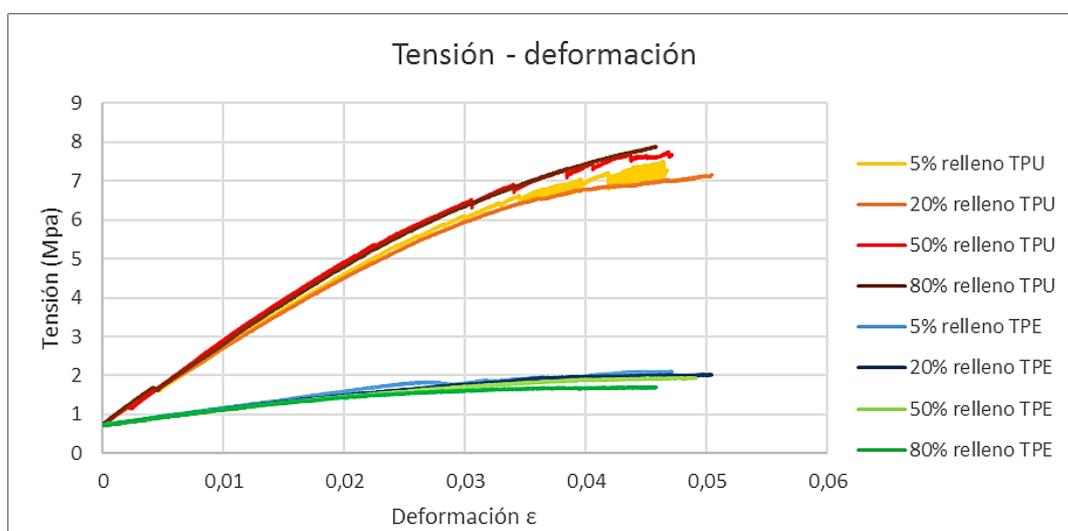
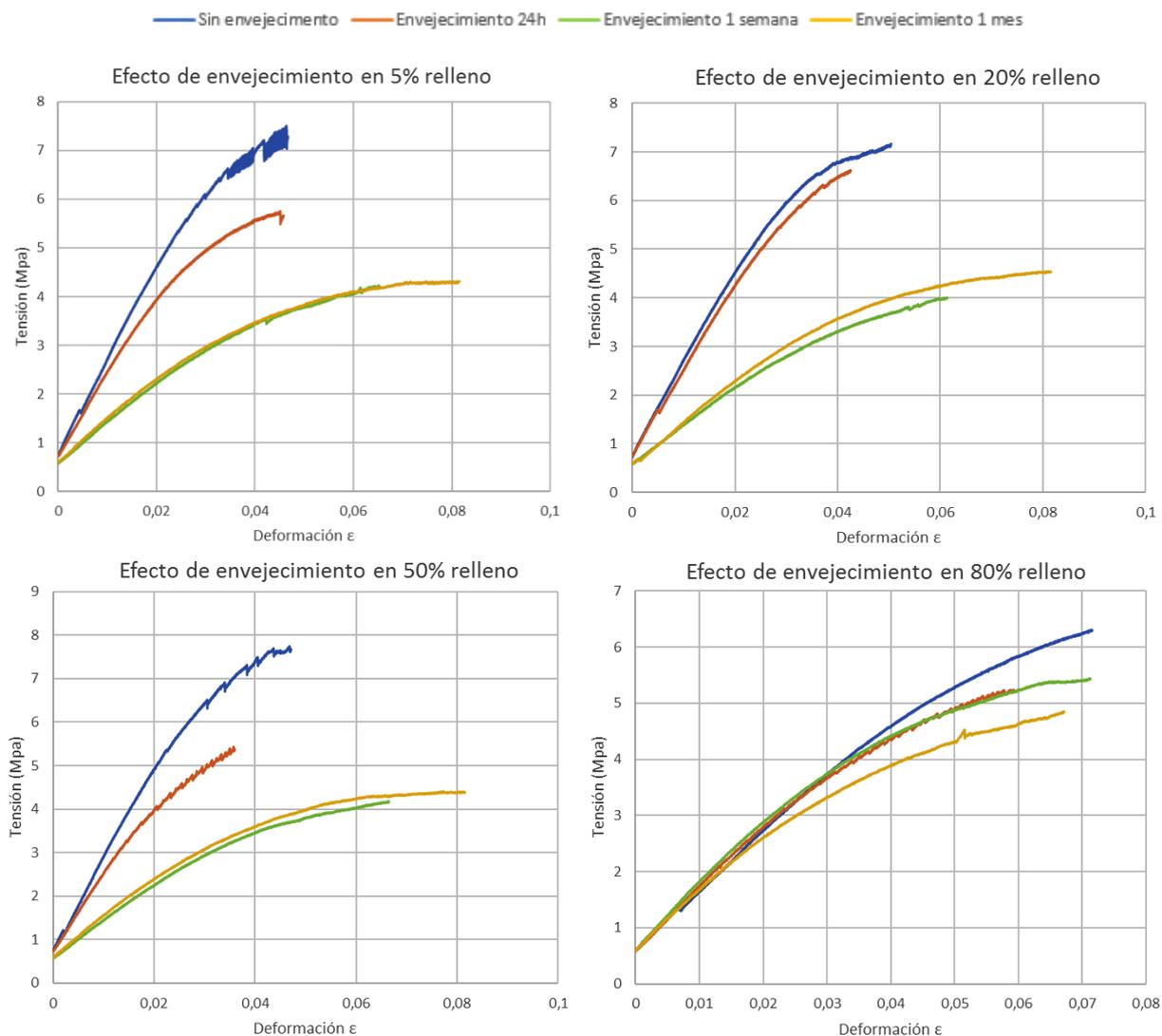


Figura 57. Ensayo de flexión TPU y TPE en condiciones estándar

Inicialmente se estudia de manera comparativa las curvas obtenidas a través de los ensayos de flexión para los distintos rellenos en ausencia de gasolina. En la Figura 57. Es posible apreciar que ambos materiales presentan una resistencia a flexión considerablemente inferior que a tracción (solo un 10% de esta). Así mismo, ambos materiales pueden diferenciarse claramente, siendo la resistencia mostrada por el TPU 7 veces superior a la presentada por el FILAFLEX ULTRASOFT. A diferencia de lo observado en los resultados del ensayo a tracción, las diferencias existentes en un mismo material para las distintas condiciones de relleno estudiadas resultan mínimas e inicialmente, parecen no influir en el comportamiento del material.

#### 3.1. RESULTADOS DE FLEXIÓN EN TPU 98-A

Se muestran a continuación en la Figura 58. las curvas de los ensayos de flexión obtenidas en cada una de las condiciones de relleno para los distintos periodos de envejecimiento estudiados. Así mismo, se analiza los efectos de la gasolina sobre el módulo de resistencia flexión que presenta el material.



**Figura 58. Ensayo de flexión TPU para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento**

Se puede apreciar que, para los distintos rellenos estudiados, el comportamiento a flexión del material presenta una tendencia común. Con respecto a los resultados obtenidos en condiciones estándar, las curvas generadas por aquellas probetas sometidas a envejecimiento presentan una menor resistencia independientemente del periodo de exposición a la gasolina.

Tras las primeras 24 horas de envejecimiento además de verse reducida la tensión máxima, las probetas se rigidizan, mostrando una menor capacidad de deformación a flexión y por tanto un desplazamiento con respecto a los puntos de apoyo para un valor de flecha menor. Al analizar los resultados correspondientes a las probetas envejecidas en periodos de una semana y un mes, la tensión máxima soportada por las probetas se ve reducida con respecto a los casos anteriores y presentan valores muy similares entre sí, lo que sugiere cierta estabilización del material. No obstante, la deformación alcanza por estas probetas es mucho mayor que la obtenida al trascurso de 24 horas, superándose tras el mes de exposición la deformación presentada por el material en los distintos rellenos antes de someterse a envejecimiento. Dada la tendencia a aumentar la capacidad de deformación conforme al tiempo de exposición, el estudio a largo plazo permitiría conocer las deformaciones máximas que pueden llegar a alcanzar estos materiales ante esfuerzos a flexión.

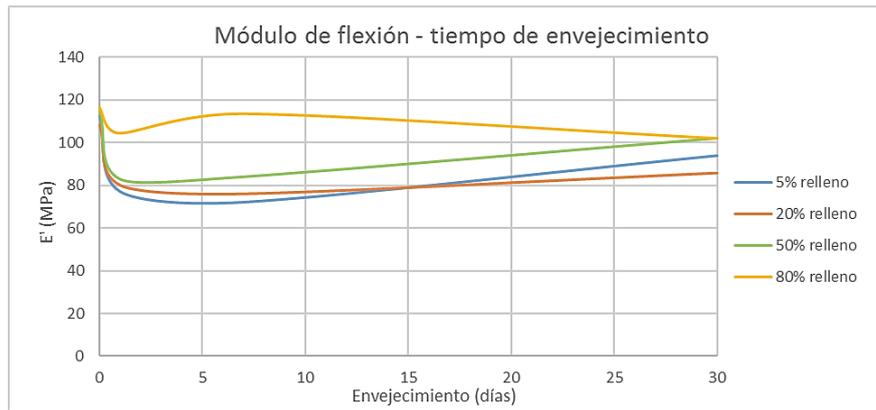


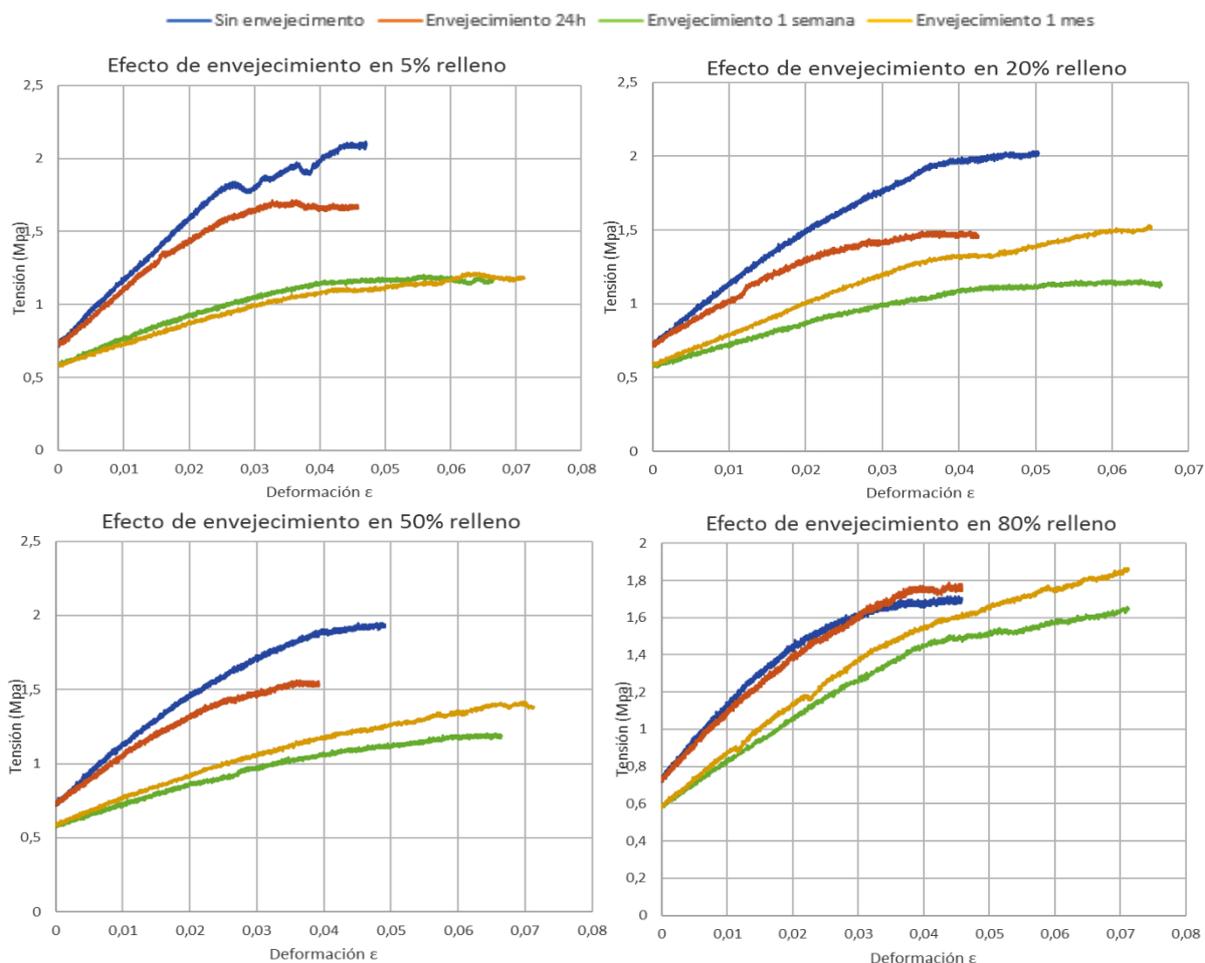
Figura 59. Módulo de flexión del TPU para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento

La variación del módulo de flexión de las probetas de distintos rellenos ensayadas presenta una tendencia común similar a la observada en la tensión máxima a flexión. Como se aprecia en la Figura 59, en las primeras 24 horas se produce un deterioro de la resistencia a flexión del material, que a diferencia de como sucedía con la resistencia a tracción, es más brusco cuanto mayor relleno presentan las probetas. Esto es debido a que la resistencia a flexión en aquellas probetas de bajo relleno es ejercida principalmente por las fibras de las capas más exteriores, por lo que el deterioro interno apenas condiciona a la resistencia final. Cuanto mayor es este relleno, las fibras interfieren unas de otras en la deformación provocando un aumento de la resistencia que, a consecuencia del efecto de la gasolina en las fibras, permiten ver las gráficas como un salto más abrupto a consecuencia del deterioro interno. Conforme aumenta el periodo de inmersión de las probetas el módulo de elasticidad muestra una variación suave y progresiva que, transcurrido un mes, muestra cierta estabilización en valores muy próximos (en torno a 100 MPa) para las distintas condiciones de relleno.

### 3.2. RESULTADOS DE FLEXIÓN EN TPE FILAFLEX ULTRASOFT 70-A

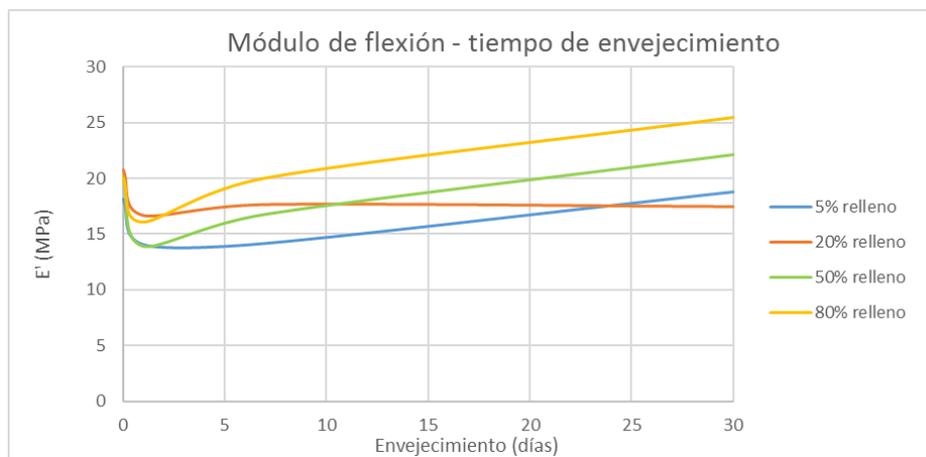
Durante la realización de los ensayos a flexión en las probetas de TPE, debido a la alta flexibilidad y capacidad de deformación elástica del material, la obtención de valores de fuerza y deformación no se inicia en el momento en que el puente de flexión contacta con la probeta. Esto se debe a que la toma de datos se inicia una vez el equipo detecta resistencia al avance. Consecuencia de la escasa resistencia presentada por el material, los valores registrados se encuentran en el límite inferior de fuerzas registrables por la célula de carga empleada y se corresponden con una flecha mayor de la indicada en el programa. Por ello, los resultados mostrados a continuación carecen de la precisión deseada, aunque permiten comparar los distintos casos estudiados.

El comportamiento descrito por el TPE ante flexión es muy similar al anteriormente visto para el otro material estudiado. En la Figura 60, se muestra como para los distintos rellenos, la exposición a gasolina del material produce una disminución en la resistencia máxima en los ensayos realizados en las probetas expuestas durante 24 horas y una semana de forma notable. Posteriormente, tras un mes de inmersión, los valores resultan ligeramente superiores a los observados en el envejecimiento a medio plazo. Con respecto a la deformación en los distintos envejecimientos realizados, al igual que sucede en el TPU, tras las primeras 24 horas se produce una rigidización de las probetas y por tanto la deformación registrada es menor. En los periodos de envejecimiento sucesivos, la deformación obtenida para los distintos rellenos estudiados resulta mayor que la registrada en las probetas que no fueron expuestas a gasolina.



**Figura 60. Ensayo de flexión TPE para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento**

El módulo a flexión del TPE presenta un comportamiento ligeramente distinto al visto anteriormente en el poliuretano 98-A. En la Figura 61. Se muestra como a corto plazo se produce una disminución notable de la resistencia que presentan las probetas en los diferentes rellenos para posteriormente aumentar de forma progresiva, alcanzándose tras un mes de exposición valores de módulo a flexión superiores a los obtenidos antes de someter a envejecimiento alguno las probetas.



**Figura 61. Módulo de flexión del TPE para distintas condiciones de fabricación y periodos de envejecimiento**

Dado que los valores obtenidos de tensión máxima, deformación y resistencia a flexión tras un mes parecen no estabilizarse, conviene analizar a largo plazo los efectos de envejecimiento de la gasolina en este material y así conocer los valores finales que presenta.

---

## V. CONCLUSIONES

---

En este trabajo se ha estudiado el efecto de la gasolina 98 como abrasivo químico sobre piezas fabricadas en TPE y TPU mediante fabricación aditiva a fin de establecer los efectos de este producto sobre las principales propiedades mecánicas de ambos materiales ante distintos periodos de exposición. El propósito de este estudio es analizar la viabilidad de estos materiales en la industria, concretamente, en el desarrollo de componentes automovilísticos destinados a operar con dicho fluido.

En vista de los medios y el plazo disponible para la realización de dicho análisis, ha sido necesario determinar en primer lugar aquellos ensayos que pudiesen proporcionar una mayor información al respecto. Esto se debe al número mínimo de probetas que resultan necesarias en los ensayos para cada uno de los casos a fin de garantizar la validez de los resultados obtenidos y al tiempo requerido en la fabricación de estas y su posterior ensayo. Finalmente, y en base a las restricciones expuestas, se opta por realizar los ensayos de tracción, flexión y dureza.

En el proceso de diseño y fabricación de las probetas necesarias para la realización de los ensayos tuvo que descartarse el equipo de impresión 3D ZMORPH 2.0 SX debido a los problemas que presentaba el trabajar con filamentos flexibles, los cuales provocaban numerosos fallos en la impresión al producirse continuos atascos en el extrusor. Así mismo, para la adecuada impresión de las probetas fue necesario realizar diversas modificaciones en los parámetros de impresión en ambos materiales. En la fabricación de probetas de TPU se empleó finalmente una temperatura de extrusión de 235 °C y una velocidad del 80% respecto a la recomendada por el fabricante. En las impresiones realizadas en TPE la temperatura fue necesario aumentarla hasta los 240 °C empleando en la impresión de las piezas una velocidad un 25% menor a la recomendada por el fabricante.

Para el análisis de los efectos de envejecimiento en gasolina de los materiales estudiados, debido a los plazos para la realización y entrega del trabajo, el estudio ha sido realizado corto y medio plazo, acorde a la norma ISO-175, llevando a cabo un tercer periodo de envejecimiento de 1 mes a fin de predecir de forma alguna el comportamiento a largo plazo de las propiedades estudiadas en ambos materiales.

Tras la realización de los ensayos establecidos y el análisis de los resultados proporcionados por cada uno de ellos se ha podido establecer lo siguiente:

Con respecto a las propiedades presentadas por los filamentos de ambos materiales, se observa una reducción considerable de la tensión máxima, la capacidad de deformación (en el caso del TPE no fue posible comprobarse el alargamiento a rotura) y la dureza. Esta diferencia es acusada en mayor medida cuanto menor es el relleno que presentan las probetas estudiadas, presentando propiedades algo más parecidas al material de origen aquellas con un relleno del 80% en volumen.

Los resultados de envejecimiento a corto plazo muestran en los distintos ensayos una considerable variación de las propiedades; la dureza, la tensión máxima y el módulo de elasticidad se reducen en gran medida. Así mismo, el peso de las probetas estudiadas resulta inferior al presentado antes de ser sometidas a este proceso. Transcurridos los periodos de envejecimiento posteriores establecidos, los valores medidos resultan contrarios a lo esperado, pues lejos de agravarse el deterioro de las propiedades, se observa una recuperación de las mismas, obteniéndose valores similares de dureza, resistencia y módulo a tracción y a flexión a los registrados por aquellas probetas que no habían sido expuestas a la acción de la gasolina. En algunos casos las probetas de TPE presentaban mejores propiedades tras el máximo envejecimiento estudiado que antes de ser sometidas al mismo.

Ante este comportamiento repetido para los distintos rellenos estudiados, se contempla la hipótesis en la que la interacción entre la gasolina y estos polímeros que poseen base de poliuretano consta de dos fases. Primeramente, la gasolina provoca la ruptura de algunas de las cadenas que conforman el polímero provocando la pérdida de masa y el deterioro de las propiedades que presenta. Finalizado este proceso, esas cadenas tienden a unirse nuevamente o a formar nuevas cadenas que permiten reforzar nuevamente la estructura de las probetas recuperando en parte sus propiedades. Teniendo lugar en un menor tiempo en el caso del TPE. Esto no ha sido posible confirmarlo dada la falta de medios y tiempo, no obstante, se trata de un aspecto fundamental para poder comprender el motivo por el que las propiedades de estos materiales describen este comportamiento.

Por tanto, las interacciones químicas que tienen lugar entre la gasolina y estos materiales resultan interesantes como futuro trabajo, permitiendo predecir los efectos de los combustibles en todos aquellos plásticos y composites que tienen como base poliuretano.

Con respecto a las dificultades surgidas durante la caracterización de los materiales conviene destacar algunas modificaciones que deben llevarse a cabo para futuras investigaciones de estos materiales. Dada la alta capacidad de deformación observada durante los ensayos de tracción, a fin de garantizar la rotura de las probetas, conviene emplear un modelo reducido de los indicados en la norma ISO 527 en lugar de la probeta estándar 1A. De forma similar sucede durante el ensayo de flexión; la distancia entre los puntos de apoyo de la probeta establecidos en la norma empleada provoca en materiales con una elasticidad como los estudiados que no se alcance la rotura al disponer la probeta de espacio suficiente para desplazarse sobredichos puntos de apoyo. Por tanto, en el caso de analizarse materiales elásticos, debería establecerse una menor distancia entre apoyos que permita obtener una mayor información del ensayo.

Finalmente, partiendo de la información obtenida en este trabajo y como posible continuación o ampliación del mismo resultan interesantes el estudio de las siguientes cuestiones:

Dado las temperaturas que pueden alcanzarse en el interior de un vehículo, la realización del proceso de envejecimiento y posteriores ensayos podría realizarse según norma a 70 °C analizándose como afecta esta nueva condición al comportamiento de los materiales.

En las condiciones estudiadas en este trabajo, otros posibles ensayos que permiten obtener información de interés son el estudio de la absorción que presentan las piezas, el análisis de propagación de grietas o el comportamiento ante fatiga. Así mismo, la obtención de puntos intermedios a los establecidos en las curvas de envejecimiento químico permitiría predecir el comportamiento de los materiales para las distintas condiciones de relleno de más precisión, identificándose así aquellos puntos críticos en los que se produce una mayor variación de las propiedades.

# **ANEXOS**

---

## VI. ANEXO 1: RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA

A continuación, se muestran las tablas correspondientes a las medidas obtenidas en la realización del ensayo de dureza Shore A, analizándose por separado cada uno de los materiales estudiados en las distintas condiciones de fabricación y envejecimiento.

### 1. MEDICIONES DE DUREZA EN TPU

TPU Relleno 5% - Sin envejecimiento									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	68	58	60	61	53	58	60	61	60
Muestra 2	53	56	58	59	49	53	56	58	55
Muestra 3	71	66	59	56	52	56	54	51	58
Muestra 4	59	60	59	58	60	56	57	61	59
Muestra 5	58	57	61	60	68	61	61	66	62
<b>Media Total</b>									<b>59</b>

Tabla 14. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno sin someter a envejecimiento

TPU Relleno 5% - Envejecimiento de 24h en gasolina 98									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	44	36	42	37	36	47	48	50	43
Muestra 2	50	31	35	30	52	43	46	47	42
Muestra 3	32	36	34	37	39	37	38	34	36
Muestra 4	36	35	36	37	34	35	36	37	36
Muestra 5	33	35	35	34	32	30	35	32	33
<b>Media Total</b>									<b>38</b>

Tabla 15. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

TPU Relleno 5% - Envejecimiento de 1 semana en gasolina 98									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	38	39	39	44	42	41	45	46	42
Muestra 2	39	37	39	38	40	41	35	41	39
Muestra 3	44	44	44	42	43	41	43	45	43
Muestra 4	42	43	41	43	41	41	40	38	41
Muestra 5	50	43	42	43	40	43	43	42	43
<b>Media Total</b>									<b>42</b>

Tabla 16. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

TPU Relleno 5% - Envejecimiento de 1 mes en gasolina 98									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	43	41	39	37	45	39	38	40	40
Muestra 2	44	41	42	42	59	40	41	44	44
Muestra 3	38	42	43	40	38	41	43	42	41
Muestra 4	36	40	36	37	44	44	46	47	41
Muestra 5	40	41	44	42	44	43	46	42	43
<b>Media Total</b>									<b>42</b>

Tabla 17. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

TPU Relleno 20% - Sin envejecimiento									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	75	77	76	78	79	74	75	77	76
Muestra 2	77	78	78	79	80	77	76	77	78
Muestra 3	82	83	76	78	74	77	77	76	78
Muestra 4	79	75	77	78	78	77	75	79	77
Muestra 5	77	76	77	75	79	76	81	79	78
<b>Media Total</b>									<b>77</b>

Tabla 18. Dureza Shore A medida en TPU con 20% de relleno sin someter a envejecimiento

TPU Relleno 20% - Envejecimiento de 24h en gasolina 98									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	75	75	74	74	74	76	76	75	75
Muestra 2	74	75	76	76	73	74	74	74	75
Muestra 3	76	76	77	76	73	75	76	74	75
Muestra 4	75	75	76	76	78	75	76	77	76
Muestra 5	76	78	78	78	74	76	76	75	76
<b>Media Total</b>									<b>75</b>

Tabla 19. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

TPU Relleno 20% - Envejecimiento de 1 semana en gasolina 98									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	71	72	74	72	73	74	73	75	73
Muestra 2	74	74	75	74	76	74	72	73	74
Muestra 3	77	73	74	75	76	77	75	75	75
Muestra 4	73	76	77	77	81	79	76	77	77
Muestra 5	77	78	76	77	75	75	74	75	76
<b>Media Total</b>									<b>75</b>

Tabla 20. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

TPU Relleno 20% - Envejecimiento de 1 mes en gasolina 98									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	73	72	73	74	76	74	72	73	73
Muestra 2	75	75	76	75	79	73	74	74	75
Muestra 3	73	73	74	74	74	73	73	74	74
Muestra 4	72	73	73	71	74	72	73	73	73
Muestra 5	73	74	75	74	72	77	73	74	74
<b>Media Total</b>									<b>74</b>

Tabla 21. Dureza Shore A medida en TPU con 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

<b>TPU Relleno 50% - Sin envejecimiento</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	84	84	85	83	83	83	83	86	<b>84</b>
<b>Muestra 2</b>	83	84	84	88	84	83	84	85	<b>84</b>
<b>Muestra 3</b>	83	84	84	88	85	84	83	84	<b>84</b>
<b>Muestra 4</b>	85	83	84	84	84	83	83	85	<b>84</b>
<b>Muestra 5</b>	83	82	83	83	80	81	81	82	<b>82</b>
<b>Media Total</b>									<b>84</b>

Tabla 22. Dureza Shore A medida en TPU con 50% de relleno sin someter a envejecimiento

<b>TPU Relleno 50% - Envejecimiento de 24h en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	80	81	81	80	83	81	82	79	<b>81</b>
<b>Muestra 2</b>	81	81	82	80	84	82	83	83	<b>82</b>
<b>Muestra 3</b>	75	77	78	80	83	81	81	80	<b>79</b>
<b>Muestra 4</b>	82	83	83	83	82	83	84	83	<b>83</b>
<b>Muestra 5</b>	81	82	78	77	82	81	81	82	<b>81</b>
<b>Media Total</b>									<b>81</b>

Tabla 23. Dureza Shore A medida en TPU con 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina

<b>TPU Relleno 50% - Envejecimiento de 1 semana en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	83	84	84	83	83	83	79	82	<b>83</b>
<b>Muestra 2</b>	82	82	83	83	81	80	80	79	<b>81</b>
<b>Muestra 3</b>	83	83	84	84	79	78	83	83	<b>82</b>
<b>Muestra 4</b>	81	80	77	81	84	82	83	83	<b>81</b>
<b>Muestra 5</b>	82	83	83	83	80	79	80	79	<b>81</b>
<b>Media Total</b>									<b>82</b>

Tabla 24. Dureza Shore A medida en TPU con 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

<b>TPU Relleno 50% - Envejecimiento de 1 mes en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	81	80	79	80	83	82	83	83	<b>81</b>
<b>Muestra 2</b>	82	81	81	81	84	83	83	83	<b>82</b>
<b>Muestra 3</b>	83	82	83	83	81	79	80	80	<b>81</b>
<b>Muestra 4</b>	84	83	83	83	82	82	83	80	<b>83</b>
<b>Muestra 5</b>	83	81	80	82	84	84	84	83	<b>83</b>
<b>Media Total</b>									<b>82</b>

Tabla 25. Dureza Shore A medida en TPU con 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

<b>TPU Relleno 80% - Sin envejecimiento</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	81	83	82	84	84	83	82	83	<b>83</b>
<b>Muestra 2</b>	83	83	85	85	84	83	83	84	<b>84</b>
<b>Muestra 3</b>	82	85	84	84	86	83	84	82	<b>84</b>
<b>Muestra 4</b>	87	86	87	84	83	84	82	83	<b>85</b>
<b>Muestra 5</b>	85	83	84	83	86	83	85	84	<b>84</b>
<b>Media Total</b>									<b>84</b>

Tabla 26. Dureza Shore A medida en TPU con 80% de relleno sin someter a envejecimiento

<b>TPU Relleno 80% - Envejecimiento de 24h semana en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	85	86	83	84	83	83	82	80	<b>83</b>
<b>Muestra 2</b>	83	84	84	83	82	83	83	84	<b>83</b>
<b>Muestra 3</b>	84	85	84	84	86	85	85	85	<b>85</b>
<b>Muestra 4</b>	83	82	84	84	83	83	83	84	<b>83</b>
<b>Muestra 5</b>	86	86	84	83	84	82	83	83	<b>84</b>
<b>Media Total</b>									<b>84</b>

Tabla 27. Dureza Shore A medida en TPU con 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

TPU Relleno 80% - Envejecimiento de 1 semana en gasolina 98									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	88	87	85	86	88	87	81	90	87
Muestra 2	89	82	88	89	83	84	85	84	86
Muestra 3	87	90	92	90	89	89	88	89	89
Muestra 4	89	86	87	86	89	88	89	88	88
Muestra 5	87	87	90	90	88	88	87	88	88
<b>Media Total</b>									<b>87</b>

Tabla 28. Dureza Shore A medida en TPU con 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

TPU Relleno 80% - Envejecimiento de 1 mes en gasolina 98									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	90	90	87	88	88	88	87	88	88
Muestra 2	85	86	86	86	87	89	88	88	87
Muestra 3	88	88	84	91	82	81	85	87	86
Muestra 4	87	87	86	87	87	89	89	87	87
Muestra 5	89	88	88	89	88	89	88	89	89
<b>Media Total</b>									<b>87</b>

Tabla 29. Dureza Shore A medida en TPU con 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

## 2. MEDICIONES DE DUREZA EN TPE

TPE Relleno 5% - Sin envejecimiento									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	26	26	25	21	28	29	28	27	26
Muestra 2	27	29	31	26	23	25	23	22	26
Muestra 3	24	31	30	27	24	28	25	24	27
Muestra 4	57	30	32	28	27	26	28	23	31
Muestra 5	22	24	27	24	22	28	29	25	25
<b>Media Total</b>									<b>27</b>

Tabla 30. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno sin someter a envejecimiento

<b>TPE Relleno 5% - Envejecimiento de 24h en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	12	10	16	14	13	24	21	22	<b>17</b>
<b>Muestra 2</b>	13	22	22	17	11	15	17	16	<b>17</b>
<b>Muestra 3</b>	13	17	19	20	14	26	21	23	<b>19</b>
<b>Muestra 4</b>	14	20	23	16	16	18	22	23	<b>19</b>
<b>Muestra 5</b>	17	21	19	17	20	11	20	19	<b>18</b>
<b>Media Total</b>									<b>18</b>

Tabla 31. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

<b>TPE Relleno 5% - Envejecimiento de 1 semana en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	16	22	23	22	12	23	23	18	<b>20</b>
<b>Muestra 2</b>	22	22	23	23	17	21	15	19	<b>20</b>
<b>Muestra 3</b>	19	19	20	21	20	23	24	21	<b>21</b>
<b>Muestra 4</b>	13	12	17	16	15	20	19	20	<b>17</b>
<b>Muestra 5</b>	18	21	23	16	19	20	19	19	<b>19</b>
<b>Media Total</b>									<b>19</b>

Tabla 32. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

<b>TPE Relleno 5% - Envejecimiento de 1 mes en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	19	20	22	19	15	13	19	14	<b>18</b>
<b>Muestra 2</b>	20	22	23	21	14	16	18	16	<b>19</b>
<b>Muestra 3</b>	18	21	23	17	16	15	19	18	<b>18</b>
<b>Muestra 4</b>	17	20	19	18	14	15	13	15	<b>16</b>
<b>Muestra 5</b>	18	17	22	21	15	20	23	16	<b>19</b>
<b>Media Total</b>									<b>18</b>

Tabla 33. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

<b>TPE Relleno 20% - Sin envejecimiento</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	51	52	48	49	47	49	50	51	<b>50</b>
<b>Muestra 2</b>	46	49	52	51	47	49	51	48	<b>49</b>
<b>Muestra 3</b>	49	50	51	48	48	49	47	50	<b>49</b>
<b>Muestra 4</b>	54	49	47	51	44	51	50	51	<b>50</b>
<b>Muestra 5</b>	45	48	50	49	46	49	50	52	<b>49</b>
<b>Media Total</b>									<b>49</b>

Tabla 34. Dureza Shore A medida en TPE con 20% de relleno sin someter a envejecimiento

<b>TPE Relleno 20% - Envejecimiento de 24h en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	36	37	36	36	34	36	37	37	<b>36</b>
<b>Muestra 2</b>	35	37	37	36	36	37	37	37	<b>37</b>
<b>Muestra 3</b>	34	36	36	35	36	35	36	36	<b>36</b>
<b>Muestra 4</b>	34	35	35	36	36	36	37	38	<b>36</b>
<b>Muestra 5</b>	39	36	37	38	38	36	40	38	<b>38</b>
<b>Media Total</b>									<b>36</b>

Tabla 35. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

<b>TPE Relleno 20% - Envejecimiento de 1 semana en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	39	40	42	41	39	39	40	38	<b>40</b>
<b>Muestra 2</b>	38	38	39	38	37	40	40	39	<b>39</b>
<b>Muestra 3</b>	38	41	40	41	37	39	38	38	<b>39</b>
<b>Muestra 4</b>	39	39	39	39	36	40	40	38	<b>39</b>
<b>Muestra 5</b>	41	40	40	40	38	39	38	37	<b>39</b>
<b>Media Total</b>									<b>39</b>

Tabla 36. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

TPE Relleno 20% - Envejecimiento de 1 mes en gasolina 98									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	40	39	40	39	38	40	41	40	40
Muestra 2	40	41	40	39	39	40	39	39	40
Muestra 3	40	41	42	42	46	40	39	39	41
Muestra 4	38	40	39	38	37	40	41	40	39
Muestra 5	39	39	40	39	41	41	42	41	40
<b>Media Total</b>									<b>40</b>

Tabla 37. Dureza Shore A medida en TPE con 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

TPE Relleno 50% - Sin envejecimiento									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	68	65	65	66	69	68	66	67	67
Muestra 2	59	61	61	58	67	67	66	67	63
Muestra 3	66	67	67	66	67	68	66	68	67
Muestra 4	68	66	66	68	67	65	65	66	66
Muestra 5	67	65	67	68	65	66	66	67	66
<b>Media Total</b>									<b>66</b>

Tabla 38. Dureza Shore A medida en TPE con 50% de relleno sin someter a envejecimiento

TPE Relleno 50% - Envejecimiento de 24h en gasolina 98									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Media Muestral
Muestra 1	56	57	59	61	58	56	59	60	58
Muestra 2	59	58	59	59	60	61	63	61	60
Muestra 3	56	55	55	56	58	55	57	58	56
Muestra 4	56	54	56	58	56	57	57	56	56
Muestra 5	49	51	50	51	60	59	58	59	55
<b>Media Total</b>									<b>57</b>

Tabla 39. Dureza Shore A medida en TPE con 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina

<b>TPE Relleno 50% - Envejecimiento de 1 semana en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	59	59	58	60	57	58	57	55	<b>58</b>
<b>Muestra 2</b>	48	51	48	49	58	59	60	61	<b>54</b>
<b>Muestra 3</b>	59	59	60	59	59	60	60	62	<b>60</b>
<b>Muestra 4</b>	60	59	58	58	57	55	57	56	<b>58</b>
<b>Muestra 5</b>	59	60	57	57	59	60	59	59	<b>59</b>
<b>Media Total</b>									<b>58</b>

Tabla 40. Dureza Shore A medida en TPE con 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

<b>TPE Relleno 50% - Envejecimiento de 1 mes en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	64	60	60	61	62	58	60	59	<b>61</b>
<b>Muestra 2</b>	65	62	63	63	52	50	49	54	<b>57</b>
<b>Muestra 3</b>	61	61	60	60	58	57	55	58	<b>59</b>
<b>Muestra 4</b>	60	61	59	63	58	57	59	58	<b>59</b>
<b>Muestra 5</b>	66	65	56	59	65	63	62	63	<b>62</b>
<b>Media Total</b>									<b>60</b>

Tabla 41. Dureza Shore A medida en TPE con 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

<b>TPE Relleno 80% - Sin envejecimiento</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	68	67	67	66	73	74	74	74	<b>70</b>
<b>Muestra 2</b>	72	68	66	67	75	73	72	73	<b>71</b>
<b>Muestra 3</b>	73	70	72	73	74	72	73	74	<b>73</b>
<b>Muestra 4</b>	68	67	65	69	76	73	74	72	<b>71</b>
<b>Muestra 5</b>	74	71	73	72	74	73	74	73	<b>73</b>
<b>Media Total</b>									<b>71</b>

Tabla 42. Dureza Shore A medida en TPE con 80% de relleno sin someter a envejecimiento

<b>TPE Relleno 80% - Envejecimiento de 24h semana en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	67	64	65	65	67	68	67	65	<b>66</b>
<b>Muestra 2</b>	67	60	61	59	66	64	66	65	<b>64</b>
<b>Muestra 3</b>	70	71	67	65	59	65	64	66	<b>66</b>
<b>Muestra 4</b>	68	66	68	66	58	59	56	59	<b>63</b>
<b>Muestra 5</b>	66	66	66	65	63	57	55	56	<b>62</b>
<b>Media Total</b>									<b>64</b>

Tabla 43. Dureza Shore A medida en TPE con 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

<b>TPE Relleno 80% - Envejecimiento de 1 semana en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	61	60	60	62	70	69	68	68	<b>65</b>
<b>Muestra 2</b>	71	70	71	71	66	65	66	64	<b>68</b>
<b>Muestra 3</b>	62	58	61	61	70	70	69	70	<b>65</b>
<b>Muestra 4</b>	71	70	69	70	68	66	66	66	<b>68</b>
<b>Muestra 5</b>	60	60	59	59	69	68	68	69	<b>64</b>
<b>Media Total</b>									<b>66</b>

Tabla 44. Dureza Shore A medida en TPE con 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

<b>TPE Relleno 80% - Envejecimiento de 1 mes en gasolina 98</b>									
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Medida 6</b>	<b>Medida 7</b>	<b>Medida 8</b>	<b>Media Muestral</b>
<b>Muestra 1</b>	72	72	71	71	68	68	68	69	<b>70</b>
<b>Muestra 2</b>	69	69	70	70	68	67	69	69	<b>69</b>
<b>Muestra 3</b>	62	62	62	61	71	70	71	71	<b>66</b>
<b>Muestra 4</b>	72	72	71	72	59	62	62	63	<b>67</b>
<b>Muestra 5</b>	71	71	72	73	61	61	62	61	<b>67</b>
<b>Media Total</b>									<b>68</b>

Tabla 45. Dureza Shore A medida en TPE con 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

## VII. ANEXO 2: RESULTADOS DE ENSAYO DE TRACCIÓN

A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a los ensayos de tracción realizados en los que se recogen las curvas de tensión-deformación obtenidas por las cuatro probetas empleadas en cada una de las condiciones de relleno y periodo de envejecimiento para los materiales de estudio TPU 98-A y TPE FILAFLEX ULTRASOFT 70-A. Así mismo se adjunta una tabla en cada caso donde se indican los datos característicos obtenidos en cada ensayo.

### 1. ENSAYO DE TRACCIÓN EN TPU

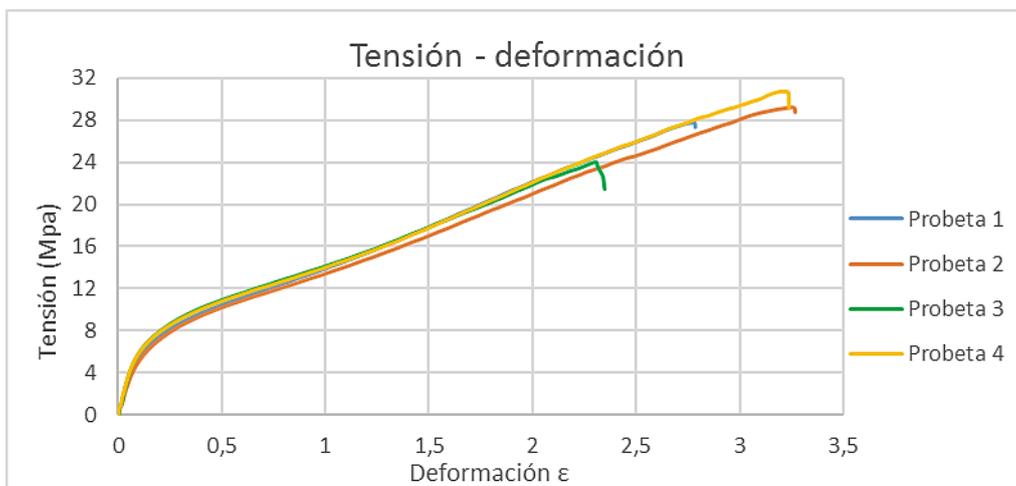


Figura 62. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	27,86	2,76	10,71
<b>Probeta 2</b>	29,15	3,23	13,79
<b>Probeta 3</b>	24,34	2,28	10,18
<b>Probeta 4</b>	30,14	3,24	15,73

Tabla 46. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno sin envejecimiento



Figura 63. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	10,46	2,63	23,47
<b>Probeta 2</b>	12,47	3,23	26,47
<b>Probeta 3</b>	11,07	2,85	23,86
<b>Probeta 4</b>	12,94	3,52	32,74

Tabla 47. Ensayo de tracción TPU 5% relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

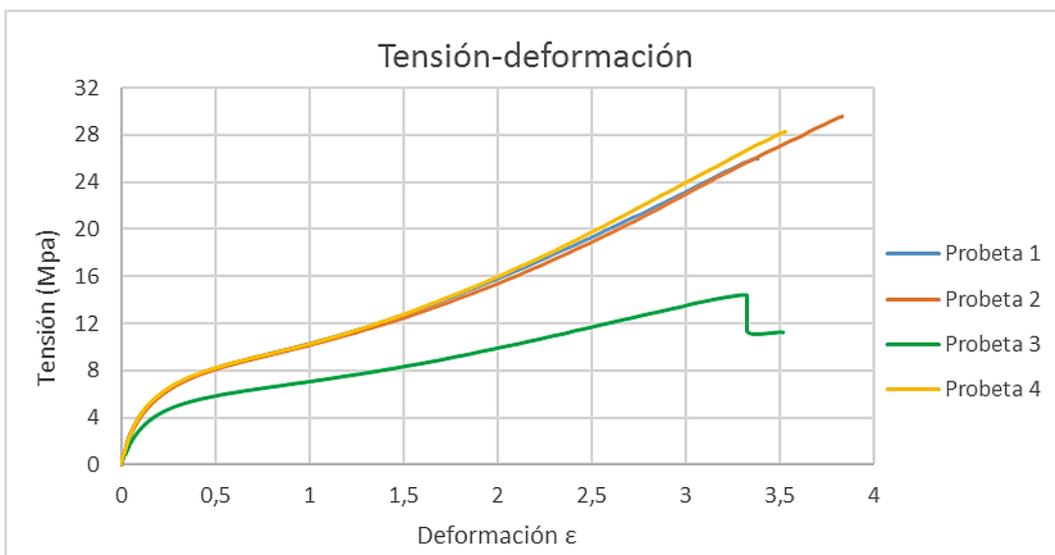


Figura 64. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	26,76	3,38	20,63
<b>Probeta 2</b>	30,11	3,80	28,91
<b>Probeta 3</b>	14,41	2,85	23,08
<b>Probeta 4</b>	28,57	3,52	25,00

Tabla 48. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

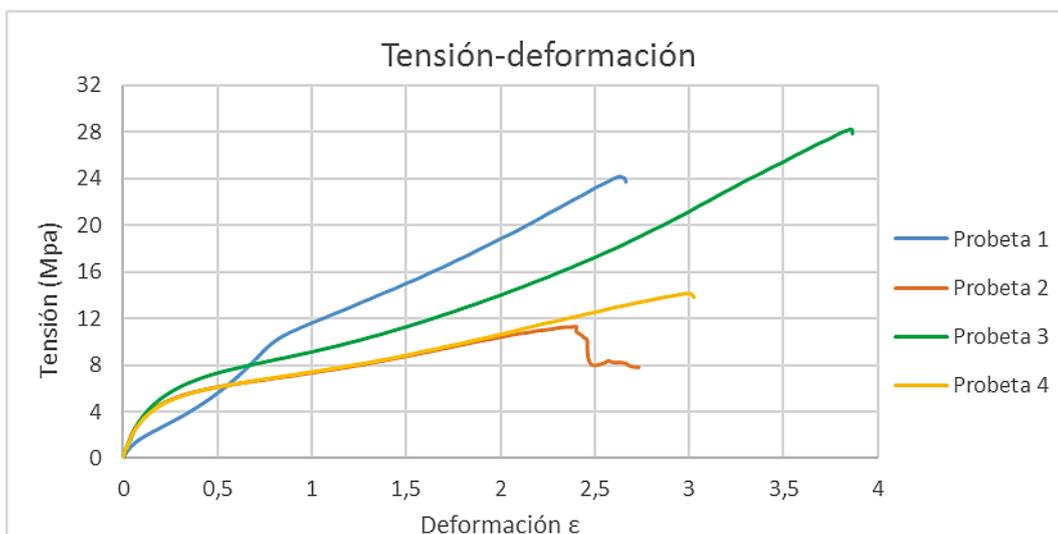


Figura 65. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	24,71	2,66	24,24
<b>Probeta 2</b>	11,98	2,44	21,47
<b>Probeta 3</b>	28,34	3,87	26,83
<b>Probeta 4</b>	14,11	3,02	23,86

Tabla 49. Ensayo de tracción TPU 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98



Figura 66. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	30,21	2,64	12,28
<b>Probeta 2</b>	30,05	2,61	10,18
<b>Probeta 3</b>	32,01	2,93	13,29
<b>Probeta 4</b>	31,28	3,93	12,79

Tabla 50. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno sin envejecimiento

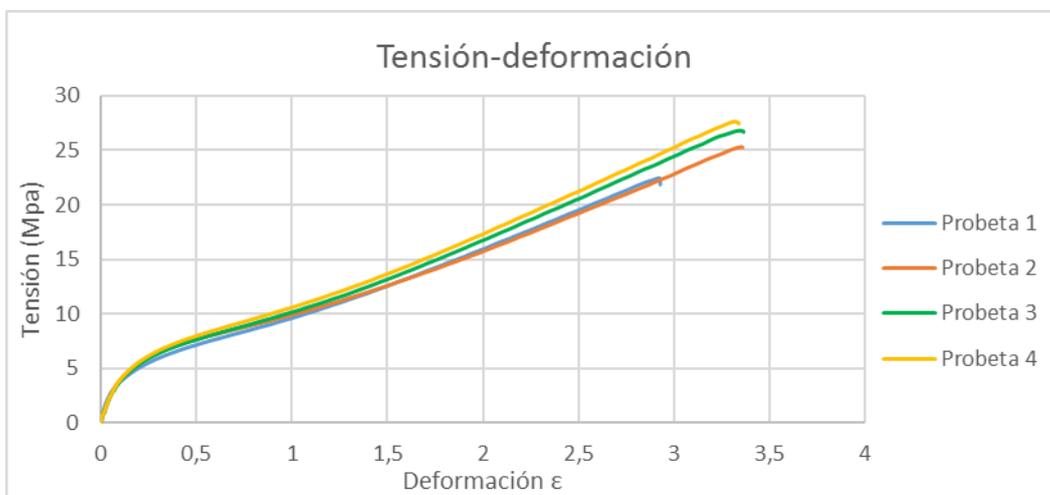


Figura 67. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	23,68	2,90	14,77
<b>Probeta 2</b>	25,17	3,31	18,92
<b>Probeta 3</b>	27,48	3,34	20,21
<b>Probeta 4</b>	27,62	3,33	20,63

Tabla 51. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98



Figura 68. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	27,32	3,34	21,88
<b>Probeta 2</b>	30,01	3,57	23,08
<b>Probeta 3</b>	29,53	3,57	23,86
<b>Probeta 4</b>	26,87	3,31	21,47

Tabla 52. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

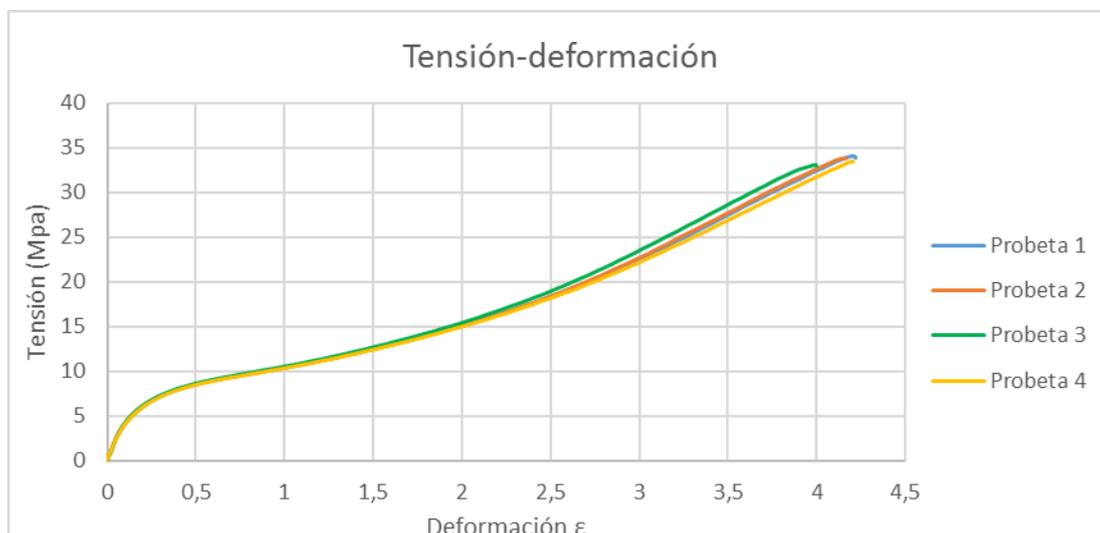


Figura 69. Ensayo de tracción TPU 20% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	33,43	4,20	24,62
<b>Probeta 2</b>	33,28	4,19	23,08
<b>Probeta 3</b>	31,84	3,99	21,05
<b>Probeta 4</b>	32,21	4,20	21,88

Tabla 53. Ensayo de tracción TPU 20% relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98



Figura 70. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	29,57	1,98	8,54
<b>Probeta 2</b>	31,22	2,44	11,76
<b>Probeta 3</b>	20,02	2,80	14,29
<b>Probeta 4</b>	22,03	1,39	6,25

Tabla 54. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno sin envejecimiento



Figura 71. Ensayo de tracción TPU 50% relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	35,32	3,78	23,86
<b>Probeta 2</b>	29,54	3,09	19,79
<b>Probeta 3</b>	28,12	3,20	14,77
<b>Probeta 4</b>	26,24	2,90	15,73

Tabla 55. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

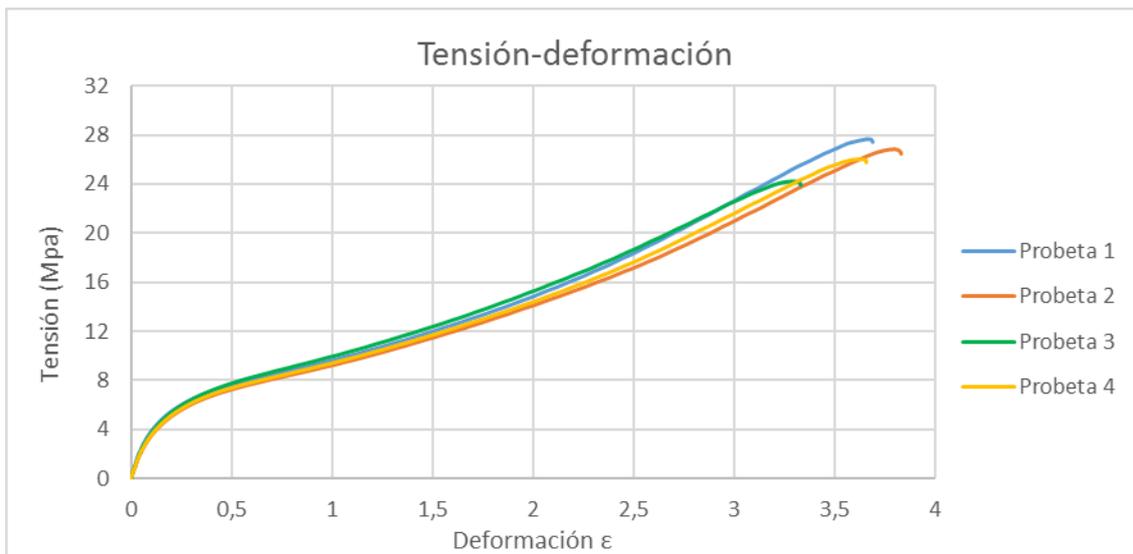


Figura 72. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	28,71	3,67	29,58
<b>Probeta 2</b>	26,51	3,83	29,91
<b>Probeta 3</b>	24,12	3,65	23,08
<b>Probeta 4</b>	25,77	2,90	28,57

Tabla 56. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

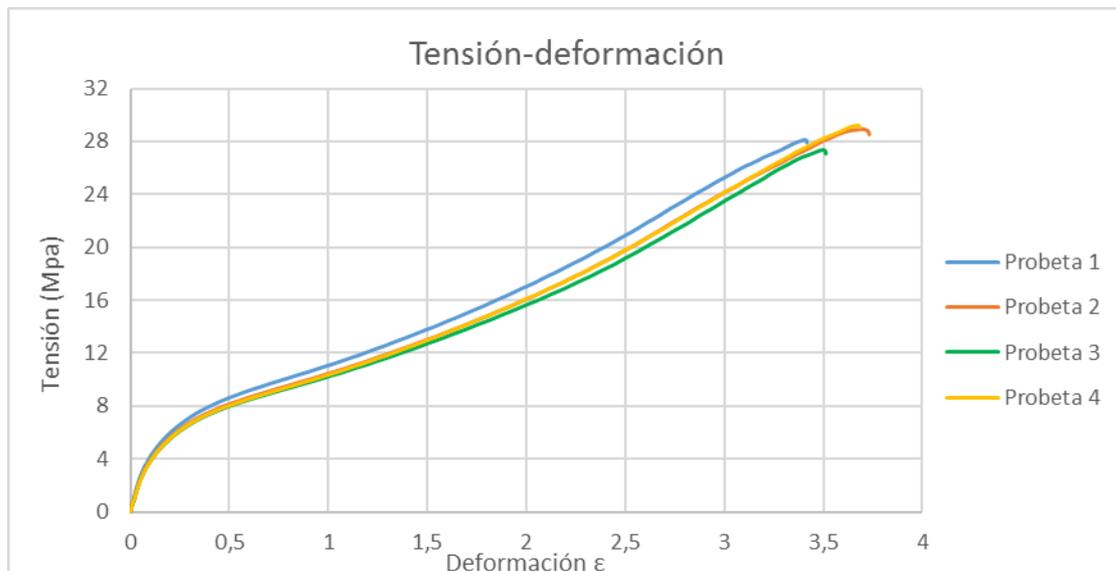


Figura 73. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	28,01	3,42	26,83
<b>Probeta 2</b>	29,18	3,71	30,56
<b>Probeta 3</b>	29,22	3,68	30,23
<b>Probeta 4</b>	27,59	3,51	28,23

Tabla 57. Ensayo de tracción TPU 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

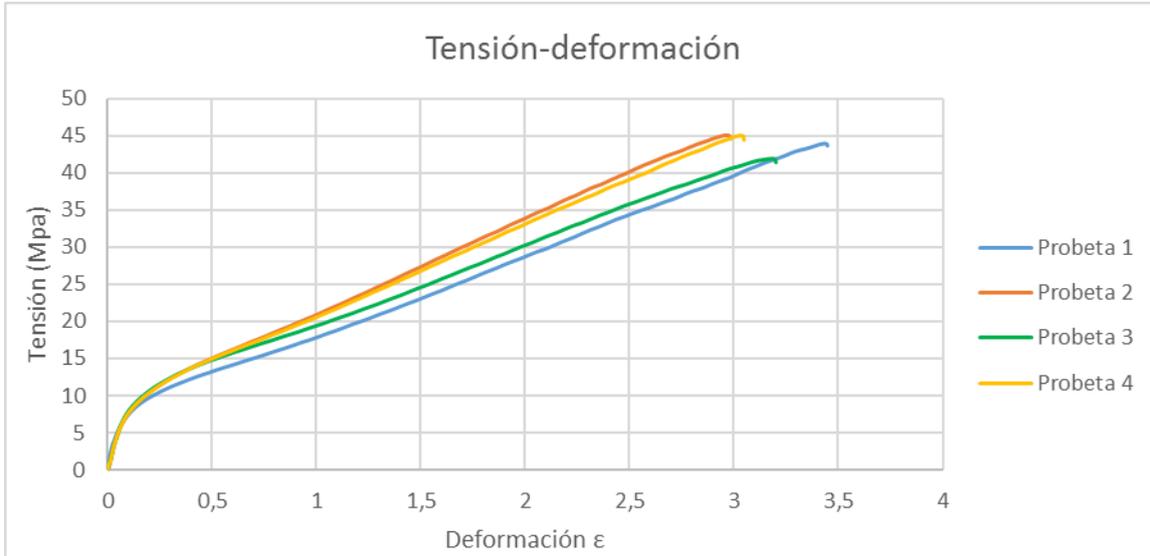


Figura 74. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	43,76	3,45	15,25
<b>Probeta 2</b>	45,27	2,87	11,76
<b>Probeta 3</b>	41,65	3,20	13,79
<b>Probeta 4</b>	45,87	3,05	12,28

Tabla 58. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno sin envejecimiento

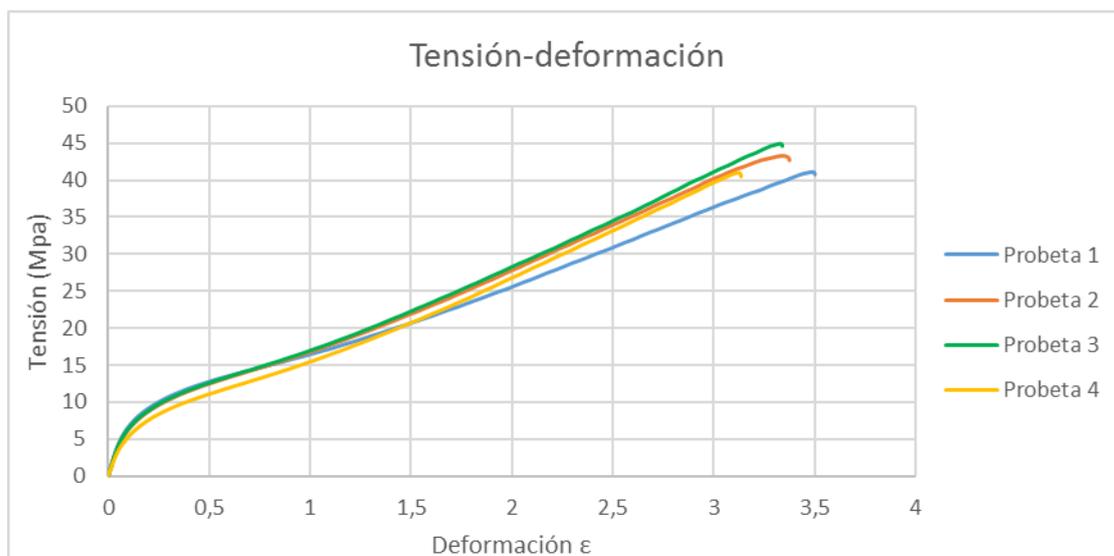


Figura 75. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	40,81	3,50	21,47
<b>Probeta 2</b>	44,72	3,37	18,48
<b>Probeta 3</b>	44,91	3,34	19,79
<b>Probeta 4</b>	40,72	3,17	18,03

Tabla 59. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98



Figura 76. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	41,91	3,82	24,24
<b>Probeta 2</b>	41,08	4,20	30,56
<b>Probeta 3</b>	39,45	3,65	18,48
<b>Probeta 4</b>	43,14	3,94	29,58

Tabla 60. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

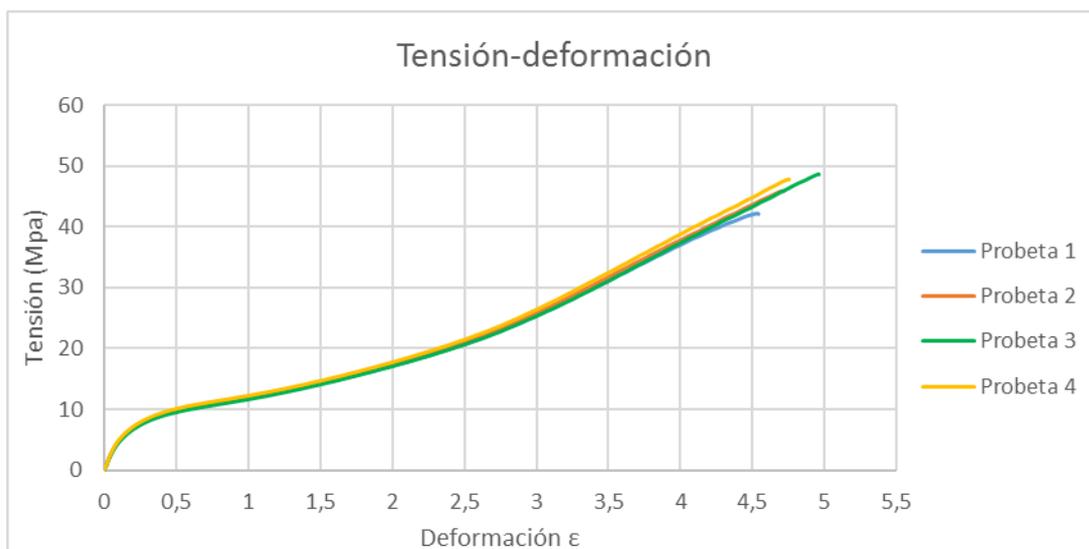


Figura 77. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Alargamiento a rotura (%)
<b>Probeta 1</b>	44,69	4,51	35,34
<b>Probeta 2</b>	47,24	4,68	36,17
<b>Probeta 3</b>	48,55	4,95	39,27
<b>Probeta 4</b>	47,72	4,71	38,78

Tabla 61. Ensayo de tracción TPU 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

## 2. ENSAYO DE TRACCIÓN EN TPE

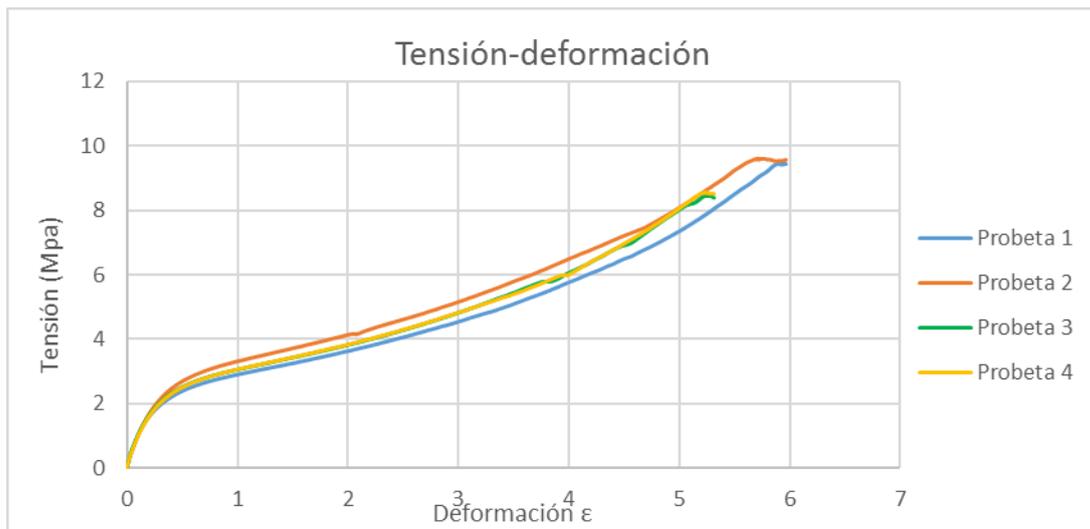


Figura 78. Ensayo de tracción TPE 5% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	9,56	6,00
<b>Probeta 2</b>	9,67	5,99
<b>Probeta 3</b>	8,51	5,27
<b>Probeta 4</b>	8,47	5,22

Tabla 62. Ensayo de tracción TPE 5% de relleno sin envejecimiento



Figura 79. Ensayo de tracción TPE 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	9,20	6,87
<b>Probeta 2</b>	10,23	6,86
<b>Probeta 3</b>	10,41	6,87
<b>Probeta 4</b>	10,15	6,88

Tabla 63. Ensayo de tracci3n TPE 5% tras 24h de envejecimiento en gasolina 98



Figura 80. Ensayo de tracci3n TPE 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	15,79	7,02
<b>Probeta 2</b>	15,04	6,87
<b>Probeta 3</b>	15,11	6,87
<b>Probeta 4</b>	17,42	7,02

Tabla 64. Ensayo de tracci3n TPE 5% tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98



Figura 81. Ensayo de tracci3n TPE 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	17,68	7,11
<b>Probeta 2</b>	17,62	6,86
<b>Probeta 3</b>	17,59	6,89
<b>Probeta 4</b>	16,73	6,90

Tabla 65. Ensayo de tracci3n TPE 5% tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98



Figura 82. Ensayo de tracci3n TPE 20% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	11,85	6,48
<b>Probeta 2</b>	9,59	5,43
<b>Probeta 3</b>	11,48	6,27
<b>Probeta 4</b>	10,88	6,12

Tabla 66. Ensayo de tracci3n TPE 20% sin envejecimiento



Figura 83. Ensayo de tracci3n TPE 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	9,76	6,12
<b>Probeta 2</b>	9,95	6,04
<b>Probeta 3</b>	8,41	5,35
<b>Probeta 4</b>	8,43	5,58

Tabla 67. Ensayo de tracci3n TPE 20% tras 24h de envejecimiento en gasolina 98



Figura 84. Ensayo de tracci3n TPE 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	13,03	6,08
<b>Probeta 2</b>	13,22	6,13
<b>Probeta 3</b>	14,19	6,12
<b>Probeta 4</b>	13,16	6,12

Tabla 68. Ensayo de tracci3n TPE 20% tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98



Figura 85. Ensayo de tracci3n TPE 20% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	16,25	6,72
<b>Probeta 2</b>	16,32	6,83
<b>Probeta 3</b>	17,38	6,94
<b>Probeta 4</b>	16,99	6,94

Tabla 69. Ensayo de tracci3n TPE 20% tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98



Figura 86. Ensayo de tracci3n TPE 50% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	17,75	6,60
<b>Probeta 2</b>	15,20	7,38
<b>Probeta 3</b>	17,65	7,63
<b>Probeta 4</b>	17,65	7,61

Tabla 70. Ensayo de tracci3n TPE 50% sin envejecimiento



Figura 87. Ensayo de tracci3n TPE 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	13,95	7,30
<b>Probeta 2</b>	12,49	6,89
<b>Probeta 3</b>	13,20	6,85
<b>Probeta 4</b>	12,48	6,86

Tabla 71. Ensayo de tracci3n TPE 50% tras 24h de envejecimiento en gasolina 98



Figura 88. Ensayo de tracci3n TPE 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	14,84	6,89
<b>Probeta 2</b>	17,84	6,89
<b>Probeta 3</b>	16,40	6,88
<b>Probeta 4</b>	17,81	6,90

Tabla 72. Ensayo de tracci3n TPE 50% tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

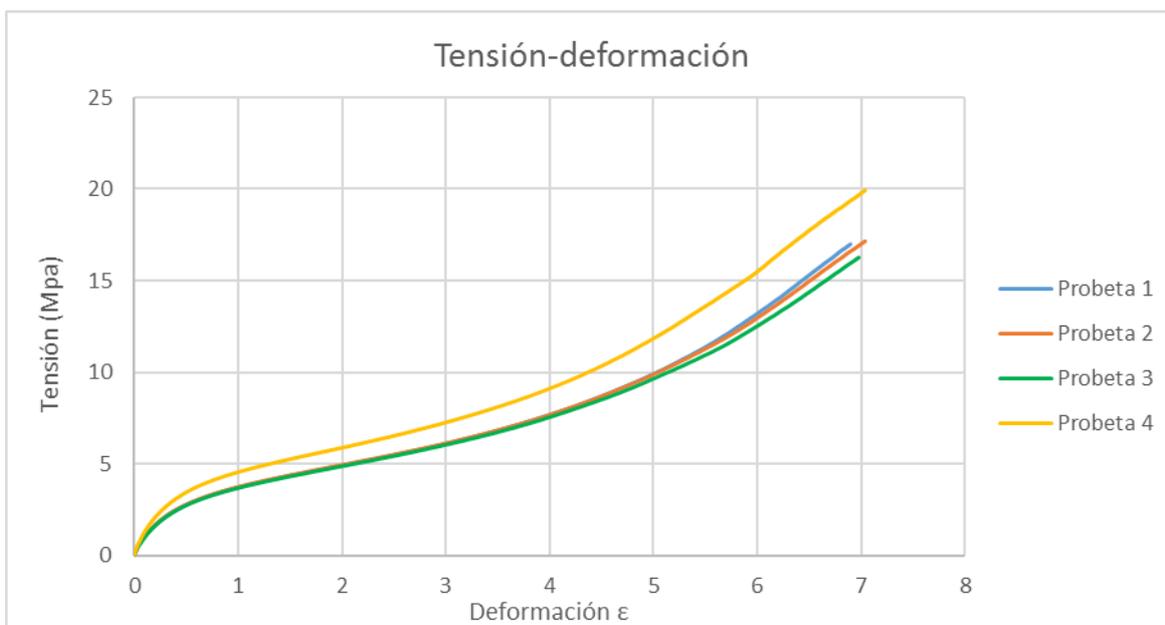


Figura 89. Ensayo de tracci3n TPE 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	16,32	6,87
<b>Probeta 2</b>	17,12	7,03
<b>Probeta 3</b>	16,08	6,97
<b>Probeta 4</b>	19,73	7,11

Tabla 73. Ensayo de tracci3n TPE 50% tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98



Figura 90. Ensayo de tracci3n TPE 80% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	16,83	5,97
<b>Probeta 2</b>	16,24	5,98
<b>Probeta 3</b>	17,63	6,28
<b>Probeta 4</b>	16,13	6,51

Tabla 74. Ensayo de tracci3n TPE 80% sin envejecimiento

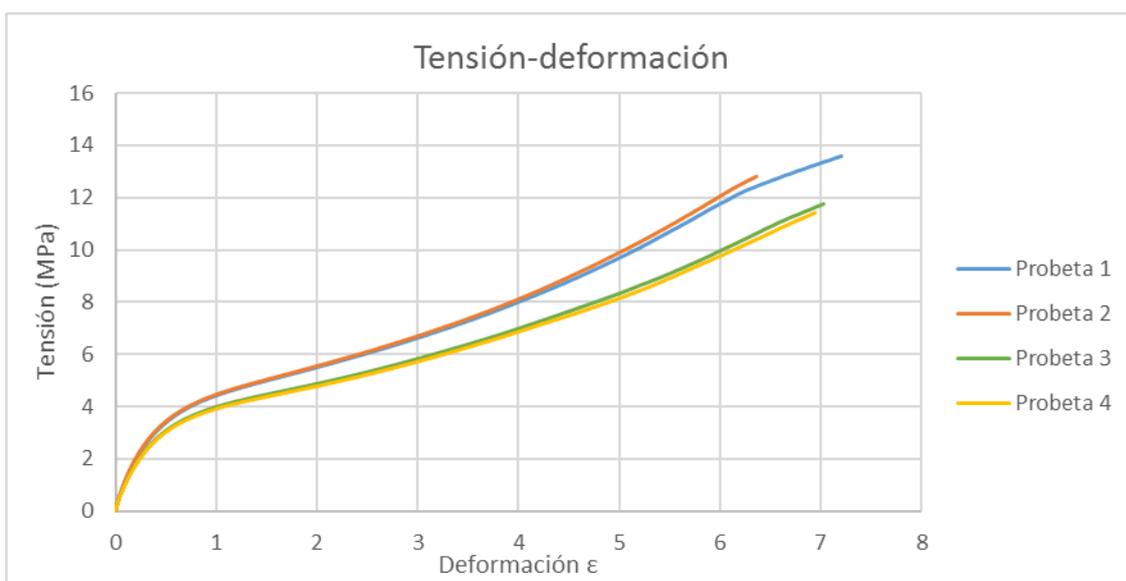


Figura 91. Ensayo de tracci3n TPE 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	13,58	7,20
<b>Probeta 2</b>	12,80	6,35
<b>Probeta 3</b>	11,41	6,83
<b>Probeta 4</b>	11,37	6,75

Tabla 75. Ensayo de tracci3n TPE 80% tras 24h de envejecimiento en gasolina 98



Figura 92. Ensayo de tracci3n TPE 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	19,19	6,91
<b>Probeta 2</b>	17,80	6,34
<b>Probeta 3</b>	16,99	6,84
<b>Probeta 4</b>	16,90	6,86

Tabla 76. Ensayo de tracci3n TPE 80% tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

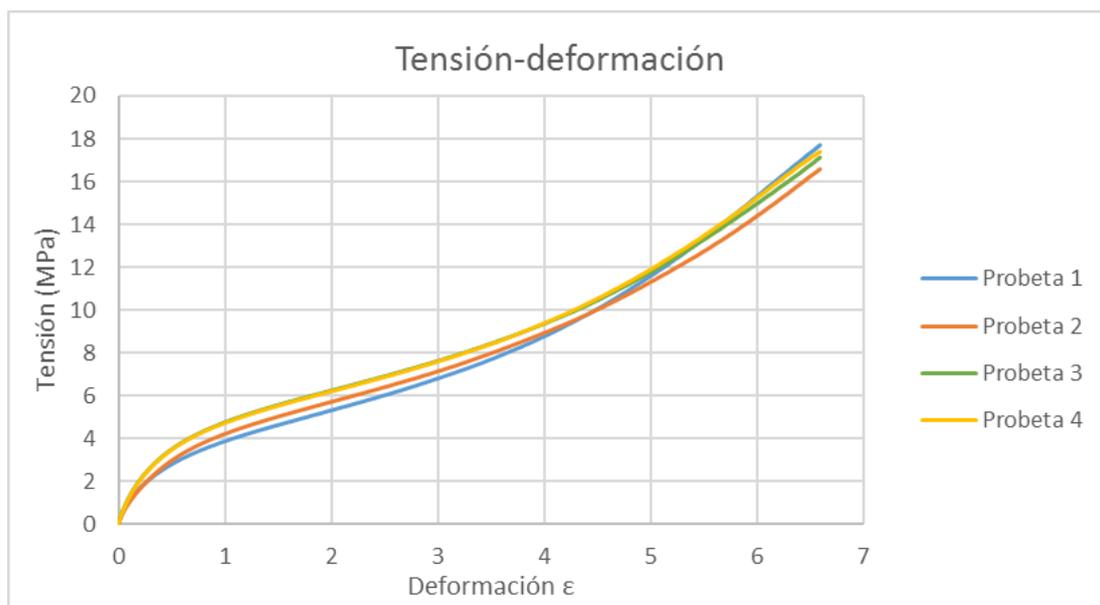


Figura 93. Ensayo de tracci3n TPE 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

---

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$
<b>Probeta 1</b>	17,37	6,58
<b>Probeta 2</b>	16,84	6,64
<b>Probeta 3</b>	17,24	6,59
<b>Probeta 4</b>	17,31	6,58

Tabla 77. Ensayo de tracci3n TPE 80% tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

## VIII. ANEXO 3: RESULTADOS DE ENSAYO DE FLEXIÓN

A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a los ensayos de flexión realizados. En ellos se recogen las curvas de tensión-deformación obtenidas por las cuatro probetas empleadas en cada una de las condiciones de relleno y periodo de envejecimiento para los materiales de estudio (TPU 98-A y TPE FILAFLEX ULTRASOFT 70-A).

A continuación de cada gráfica se adjunta una tabla que recoge los datos característicos obtenidos en dicho ensayo.

### 1. ENSAYO DE FLEXIÓN EN TPU



Figura 94. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$E'$ (MPa)
<b>Probeta 1</b>	5,79	0,073	106,81
<b>Probeta 2</b>	5,97	0,082	113,89
<b>Probeta 3</b>	6,05	0,078	113,94
<b>Probeta 4</b>	6,19	0,076	120,56
<b>Probeta 5</b>	5,81	0,070	107,35

Tabla 78. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno sin envejecimiento

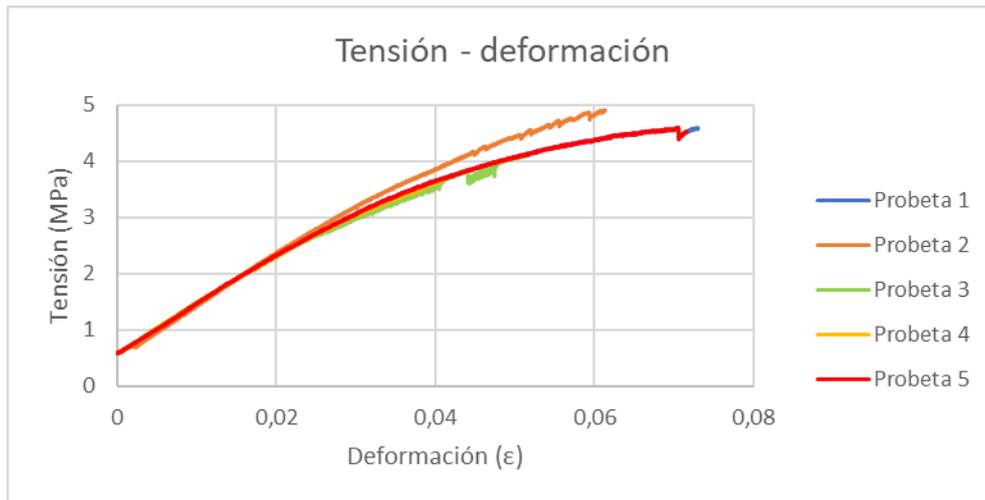


Figura 95. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	4,62	0,077	83,93
<b>Probeta 2</b>	4,88	0,061	43,15
<b>Probeta 3</b>	4,08	0,051	89,86
<b>Probeta 4</b>	3,61	0,043	83,95
<b>Probeta 5</b>	4,53	0,072	83,93

Tabla 79. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

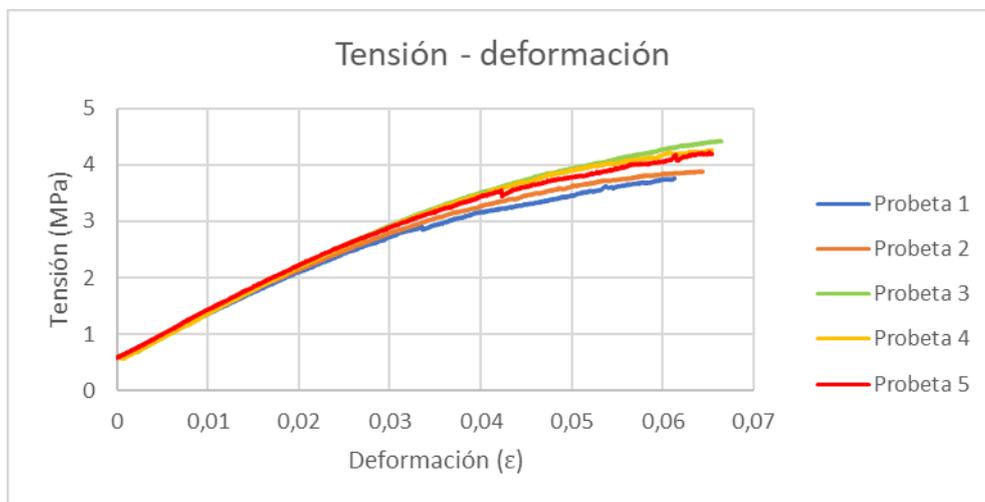


Figura 96. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	3,79	0,064	86,90
<b>Probeta 2</b>	3,87	0,073	70,13
<b>Probeta 3</b>	4,59	0,078	50,38
<b>Probeta 4</b>	4,29	0,068	66,54
<b>Probeta 5</b>	4,25	0,069	86,33

Tabla 80. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

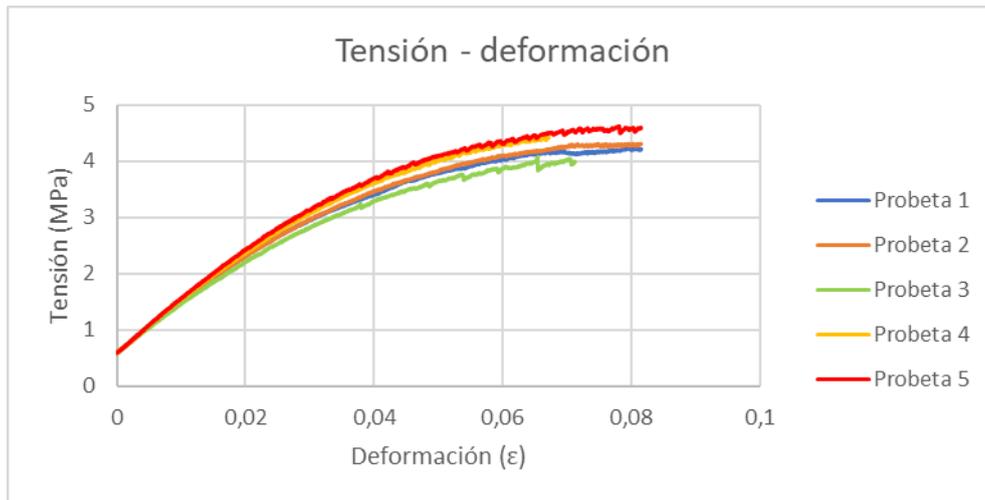


Figura 97. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	3,94	0,103	96,20
<b>Probeta 2</b>	4,28	0,087	80,76
<b>Probeta 3</b>	4,00	0,073	97,62
<b>Probeta 4</b>	4,46	0,069	91,10
<b>Probeta 5</b>	4,53	0,089	103,73

Tabla 81. Ensayo de flexión TPU 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

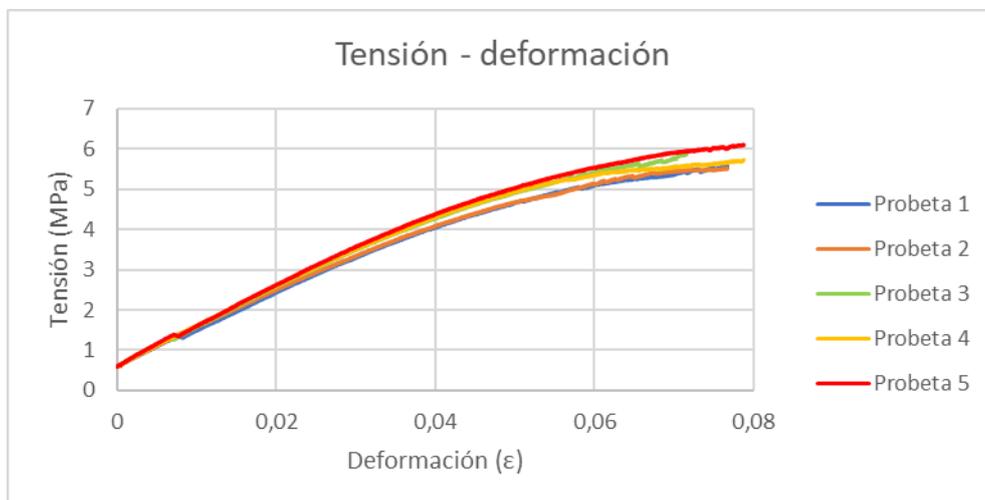


Figura 98. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	5,60	0,077	97,14
<b>Probeta 2</b>	5,49	0,077	106,75
<b>Probeta 3</b>	5,85	0,071	113,94
<b>Probeta 4</b>	5,68	0,078	103,76
<b>Probeta 5</b>	6,08	0,079	120,61

Tabla 82. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno sin envejecimiento

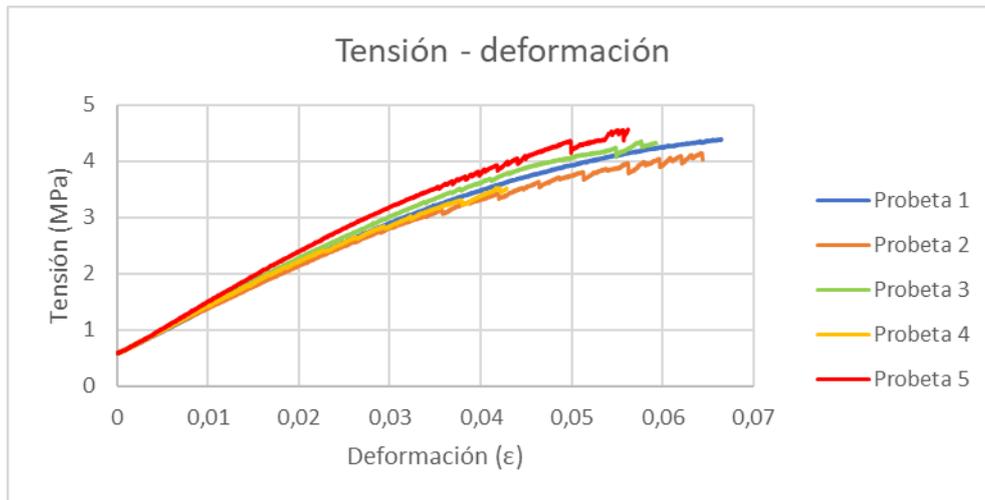


Figura 99. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	4,43	0,069	76,68
<b>Probeta 2</b>	4,07	0,065	70,16
<b>Probeta 3</b>	4,34	0,061	86,96
<b>Probeta 4</b>	3,57	0,044	83,36
<b>Probeta 5</b>	4,47	0,058	83,33

Tabla 83. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98



Figura 100. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	3,98	0,056	80,34
<b>Probeta 2</b>	4,23	0,082	70,13
<b>Probeta 3</b>	3,74	0,075	73,06
<b>Probeta 4</b>	3,74	0,075	73,06
<b>Probeta 5</b>	4,00	0,057	83,91

Tabla 84. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98



Figura 101. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	4,72	0,084	94,13
<b>Probeta 2</b>	4,25	0,077	97,06
<b>Probeta 3</b>	4,52	0,084	56,65
<b>Probeta 4</b>	3,48	0,082	84,39
<b>Probeta 5</b>	4,08	0,081	97,08

Tabla 85. Ensayo de flexión TPU 20% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

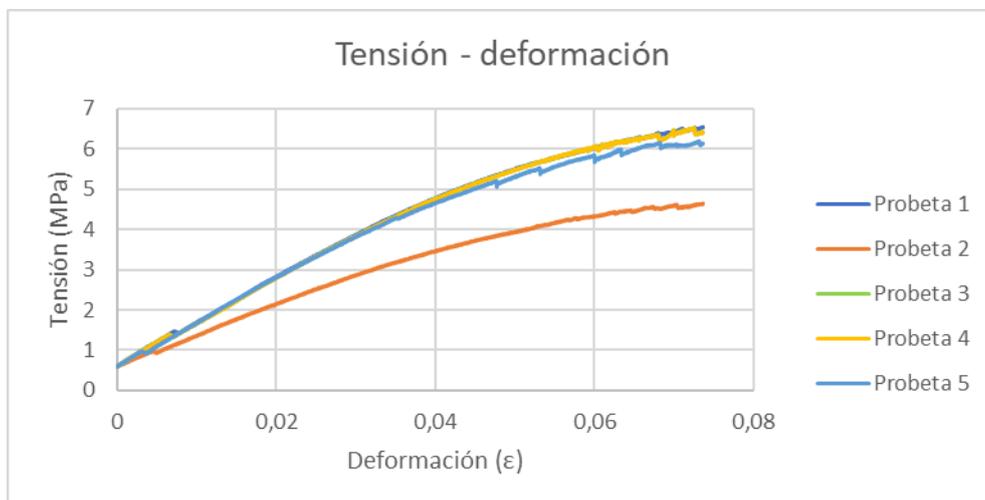


Figura 102. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	6,55	0,074	126,38
<b>Probeta 2</b>	4,62	0,074	83,36
<b>Probeta 3</b>	6,42	0,074	117,54
<b>Probeta 4</b>	6,42	0,074	117,54
<b>Probeta 5</b>	6,41	0,074	130,76

Tabla 86. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno sin envejecimiento

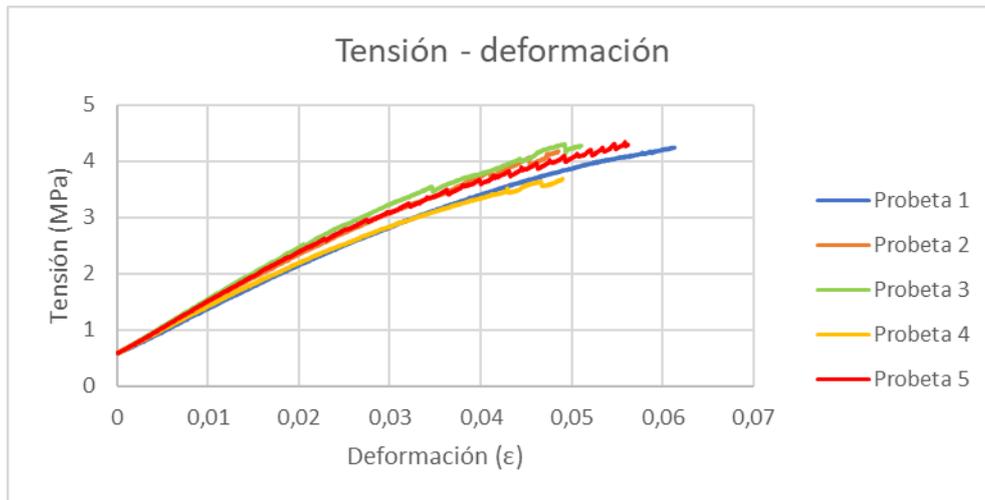


Figura 103. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	4,46	0,072	66,53
<b>Probeta 2</b>	4,15	0,048	83,93
<b>Probeta 3</b>	4,40	0,054	97,09
<b>Probeta 4</b>	3,67	0,049	79,70
<b>Probeta 5</b>	4,39	0,059	86,93

Tabla 87. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

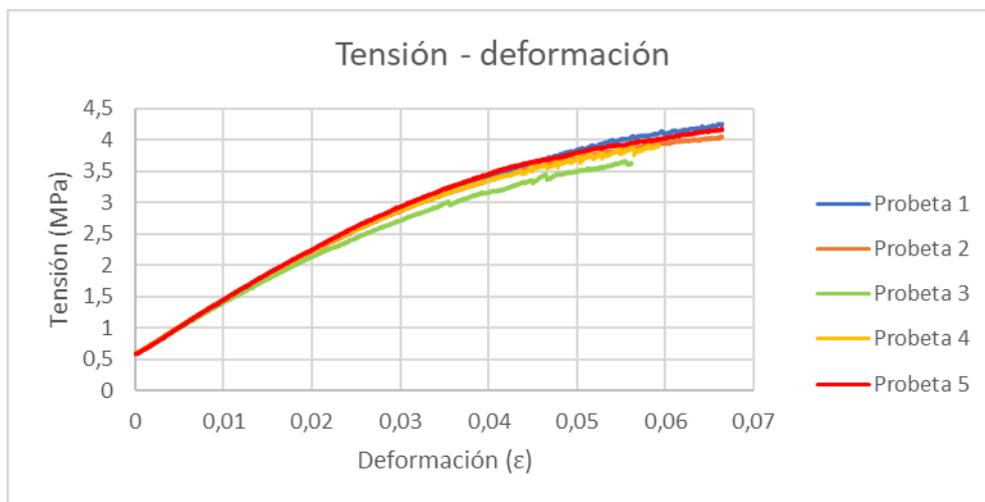


Figura 104. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	4,29	0,068	89,84
<b>Probeta 2</b>	4,06	0,069	90,51
<b>Probeta 3</b>	3,69	0,058	76,70
<b>Probeta 4</b>	3,97	0,060	79,76
<b>Probeta 5</b>	4,19	0,070	83,32

Tabla 88. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

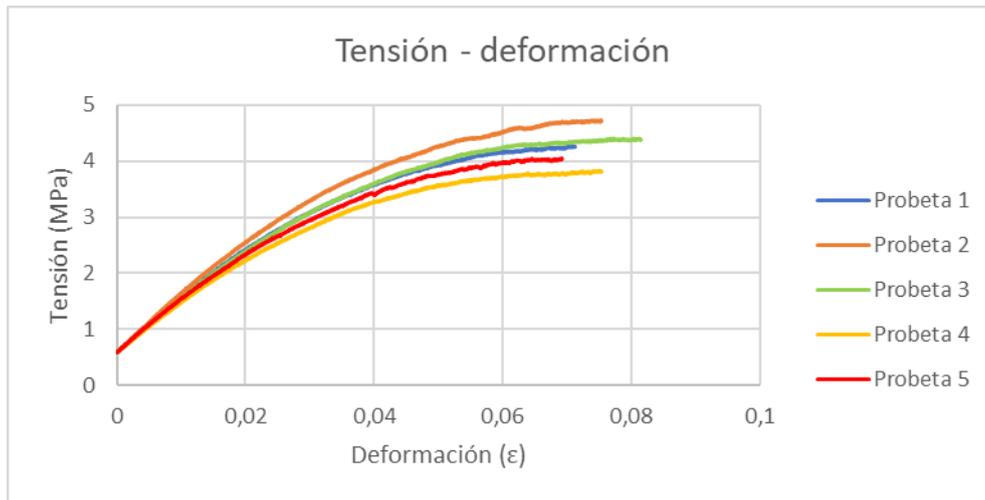


Figura 105. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	4,26	0,079	103,35
<b>Probeta 2</b>	4,77	0,085	103,66
<b>Probeta 3</b>	4,27	0,096	106,90
<b>Probeta 4</b>	3,83	0,079	97,05
<b>Probeta 5</b>	4,05	0,071	99,66

Tabla 89. Ensayo de flexión TPU 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

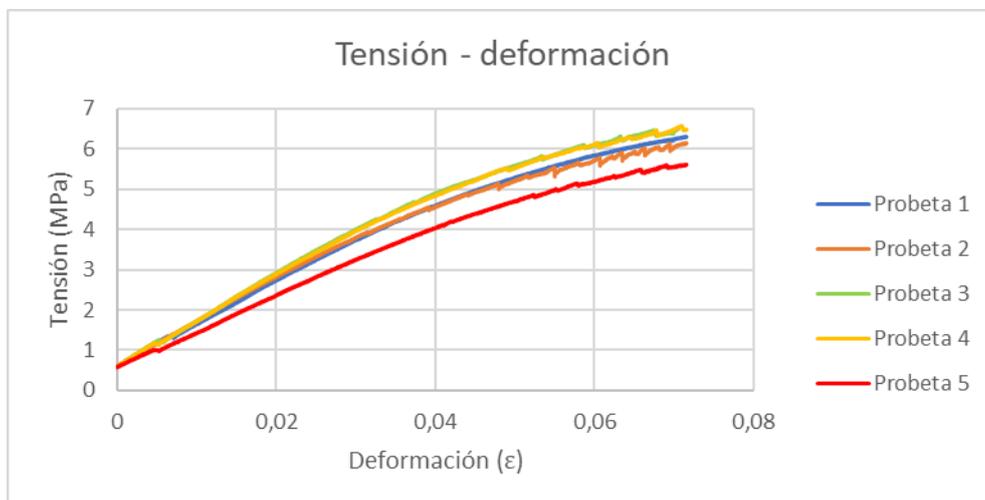


Figura 106. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	6,72	0,091	124,12
<b>Probeta 2</b>	6,14	0,072	124,16
<b>Probeta 3</b>	6,49	0,070	123,60
<b>Probeta 4</b>	6,48	0,072	120,50
<b>Probeta 5</b>	5,61	0,072	90,65

Tabla 90. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno sin envejecimiento

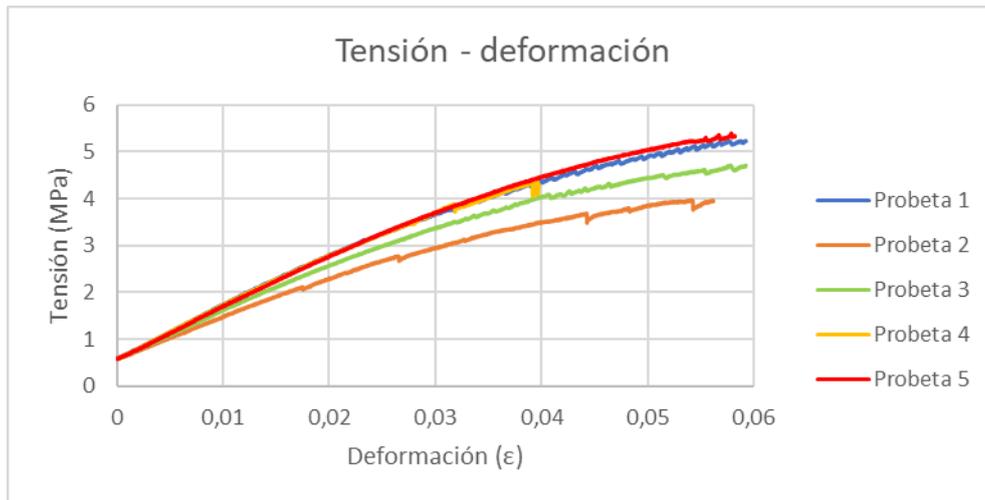


Figura 107. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	5,22	0,059	106,69
<b>Probeta 2</b>	3,80	0,059	90,54
<b>Probeta 3</b>	4,72	0,059	103,67
<b>Probeta 4</b>	4,54	0,043	116,89
<b>Probeta 5</b>	5,35	0,059	103,70

Tabla 91. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

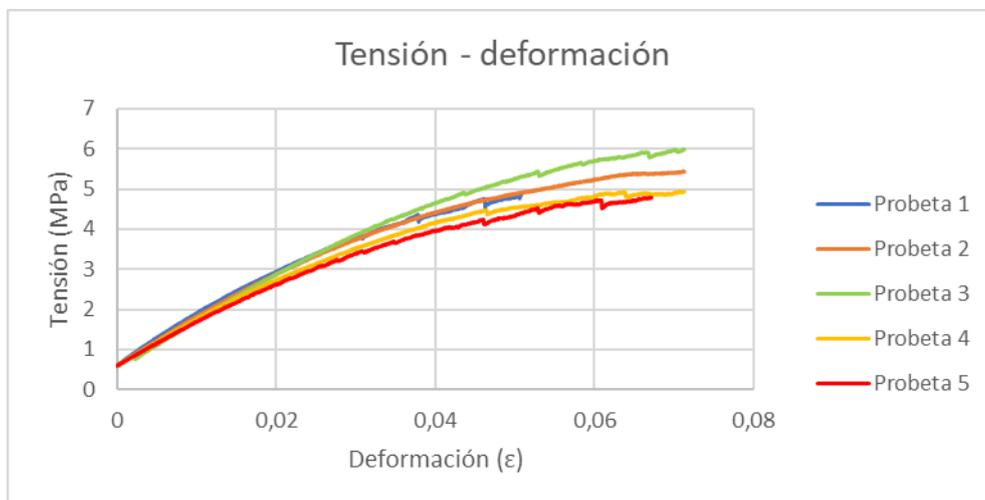


Figura 108. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	4,85	0,052	148,33
<b>Probeta 2</b>	5,53	0,079	121,16
<b>Probeta 3</b>	6,01	0,073	66,35
<b>Probeta 4</b>	5,03	0,076	121,18
<b>Probeta 5</b>	4,86	0,069	109,92

Tabla 92. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

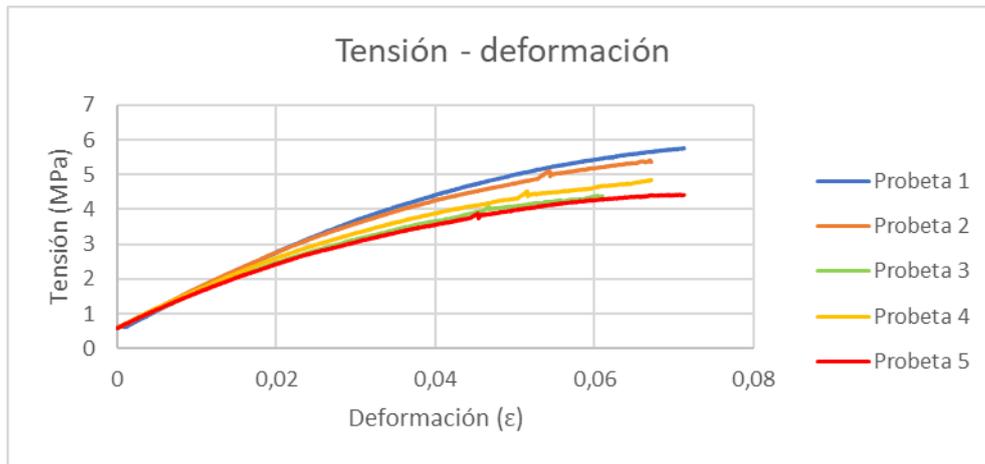


Figura 109. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$E'$ (MPa)
<b>Probeta 1</b>	5,90	0,078	72,86
<b>Probeta 2</b>	5,43	0,069	116,46
<b>Probeta 3</b>	4,43	0,063	103,74
<b>Probeta 4</b>	4,83	0,069	109,94
<b>Probeta 5</b>	4,41	0,072	106,34

Tabla 93. Ensayo de flexión TPU 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

## 2. ENSAYO DE FLEXIÓN EN TPE

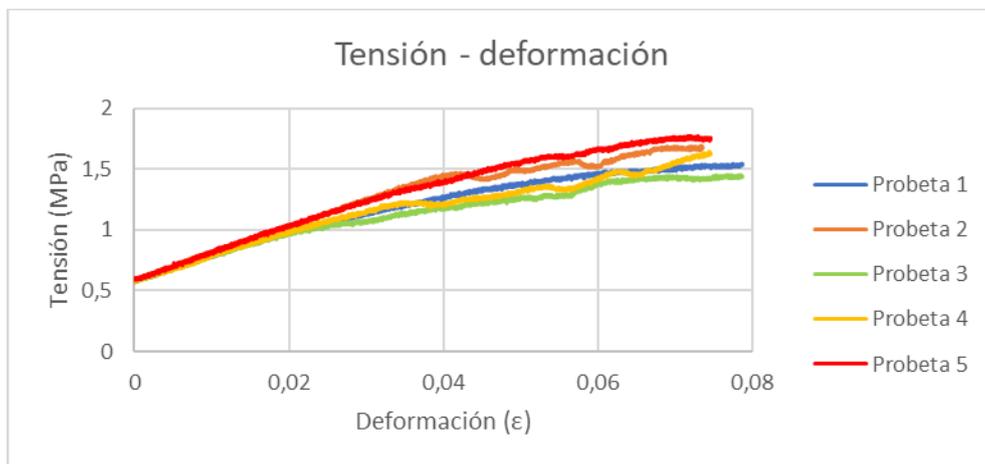


Figura 110. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$E'$ (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,52	0,078	23,39
<b>Probeta 2</b>	1,67	0,076	16,88
<b>Probeta 3</b>	1,44	0,079	16,78
<b>Probeta 4</b>	1,63	0,075	13,21
<b>Probeta 5</b>	1,73	0,076	20,39

Tabla 94. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno sin envejecimiento

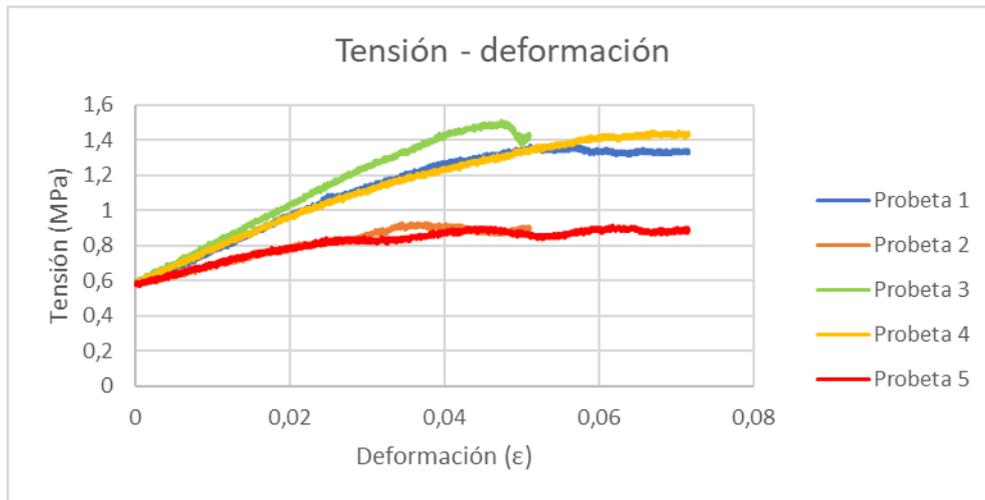


Figura 111. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,32	0,071	13,19
<b>Probeta 2</b>	0,88	0,051	13,78
<b>Probeta 3</b>	1,41	0,051	16,79
<b>Probeta 4</b>	1,42	0,074	16,78
<b>Probeta 5</b>	0,85	0,051	9,59

Tabla 95. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

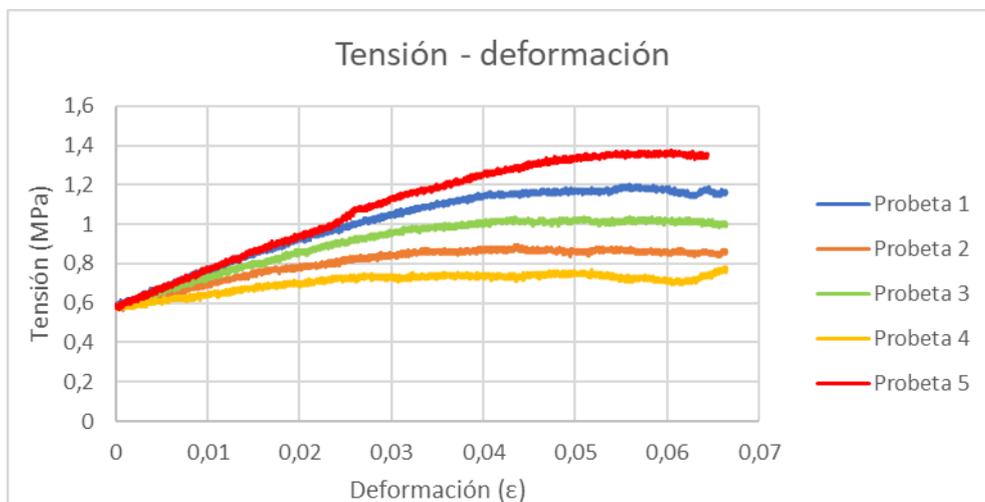


Figura 112. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,16	0,073	13,78
<b>Probeta 2</b>	0,99	0,082	13,19
<b>Probeta 3</b>	0,99	0,078	16,78
<b>Probeta 4</b>	0,88	0,076	10,19
<b>Probeta 5</b>	1,35	0,066	16,78

Tabla 96. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98



Figura 113. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$E'$ (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,22	0,074	19,71
<b>Probeta 2</b>	0,88	0,055	13,27
<b>Probeta 3</b>	1,43	0,085	23,52
<b>Probeta 4</b>	1,33	0,063	20,50
<b>Probeta 5</b>	1,17	0,073	16,88

Tabla 97. Ensayo de flexión TPE 5% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

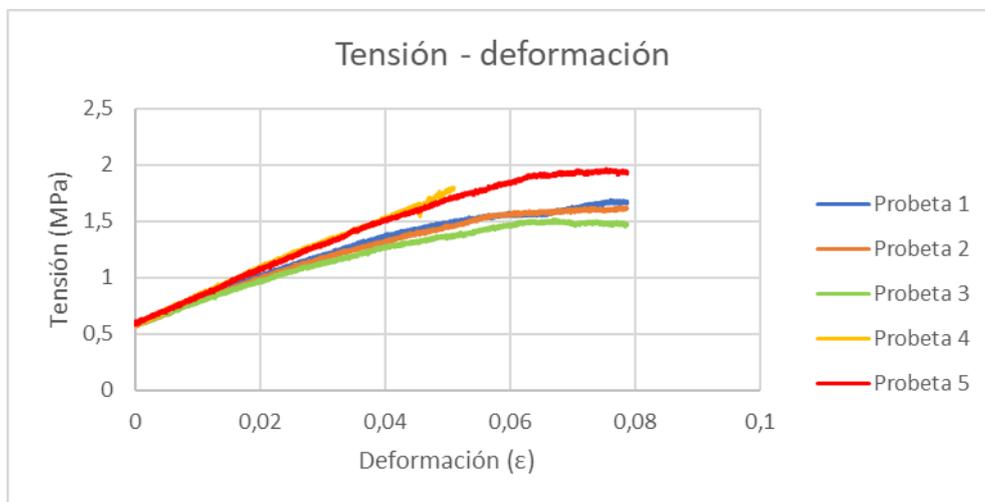


Figura 114. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$E'$ (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,66	0,079	20,40
<b>Probeta 2</b>	1,61	0,079	23,40
<b>Probeta 3</b>	1,45	0,078	13,20
<b>Probeta 4</b>	1,88	0,056	23,38
<b>Probeta 5</b>	1,92	0,079	23,38

Tabla 98. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno sin envejecimiento

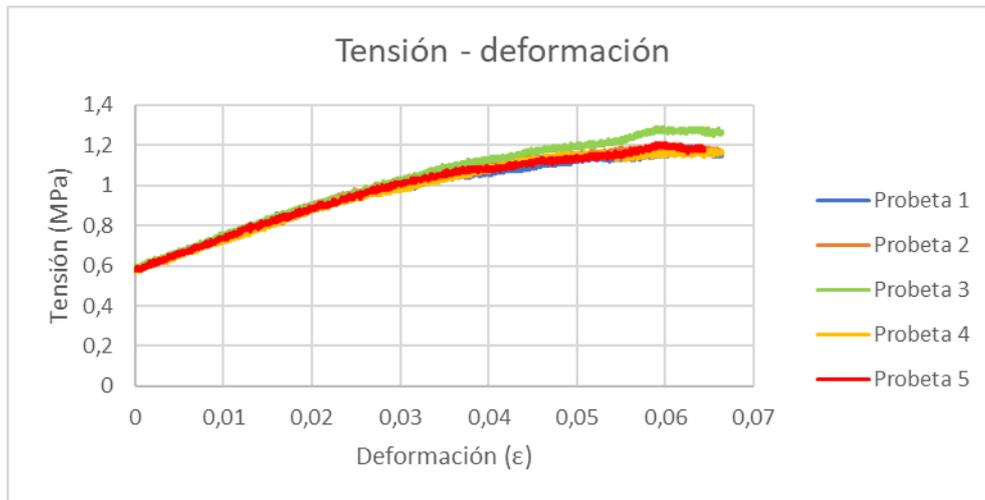


Figura 115. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,18	0,068	16,78
<b>Probeta 2</b>	1,32	0,079	16,78
<b>Probeta 3</b>	1,31	0,078	10,19
<b>Probeta 4</b>	1,13	0,056	13,19
<b>Probeta 5</b>	1,18	0,065	26,37

Tabla 99. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

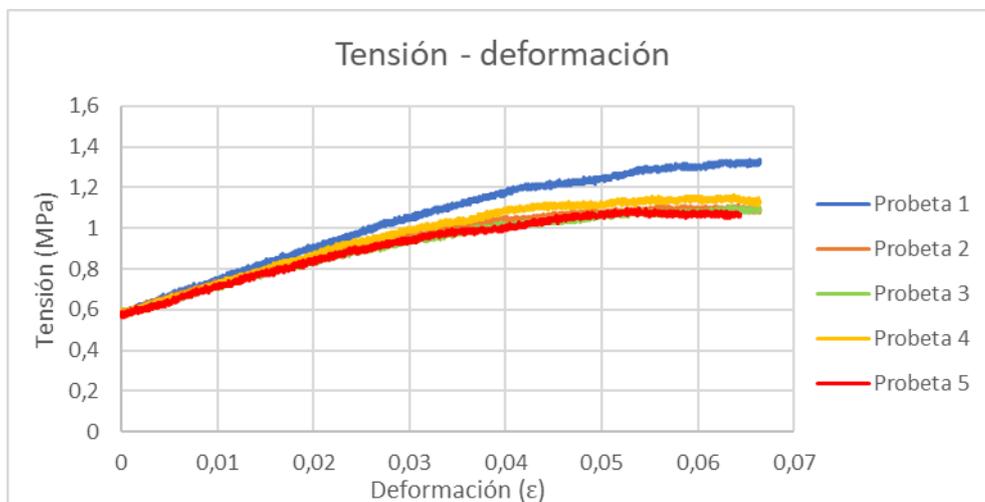


Figura 116. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,31	0,073	27,09
<b>Probeta 2</b>	1,26	0,082	13,78
<b>Probeta 3</b>	1,20	0,077	16,78
<b>Probeta 4</b>	1,12	0,075	16,78
<b>Probeta 5</b>	1,05	0,071	13,78

Tabla 100. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

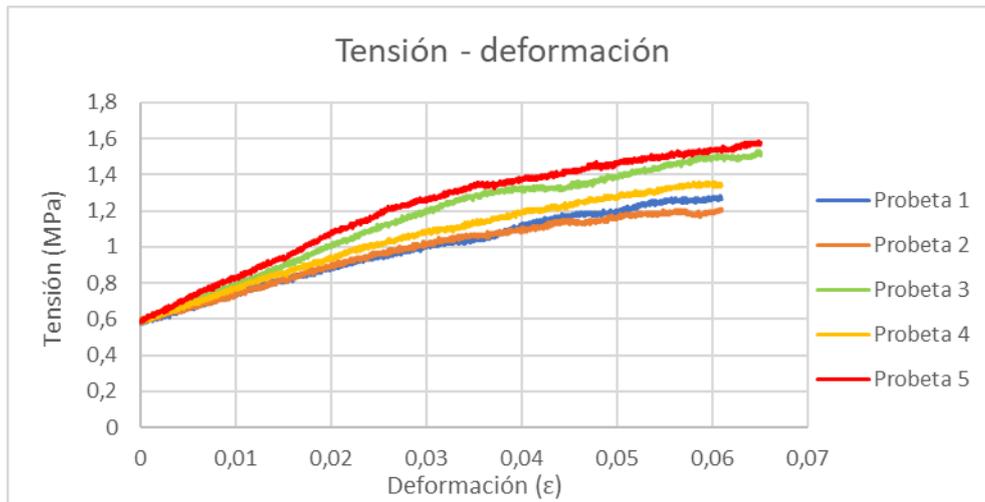


Figura 117. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,50	0,074	13,14
<b>Probeta 2</b>	1,35	0,076	16,87
<b>Probeta 3</b>	1,56	0,071	16,88
<b>Probeta 4</b>	1,40	0,071	16,88
<b>Probeta 5</b>	1,67	0,095	23,50

Tabla 101. Ensayo de flexión TPE 20% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

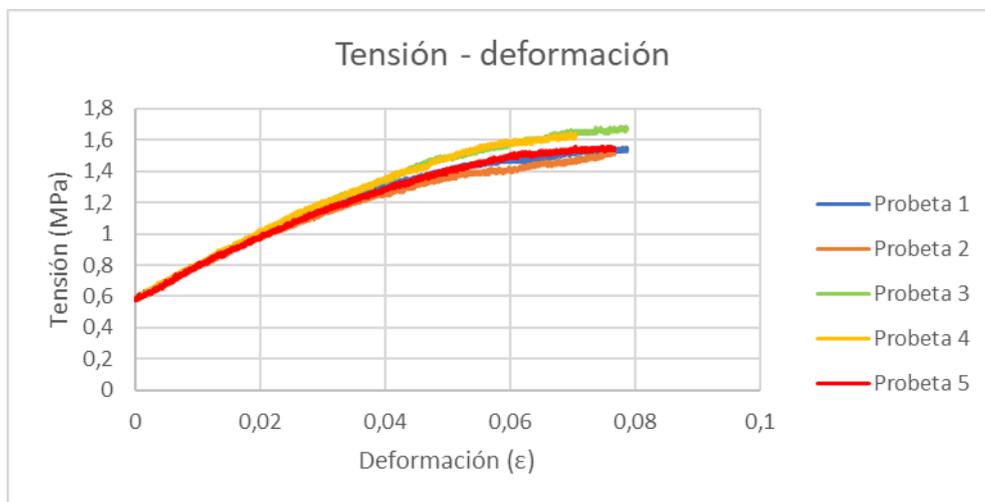


Figura 118. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,53	0,079	16,79
<b>Probeta 2</b>	1,53	0,077	23,39
<b>Probeta 3</b>	1,67	0,079	16,79
<b>Probeta 4</b>	1,65	0,077	23,36
<b>Probeta 5</b>	1,54	0,077	20,39

Tabla 102. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno sin envejecimiento

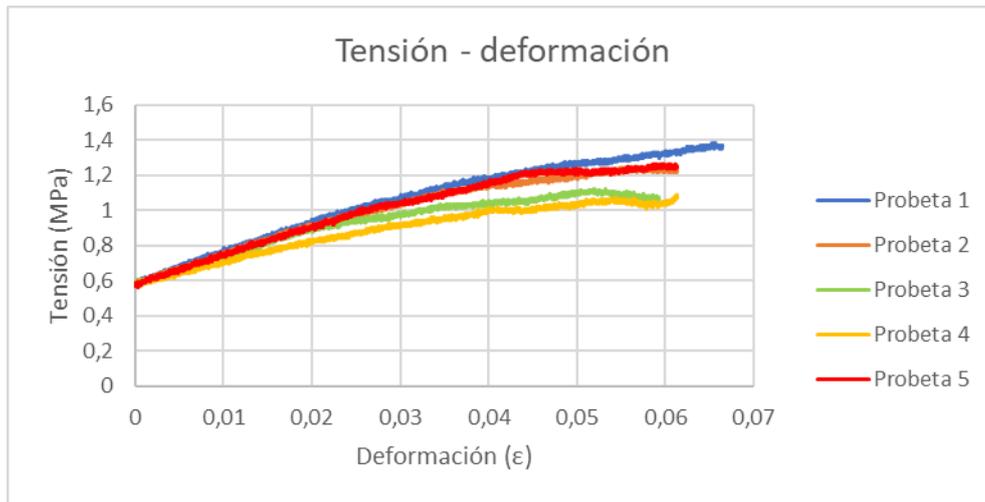


Figura 119. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,37	0,071	16,18
<b>Probeta 2</b>	1,23	0,075	13,19
<b>Probeta 3</b>	1,07	0,060	20,39
<b>Probeta 4</b>	1,11	0,063	2,99
<b>Probeta 5</b>	1,22	0,071	16,78

Tabla 103. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

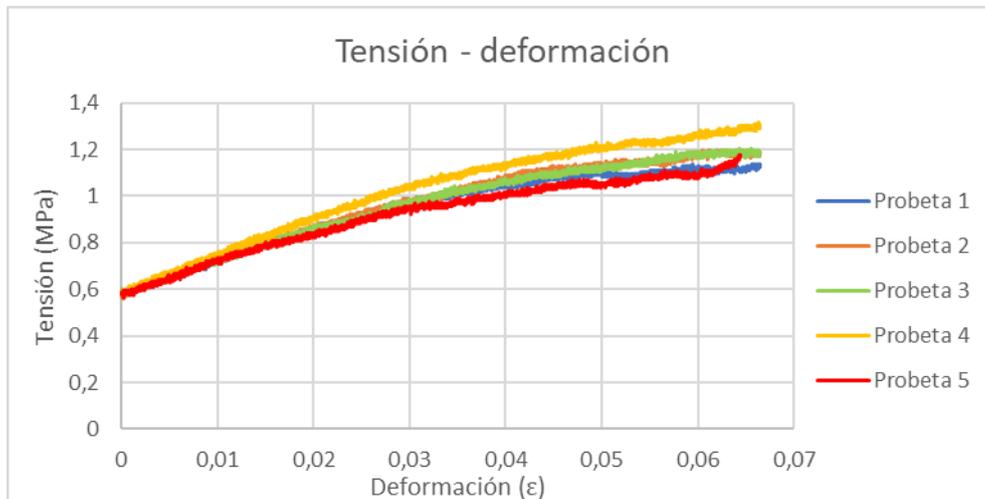


Figura 120. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,27	0,072	16,78
<b>Probeta 2</b>	1,22	0,073	9,59
<b>Probeta 3</b>	1,20	0,077	20,39
<b>Probeta 4</b>	1,32	0,076	23,39
<b>Probeta 5</b>	1,35	0,070	13,79

Tabla 104. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

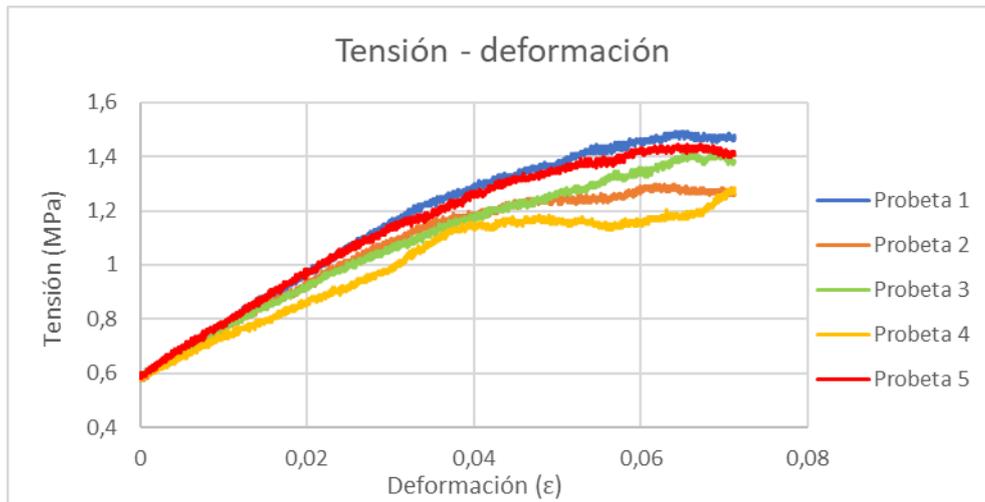


Figura 121. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,76	0,093	29,86
<b>Probeta 2</b>	1,36	0,075	29,87
<b>Probeta 3</b>	1,67	0,089	16,89
<b>Probeta 4</b>	1,27	0,072	20,29
<b>Probeta 5</b>	1,46	0,073	13,79

Tabla 105. Ensayo de flexión TPE 50% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

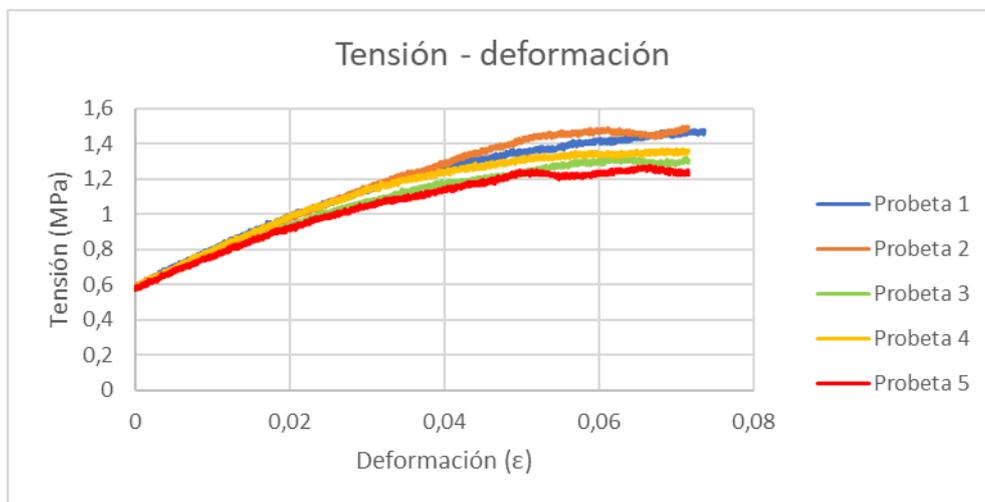


Figura 122. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno sin envejecimiento

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,45	0,074	23,41
<b>Probeta 2</b>	1,49	0,071	26,40
<b>Probeta 3</b>	1,31	0,071	16,79
<b>Probeta 4</b>	1,34	0,071	19,79
<b>Probeta 5</b>	1,22	0,072	13,79

Tabla 106. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno sin envejecimiento

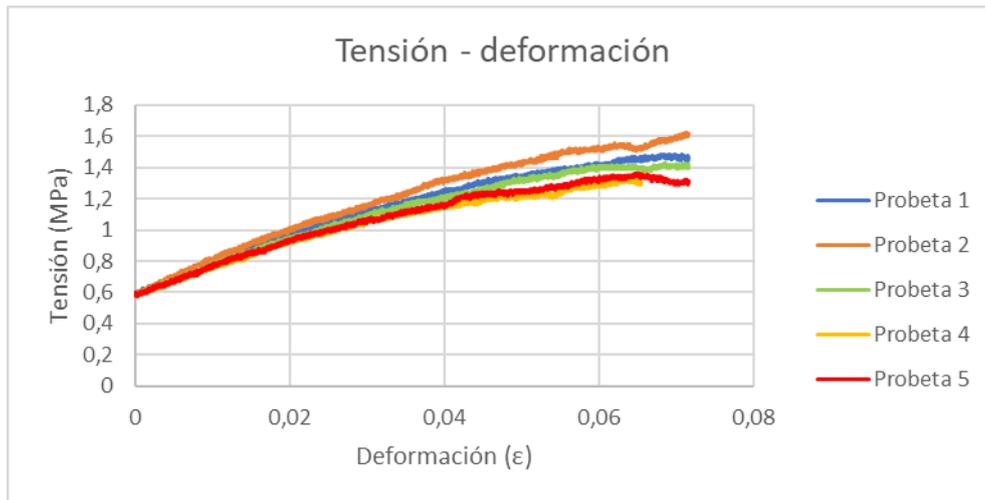


Figura 123. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,45	0,073	13,19
<b>Probeta 2</b>	1,61	0,072	10,19
<b>Probeta 3</b>	1,39	0,072	19,77
<b>Probeta 4</b>	1,28	0,066	13,79
<b>Probeta 5</b>	1,30	0,072	23,38

Tabla 107. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno tras 24h de envejecimiento en gasolina 98

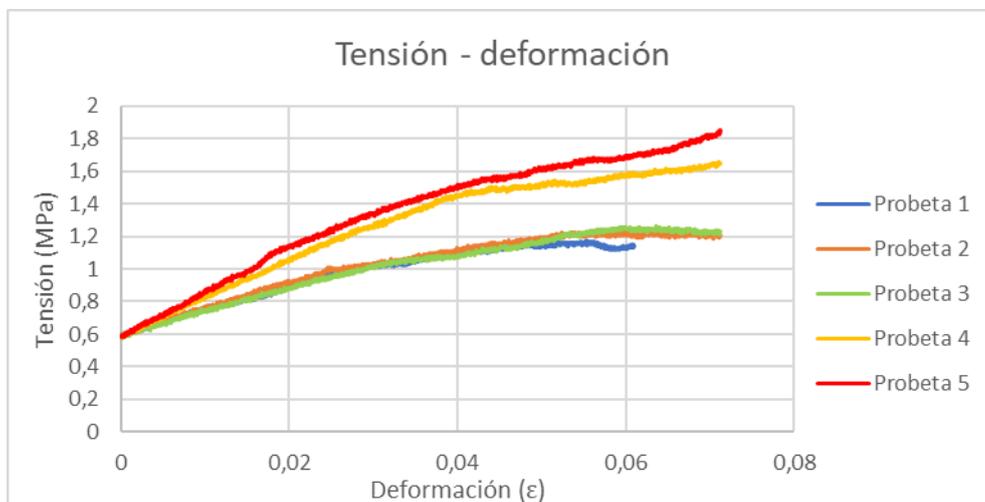


Figura 124. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	E' (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,15	0,070	13,15
<b>Probeta 2</b>	1,37	0,079	13,26
<b>Probeta 3</b>	1,14	0,077	16,73
<b>Probeta 4</b>	1,71	0,073	29,84
<b>Probeta 5</b>	1,84	0,071	27,14

Tabla 108. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno tras 1 semana de envejecimiento en gasolina 98

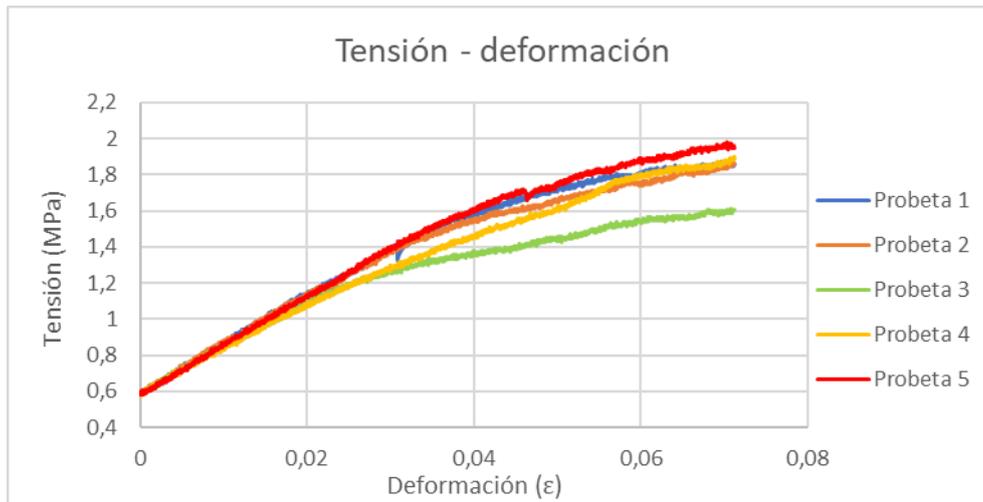


Figura 125. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$	$E'$ (MPa)
<b>Probeta 1</b>	1,85	0,074	30,73
<b>Probeta 2</b>	1,88	0,073	26,27
<b>Probeta 3</b>	1,59	0,074	19,89
<b>Probeta 4</b>	1,89	0,075	27,15
<b>Probeta 5</b>	1,98	0,075	23,29

Tabla 109. Ensayo de flexión TPE 80% de relleno tras 1 mes de envejecimiento en gasolina 98

## IX. BIBLIOGRAFÍA

---

- [ARAN00] **Síntesis y caracterización de poliuretanos termoplásticos que contienen resinas de colofonia y su aplicación como adhesivos, Francisca Arán Aís, 2000**
- [BRYD00] **Plastics Materials, BRYDSON J, 2000**
- [NAGY03] **Analysis of STL files, M. Szilvsi-Nagy, diciembre 2003;**  
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0895717703900793?token=1DC9A7F6EE7161D0B20B0047652564A6774BE697C6BC10DD5ADF4363C3E766B20A3D3C8BD2B045EDFE0E4275C8FBFF03>
- [OSSW03] **Materials Science of Polymer Engineers, OSSWALD TA, 2003**
- [JUAR12] **Estudio, análisis y clasificación de elastómeros termoplásticos, David Juárez Varón, Santiago Ferrandiz Bou, Rafael Antonio Balart Gimeno, David García Sanoguera, 2012**
- [KAUF12] **A Review of Additive Manufacturing, Kaufui V. Wong and Aldo Hernandez, mayo 2012**
- [MURR12] **Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies, Lawrence E.Murr, enero 2012**
- [SRIN12] **3D Printing and the Future of Manufacturing, Vivek Srinivasan and Jarrod Bassan, otoño 2012;** [http://assets1.csc.com/innovation/downloads/LEF\\_20123DPrinting.pdf](http://assets1.csc.com/innovation/downloads/LEF_20123DPrinting.pdf)
- [HOYO13] **Tecnologías de impresión de polímeros – procesos y aplicaciones, Mario Hoyos Núñez, 2013**
- [OJAD13] **RESISTENCIA AL DESGASTE Y A LA ABRASIÓN DE POLÍMEROS TÉCNICOS Y NANOCOMPOSITES, Gonzalo Ojados Sánchez, septiembre 2013**
- [OJED13] **Impresión 3D, Tecnología de los Plásticos, Mariano Ojeda, 17 de febrero de 2013**  
<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/02/impresion-3d.html>
- [HEDO14] **Herramienta para la definición de diferentes estrategias de impresión en tecnología FDM. Ensayos mecánicos, David Hedo Garcés, septiembre 2014**
- [FINN15] **High Definition 3D Printing – Comparing SLA and FDM Printing Technologies, Tyler Finnes, 2015;**  
<https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://scholar.google.es/&httpsredir=1&article=1001&context=jur>
- [KEAR15] **3D Printing: A Manufacturing Revolution, A. T. Kearney, 2015;**  
<https://www.atkearney.com/documents/10192/5992684/3D+Printing+A+Manufacturing+Revolution.pdf/bf8f5c00-69c4-4909-858a-423e3b94bba3>
- [KRUT15] **Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting, J-P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, L. Froyen, M. Rombouts, febrero 2015**
- [UKAR15] **Fabricación aditiva: Qué es cada tecnología, Eneko Ukar, Aitzol Lamikiz, Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco 8 de junio de 2015;**  
<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/138289-Fabricacion-aditiva-Que-es-cada-tecnologia.html>
- [MED17] **PROPIEDADES MECÁNICAS DE COMPONENTES FABRICADOS MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA, Alejandro Javier Del Medico Bravo, Julio de 2017**
- [WANG17] **3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective, Xin Wang, Man Jiang, Zuowan Zhou, febrero 2017**

- [GTGC16] **NOTA DE FUTURO Impresoras 3D, Centro de Análisis y Prospectiva Gabinete técnico de la Guardia Civil, 11 de marzo de 2016;** [https://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local\\_repository/documents/17854.pdf](https://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local_repository/documents/17854.pdf)
- [PATT16] **Characterization of Thermoplastic Polyurethane (TPU) and Ag-Carbon Black TPU Nanocomposite for Potential Application in Additive Manufacturing, Steven T. Patton, Chenggang Chen, diciembre 2016**
- [CANT17] **Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts, Jason T. Cantrell, Sean Rohde, David Damiani, junio 2017**
- [BILD18] **The Benefits of Additive Manufacturing, Samantha Bild, 8 de marzo 2018;** <https://blog.trimech.com/what-is-additive-manufacturing>
- [GARC18] **REFERENCIAS HISTÓRICAS Y EVOLUCIÓN DE LOS PLÁSTICOS, Sergio García, octubre 2018**
- [HIEM18] **LA IMPRESION 3D CON FDM: ¿Cómo funciona?, Joe Hiemenz, 2018;** <https://caminstech.upc.edu/sites/default/files/FDM%20I%20-%20Tecnologia.pdf>
- [JIME18] **MODELADO E IMPRESIÓN 3D, Mariano Jiménez y David Fraiz, Universidad Pontificia Comillas - ICAI, curso 2018-2019**