



Universidad
Rey Juan Carlos

Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Trabajo de Fin de Grado

EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD
ESTRUCTURAL DE POLÍMEROS PROCESADOS
POR TÉCNICAS DE FABRICACIÓN ADITIVA
MENDIANTE DIAGRAMAS DE RESISTENCIA
RESIDUAL

Rubén Fernández Casillas

Curso Académico 2022/23



Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Trabajo de Fin de Grado

El presente trabajo, titulado ***EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE POLÍMEROS PROCESADOS POR TÉCNICAS DE FABRICACIÓN ADITIVA MENDIANTE DIAGRAMAS DE RESISTENCIA RESIDUAL***, constituye la memoria correspondiente a la asignatura Trabajo de Fin de Grado que presenta D./D^a ***RUBÉN FERNÁNDEZ CASILLAS*** como parte de su formación para aspirar al Título de Graduado/a en Ingeniería de Tecnologías Industriales. Este trabajo ha sido realizado en ***UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS*** en el ***DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA QUÍMICA, ENERGÉTICA Y MECÁNICA*** bajo la dirección de ***ALBERTO J. CANO ARAGÓN y ALICIA SALAZAR LÓPEZ***.

Móstoles, 14 de junio de 2023

Contenido

1. Resumen.....	8
2. Introducción	10
2.1. Fabricación aditiva en materiales poliméricos.....	10
2.1.1. Fabricación aditiva. Características generales.	10
2.1.2. El papel de los materiales poliméricos en el mundo actual.....	11
2.1.3. Clasificación de las técnicas de fabricación aditiva para materiales poliméricos	12
2.1.4. Polímeros objeto de estudio.	17
2.2. Diagramas de resistencia residual.....	18
3. Objetivos	20
4. Metodología	21
4.1. Materiales y fabricación.....	21
4.2. Introducción controlada de defectos.....	23
4.3. Caracterización mecánica.....	24
4.3.1. Probetas lisas (sin agrietar)	24
4.3.2. Probetas con grietas largas	25
4.3.3. Probetas con grietas cortas.....	26
4.4. Medida de rugosidad	26
5. Resultados y discusión	28
5.1. Medida de rugosidad	28
5.2. Propiedades a tracción.....	28
5.3. Propiedades a fractura.....	31
5.4. Capacidad resistente de probetas fisuradas	33
5.5. Diagramas de resistencia residual.....	36
6. Conclusiones.....	42
7. Bibliografía	43
8. Anexo.....	48

Índice de ilustraciones

Figura 1 Proceso general de la fabricación aditiva (6)	11
Figura 2 Técnicas de fabricación aditiva.....	13
Figura 3 Esquema del Modelado por disposición de material fundido (FDM) (15)	14
Figura 4 Esquema del Procesamiento por luz digital (DLP) (33)	16
Figura 5 Diagrama de resistencia residual (41).....	18
Figura 6 Modelo de probetas objeto de estudio (Orientación 0º)	21
Figura 7 Creality Ender 3 (44).....	21
Figura 8 BCN Sigma R19 (45).....	22
Figura 9 Creality LD-006 (46).....	22
Figura 10 Montaje para introducir grietas entallas mediante la técnica “Sliding”	23
Figura 11 Ensayo mecánico utilizando la configuración de ensayo de tracción	24
Figura 12 Tensión ingenieril-Deformación ingenieril.....	25
Figura 13 Rugosímetro Mitutoyo SJ-301.....	26
Figura 14 Medida de la rugosidad en ambas direcciones	27
Figura 15 Curvas tensión-deformación ingenieril de los ensayos en probetas lisas de PLA.....	28
Figura 16 Curvas tensión-deformación ingenieril de los ensayos en probetas lisas de PETG	29
Figura 17 Curvas tensión-deformación ingenieril de los ensayos en probetas lisas de resina...	29
Figura 18 Fenómeno de Estricción	30
Figura 19 Fenómeno de estricción previo a la rotura de la probeta.....	30
Figura 20 Curvas fuerza-desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas de PLA con grietas de 3 mm de longitud nominal	31
Figura 21 Curvas fuerza-desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas de PETG con grietas de 3 mm de longitud nominal	32
Figura 22 Curvas fuerza-desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas de resina con grietas de 3 mm de longitud nominal	32
Figura 23 Curvas fuerza – desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas fabricadas en PLA, con distintas longitudes de grieta.	34
Figura 24 Curvas fuerza – desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas de PETG, con distintas longitudes de grieta.....	35
Figura 25 Curvas fuerza – desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas de resina, con distintas longitudes de grieta.....	36

Figura 26 Diagrama de resistencia mecánica residual del PLA junto con los datos experimentales (rombos rojos).....	38
Figura 27 Diagrama de resistencia mecánica residual del PETG junto con los datos experimentales (rombos rojos).....	38
Figura 28 Diagramas de resistencia mecánica residual de la resina junto con los datos experimentales (rombos rojos).....	39
Figura 29 Diagrama de resistencia mecánica residual utilizando la relación semi-empírica (ecuación 3) en función de l_0 del PLA junto con los datos experimentales (rombos rojos).....	40
Figura 30 Diagrama de resistencia mecánica residual utilizando la relación semi-empírica (ecuación 3) en función de l_0 del PETG junto con los datos experimentales (rombos rojos)	40
Figura 31 Diagrama de resistencia mecánica residual utilizando la relación semi-empírica (ecuación 3) en función de l_0 de la resina junto con los datos experimentales (rombos rojos) .	41

Índice de tablas

Tabla 1 Propiedades y aplicaciones de los filamentos utilizados en la modelación FDM	15
Tabla 2 Resultados del ensayo de rugosidad	28
Tabla 3 Parámetros obtenidos tras los ensayos para los tres materiales.....	31
Tabla 4 Tenacidad de fractura de los materiales objeto de estudio.....	33
Tabla 5 Valores de la tensión remota máxima y de la longitud de grieta inicial	37
Tabla 6 Longitudes críticas de los materiales objeto de estudio.	37
Tabla 7 Datos de las probetas ensayadas de PLA	48
Tabla 8 Datos de las probetas ensayadas de PETG	49
Tabla 9 Datos de las probetas ensayadas de la resina Monocure 3D.....	49

1. Resumen

Los polímeros son cada vez más utilizados en diferentes aplicaciones, tanto a nivel industrial como en diversos sectores. Estos materiales tienen como principal gran ventaja su elevada relación resistencia/peso frente a otro tipo de materiales como los metales. El presente trabajo se va a centrar en el estudio de tres materiales distintos, dos polímeros termoplásticos como el Ácido poliláctico (PLA) y el Poliéster de glicol (PETG), y la resina termostable fotocurable con denominación comercial Monocure 3D Clear Rapid. Estos polímeros son muy útiles cuando se enfocan a ciertos sectores, como puede ser el sector transporte o el aeronáutico, especialmente con la irrupción de las técnicas de fabricación aditiva, ya que permite abaratar el tiempo y costes de producción y de servicio en muchos casos, sin ver comprometida la calidad, y garantizando en todo momento la seguridad y la integridad estructural. La reducción de costes durante su vida en servicio está asociado al ahorro del combustible debido al bajo peso que ofrecen estos materiales frente a otros materiales tradicionales.

El uso de estos materiales en componentes estructurales requiere un conocimiento de la capacidad resistente en función del tamaño de defecto, para garantizar en todo momento que no se produzca el fallo en condiciones de servicio. Este conocimiento es escaso en el caso de los materiales poliméricos procesados por técnicas de fabricación aditiva, por lo que se requiere de un estudio de la integridad estructural profundo para garantizar el uso de las piezas procesadas por técnicas de fabricación aditiva en el componente final. Este conocimiento puede adquirirse con la determinación de los diagramas de resistencia mecánica residual que son representaciones de la tensión máxima capaz de soportar el componente en función del tamaño de defecto.

Para poder llevar a cabo el estudio, inicialmente se midieron las propiedades mecánicas y las propiedades a fractura y posteriormente se midió la fuerza máxima capaz de soportar la probeta cuando ésta presentaba grietas con distintas longitudes. La configuración de ensayo fue en todo momento la configuración halterio y el estudio se realizó en probetas fabricadas en los termoplástico PLA y en PETG mediante la técnica de modelado por filamento fundido (FDM), y en una resina comercial mediante la técnica de procesado por luz digital (DLP). En el caso de las probetas procesadas por FDM, éstas se diseñaron para que la orientación del filamento fuera paralela a la de la aplicación de la carga en todos los ensayos mecánicos. Sobre cada una de las probetas fabricadas se analizó el acabado superficial mediante ensayos de rugosidad superficial.

Para el análisis de la influencia de los defectos en el comportamiento mecánico de los materiales objeto de estudio, los defectos introducidos fueron los más perjudiciales posibles como son las grietas. Se introdujeron grietas de diferentes tamaños mediante las técnicas de presión de cuchilla

y de deslizamiento de cuchilla, realizando siempre un análisis posterior para garantizar que el procedimiento seguido no introducía daño en el frente de la grieta introducida.

De las dos técnicas de fabricación aditiva, el procesado por luz digital se caracterizó por conseguir mejores acabados superficiales que el modelado por filamento fundido. Los resultados mecánicos revelaron que el PLA y la resina presentaban un comportamiento frágil mientras que el PETG un comportamiento dúctil. Los valores de mayor resistencia mecánica y rigidez fueron para el PLA y los menores para la resina comercial, mientras que la deformación a rotura fue superior al 200% en el PETG. Respecto a la tenacidad de fractura, el PETG presentó los valores más elevados mientras que la resina comercial los valores más bajos, habiendo una diferencia de un orden de magnitud entre los termoplásticos y la resina termoestable.

En relación a la sensibilidad a la presencia de defectos, los termoplásticos presentaron menor sensibilidad que la resina termoestable. Esto en parte viene definido por la longitud característica que se puede definir como el valor límite a partir del cual la capacidad resistente del material empieza a disminuir. En caso de los termoplásticos es del orden de milímetros mientras que en la resina comercial de apenas una decena de micras.

Una vez realizados los ensayos mecánicos se obtuvieron los diagramas de resistencia residual a partir de las filosofías de la Resistencia de Materiales y de la Mecánica de la Fractura. El problema fue que los datos experimentales no se ajustaban a los diagramas en ninguno de los casos. En cambio, los diagramas de resistencia residual mediante el uso de la relación semi-empírica de El Haddad y Topper haciendo uso de la longitud característica se ajustaron perfectamente a los datos experimentales, resultando una herramienta muy precisa para la predicción del fallo.

2. Introducción

2.1. Fabricación aditiva en materiales poliméricos

2.1.1. Fabricación aditiva. Características generales.

La fabricación aditiva se puede definir como aquel conjunto de técnicas en las que a través de la adición y unión de materiales capa a capa a partir de un archivo CAD (Computer-Aided Design) se consigue la pieza final requerida (1). Esta técnica permite fabricar objetos tridimensionales, a través de un modelo digital, sin necesidad de poseer un molde. (2)

La fabricación aditiva comenzó en el año 1981 cuando Hideo Kodama solicitó una patente en la que se describía el sistema de curado de resina mediante láser, aunque por problemas de financiación, no pudo completar el proceso. Mas tarde, un equipo francés intentó patentar una técnica parecida a la ideada por Hideo, pero nuevamente tuvieron problemas de financiación. No fue hasta el año 1984 cuando Charles Chuck Hull creó la tecnología de estereolitografía (SLA, Stereolithography), técnica que consiste en la curación de una resina mediante luz ultravioleta en un tanque, consiguiendo en 1986 la patente (3) y comercializando esta tecnología a partir del año 1988. Posteriormente, en 1988 se inventó la técnica de Sinterizado Selectivo por Láser (SLS, Selective Laser Sintering), la cual comenzó su comercialización en los años 90. Esta técnica de fabricación aditiva está basada en la utilización de un láser de CO₂ que sinteriza pequeñas partículas de materiales poliméricos o metálicos juntándolas capa a capa, hasta conseguir una estructura 3D sólida. (4)

Para la construcción de piezas mediante fabricación aditiva, se toma como punto de partida un modelo CAD (modelo en 3D) con las especificaciones de diseño requeridas en cada una de las variantes de la técnica de fabricación (Figura 1). Este diseño se exporta en formato STL (siglas provenientes del término en inglés Stereolithography), encargado de generar triángulos enlazados que definen la geometría superficial del modelo 3D, eliminando todo aquello ajeno a la geometría tal como colores, texturas y la estructura interna, y facilitando la lectura de los modelos CAD a través de softwares especializados para cada una de las técnicas de fabricación aditiva (5).

Una vez finalizada la lectura del fichero STL a través del software especializado, se procede a seleccionar los parámetros que definirán el proceso de impresión tales como el espesor de cada capa, la velocidad de impresión, la cantidad de material utilizado, el patrón del relleno, la orientación de cada capa, etc. Estos parámetros definirán tanto la calidad final de la pieza, como las propiedades mecánicas de la misma. Finalmente, se procede a la impresión de la pieza final.

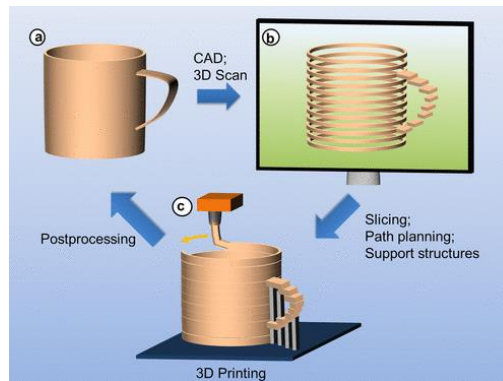


Figura 1 Proceso general de la fabricación aditiva (6)

2.1.2. El papel de los materiales poliméricos en el mundo actual

Hoy en día el uso de los polímeros está muy extendido en el mundo, usados en multitud de campos como el de la salud, el textil, la construcción, el transporte y la electricidad (7). Uno de los sectores más destacados es el sector del transporte. El auge de estos materiales se debe a la posibilidad de fabricar piezas que aseguren la seguridad y el confort requeridos en las distintas aplicaciones, disminuyendo el peso y generando un ahorro de coste tanto en los procesos de fabricación como en el uso de combustibles. Un claro ejemplo del avance que han supuesto estos materiales es en los vehículos de carreras, ya que en un inicio éstos eran construidos con piezas de acero. Posteriormente, se introdujo el uso de aleaciones de aluminio que eran más livianas, hasta llegar al uso de materiales compuestos y polímeros de alto rendimiento (8). Otro sector de los transportes en el que se ha incrementado el uso de los materiales poliméricos es el sector de la aeronáutica, ya que permite reducir el peso de las aeronaves y, por tanto, reducir los costes de servicio sin comprometer la seguridad.

Los polímeros se pueden clasificar en función de su estructura, origen, método de estructuración, aplicaciones, naturaleza química, sus propiedades físicas y, por último, en función de su comportamiento térmico (9). En el presente estudio, nos centraremos en esta última clasificación, diferenciando, de manera general, entre dos tipos de polímeros (9):

- **Termoplásticos:** formados por cadenas de moléculas largas unidas por enlaces de Van der Waals, formando estructuras lineales o ramificadas. Este tipo de enlace se caracteriza por la debilidad en la unión entre las moléculas (10), de modo que, al aplicar temperatura sobre ellos, los enlaces se debilitan y las cadenas de moléculas comienzan a fluir, pasando del estado sólido al de fluidez, lo que permite moldearlos a temperaturas entre los 80 °C y 100 °C. Cabe destacar que, una vez se disminuye la temperatura, los enlaces se vuelven a formar, pasando por un estado viscoso para posteriormente solidificarse y endurecerse de forma completa, adoptando la forma deseada.

Debido a su estructura, los polímeros termoplásticos presentan diferentes propiedades, pudiendo destacar: aislamiento térmico y eléctrico, maleabilidad a altas temperaturas, resistencia a la fluencia y a agentes químicos y reciclabilidad.

- Termoestables: formados por cadenas de moléculas unidas fuertemente por enlaces covalentes. No son moldeables a alta temperatura, dado que los enlaces son tan fuertes que al elevar la temperatura no se rompen y fluyen, como ocurre con los polímeros termoplásticos, sino que se descomponen, convirtiéndose en un material frágil (9).

Debido a su estructura, los polímeros termoestables presentan diferentes propiedades, pudiendo destacar: aislamiento térmico y eléctrico, estabilidad térmica, rigidez, estabilidad dimensional o resistencia a la fluencia.

2.1.3. Clasificación de las técnicas de fabricación aditiva para materiales poliméricos

Existe una amplia variedad de tecnologías englobadas dentro de la fabricación aditiva, las cuales se pueden clasificar en función de los siguientes procesos de manufactura en: extrusión de material, inyección de material, inyección de aglomerante, laminación por capas, fotopolimerización en cuba, fusión de lecho de polvo y deposición de energía dirigida (Figura 2) (6). A continuación, se hace una breve descripción de cada una de las técnicas (11):

- Fotopolimerización en cuba: este proceso consiste en la fabricación de una pieza mediante luz ultravioleta que cura capa por capa un baño de resina. Con esta técnica se puede conseguir un elevado grado de precisión y un buen acabado superficial.
- Extrusión de material: una de las técnicas más comunes de este proceso es el método de deposición fundida de material, el cual consiste en fundir el polímero y a través de una boquilla se va depositando capa a capa hasta obtener la pieza final.
- Inyección de material: este proceso funde un polímero para inyectarlo en un molde a través de una boquilla de inyección. Una vez el material se enfría, se abre el molde para extraer la pieza.
- Inyección de aglomerante: este proceso utiliza un aglutinante líquido que se pulveriza sobre un lecho de polvo para su posterior solidificación.
- Fusión de lecho de polvo: esta tecnología funde partículas de polvo usando un láser o un haz de electrones. Actualmente, es una de las técnicas más utilizadas debido a los buenos acabados de la pieza y al bajo coste del proceso.
- Deposición directa de energía: a través de una boquilla se deposita polvo fundido sobre una superficie donde solidifica. Esta técnica utiliza un rayo láser o un haz de electrones, y tiene un elevado control sobre la estructura del grano.
- Laminación por capas: consiste en superponer varias capas de material compuesto para fabricar el objeto deseado.

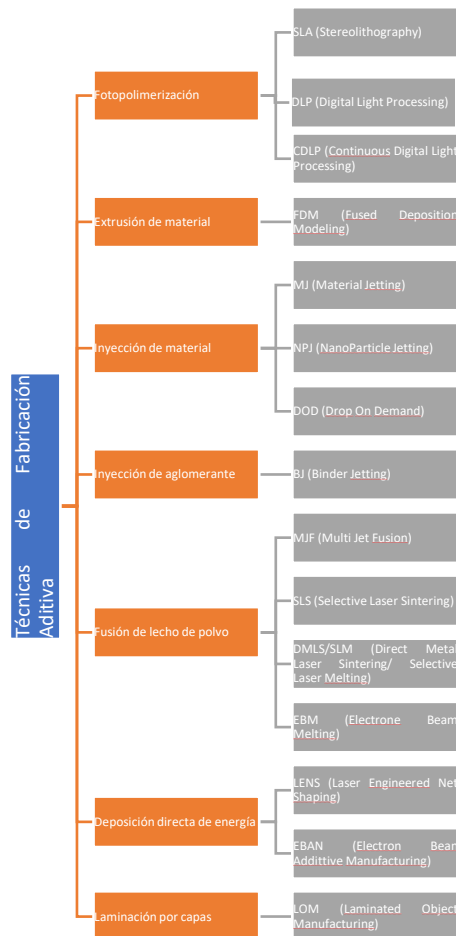


Figura 2 Técnicas de fabricación aditiva

Las técnicas más representativas de acuerdo con el uso que tienen en el sector de la fabricación 3D se detallan brevemente a continuación (12):

- Estereolitografía (SLA, Stereo Litography Apparatus): técnica incluida dentro del proceso de manufactura de fotopolimerización, basada en el uso de un láser de luz ultravioleta para llevar a cabo el curado de una resina termoestable.
- Modelado por filamento fundido (FDM, Fused Deposition Modeling): a través de un cabezal se depositan capas de polímero termoplástico fundido hasta formar la pieza final. Esta técnica se encuentra clasificada dentro del proceso de manufactura de fabricación aditiva por extrusión de material.
- Sinterizado selectivo por láser (SLS): tecnología basada en la utilización de un láser que solidifica capa a capa el polvo de un polímero termoplástico. Este método se incluye dentro del proceso de manufactura de fabricación aditiva por fusión de lecho de polvo.
- Procesado por luz digital (DLP, Digital Light Processing): técnica incluida dentro del proceso de manufactura de fotopolimerización, basada el uso de un proyector situado en la parte inferior de una cuba donde se lleva a cabo el curado de una resina termoestable.

El presente trabajo de fin de grado se centrará en la fabricación de probetas mediante las técnicas de fabricación aditiva de modelado por filamento fundido y procesado por luz digital, las cuales se describen en profundidad en los siguientes apartados.

2.1.3.1. Modelado por filamento fundido

La técnica de modelado mediante deposición de filamento fundido (FDM) es un proceso de fabricación aditiva basado en la extrusión de un filamento para generar capas que se van depositando una encima de otra. En primer lugar, se comienza colocando una bobina de material con forma de filamento, el cual se hace pasar por un extrusor a altas temperaturas (en función de la temperatura de fusión del polímero) (Figura 3). Una vez fundido, se deposita por capas sobre una cama o plataforma precalentada, a fin de evitar roturas de la pieza final por un cambio brusco de temperatura (13).

El extrusor debe desplazarse en los ejes X e Y mientras que la cama se desplaza a lo largo del eje Z. De este modo, el extrusor da la forma a la pieza en función del modelo deseado y la cama va descendiendo verticalmente, permitiendo depositar cada capa de la pieza. Como resultado final se obtiene una pieza con estructura anisotrópica, cuyas propiedades mecánicas van a depender de la dirección de la capa (14).

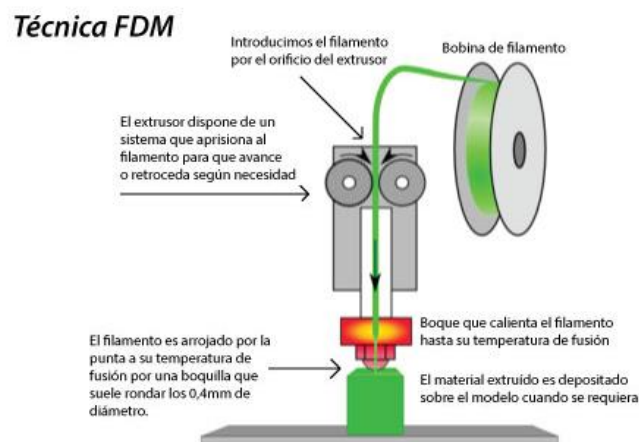


Figura 3 Esquema del Modelado por disposición de material fundido (FDM) (15)

Este tipo de proceso de fabricación aditiva solo puede aplicarse con polímeros termoplásticos debido a su capacidad para fluir, destacando, entre otros materiales, el uso de filamentos de ácido poliláctico (PLA). El PLA se caracteriza por tratarse de un material biodegradable y por no necesitar una cama precalentada durante el proceso de impresión debido a que la temperatura de extrusión no supera los 220 °C. Este material se caracteriza por su bajo coste, pero su resistencia mecánica es menor que la de otros materiales, como por ejemplo el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). En cambio, su temperatura de impresión es mayor, en torno a los 240 °C y 250 °C, haciendo necesario el uso de una cama precalentada en la impresión para evitar roturas de la pieza

(16). Otro de los materiales más utilizados en esta técnica es el poliéster de glicol (PETG) debido a su facilidad de extrusión y su estabilidad térmica.

La tabla 1 muestra el resumen de las propiedades y aplicaciones de los filamentos más utilizados en este tipo de impresión.

MATERIAL	Tª Impresión (°C)	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
PLA	220 (17)	Biodegradable (18), bajo coste, no toxico (17)	No muy resistente (17)	ingeniería Tisular (19), biosensores (20)
PETG	250 (21)	Resistente a varios químicos, resistente a esfuerzos mecánicos, no es tóxico (21)	Necesita alta temperatura y cama caliente (21)	Industria alimentaria, sector médico, piezas de soporte y protección en la industria del transporte (22)
ABS	240-250 (18)	Resistente (18)	Necesita alta temperatura y cama caliente, tóxico	Micro dispositivos (23), biomedicina
PVA	210-220 (18)	Hidrosoluble, útil como soporte (18)	Le afecta mucho la humedad (18)	Soporte, maquetas dentales (24)
TPE	210 (25)	Flexible (25)	No soporta la humedad (26)	Textil (27), plantillas ortopédicas (28)
PC	280 (18)	Muy resistente a golpes y altas temperaturas (18)	Necesita alta temperatura y cama caliente (18)	Dental, ortopédico (29), ingeniería tisular (30)

Tabla 1 Propiedades y aplicaciones de los filamentos utilizados en la modelación FDM

Las ventajas y desventajas de la técnica FDM (13) (31) son:

- Ventajas:
 - o Velocidad: es relativamente rápido para piezas de tamaño pequeño a mediano.
 - o Materiales: puede utilizar una amplia variedad de materiales en función de las aplicaciones.
 - o Coste: es económico debido a la accesibilidad de los materiales y equipos utilizados en el proceso.
 - o Diseño: permite la creación de diseños complejos en comparación con otros métodos de fabricación.
- Desventajas
 - o Limitaciones de resolución: la resolución de la impresora puede afectar a la calidad y precisión final de la pieza.

- Acabado superficial: en ocasiones es necesario someter a las piezas a un post-procesado a fin de eliminar la rugosidad superficial, lo que conlleva un encarecimiento.
- Llenado del material: debido a los cambios de dirección, las piezas presentan un porcentaje de volumen no llenado.
- Soportes: para imprimir piezas complejas es necesario el uso de soportes de material que se deben retirar, habitualmente disolviéndolas en agua o detergente, lo que puede requerir de más tiempo y trabajo.
- Deformaciones: cuando el material fundido se extruye y se enfría muy rápidamente, pueden generarse tensiones internas debido a la contracción del material. Esto genera deformaciones elevadas preferentemente en las esquinas, lo que puede generar un alabeo de la pieza denominado “warping”.

2.1.3.2. Procesado por luz digital

El modelado por luz digital (DLP) es una técnica de fabricación aditiva que utiliza una tecnología de proyección de luz para solidificar una resina líquida, depositada en el tanque de la impresora, en capas sucesivas.

En el proceso de modelado DLP (Figura 4), una fuente de luz se proyecta a través de una pantalla LCD (liquid crystal display) para crear una imagen en la superficie de la resina líquida. La luz proyectada endurece la resina en las áreas donde la imagen es visible, creando así una capa entera a la vez. Durante el proceso, la plataforma de impresión se mueve verticalmente a lo largo del eje Z para permitir la formación de una nueva capa de resina. Este proceso se repite hasta que finaliza la fabricación de la pieza. La pieza terminada se somete a una etapa de post-procesado, realizando una limpieza para eliminar el exceso de resina y un post-curado para dar el acabado final (32).

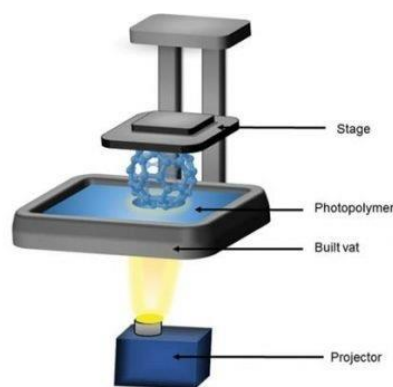


Figura 4 Esquema del Procesamiento por luz digital (DLP) (33)

Este proceso es similar al de la estereolitografía (SLA) pero, en lugar de un láser se utiliza una fuente de luz de proyección para solidificar la resina. Esto confiere al modelado DLP una mayor velocidad de impresión en comparación con el modelado SLA, lo que lo convierte en una opción popular para la producción de piezas en 3D.

La fabricación aditiva por procesamiento por luz digital utiliza como material resinas fotosensibles, es decir, polímeros termoestables que se curan al ser expuestas a una luz. Un ejemplo de ello es la resina Monocure3D.

A continuación, se detallan las principales ventajas y desventajas del modelado DLP:

- Ventajas:
 - o Alta resolución: puede producir piezas con una alta resolución, lo que lo convierte en una excelente opción para crear piezas detalladas y precisas.
 - o Variedad de materiales: existe una amplia variedad de resinas fotosensibles disponibles para el modelado DLP en función de las propiedades físicas, mecánicas y el coste deseado de la pieza.
- Desventajas
 - o Coste: tiene un coste mayor en comparación con otras técnicas de fabricación aditiva como la FDM debido al coste de los materiales y a las etapas de post-procesado.
 - o Vida útil de la resina: la resina fotosensible tiene una vida útil limitada en función de la calidad de la resina y las condiciones de almacenamiento (34).

2.1.4. Polímeros objeto de estudio.

El presente trabajo se centra en el estudio de tres materiales, dos termoplásticos como el PLA y el PETG y la resina termostable fotocurable con denominación comercial Monocure 3D Clear Rapid. A continuación, se describen las características de cada uno de ellos:

- El PLA es un polímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Este material está fabricado a base de recursos renovables como el almidón de maíz o la caña de azúcar, lo cual lo hace un material sostenible respetando al medio ambiente. Tiene numerosas aplicaciones ya que presenta un amplio rango de propiedades, desde el estado amorfo al estado cristalino. Se caracteriza por tener gran dureza, resistencia al impacto y rigidez, además de una buena resistencia frente a la torsión. Entre sus usos principales destaca: envases para la industria alimentaria y diferentes tejidos para la industria textil y médica (implantes de hueso y tejido y para suturas) (35) (36).
- El PETG es un termoplástico amorfo, caracterizado por tener una alta resistencia al impacto, al desgaste y a la corrosión de agentes oxidantes. A diferencia del PLA, es más flexible. Destaca su uso para envases de la industria alimentaria por su elevada resistencia al impacto y fácil esterilización. Por otro lado, al igual que en el caso del PLA es bastante utilizado en el sector médico para la fabricación de herramientas y prótesis (37) (38).
- Resina termoestable Monocure 3D Clear Rapid. Es una resina comercial termoestable fotocurable de uso extendido en impresoras 3D de procesamiento por luz digital. Es utilizada en diferentes sectores, como por ejemplo el de la aeronáutica para fabricar

componentes estructurales abaratando los costes de producción y mejorando la relación resistencia/peso de la aeronave. Cabe destacar que este tipo de resinas son muy utilizadas en impresiones 3D debido a su elevado grado de precisión frente a otro tipo de materiales que usan otras técnicas de fabricación aditiva.

2.2. Diagramas de resistencia residual

Existen dos filosofías de diseño de componentes estructurales (39) (40). La primera de ellas es la Resistencia de Materiales, que se basa en la aproximación de la vida segura del material donde no se tiene en cuenta los defectos. Esta filosofía considera que los materiales tienen una resistencia intrínseca e intenta que las cargas a las va a estar sometido el componente estructural genere tensiones que no superen en ningún caso la resistencia mecánica intrínseca del material.

Por otra parte, se encuentra la Mecánica de la Fractura, cuya filosofía es la de tolerancia al daño, y asume que cualquier material del que está hecho un componente estructural presenta defectos. El objetivo es determinar si los defectos son tolerables o si pueden llegar a provocar la fractura del material bajo la sollicitación externa del componente (39) .

Los diagramas de resistencia residual son representaciones en escala doblemente logarítmica de la tensión, σ , frente al tamaño del defecto, a , aunando las dos filosofías de diseño (Figura 5). Por un lado, para tamaños de defecto pequeños, próximos a cero, domina la Resistencia de Materiales, mientras que, para tamaños grandes del defecto, controla la Mecánica de la Fractura. Estos diagramas permiten conocer el comportamiento mecánico del componente en función del tamaño del defecto.

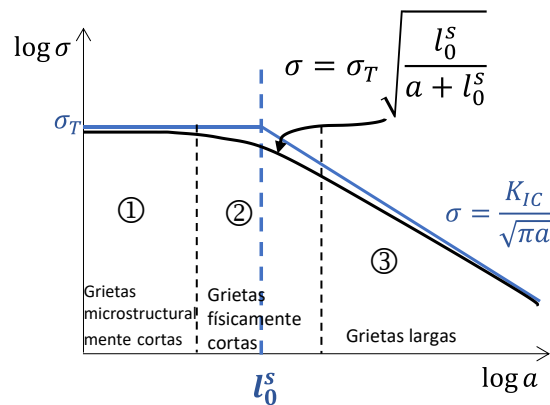


Figura 5 Diagrama de resistencia residual (41)

Estos diagramas se caracterizan por tres zonas bien diferenciadas. La zona ① o también denominada zona de grietas microestructuralmente cortas, el fallo ocurre cuando la tensión, σ , en algún punto del componente alcanza la propiedad mecánica intrínseca del material (tramo horizontal en color azul). En el caso de trabajar en modo I, la propiedad intrínseca sería la resistencia a tracción o la tensión de cedencia del material, σ_T . La zona ③ o zona de grietas largas, el fallo ocurre cuando el factor de intensidad de tensiones, K , alcanza la tenacidad de fractura del

material, K_{IC} . Y en el caso de estar en modo I, la tensión que produce el fallo viene determinada por

$$\sigma = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}}$$

Ecuación 1 Tensión de cedencia

donde K_{IC} es la tenacidad de fractura del material en modo I. Se trata de una recta de trazo azul con pendiente negativa y de valor $-1/2$ en escala doblemente logarítmica. En principio, para combinaciones de valores (σ, a) por debajo del trazo azul, se garantiza la integridad del componente mientras que, para combinaciones por encima del trazo azul, el fallo está garantizado. Y los valores que se encuentran sobre el trazo azul corresponde con el lugar de fallo.

El problema de estos diagramas se encuentra en la zona de intersección de ambas rectas, en la denominada zona de grietas físicamente cortas o zona ②. Experimentalmente se observó que para combinaciones de valores (σ, a) en la zona ② por debajo del trazo azul se producía la rotura del componente a pesar de estar en zona de integridad. Esto en parte se debe a que en la zona ② no es aplicable ni la Resistencia de Materiales ni la Mecánica de la Fractura. En el primer caso porque el tamaño de defecto es mayor que lo asumible por esta teoría, incumpliendo las leyes del Medio Continuo (40) y, en el segundo caso, el tamaño de defecto es menor o comparable a la zona de deformación plástica generada en la punta de la grieta, invalidando las hipótesis de aplicación de la Mecánica de la Fractura. La zona ② está caracterizada por una longitud característica, L_0 que puede definirse como el tamaño de defecto que marca la zona limítrofe de ambas teorías y se obtiene como de la intersección de ambas rectas:

$$L_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_T} \right)^2$$

Ecuación 2 Determinación de la longitud característica

Para salvar los problemas de integridad en la zona ②, donde claramente el lugar de fallo, El Haddad and Topper (42) propone una relación semi-empírica que predice de forma más precisa la tensión de rotura de los materiales en todo el rango de tamaño de grieta (incluyendo las grietas cortas), dada por:

$$\frac{\sigma}{\sigma_T} = \sqrt{\frac{L_0}{a + L_0}}$$

Ecuación 3 Tensión máxima en función del tamaño de grieta

Y que está representada en la Figura 5 con trazo negro. De este diagrama se concluye que a tamaños de grieta pequeños la tensión de fallo del material es prácticamente la tensión calculada por la Resistencia de Materiales y que a medida que aumenta el tamaño de grieta la tensión va disminuyendo y está definida por las leyes que rigen la Mecánica de la Fractura.

3. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es determinar los diagramas de resistencia mecánica residual en condiciones cuasiestáticas de los polímeros termoplásticos PLA y PETG y de la resina termoestable Monocure 3D, fabricados mediante técnicas de fabricación aditiva. Para la consecución de este objetivo principal, se definen los siguientes hitos:

- Medir la rugosidad de las superficies de las probetas para obtener la influencia del material y de la técnica de fabricación en el acabado superficial.
- Determinar la resistencia mecánica de los materiales objeto de estudio a partir de probetas lisas.
- Obtener la tenacidad de fractura de los materiales a partir de probetas con grietas largas.
- Obtener la capacidad resistente de los materiales objeto de estudio en función del tamaño de grieta introducido.
- Analizar la tolerancia de estos materiales a diferentes defectos que puedan aparecer en su estructura a partir de los diagramas de resistencia mecánica residual obtenidos.

4. Metodología

4.1. Materiales y fabricación.

Se han fabricado probetas de PLA y PETG utilizando la técnica de deposición de material fundido y probetas de resina termoestable fotocurable de grado comercial mediante la técnica de procesamiento por luz digital. La configuración de las probetas elegida es de tipo halterio (Figura 6), con dimensiones del fuste de $50 \times 12 \times 6 \text{ mm}^2$ para el caso de los tres materiales.

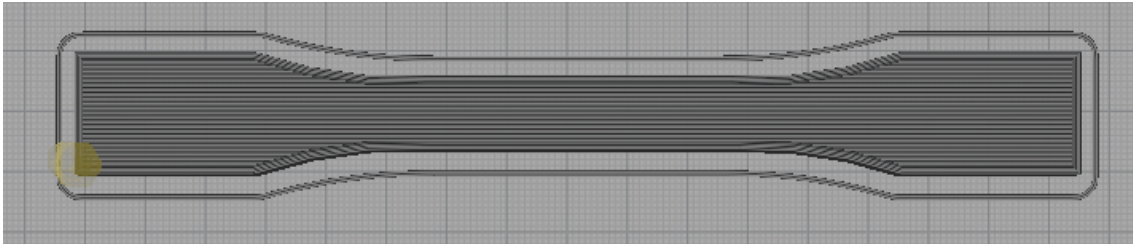


Figura 6 Modelo de probetas objeto de estudio (Orientación 0°)

Para las probetas de PLA, se ha utilizado la impresora *Creality Ender 3* (Figura 7) junto a un filamento transparente de la marca BQ. Estas probetas se diseñaron con orientación de capa de 0°, es decir, las fibras que conforman la probeta están orientadas paralelamente a la dirección de aplicación de la carga en los ensayos mecánicos (43). Para evitar discontinuidades en la superficie de rotura, el cambio de capa se ha generado en uno de los extremos de la probeta, evitando la generación de puntos de acumulación de tensiones en la zona central. La impresión se configuró con una altura de capa de 0,2 mm, una velocidad de impresión de 45 mm/min, una temperatura de extrusión de 205°C y la de la cama de impresión de 50°C.



Figura 7 Creality Ender 3 (44)

En el caso de las probetas de PETG se utilizó la impresora *BCN3D Sigma R19* (Figura 8), debido a su capacidad de trabajar a temperaturas de extrusión más elevadas que el equipo Creality Ender

3. La impresión se realizó a una temperatura de extrusión de 240°C y de 90°C para el soporte de impresión, siendo el resto de los parámetros de impresión los mismos que en el caso del PLA. También en este caso la orientación de la disposición del filamento ha sido de 0°, paralela a la dirección de aplicación de la carga en los ensayos mecánicos.



Figura 8 BCN Sigma R19 (45)

Las probetas de resina termoestable fueron fabricadas mediante la técnica de procesamiento por luz digital con el equipo *Creality LD-006* (Figura 9). La resina líquida se introduce en el equipo y una placa asciende lentamente a la vez que va curando capa a capa hasta completar la pieza. La altura de capa seleccionada fue de 50 μm y el tiempo de curado de 6 s. Una vez la pieza está fabricada, se pasa a una estación de lavado y post-curado. En primer lugar, se introduce la probeta en un baño de limpieza de isopropanol y, a continuación, se realiza un post-curado de 3 minutos con luz ultravioleta, el cual da el acabado final a la probeta.



Figura 9 Creality LD-006 (46)

4.2. Introducción controlada de defectos

Tras fabricar las probetas, se procede a introducir las diferentes grietas con diferentes longitudes. En primer lugar, se optimizó los pasos de las técnicas de corte con trozos de material desechables.

Para la introducción de las grietas, se utilizaron dos técnicas:

- Presión de cuchilla o “Pressing”: esta técnica fue utilizada en las probetas de PLA y PETG. Para llevar a cabo este procedimiento se utilizó un tornillo de banco donde se instaló una cuchilla de microtomo con un espesor de 0,3 mm, la cual cuenta con una punta de diámetro 5,3 μm . Enfrentada a la cuchilla se coloca la probeta y se ejerce una presión homogénea hasta conseguir la longitud final de la grieta requerida. Una vez se consigue el tamaño de grieta deseado, se extrae lentamente la cuchilla para no generar desperfectos en la pieza.
- Deslizamiento de cuchilla o “Sliding”: utilizado para las probetas de resina, es una técnica en la cual se introduce la grieta aplicando una pequeña presión a la vez que se desliza a lo largo de la superficie. Las probetas de resina son más frágiles que las de PLA y las de PETG y se descartó el uso de la técnica “pressing” en las primeras porque a la mínima presión ejercida la grieta natural se extendía más de lo requerido. El montaje utilizado consistía en un pequeño tornillo de banco con unas mordazas acopladas en las que se inserta la cuchilla (Figura 10). Mientras se ejerce una ligera presión en el material, se gira una manivela que hace desplazarse la plataforma inferior, en la cual está sujeta la probeta, para de esta forma deslizar la cuchilla en la superficie de la probeta a agudizar.

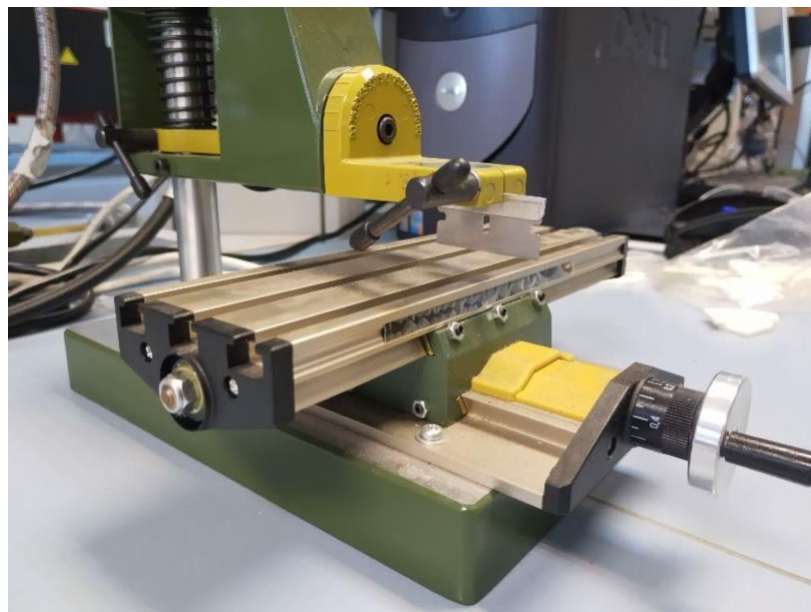


Figura 10 Montaje para introducir grietas entallas mediante la técnica “Sliding”

Las grietas introducidas han sido de 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 2,5 y 3 mm de longitud nominal con 3 probetas por condición y material.

Para garantizar la validez de los ensayos, la grieta introducida debe estar lo más recta posible, ya que la norma ISO 13586 (47) en el apartado 5.6 establece que la medida de la grieta, en cualquiera de sus puntos a lo largo del espesor de esta, no debe diferir en más del 10%. Además, se realiza la medición con calibre de las grietas introducidas antes de llevar a cabo los ensayos mecánicos.

4.3. Caracterización mecánica

La caracterización mecánica se llevó a cabo utilizando la configuración del ensayo de tracción para todas las probetas con o sin grieta introducida. Los ensayos se realizaron en la máquina de ensayos universal electromecánica *MTS Alliance RF/100* (Figura 11) equipada con una célula de carga de $\pm 5 \text{ kN}$, en control de desplazamiento y a una velocidad de desplazamiento del puente de 5 mm/min. La deformación axial se midió con un extensómetro de contacto *MTS 634.12F-54*. Previo al inicio de cada ensayo, se corrobora que la temperatura de la sala se encuentre a 21°C siguiendo las directrices de la norma *ASTM D638* (48).

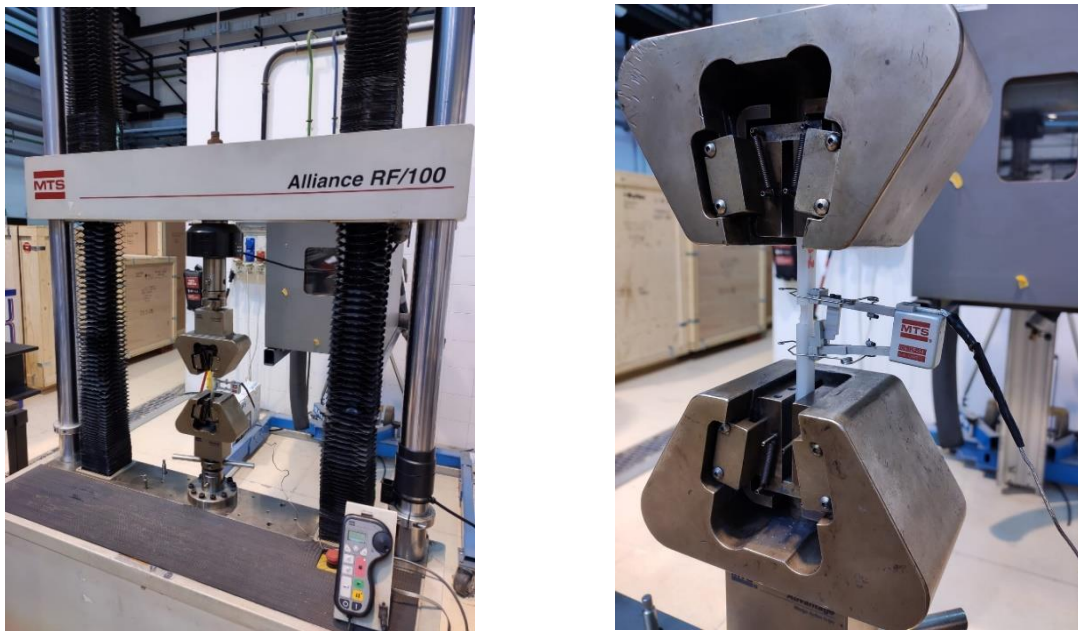


Figura 11 Ensayo mecánico utilizando la configuración de ensayo de tracción

Sobre la superficie de fractura se midieron las longitudes de grieta iniciales y finales con una lupa *MOTIC SMZ-168TL* junto con el software *Motic Images Plus 2.0*.

Una vez realizados los ensayos para los tres tipos de probetas (lisas, con grietas largas y con grietas cortas), hay que diferenciar qué parámetros mecánicos se obtiene de cada uno de ellos y como analizarlos.

4.3.1. Probetas lisas (sin agrietar)

De todos los ensayos realizados en las probetas lisas (sin agrietar) se obtiene las curvas fuerza-desplazamiento o alargamiento. A través de las curvas fuerza-desplazamiento se obtiene la tensión ingenieril como la fuerza dividida por la sección inicial de la probeta. Por otra parte, la

deformación ingenieril se obtuvo dividiendo el desplazamiento o alargamiento de la probeta medido con el extensómetro entre la longitud base del extensómetro. Una vez calculada la tensión y la deformación ingenieril se obtiene una curva como en la figura 12.

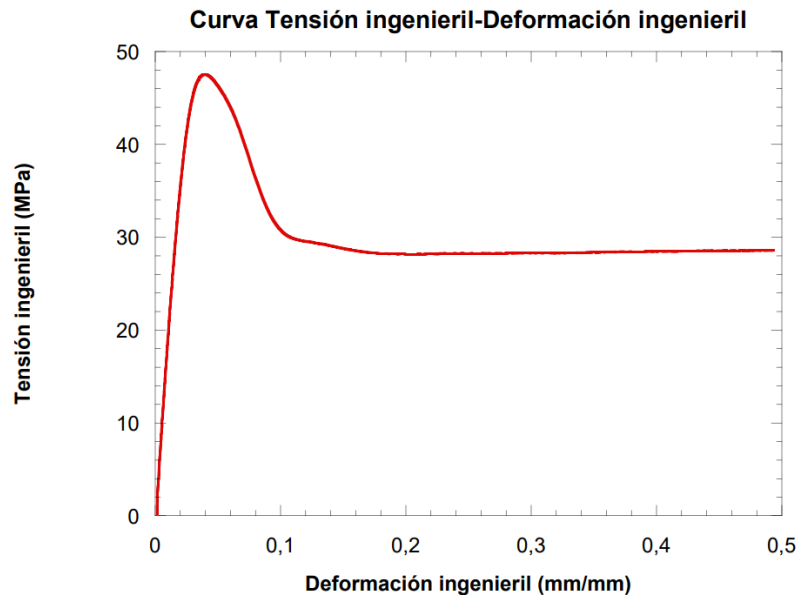


Figura 12 Tensión ingenieril-Deformación ingenieril

A través de la curva tensión-deformación ingenieril se puede realizar un análisis de las propiedades mecánicas del material. La curva presenta un primer tramo elástico-lineal, siendo la pendiente de este primer tramo lineal el módulo elástico del material.

Posterior a esta zona elástico-lineal, la curva llega a un máximo conocido como la tensión máxima alcanzada del material. En el caso de la figura 12, a partir de la tensión máxima alcanzada comienza la deformación plástica del material. En los materiales frágiles, la tensión máxima alcanzada del material no marca el cambio de comportamiento lineal a plástico, sino la tensión a la que el material rompe.

Por último, de estas curvas se puede obtener la deformación a rotura. Esta deformación es la máxima que alcanza el material en el momento exacto de rotura.

4.3.2. Probetas con grietas largas

El análisis de los datos de los ensayos en las probetas que presentan grietas largas se basa en la filosofía de la Mecánica de la Fractura. Para ello primero se debe identificar el tipo de ensayo que se va a realizar, en este caso, son probetas halterio con grietas largas, por tanto, esta configuración es análoga a la configuración del ensayo de fractura SENT (Single Edge Notch Tension).

Para calcular la tenacidad a fractura de las probetas, primero se debe calcular la relación del tamaño de grieta, a , frente al ancho de la probeta, w (Ecuación 4).

$$\alpha = \frac{a}{w}$$

Ecuación 4 Relación tamaño de grieta/ancho de probeta

Con este valor, se calcula el factor de forma $F(\alpha)$ (Ecuación 5) para esta configuración, que se aproxima a la configuración SENT (49):

$$F(\alpha) = 0,2832 + 3,8497\alpha - 1,4885\alpha^2 + 4,1716\alpha^3 + 9,9094\alpha^4 - 7,4188\alpha^5$$

Ecuación 5 Factor de forma de la configuración SENT

Una vez se ha obtenido el factor forma, la tenacidad a fractura K_{IC} para cada uno de los materiales se obtiene con la Ecuación 6 Determinación de la tenacidad .

$$K_{IC} = \sigma_f \sqrt{\pi a} F$$

Ecuación 6 Determinación de la tenacidad de fractura

Siendo σ_f la tensión remota de fallo, la cual se obtiene dividiendo la fuerza que da lugar a la rotura entre la sección remota (sección transversal de la probeta sin agrietar).

4.3.3. Probetas con grietas cortas

En el análisis de las probetas con grietas cortas surge una problemática, ya que no se pueden caracterizar bajo el marco de la Resistencia de los Materiales ni el de la Mecánica de la Fractura. Por tanto, de estos ensayos se recogen los datos de la tensión remota máxima previa a la rotura del material, para llevar a cabo la representación de las curvas tensión remota-deformación.

4.4. Medida de rugosidad

Para llevar a cabo la medida de la rugosidad de las probetas se ha utilizado un rugosímetro de contacto Mitutoyo SJ-301 (Figura 13), el cual cuenta con un detector con radio de punta de $60 \mu\text{m}$ y un ángulo de punta de 60° . La rugosidad ha sido medida en dirección 0° y 90° (Figura 14).



Figura 13 Rugosímetro Mitutoyo SJ-301

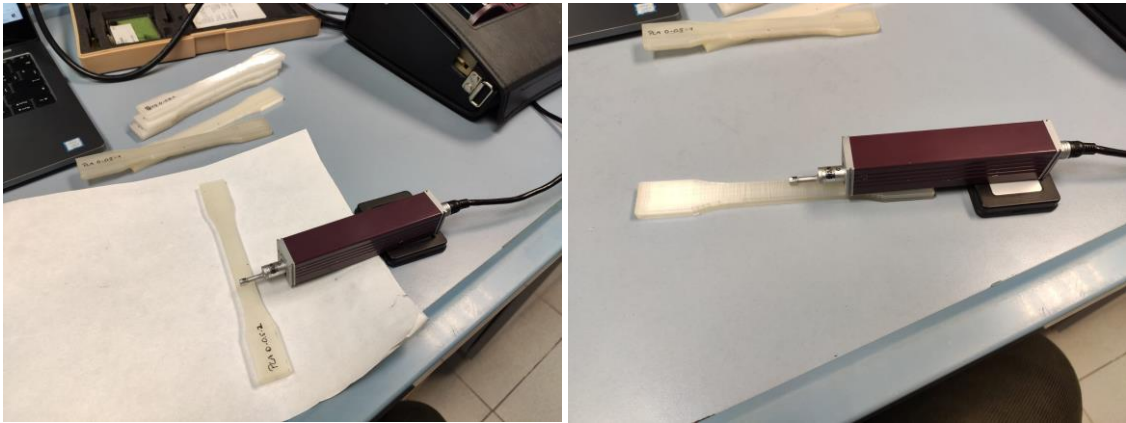


Figura 14 Medida de la rugosidad en ambas direcciones

Mediante la realización de este tipo de ensayos, se pueden obtener los siguientes parámetros característicos (50):

- R_a : se define como la rugosidad media aritmética, siendo el promedio de las desviaciones presentes de la longitud medida.
- R_z : representa la medida de las distancias máximas pico-valle obtenida en cada una de las longitudes ensayadas.

Al medir la rugosidad de las probetas se puede estudiar el acabado superficial dependiendo del material y técnica de fabricación.

5. Resultados y discusión

5.1. Medida de rugosidad

La Tabla 2 recoge los valores de la rugosidad, R_a y R_z , de los materiales objeto de estudio. Las probetas de resina, fabricadas mediante procesamiento por luz digital, presentan superficies más lisas y, por lo tanto, una menor cantidad de defectos superficiales, mientras que las probetas de PETG, fabricadas por modelado por filamento fundido (FDM), son las que presentan un mayor nivel de rugosidad.

Material	R_a (μm)	R_z (μm)
MONOCURE 3D	$0,1 \pm 0,01$	12 ± 2
PLA	$1,6 \pm 0,4$	26 ± 8
PETG	$2,4 \pm 0,1$	56 ± 4

Tabla 2 Resultados del ensayo de rugosidad

Estos valores de rugosidad permiten conocer las dimensiones iniciales de los defectos superficiales de las probetas, los cuales permitirán asignar a las probetas sin grietas en los diagramas de resistencia residual un tamaño de defecto igual al valor de la rugosidad tal y como se presentarán en el apartado 5.5.

5.2. Propiedades a tracción

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de tracción realizados en probetas de PLA, PETG y resina sin agrietar con orientación 0° . Las Figuras 15, 16 y 17 muestran las curvas tensión-deformación ingenieril obtenidas de los ensayos realizados en PLA, PETG y resina, respectivamente.

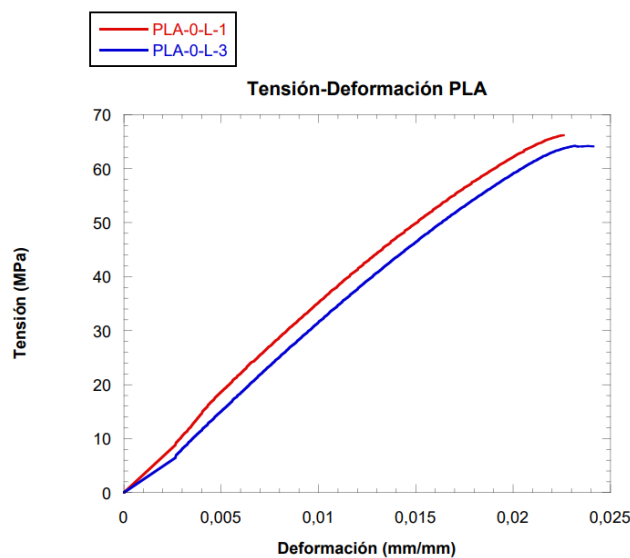


Figura 15 Curvas tensión-deformación ingenieril de los ensayos en probetas lisas de PLA

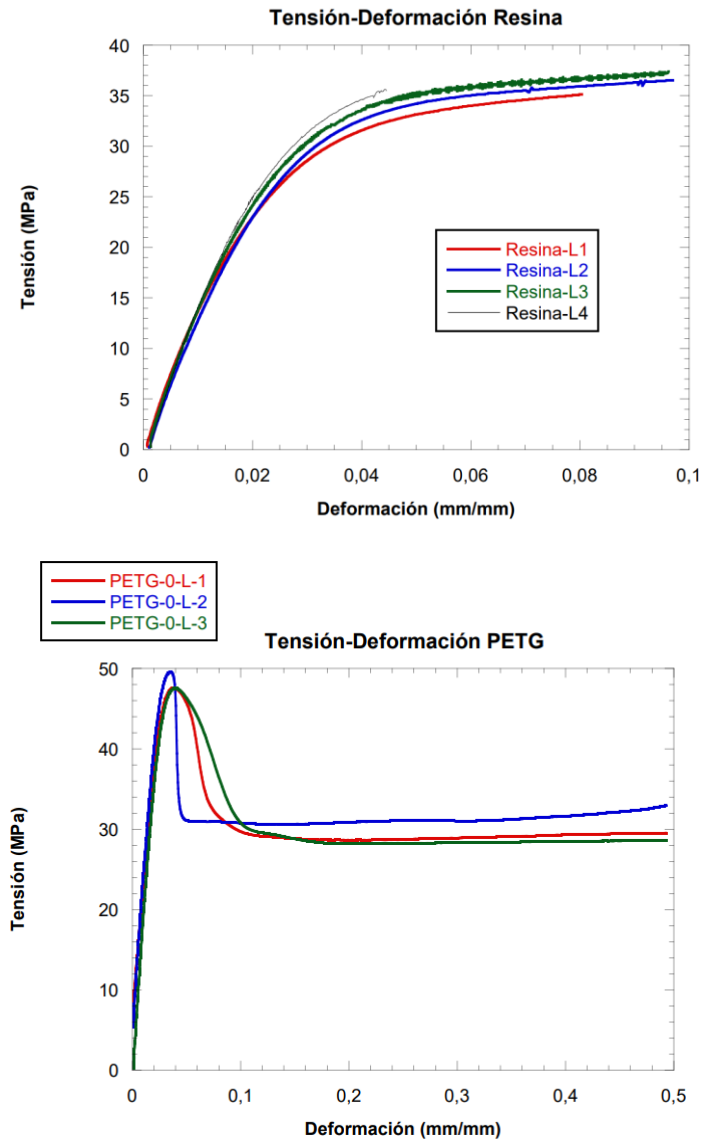


Figura 16 Curvas tensión-deformación ingenieril de los ensayos en probetas lisas de PETG

Figura 17 Curvas tensión-deformación ingenieril de los ensayos en probetas lisas de resina

En la figura 15 se observa que las probetas de PLA tienen un comportamiento frágil caracterizado por un tramo elástico-lineal prolongado y una pequeña curvatura previa a la rotura inestable de la probeta. Esta rotura se produce de forma repentina, ya que, el cambio de pendiente de estas curvas es casi inexistente. Y se puede concluir que las probetas de PLA se han mantenido en el régimen elástico hasta su fallo.

En cuanto al PETG (Figura 16), a pesar de ser un termoplástico como el PLA se observa un comportamiento claramente dúctil, en contraposición al comportamiento mecánico mostrado por

el PLA. Esta curva comienza con una región elástico y lineal hasta alcanzar un punto en la relación lineal donde el material empieza a ceder hasta llegar al máximo de tensión. Una vez se ha superado este punto, el material se encuentra en régimen plástico, y la tensión decrece debido a que ocurre un fenómeno llamado estricción, el cual implica que en una zona del fuste de la probeta la deformación se concentra y la sección se estrecha rápidamente, pudiendo ceder y romper en cualquier momento (Figuras 18 y 19). El tramo de la curva tensión-deformación ingenieril en el que la deformación crece para una tensión aproximadamente constante corresponde a la propagación de la estricción a lo largo del fuste de la probeta (Figura 19). En el presente TFG no se llegó a la rotura del PETG, se paró el ensayo antes, ya que la deformación a rotura superaba valores del 200% y el estudio se centra en la región elástico-lineal y en obtener los valores de tensión máxima admitida del material.

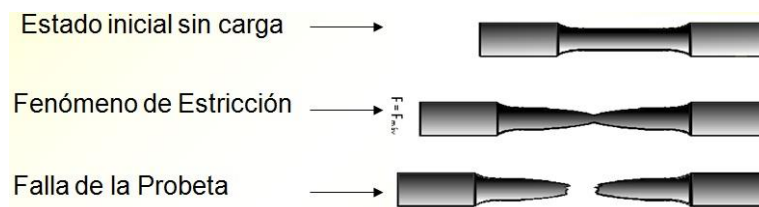


Figura 18 Fenómeno de Estricción



Figura 19 Fenómeno de estricción previo a la rotura de la probeta

Por último, en la figura 17 se muestran las curvas obtenidas para las probetas lisas de la resina. Estas curvas son parecidas a las curvas del PLA, ya que presentan una zona elástico-lineal, aunque no presenta una linealidad tan acusada como las probetas del PLA. Al igual que en el caso de las

probetas de PLA, la resina presenta un comportamiento frágil y rompe repentinamente sin mostrar indicios previos de deformación.

La tabla 3 muestra los valores obtenidos del módulo de elasticidad, de la tensión máxima, σ_T , y de la deformación a rotura para los tres materiales. Como puede observarse, el material más rígido y resistente mecánicamente fue el PLA, pero por el contrario fue el que presentó menor capacidad de deformación. El otro termoplástico como el PETG fue el más dúctil, como valores de la deformación a rotura que superaban el 200%. Por último, la resina fue el material con menor rigidez y menor capacidad resistente, aunque sorprendentemente con deformaciones a rotura mayores que el otro material frágil como el PLA.

Probeta	Módulo de Elasticidad (GPa)	Tensión máxima alcanzada, σ_T , (MPa)	Deformación a rotura (%)
PLA	3,1 \pm 0,1	65,0 \pm 1,5	2,0 \pm 0,5
PETG	1,7 \pm 0,2	48 \pm 1	>200
Resina	1,0 \pm 0,3	36 \pm 1	8 \pm 2

Tabla 3 Parámetros obtenidos tras los ensayos para los tres materiales

5.3. Propiedades a fractura

En este apartado se van a analizar las curvas Fuerza-Desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas que presentan grietas largas, de 3 mm de longitud, del PLA (Figura 20), del PETG (Figura 21) y de la resina (Figura 21), con el fin de determinar mediante la metodología de la Mecánica de la Fractura el valor de tenacidad de fractura de cada uno de los materiales. Como se avanzó en la introducción, estos ensayos se pueden asimilar a los de una probeta con configuración SENT.

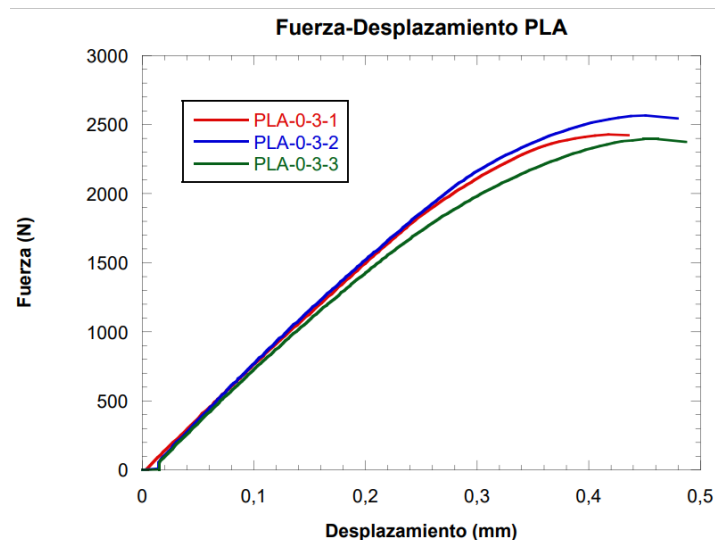


Figura 20 Curvas fuerza-desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas de PLA con grietas de 3 mm de longitud nominal

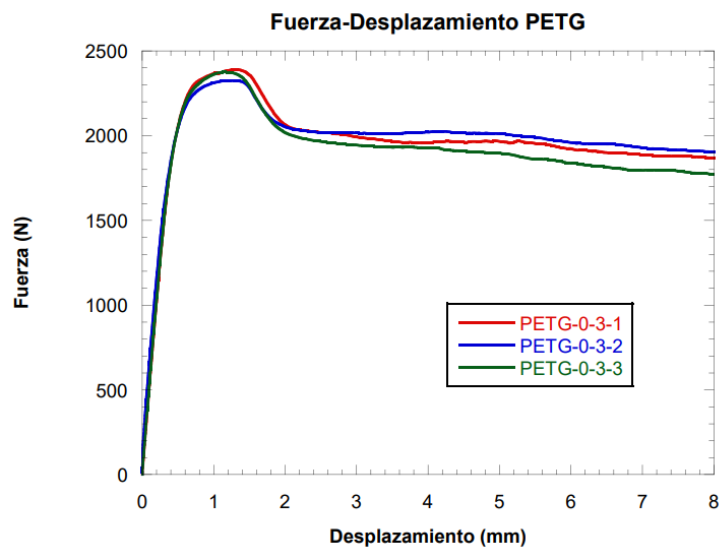


Figura 21 Curvas fuerza-desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas de PETG con grietas de 3 mm de longitud nominal

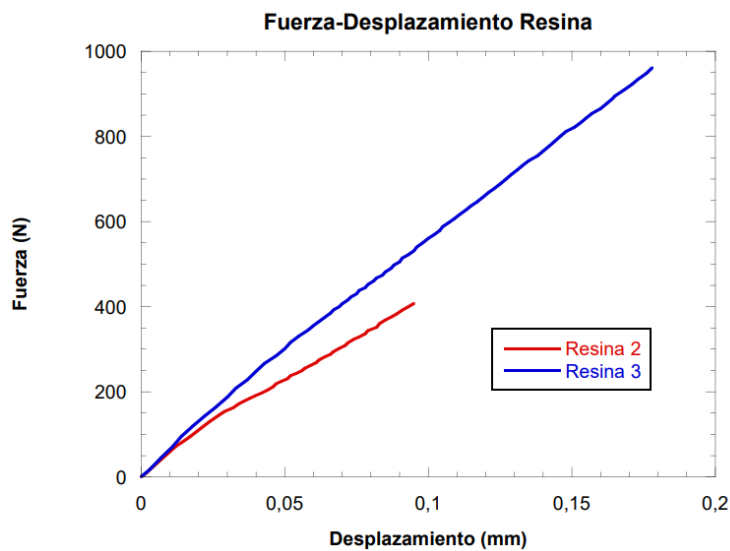


Figura 22 Curvas fuerza-desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas de resina con grietas de 3 mm de longitud nominal

En la figura 20 se observa que las probetas de PLA tienen un comportamiento elástico lineal con una ligera curvatura previa a la rotura del material, estando el desplazamiento a rotura en el intervalo entre 0,4 y 0,5 mm. En el otro material frágil como la resina (Figura 22), las curvas fuerza-desplazamiento fueron prácticamente elástica y lineales hasta rotura. Y para ambos materiales, la tenacidad de fractura se obtuvo a partir del valor máximo de carga.

Sin embargo, las curvas fuerza-desplazamiento obtenidos en las probetas de PETG con grietas largas presentaron un comportamiento completamente dúctil, en donde el redondeo de la punta de la grieta y el crecimiento estable de la misma dominaba el escenario de fractura debido a la

gran deformación plástica desarrollada en el material durante el proceso de rotura. Los valores de fractura que caracterizan este material sería los de la metodología Elasto-Plástica utilizando como parámetro la integral J (40). Por tanto, no son aplicables las expresiones para el cálculo de la tenacidad de fractura mostradas en las ecuaciones 5 y 6 porque éstas son válidas para un comportamiento mecánico elástico y lineal. No obstante, lo que sí se observó es que el inicio del crecimiento de la grieta inicial ocurrió para valores próximos a la carga máxima y la no linealidad hasta ese punto no es demasiado grande, lo que, en principio, nos permite el uso de las ecuaciones 5 y 6 para obtener una tenacidad de fractura aparente para este material.

La Tabla 4 muestra los valores de la tenacidad de fractura de los materiales objeto de estudio. De la tabla se puede ver como los polímeros termoplásticos (PLA y PETG) tienen valores de tenacidad a fractura mayores que en el caso de la resina, material termoestable. Los termoplásticos son más dúctiles, es por ello por lo que tienen mayor capacidad de soportar la presencia de defectos sin que se reduzca su resistencia. De los materiales termoplásticos, el más tenaz resultó ser el más dúctil, es decir, el PETG, como era de esperar teniendo en cuenta las curvas fuerza-desplazamiento.

Material	$K_{IC} \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
PLA	$4,8 \pm 0,5$
PETG	$5,6 \pm 1,5$
Resina MONOCURE 3D	$0,50 \pm 0,03$

Tabla 4 Tenacidad de fractura de los materiales objeto de estudio

5.4. Capacidad resistente de probetas fisuradas

Para poder estudiar la influencia que tiene la presencia de fisuras en las probetas, se van a estudiar las curvas que se obtienen de los tres materiales cuando se introducen grietas de diferentes tamaños. En los apartados anteriores se han tenido en cuenta las longitudes de grieta nominales, es decir, aquellas que se pretendían introducir, en cambio, en las siguientes curvas se muestran los valores de grieta reales de las probetas.

La Figura 23 muestra las curvas características fuerza – desplazamiento para las probetas fabricadas en PLA con distinta longitud de grieta. En la curva de la probeta lisa, la fuerza aumenta linealmente hasta llegar a un máximo en el cual se produce la fractura del material. Esta región se caracteriza por tener un comportamiento elástico-lineal, además de ser la que más fuerza soporta antes de romper. A medida que aumenta la longitud de grieta inicial, la capacidad resistente o la fuerza máxima que es capaz de soportar es menor y también puede observarse como la flexibilidad también tiende a aumentar.

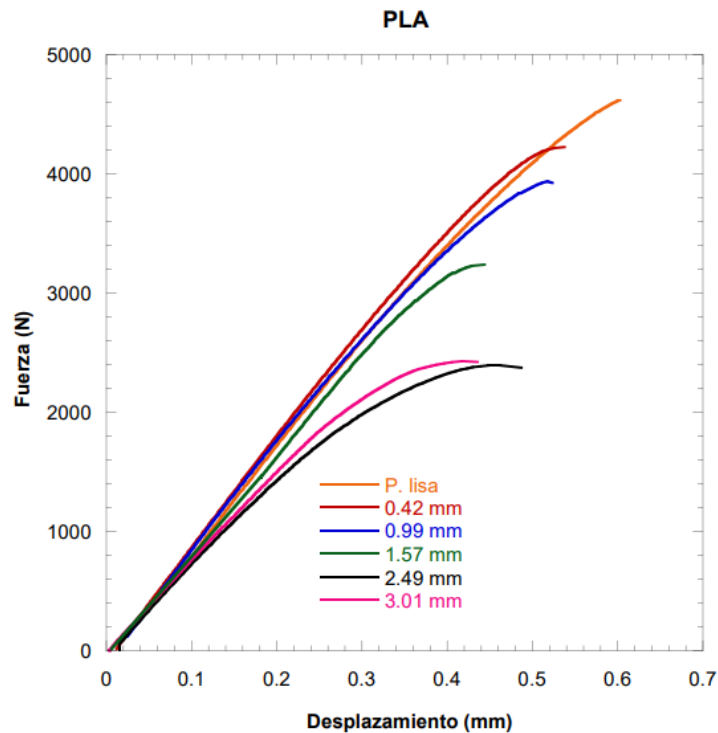


Figura 23 Curvas fuerza – desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas fabricadas en PLA, con distintas longitudes de grieta.

La Figura 24 muestra las curvas fuerza-desplazamiento características en función del tamaño de grieta del otro termoplástico, el PETG. El comportamiento mecánico difiere drásticamente del PLA, con un comportamiento claramente dúctil, en el que las curvas fuerza desplazamiento pasan por un máximo, y posteriormente la capacidad de desplazamiento aumenta drásticamente para valores de fuerza aproximadamente constantes. También en este caso puede observarse como la capacidad resistente o la fuerza máxima disminuye con el tamaño de grieta, aunque es cierto que la reducción más significativa ocurre cuando la longitud de grieta es mayor que 0.98 mm, puesto que para longitudes de grieta de hasta 1 mm, la capacidad resistente se mantiene constante.

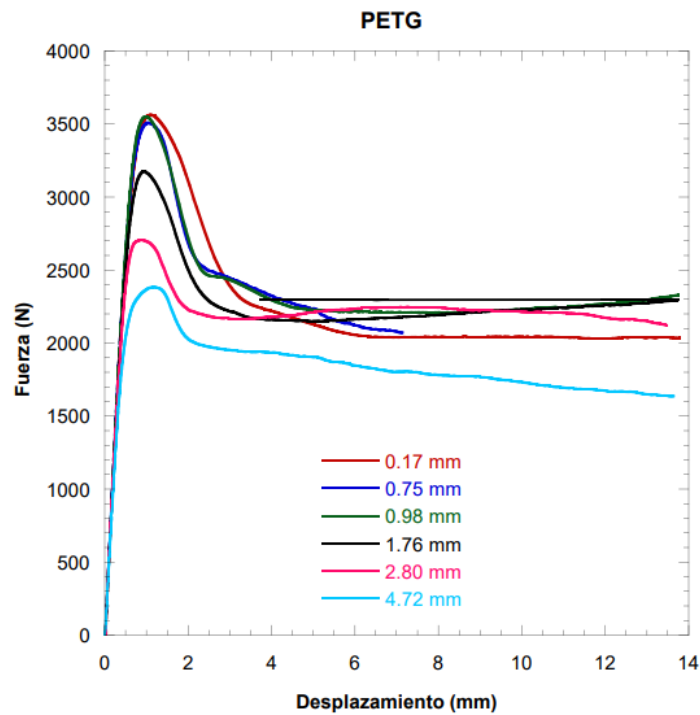


Figura 24 Curvas fuerza – desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas de PETG, con distintas longitudes de grieta

La Figura 25 muestra las curvas fuerza-desplazamiento características en función del tamaño de grieta obtenidas de los ensayos en las probetas de la resina. Lo más significativo es la diferencia tan grande que existe entre la probeta y las probetas con un defecto. Mientras que la probeta lisa presenta un comportamiento semi-frágil con capacidad de extensión previo a la rotura, la presencia de un defecto por pequeño que sea disminuye drásticamente la fuerza máxima capaz de soportar. Al igual que en los casos anteriores, cuanto mayor sea la longitud de fisura, menor es la fuerza máxima alcanzada y curiosamente, la flexibilidad en estos materiales se mantiene más o menos constante para todas las longitudes de grieta introducidas. Esto en parte puede ser debido a la estructura propia de los termoestables, donde las cadenas poliméricas están formadas por enlaces covalentes, caracterizados por su elevada rigidez.

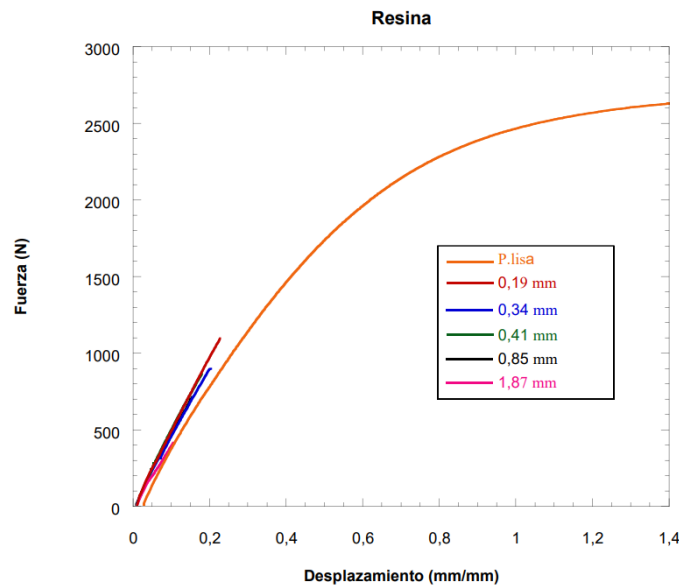


Figura 25 Curvas fuerza – desplazamiento obtenidas de los ensayos en probetas de resina, con distintas longitudes de grieta

De los tres materiales, se puede concluir que el material más sensible a la presencia de defectos es la resina termoestable, seguido del termoplástico PLA mientras que el menos sensible es el PETG, puesto que, en este último caso, las curvas fuerza-desplazamiento apenas se modifican hasta longitudes de fisuras superiores a 1 mm.

5.5. Diagramas de resistencia residual

El diagrama de resistencia mecánica residual unifica en una gráfica las aproximaciones de la Resistencia de Materiales y la Mecánica de la Fractura y representa la capacidad resistente del material considerando como variables la tensión remota y el tamaño de grieta. La tabla 5 muestra los datos experimentales de la tensión remota que origina la rotura del material en el PLA y la resina y/o la tensión máxima en el PETG, σ , en función de la longitud de grieta inicial, a .

PLA		PETG		RESINA	
σ_t (MPa)	a (mm)	σ (MPa)	a (mm)	σ (MPa)	a (mm)
66,19	0	47,57	0	5,28	1,87
64,191	0	49,58	0	12,67	1,01
56,55	0,991	47,53	0	8,217	0,465
58,112	0,68	44,23	0	14,64	0,525
55,286	1,29	42,86	1,46	10,63	0,413
46,552	1,57	41,66	1,76	8,11	0,289
35,409	3,097	38,12	2,53	17,12	0,3839
37,11	2,9	37,87	2,87	13,73	0,3776
34,865	2,49	35,99	2,8	9,41	0,85

60,466	1,41	32,082	2,476	11,4	0,336
61,02	0,415	30,75	4,72	10,26	0,338
59,708	0,4575	31,64	4,53	13,45	0,194
		49,41	0,74	9,04	0,688
		47,97	0,98		
		49,04	1,05		
		48,496	0,71		
		48,022	0,75		
		48,37	0,51		
		48	0,17		

Tabla 5 Valores de la tensión remota máxima y de la longitud de grieta inicial

Utilizando los datos de la resistencia a tracción obtenidos en probetas lisas, σ_T , (Tabla 3) y la tenacidad de fractura obtenida a partir de grietas largas (Tabla 4), puede obtenerse la longitud característica, L_o , utilizando la $L_o = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_T} \right)^2$

Ecuación 2 y mostrada en la Tabla 6 para los materiales objeto de estudio. Los resultados obtenidos están acordes con los obtenidos en el apartado anterior. El material más sensible a la presencia de defectos es la resina porque la longitud característica, definida como la longitud del defecto a partir del cual la tensión remota responsable del fallo empieza a disminuir con el tamaño del defecto, es la menor de todas y del orden de la decena de micras. Por el contrario, el material con menos sensibilidad a los defectos es el PETG, que tiene una longitud característica del orden de milímetros. Es curioso observar que la longitud característica para ambos termoplásticos es del mismo orden de magnitud, es decir, milímetros a pesar del comportamiento mecánico tan diferente mostrado en las figuras 23 y 24. No obstante, la diferencia en los valores de la longitud característica entre los termoplásticos y el termoestable es de dos órdenes de magnitud.

	PLA	PETG	RESINA
L_o (mm)	$1,6 \pm 0,4$	$3,5 \pm 0,7$	$0,032 \pm 0,008$

Tabla 6 Longitudes críticas de los materiales objeto de estudio.

A

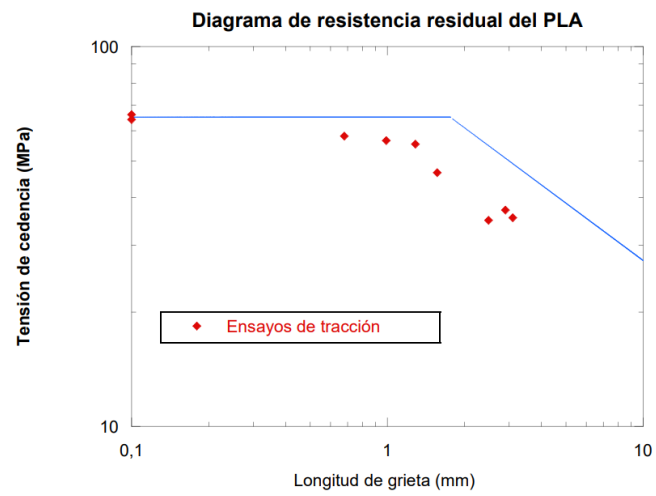


Figura 26 Diagrama de resistencia mecánica residual del PLA junto con los datos experimentales (rombos rojos)

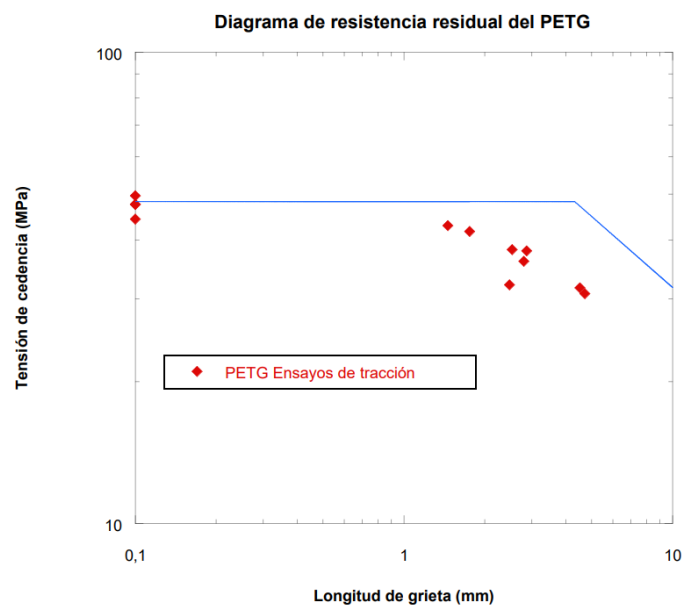


Figura 27 Diagrama de resistencia mecánica residual del PETG junto con los datos experimentales (rombos rojos)

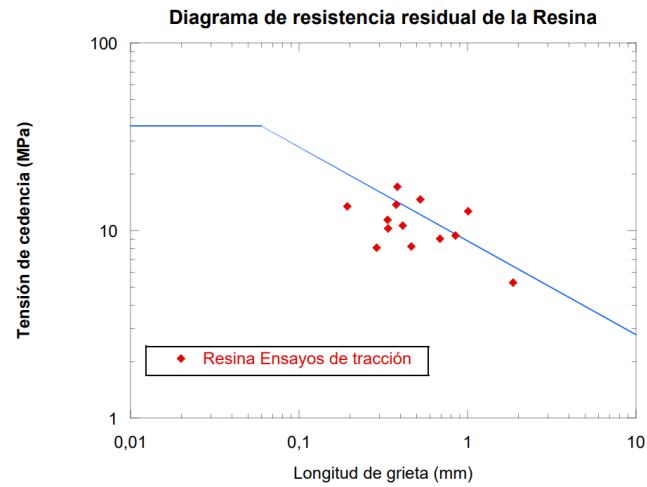


Figura
 De
 Como
 Con

Ecuación 3 para encontrar el lugar de fallo del PLA (Figura 29), del PETG (Figura 30) y de la resina (Figura 31) haciendo uso de las longitudes características de estos materiales recogidas en la Tabla 6.

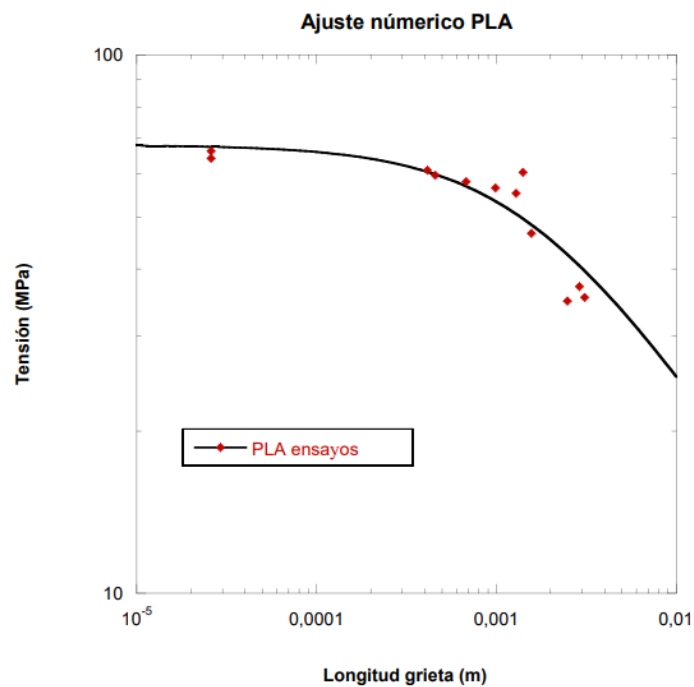


Figura 29 Diagrama de resistencia mecánica residual utilizando la relación semi-empírica (ecuación 3) en función de l_0 del PLA junto con los datos experimentales (rombos rojos)

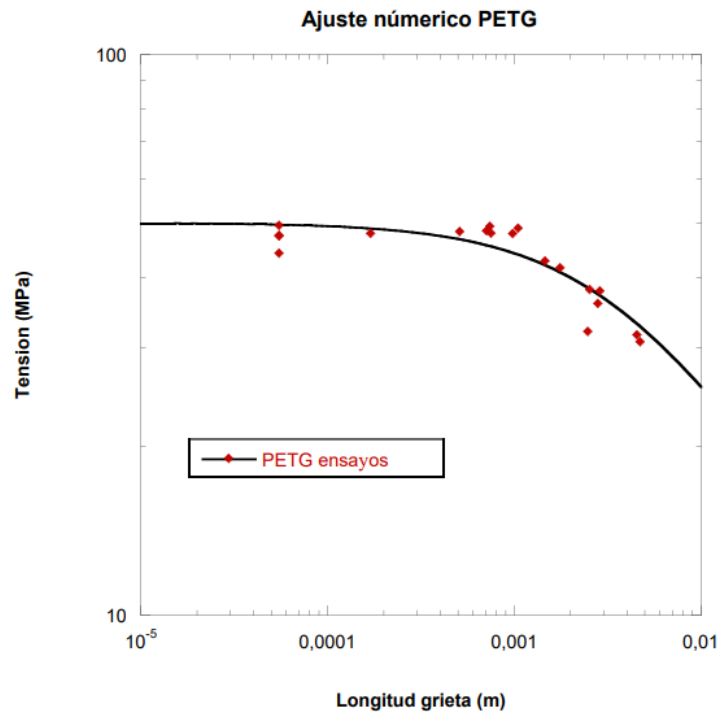


Figura 30 Diagrama de resistencia mecánica residual utilizando la relación semi-empírica (ecuación 3) en función de l_0 del PETG junto con los datos experimentales (rombos rojos)

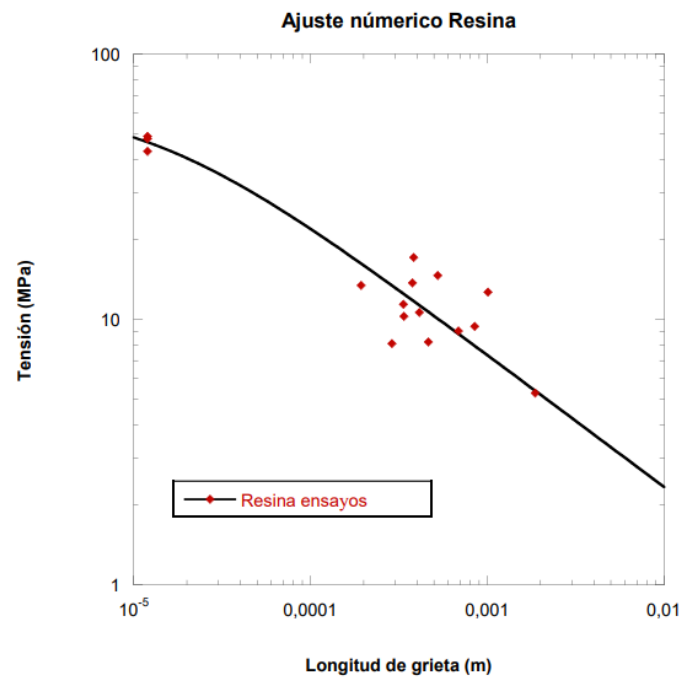


Figura 31 Diagrama de resistencia mecánica residual utilizando la relación semi-empírica (ecuación 3) en función de l_0 de la resina junto con los datos experimentales (rombos rojos)

Se puede observar como la relación semi-empírica (ecuación 3) utilizando la longitud característica del material, L_0 , de estas curvas se ajusta bien a los datos obtenidos de los ensayos

experimentales, por lo que la ecuación 3 representa mucho mejor el lugar de fallo en los diagramas de integridad que el resultante de aplicar sólo las aproximaciones de la Resistencia de Materiales y la Mecánica de la Fractura como se mostró en las figuras 26, 27 y 28. Por tanto, la ecuación 3 puede emplearse para predecir el fallo de componentes estructurales agrietados una vez conocida la longitud característica del material.

6. Conclusiones

En este TFG se ha determinado la resistencia mecánica residual y la sensibilidad a los defectos de una familia de materiales procesados por técnicas de fabricación aditiva, en concreto, dos termoplásticos como el PLA y el PETG procesados por la técnica de modelado por filamento fundido (FDM) y una resina termoestable comercial procesada por la técnica luz digital (DLP).

Las principales conclusiones del estudio han sido:

- La técnica de fabricación DLP utilizada para el procesamiento de las probetas de resina permite fabricar piezas con los valores más bajos de rugosidad que los obtenidos en las probetas de materiales termoplásticos, el PLA y el PETG, fabricados por FDM. Por tanto, la técnica DLP consigue mejores acabados superficiales. De entre los dos materiales termoplásticos, el PETG presentó mayor rugosidad.
- Del análisis mecánico en probetas lisas, tanto el termoplástico PLA como la resina termoestable presentaron un comportamiento mecánico elástico y lineal hasta rotura, siendo ésta eminentemente frágil. En contra, el PETG presentó un comportamiento dúctil. El PLA se caracterizó por tener los valores más elevados de módulo elástico y de resistencia a tracción y la resina los valores más bajos. En cuanto a la deformación a rotura, el PETG fue el material más dúctil de los tres, con deformaciones a rotura superiores al 200%, seguido de la resina, y situándose en último lugar el PLA.
- Los valores de la tenacidad a fractura de los materiales termoplásticos fueron mayores que los de la resina termoestable, en concreto, un orden de magnitud mayor. El PLA presentó un comportamiento semi-frágil mientras que el PETG presentó un comportamiento dúctil con los valores más altos de tenacidad de fractura.
- Con relación al análisis mecánico de materiales agrietados, el valor de la fuerza máxima capaz de soportar el material fue menor cuanto mayor fue el tamaño de la grieta introducida. No obstante, el PETG presentó la menor sensibilidad a la presencia a los defectos seguido del PLA y, siendo la resina el material más afectado por los defectos. Esto se traduce en longitudes características en los dos termoplásticos del orden de milímetros, mientras que en la resina de unas decenas de micras.
- Las predicciones ofrecidas por el diagrama de resistencia residual obtenidos de aplicar la Resistencia de Materiales y la Mecánica de la Fractura difieren bastante de los valores experimentales, esto implica que no son capaces de discriminar la zona de integridad de la de fallo. En cambio, las predicciones obtenidas tras el ajuste semi-empírico introducido por El Haddad y Topper haciendo uso de la longitud característica son mucho más precisas, constituyendo una herramienta imprescindible en la predicción del fallo estructural.

7. Bibliografía

1. Manuel Zahera. "La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos". XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos Valencia, Fundación Cotec. 2012.
2. Hernández Castellano, Pedro Manuel, y otros. *TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA. Las Palmas de Gran Canaria : Universidad de Las Palmas, 2018. 978-84-9042-335-6.*
3. Hull, Chuck. Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography. s.l. : U.S. Patent , 1986. 4,575,330.
4. E.O. Olakanmi, R.F. Cochrane, K.W. Dalgarno. "A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties". *Progress in Materials Science, 2015, Vol. 74. 0079-6425.*
5. J. Paulo Lago Job. "Revision de las tecnicas de fabricacion aditiva y sus aplicaciones". Santa Cruz de Tenerife : Universidad de La Laguna, 2020.
6. S. Clark Ligon; R. Liska; J. Stampfl; M. Gurr; R. Mülhaupt. *Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. Chemical Reviews, 2017, Vol. 117. 15. 10212-10290.*
7. Ugarte, C. Mijangos. *100 años de Ciencia de Polímeros en el mundo, 73 años en nuestro país. Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros, CSIC, 2020, Vol. 116, 4.*
8. Cano Aragón, Alberto Jesús. Fatigue behaviour of Polyamide 12 processed by Selective Laser Sintering. s.l. : Universidad Rey Juan Carlos , 2021.
9. Romero, Juan Manuel López. *Transformación de materiales termoplásticos.* s.l. : IC Editorial, 2013. 978-84-15942-20-7.
10. Fajín, J. L Cagide. Estudio Coupled Cluster de potenciales de interacción en complejos de Van der Waals. Santiago de Compostela : Universidad de Santiago de Compostela (USC), 2006.
11. Singh, Riya; Gupta, Akash; Tripathi, Ojestez; Srivastava, Sashank; Singh, Bharat ; Awasthi, Ankita ; Rajput, S.K. ; Sonia, Pankaj. *Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview. Material Today, 2020, Vol. 26. 2, 3058-3070.*
12. C. Hernández Castellano y D. Hernández Rodríguez. *Técnicas de Fabricación Aditiva.* s.l. : Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2018. isbn:9788490423356.

13. L. Kenny y C. Alvarez. *Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM)*. 2016.
14. D. Gutiérrez García y J. Zapata Carmona. *Análisis funcional del mecanismo tipo rotula fabricado con FDM*. Medellín : UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, 2017.
15. Escobar Guachambala, Miguel Ángel , Gavilanes Carrión, Javier Jose y Freire Quintanilla, Mesías Heriberto. *Evaluación de la capacidad de absorción de energía de impacto y dureza en probetas impresas en 3D de PLA y ABS con estructura cúbica y tri hexagonal*. Conciencia Digital, 2020, Vol. 3. 2, 2600-5859.
16. A. Cano Vicent y A. Serrano Aroca. *Impresión 3D por modelado por deposición fundida, manejo, funcionamiento y aplicaciones biomédicas. revista iberoamericana interdisciplinar de métodos, modelización y simulación, ISSN 1888-8550, Nº. 13, 2021. págs. 227-238.*
17. J. Aspler, Arlene Kingsland, L. M. Cormier, X. Zou. *3d printing – a review of technologies, markets, and opportunities for the forest industry. Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes, 2016, Vol. 5., 2.*
18. Singh, Hardial. *A comprehensive study on 3D printing. Amity University Haryana 2020, Vol. 7., 6, ISSN-2349-5162.*
19. Zuluaga, Fabio. *Algunas aplicaciones del ácido poli-l-láctico. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2013, Vol. 37, 142 0370-3908.*
20. Muñoz J, Pumera M. *3D-printed biosensors for electrochemical and optical applications. TrAC - Trends in Analytical Chemistry, 2020, Vol. 128.*
21. Cedeño, Raúl. The Machine Bros. [En línea] 31 de Agosto de 2022. [Citado el: 16 de Mayo de 2023.] <https://themachinebros.com/es/todo-lo-que-quieres-saber-sobre-el-filamento-petg/>.
22. Laboratorios 3D. Laboratorios 3d. [En línea] 23 de Junio de 2021. [Citado el: 16 de Mayo de 2023.] <https://laboratorios3d.es/blog/filamento-petg-fabricacion-aditiva-propiedades-y-aplicaciones/#:~:text=Adem%C3%A1s%20de%20estas%20aplicaciones%2C%20el,aeron%C3%A1utica%20o%20el%20sector%20naval..>

23. Li, Xiaoming; Cui, Rongrong; Sun, Lianwen; E. Aifantis, Katerina; Fan, Yubo; Feng, Qingling; Cui, Fuzhai; Watari, Fumio *3D-Printed Biopolymers for Tissue Engineering Application. International Journal of Polymer Science, 2014, Vol. 2014.*
24. Muta S, Ikeda M, Nikaido T, Sayed M, Sadr A, Suzuki T, Tagami J. *Chairside fabrication of provisional crowns on FDM 3D-printed PVA model. J Prosthodont Res, 2020, Vol. 64, 4 401-407.*
25. Hu X, Kang H, Li Y, Geng Y, Wang R, Zhang L. *Preparation, morphology and superior performances of biobased thermoplastic elastomer by in situ dynamical vulcanization for 3D-printed materials. Polymer (Guildf). 2017 Jan 13;108:11-20.*
26. Georgopoulou A, Sebastian T, Clemens F. *Thermoplastic elastomer composite filaments for strain sensing applications extruded with a fused deposition modelling 3D printer. Flexible and Printed Electronics, 2020, Vol. 5, 3.*
27. Korger M, Bergschneider J, Lutz M, Mahltig B, Finsterbusch K, Rabe M. *Possible Applications of 3D Printing Technology on Textile Substrates. Materials Science and Engineering, 2016, Vol. 141.*
28. Mogan Y, Periyasamy R. *Thermoplastic elastomer infill pattern impact on mechanical properties 3D printed customized orthotic insole. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016, Vol. 11, 10.*
29. Han X, Yang D, Yang C, Spintzyk S, Scheideler L, Li P, Li D, Geis-Gerstorfer J, Rupp F. *Carbon Fiber Reinforced PEEK Composites Based on 3D-Printing Technology for Orthopedic and Dental Applications. Clin Med, 2019, Vol. 8, 2.*
30. Radhakrishnan S, Nagarajan S, Belaid H, Farha C, Iatsunskyi I, Coy E, Soussan L, Huon V, Bares J, Belkacemi K, Teyssier C, Balme S, Miele P, Cornu D, Kalkura N, Cavallès V, Bechelany M. *Fabrication of 3D printed antimicrobial polycaprolactone scaffolds. for tissue engineering applications. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl., 2021, Vol. 118.*
31. Barranco, R. Moreno. *Análisis de la resistencia mecánica de piezas de materiales biocompatibles obtenidas mediante fabricación aditiva. 2019.*
32. Mazo, J. Santolaría. *Diseño de sistema de fabricación aditiva y caracterización del proceso de fotocurado de resina mediante tecnología DLP. Zaragoza : Universidad de Zaragoza, 2013.*

33. Innovación y Tecnología . [En línea] <https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/impresoras-3d-tecnologia-dlp/>.
34. Villena, J. García. Desarrollo de un equipo de investigación de impresión 3D por fotopolimerización mediante tecnología DLP. Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
35. J. Rampérez. *El ácido polilactico (PLA): Un material innovador en la actualidad*. 2021.
36. D. Cayuela y A. Manich. *Comportamiento y propiedades de las fibras de polilactida (PLA) durante su procesado y uso*. 2010.
37. Y. Neftalí. *Caracterización de las propiedades mecánicas del copolímero PETG mediante impresión FDM 3D*. 2021.
38. N. León. *Efecto de las diferentes técnicas de agudización sobre la tenacidad de fractura del PETG*. 2014.
39. J. L. Arana y J. J. González. *Mecánica de la fractura*. s.l. : Universidad del País Vasco, 1999. 8483734559.
40. T.L. Anderson, "Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications". 3rd edition. CRC Press Boca Raton Florida 2005.
41. A.J. Cano, A. Salazar, J. Rodríguez, "Evaluación de la integridad estructural de polímeros procesados por técnicas de fabricación aditiva mediante diagramas de resistencia residual". *Revista Española de Mecánica de la Fractura*, vol. 4 (2022): 127-132.
42. M. El Haddad M, T. Topper, K. Smith, *Prediction of non-propagating cracks*. *Eng. Fract. Mech.* (1979) 11:573–84. .
43. Mínguez Algarra, Jesús, González Cabrera, Dorys y Vicente Cabrera, Miguel Ángel. *Influencia de la orientación y la densidad de las fibras en la resistencia a tracción por flexión de hormigones*. *Revista hórmiyon y acero*. 2017. Vol. 68, ISSN 0439-5689.
44. Somos Mecatrónica. [En línea] <https://somsmeccatronics.com/producto/impresora-3d-creality-ender-3-max/>.
45. ALL3DP. [En línea] <https://i.all3dp.com/workers/images/fit=cover,w=2360,h=1328,gravity=0.5x0.5,format=auto/wp-content/uploads/2019/09/09134345/best-printers-q419-sigma-r192.jpg>.

46. *Krear 3D*. [En línea] <https://tiendakrear3d.com/producto/creality-ld-006/>.
47. *ISO13586: Determination of fracture toughness (GIC y KIC) -Linear elastic fracture mechanics (LEFM) approach*. 2018.
48. *ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. s.l. : Annu. B. ASTM, 2022.
49. Xian-Kui Zhu, "Progress in development of fracture toughness test methods for SENT Specimens", *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 156 (2017) 40e58.
50. Hobson, Taylor. *Manual del Rugosímetro Surtronic 3 Plus*.

8. Anexo

Orientación	Longitud de grieta (mm)	Nombre	Ancho (mm)	Espesor (mm)	F max (N)	Tensión máxima (MPa)	Tamaño de grieta inicial (mm)
0°	0 mm	PLA-0-L-1	12,57	5,55	4618,70	66,19	0,00
		PLA-0-L-3	12,51	5,54	4661,10	64,19	0,00
	1 mm	PLA-0-1-1	12,53	5,57	3937,70	56,55	0,99
		PLA-0-1-2	12,56	5,56	4058,20	58,11	0,68
	2 mm	PLA-0-2-1	12,43	5,56	3817,90	55,29	1,29
		PLA-0-2-2	12,54	5,55	3238,80	46,55	1,57
	3 mm	PLA-0-3-1	12,40	5,53	2428,10	35,41	3,10
		PLA-0-3-2	12,41	5,57	2566,70	37,11	2,90
		PLA-0-3-3	12,40	5,54	2395,10	34,87	2,49
	0,5 mm	PLA-0-0,5-1	12,65	5,60	4283,40	60,47	1,41
		PLA-0-0,5-2	12,52	5,53	4224,80	61,02	0,42
		PLA-0-0,5-3	12,44	5,53	4107,50	59,71	0,46

Tabla 7 Datos de las probetas ensayadas de PLA

Orientación	Longitud de grieta (mm)	Nombre	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Fmax (N)	Tensión máxima (MPa)	Tamaño de grieta inicial (mm)
0°	0 mm	PETG-0-L-1	12,13	5,76	3326,80	47,57	0,00
		PETG-0-L-2	12,25	6,05	3673,40	49,58	0,00
		PETG-0-L-3	12,21	6,01	3486,10	47,53	0,00
	1 mm	PETG-0-1-1	12,16	6,16	3312,90	44,23	0,00
		PETG-0-1-2	12,18	6,24	3254,60	42,86	1,46
		PETG-0-1-3	12,17	6,26	3174,00	41,66	1,76
	2 mm	PETG-0-2-1	12,17	6,18	2867,00	38,12	2,53
		PETG-0-2-2	12,27	6,03	2802,20	37,87	2,87
		PETG-0-2-3	12,17	6,18	2707,10	35,99	2,80
	3 mm	PETG-0-3-1	12,16	6,18	2411,00	32,08	2,48
		PETG-0-3-2	12,19	6,23	2335,50	30,75	4,72

		PETG-0-3-3	12,17	6,19	2383,70	31,64	4,53
	0,5 mm	PETG-0-0.5-1	12,27	6,01	3643,00	49,41	0,74
		PETG-0-0.5-2	12,12	6,11	3553,10	47,97	0,98
		PETG-0-0.5-3	12,17	6,05	3610,80	49,04	1,05
	0,2 mm	PETG-0-0.2-1	12,17	6,05	3570,70	48,50	0,71
		PETG-0-0.2-2	12,22	5,98	3509,20	48,02	0,75
		PETG-0-0.2-3	12,08	6,06	3540,90	48,37	0,51
	0,1 mm	PETG-0-0.1-1	12,33	6,02	3562,80	48,00	0,17

Tabla 8 Datos de las probetas ensayadas de PETG

Nombre	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Fmax (N)	Tensión máxima (MPa)	Tamaño de grieta inicial (mm)
RESINA-L1	12,05	5,9	2497	35,11	0
RESINA-L2	11,82	6,4	2763	36,53	0
RESINA-L3	11,85	6,21	2752	37,4	0
RESINA-L4	11,75	5,82	2437	35,64	0
R-2	12,25	6,44	416,70	5,28	1,87
R3	12,30	6,28	979,09	12,67	1,01
R4	12,40	6,44	656,18	8,22	0,47
R5	12,50	6,47	1184,40	14,64	0,53
R6	12,34	6,60	865,63	10,63	0,41
R7	12,19	6,63	656,01	8,11	0,29
R8	12,42	6,15	13078,00	17,12	0,38
R9	12,35	6,29	1066,50	13,73	0,38
R10	12,09	6,28	714,18	9,41	0,85
R11	12,23	6,45	899,53	11,40	0,34
R12	12,47	6,14	787,49	10,26	0,34
R13	12,29	6,64	1097,90	13,45	0,19
R14	12,28	6,17	685,05	9,04	0,69

Tabla 9 Datos de las probetas ensayadas de la resina Monocure 3D