

Influencia de la orientación del patrón de relleno en las propiedades mecánicas del TPU de dureza 82A

Rodríguez-Sanz, A.^{1,*}, Sánchez, C.¹, Martínez, S.¹, Monje, C. A.¹

RoboticsLab, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Av. de la Universidad 30, 28911 Leganés, España.

Resumen

Este trabajo presenta el análisis experimental del comportamiento mecánico del filamento flexible basado en poliuretano termoplástico (TPU) *Filaflex* de dureza 82A de la marca Recreus, impreso mediante modelado por deposición fundida (FDM). Se estudió la influencia de la orientación del patrón de relleno (0°, 45°, 90° y concéntrico) en la respuesta a tracción de probetas normalizadas según la norma ISO 37. Las muestras se imprimieron con una densidad de relleno del 100 % y condiciones controladas para minimizar la anisotropía. Los ensayos revelaron variaciones significativas en el módulo de Young, la resistencia a la tracción y la deformación máxima según la orientación del relleno. El relleno con un ángulo de 0° mostró la mayor rigidez y resistencia, mientras que el relleno a 45° exhibió una ductilidad superior. El patrón concéntrico ofreció un buen equilibrio, aunque con mayor dispersión. Estos resultados permiten seleccionar configuraciones óptimas de impresión en función del requerimiento mecánico en aplicaciones de robótica blanda.

Palabras clave: Impresión 3D, TPU, Hiperelástico, Ángulo de relleno, Caracterización mecánica.

The influence of raster angle in the mechanical properties of 82A shoreness TPU

Abstract

This work presents an experimental analysis of the mechanical behavior of Recreus' *Filaflex* flexible filament, a thermoplastic polyurethane (TPU) with Shore hardness 82A, printed using fused deposition modeling (FDM). The influence of the raster angle (0°, 45°, 90°, and concentric) on the tensile response of standardized specimens according to ISO 37 was studied. The samples were printed with 100 % infill density and under controlled conditions to minimize anisotropy. The tests revealed significant variations in Young's modulus, tensile strength, and maximum strain depending on the infill orientation. The 0° infill raster angle exhibited the highest stiffness and strength, while the 45° angle showed superior ductility. The concentric pattern offered a good balance, albeit with greater variability. These results enable the selection of optimal printing configurations based on mechanical requirements in soft robotics applications.

Keywords: 3D Printing, TPU, Hyperelastic, Infill Angle, Mechanical Characterization.

1. Introducción

El desarrollo de la impresión 3D en los últimos años ha influido considerablemente en diversos campos, siendo la robótica blanda uno de los más beneficiados. Esta rama de la robótica se centra en el desarrollo, control y actuación de plataformas fabricadas con materiales flexibles y fácilmente deformables, como las siliconas, los elastómeros o los hidrogeles. Estos materiales, formados por largas cadenas poliméricas entrecruzadas, presentan respuestas mecánicas no lineales asociadas a la elasti-

cidad entrópica. Ante una deformación, estas cadenas tienden a alinearse, reduciendo la entropía del sistema, lo que genera una resistencia progresiva a la deformación y un incremento de la fuerza necesaria para continuarla (Buche and Silberstein, 2021; Khandagale et al., 2023).

Tradicionalmente, la fabricación de estos dispositivos se ha llevado a cabo mediante técnicas de moldeo por inyección. No obstante, en la última década, la fabricación aditiva ha experimentado avances notables que permiten superar muchas de las

*Autor para correspondencia: albertro@ing.uc3m.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

limitaciones asociadas al procesamiento de materiales no rígidos. Estudios recientes han demostrado la viabilidad de imprimir hidrogeles autocurables mediante técnicas como la impresión digital por luz (DLP), permitiendo su implementación como sensores blandos o sistemas de almacenamiento de energía (Caprioli et al., 2021), así como en plataformas electroactivas para tareas de manipulación y locomoción (Caprioli et al., 2021). De forma similar, (von Szczepanski et al., 2023) desarrollaron un sensor de deformación autocurable basado en silicona, con una sensibilidad hasta 30 veces superior a sensores basados en PDMS.

Pese a los avances con siliconas e hidrogeles, el método más accesible y extendido para fabricar robots flexibles continúa siendo la impresión por modelado por deposición fundida (FDM) empleando elastómeros termoplásticos (TPE). A diferencia de los termoestables, que requieren vulcanización para adquirir resistencia, los TPE presentan entrecruzamientos físicos débiles, lo que permite una transición rápida y reversible entre estados sólido y fundido, facilitando su procesamiento mediante extrusión e inyección (Holden, 2024). La dureza de estos materiales puede clasificarse según la escala Shore (A o D), que establece valores entre 0 y 100 siguiendo normas como ASTM D2240 o ISO 868 (Qi et al., 2003).

Las propiedades mecánicas de los materiales elastoméricos se evalúan comúnmente mediante ensayos de tracción definidos por normas como ASTM D412, ISO 37 ó DIN 53504. Aunque todas buscan determinar parámetros similares, difieren en dimensiones de probeta y velocidades de ensayo. Estas normas no especifican el método de fabricación de las probetas, pero recomiendan su obtención mediante moldeo por compresión o inyección, seguidos de mecanizado, técnicas propias del entorno industrial debido a los requisitos de precisión y control que exigen los productos finales.

En contraste, en el ámbito de la investigación, la fabricación aditiva representa una alternativa más accesible, principalmente por su bajo coste y facilidad de implementación. No obstante, esta técnica introduce una marcada anisotropía en las piezas impresas, provocada por diversos factores como el porcentaje y la orientación del relleno, las fluctuaciones térmicas del extrusor o la humedad presente en el filamento, aspecto particularmente relevante en el caso del TPE debido a su naturaleza hidrófila. Como resultado, las propiedades mecánicas obtenidas pueden diferir significativamente de aquellas obtenidas mediante métodos de fabricación tradicionales.

De las seis clases de TPE, el TPU se ha consolidado como el elastómero termoplástico más comúnmente utilizado en impresión 3D flexible, gracias a su disponibilidad y al amplio uso entre usuarios particulares. Diversos estudios han analizado el efecto de estos parámetros sobre el comportamiento mecánico del TPU. Por ejemplo, en (Nace et al., 2021) evaluaron el impacto del patrón y porcentaje de relleno en muestras de TPU 40D bajo compresión, determinando que una mayor densidad aumenta la rigidez y que el patrón en cruz 3D era el más resistente entre los ensayados. En (Xiao and Gao, 2017) se estudió la influencia de la orientación del relleno y la temperatura de impresión en un TPU médico (Tecoflex 95A), concluyendo que una disposición a 45° y una temperatura de 215°C proporcionaban la mayor rigidez, al favorecer la alineación de las fibras con la dirección de carga. Siguiendo esa línea, en (Martín-Sosa

et al., 2025) se analizó el comportamiento mecánico del filamento *Filaflex* 70A replicando condiciones de impresión similares para comparar su respuesta con materiales de mayor dureza, concluyendo que el patrón más rígido era el concéntrico, y el menos, el rectilíneo a 0°. Por el contrario, en (Lang et al., 2025) se modeló el comportamiento hiperelástico del *Filaflex* 60A, para el cual se observó que el ángulo de 0° era aquel que presentaba mayor rigidez mientras que el patrón cuasi-isótropo (combinación de cuatro capas a 0°, 45°, -45° y 90°) tenía una respuesta más equilibrada.

Estos estudios han evaluado la influencia de la orientación del patrón de relleno en las propiedades mecánicas de diversos filamentos que varían en dureza y fabricante, demostrando una elevada variabilidad. En consecuencia, se establece la necesidad de evaluar de forma individual determinados filamentos que puedan considerarse deseables en campos como la robótica blanda.

Este trabajo evalúa la respuesta mecánica de un filamento de TPU de dureza 82A ante la variación de la orientación del patrón de relleno. Teniendo en cuenta el compromiso entre rigidez y flexibilidad que exhibe este material y la falta de estudios anteriores que lo hayan evaluado, este estudio provee un análisis de la variabilidad que provoca en su morfología y propiedades mecánicas la impresión mediante FDM utilizando patrones de relleno concéntrico, de 0°, 45° y 90°. Los resultados obtenidos en estos ensayos refuerzan la aplicabilidad del TPU de dureza 82A en el desarrollo de robots blandos, permitiendo optimizar la impresión 3D de sus componentes en función de sus requerimientos mecánicos.

2. Métodos y materiales

Para este estudio se llevaron a cabo una serie de ensayos de tracción con el objetivo de analizar la influencia de la orientación del patrón de relleno interno en las propiedades mecánicas del filamento de TPU *Filaflex* 82A, fabricado por la empresa Recreus. Las propiedades mecánicas proporcionadas por el fabricante, recogidas en su hoja técnica, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades físicas y mecánicas del TPU

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad del material	1120.000	kg/m ³
Módulo de Young	22.00	MPa
Tensión de rotura	45.00	MPa
Elongación a la rotura	650.00	%
Tensión al 20 % de elongación	2.50	MPa
Tensión al 100 % de elongación	6.00	MPa
Tensión al 300 % de elongación	10.00	MPa

Estos valores fueron determinados conforme a los lineamientos del estándar DIN 53504-S2, con la excepción del módulo de elasticidad (módulo de Young), que no se contempla en dicha norma debido a la naturaleza no lineal de la respuesta del material. Este parámetro fue calculado según lo especificado en la norma ISO 527, que establece la obtención del módulo mediante la pendiente de la región inicial lineal de la curva tensión-deformación, considerando hasta un 50 % de deformación de la muestra.

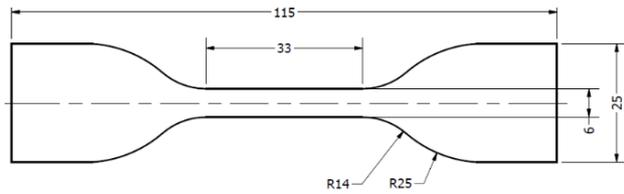


Figura 1: Dimensiones de la probeta de tracción con estrechamiento central, de acuerdo con las especificaciones del estándar ISO 37 (tipo 1).

Los experimentos se realizaron siguiendo las directrices de la norma internacional ISO 37, utilizando para ello un lote de cinco probetas tipo mancuerna (tipo 1), impresas para cada configuración del ángulo de relleno. Las probetas fueron fabricadas con una impresora Prusa i3 MK3S+ equipada con un extrusor de 0.4 mm y utilizando filamento de 1.75 mm de diámetro. Todas las muestras se imprimieron en plano, con orientación horizontal y una tasa de flujo volumétrico reducida para evitar atascos o problemas de subextrusión, habituales en materiales de alta flexibilidad (Figura 1).

El presente estudio se centró en analizar el comportamiento mecánico de probetas impresas con cuatro configuraciones de ángulo de relleno: 0° , 45° , 90° y un patrón concéntrico. Todas las configuraciones fueron fabricadas con un laminado cuasi-isótropo, con el objetivo de maximizar la uniformidad en la respuesta frente a deformaciones multiaxiales, como las que se presentan en aplicaciones de robótica blanda.

Las probetas fueron laminadas con el software PrusaSlicer (versión 2.9.0), aplicando los parámetros de impresión recomendados por el fabricante, complementados con los utilizados en (Martín-Sosa et al., 2025). Todos los parámetros empleados se detallan en la Tabla 2. Las muestras se imprimieron con una densidad de relleno del 100 %, sin perímetros ni capas superiores o inferiores, con el fin de reducir la anisotropía inducida por el proceso de fabricación y evitar la alteración de las propiedades mecánicas.

La fabricación se llevó a cabo utilizando un rollo de filamento nuevo, sin exposición previa a la humedad ambiental. Debido a las limitaciones del volumen de impresión de la cama, las impresiones se realizaron en dos tandas sucesivas.

Tabla 2: Parámetros de impresión

Parámetros	Valor	Unidades
Altura de capa	0.16	mm
Ancho de línea de relleno	0.44	mm
Grosor de la pared	0	mm
Grosor capa superior/inferior	0	mm
Capas inferiores	0	mm
Densidad de relleno	100	%
Temperatura de impresión	228	$^\circ\text{C}$
Temperatura de la cama	30	$^\circ\text{C}$
Flujo volumétrico	1.2	mm^3/s
Velocidad de impresión	20	mm/s
Habilitar retracción	Sí	
Velocidad del ventilador	100	%
Tipo de adhesión a la cama	Falda	
Recuento de líneas de falda	4	
Distancia de la falda	10.0	mm
Distancia de líneas de relleno	0.40	mm

2.1. Descripción de los ensayos mecánicos

Los ensayos de tracción se llevaron a cabo en un sistema de ensayos universal Instron 34SC-1, equipado con una célula de carga de 1 kN, a temperatura ambiente. Se ensayaron cinco muestras por cada configuración de relleno a una velocidad de 100 mm/min, lo que resultó en un total de 20 probetas. Todos los ensayos se realizaron de forma consecutiva, dentro de las 24 horas posteriores a la fabricación de la primera tanda, con el objetivo de minimizar la absorción de humedad y mantener uniformidad en las condiciones experimentales.

Durante la preparación de los ensayos, fue necesario ajustar los agarres de tracción con mayor presión de lo habitual para compensar la alta elasticidad del material y evitar que las probetas se deslizaran, lo cual ocurrió en la primera de las muestras correspondientes al ángulo de relleno de 0° , invalidando su resultado. No obstante, la posible influencia de esta presión adicional en el comportamiento mecánico durante los ensayos no ha sido evaluada en el presente trabajo.

3. Resultados y Discusión

3.1. Caracterización morfológica

La Figura 2 muestra la morfología e imágenes de microscopía digital de las muestras antes de ser sometidas a los ensayos de tracción. El ángulo del relleno correspondiente a 0° (Figura 2c) evidencia una disposición lineal paralela a la dirección de carga en los ensayos de tracción uniaxial, mientras el de 90° (Figura 2e) exhibe una orientación perpendicular a esta dirección. Respecto al ángulo del relleno de 45° (Figura 2d), se observa una distribución cruzada que genera zonas alternas de soporte en la estructura de la probeta. Para estos tres patrones, se evidencia el laminado cuasi-isótropo interno que alterna capas con orientaciones inversas. El patrón de relleno concéntrico (Figura 2f) exhibe claramente una distribución circular, con trayectorias curvilíneas alrededor del eje central de la probeta. En todas las muestras se aprecian microespacios entre las líneas de filamento depositado, siendo más notorio en los patrones de relleno con orientación 0° y 90° .

3.2. Ensayo de tracción uniaxial: resultados experimentales

Las curvas de esfuerzo - deformación obtenidas en los ensayos de tracción uniaxial para las probetas de TPU 82A se presentan en la Figura 3. Para cada lote de probetas (Figura 3(a-d)) se aprecia una tendencia similar al comportamiento viscoelástico característico del TPU: una zona inicial de respuesta elástica, seguida de una zona de deformación no lineal hasta que se produce la rotura (Boubakri et al., 2010).

Las probetas con una orientación del relleno de 45° exhibieron la mayor deformación uniaxial alcanzando la muestra 4 un valor superior al 300 %. Este comportamiento, que evidencia mayor ductilidad de estas muestras respecto al resto, puede atribuirse a la disposición diagonal de los filamentos depositados (Figura 2d) que facilita una distribución homogénea del esfuerzo aplicado permitiendo una disipación más homogénea de energía y en consecuencia una mayor capacidad de deformación respecto al resto. En contraste, las probetas con ángulos de relleno de 0° y 90° exhiben menores niveles de deformación $\approx 200 - 230 \%$, con curvas más similares entre muestras y esfuerzos máximos en un rango de $\approx 14 - 15 \text{ MPa}$ para ambos casos.

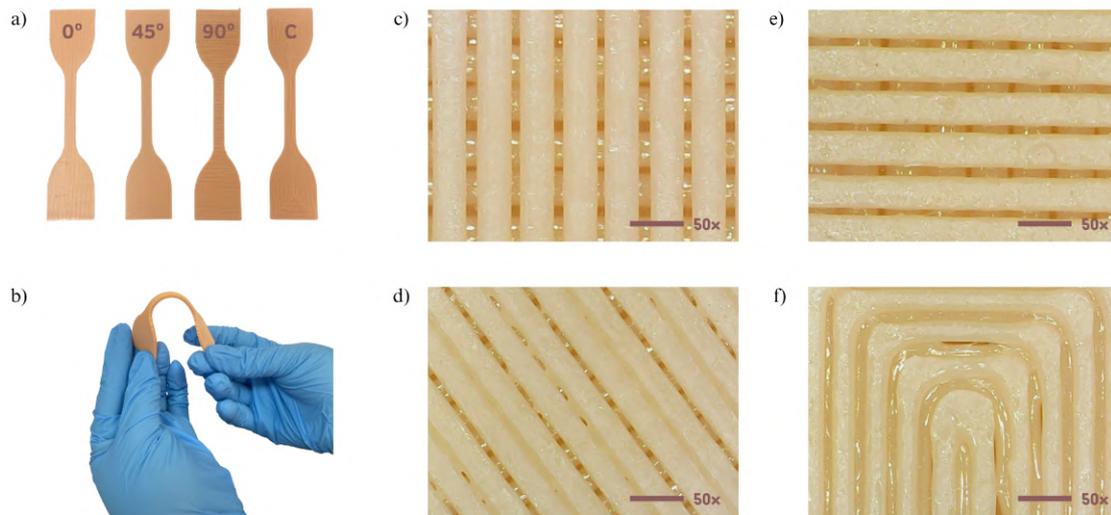


Figura 2: a) Lote de probetas impresas conforme a la norma ISO 37 tipo 1. b) Flexibilidad del TPU 82A bajo carga manual. Representación microscópica de la morfología interna de las probetas según la orientación del patrón de relleno: c) 0°, d) 45°, e) 90° y f) concéntrico.

El patrón de relleno concéntrico presenta deformaciones máximas similares a los otros lotes evaluados, aunque se observa mayor variabilidad entre las 5 muestras evaluadas y esfuerzos máximos ligeramente inferiores.

Respecto a la rotura, se han identificado diferencias relevantes, particularmente en las muestras con ángulo del relleno interno de 45°. En la respuesta mecánica de estas muestras se aprecian oscilaciones en la región final de la curva, lo que sugiere la ocurrencia de microfallos progresivos o deslizamiento entre las capas de filamento antes de que ocurra la rotura completa. Este fenómeno, observado en (Lang et al., 2025), se evidencia también en algunas curvas de las muestras con ángulo de relleno de 0°, en este caso posiblemente asociado a fallos parciales en la adhesión entre capas o trayectorias de carga no balanceadas a lo largo del eje de tracción. Las muestras con patrón de relleno concéntrico y de 90° presentan una caída más abrupta y continua al alcanzar el esfuerzo máximo, lo que sustenta la idea de atribuir a las muestras con estos patrones una menor capacidad para redistribuir las tensiones.

En la Figura 3e se muestran la media y la desviación estándar (DE) de las curvas de esfuerzo-deformación correspondientes a cada orientación del patrón de relleno. Destaca el comportamiento de las muestras con patrón concéntrico, cuya curva media se desvía del resto desde etapas muy tempranas del ensayo, evidenciando una rigidez inicial claramente inferior. Esta diferencia tan notable podría atribuirse a que la disposición curvilínea de los cordones no ofrece una trayectoria de carga continua en la dirección axial, lo cual podría provocar una reducción de la capacidad del material para resistir la deformación inicial. Los patrones de relleno de 0°, 45° y 90° exhiben pendientes similares en la zona elástica, representativas de mayor rigidez. Sin embargo, a pesar de seguir tendencias parecidas, la curva correspondiente al ángulo de 45° se aprecia con una pendiente más suave y alcanza deformaciones considerablemente más altas. Respecto a la variabilidad, especialmente en la zona final del ensayo, los patrones de relleno concéntrico y de 45° presentan los valores más elevados, lo cual sugiere que estas muestras tienen una respuesta menos predecible.

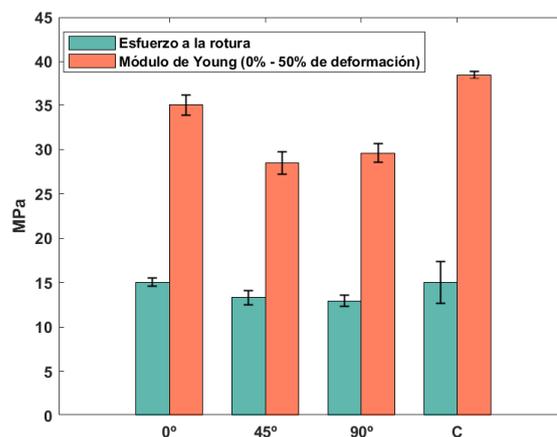


Figura 4: Propiedades de tracción uniaxial de las muestras de TPU 82A: esfuerzo a la rotura y módulo de Young en la región del 0% al 50%.

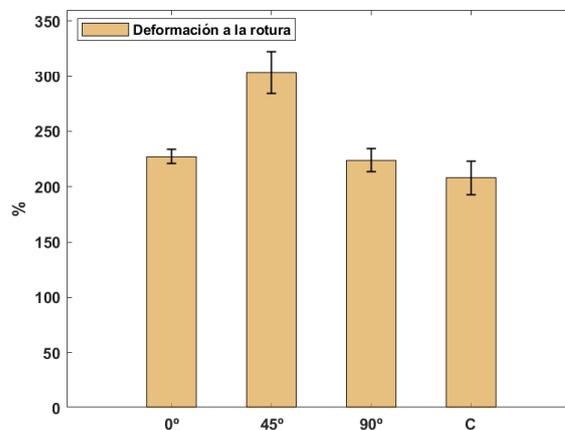


Figura 5: Propiedades de tracción uniaxial de las muestras de TPU 82A: deformación a la rotura.

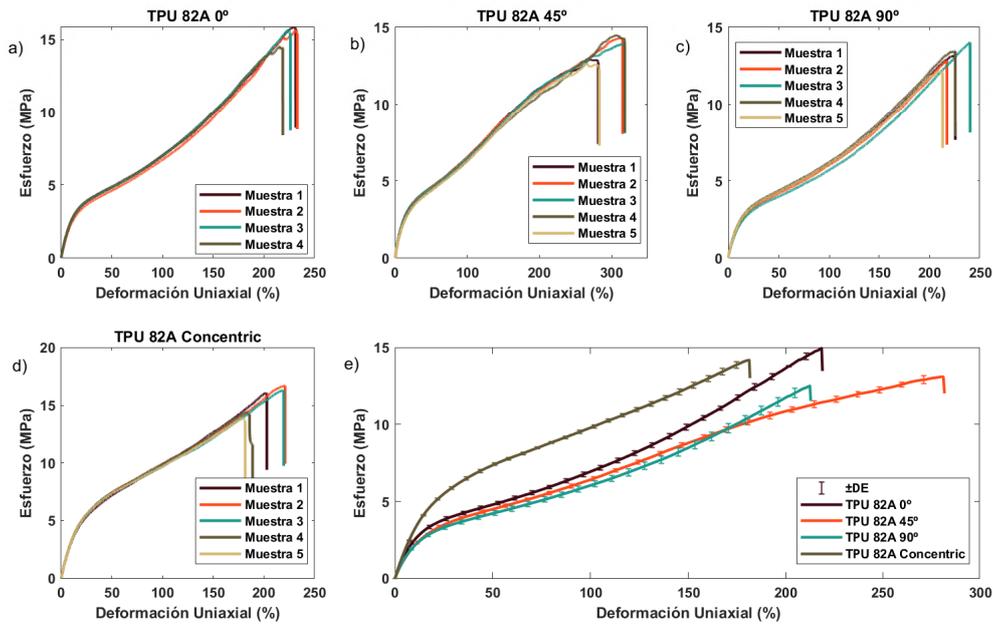


Figura 3: Curvas esfuerzo-deformación uniaxial de las muestras de TPU 82A impresas con distintos patrones de relleno. (a–d) Resultados individuales para cada patrón: 0°, 45°, 90° y concéntrico. (e) Media y desviación estándar (\pm DE) de curvas esfuerzo-deformación uniaxial para cada configuración.

Las Figuras 4 y 5 presentan los valores promedio y la dispersión del módulo de Young, calculado en el intervalo de 0% a 50% de deformación, así como el esfuerzo y la deformación a la rotura obtenidos a partir de los ensayos de tracción para cada orientación del relleno. Las probetas con patrón concéntrico registraron el mayor módulo de Young ($38.45 \text{ MPa} \pm 0.4$), seguidas por las de 0° ($34.99 \text{ MPa} \pm 1.2$). El patrón concéntrico no presenta alineación paralela con la dirección de carga, a diferencia del patrón 0°. Sin embargo, su estructura interna curvada puede inducir un efecto de confinamiento local y redistribución de tensiones en las primeras etapas del ensayo, lo que contribuiría a una mayor rigidez aparente. Esto podría explicar su desempeño comparable al ángulo de 0° en términos de rigidez, y su elevado esfuerzo máximo (15.05 MPa), a pesar de la complejidad geométrica del relleno.

Por otro lado, los patrones de 45° y 90° presentaron módulos más bajos de 28.49 y 29.59 MPa, respectivamente, indicando una menor rigidez estructural en etapas iniciales de esfuerzo. Este comportamiento se contraponen, en el caso de la orientación de 45°, con su deformación a la rotura tan elevada de 303.3%, con una DE de ± 19.1 que evidencia una naturaleza más dúctil, como se ha comentado anteriormente, aunque acompañada de una elevada dispersión.

El mayor esfuerzo a la rotura lo registra el ángulo del patrón de relleno de 0° con $15.05 \text{ MPa} \pm 0.4$, evidenciando una rigidez y repetibilidad elevada. Este comportamiento ha sido observado en la bibliografía y se atribuye a la alineación directa de los cordones de extrusión con la dirección de la carga aplicada. El patrón concéntrico exhibe 14.99 MPa , un valor de esfuerzo a rotura muy cercano al de 0°. Sin embargo, lo acompaña una DE de ± 2.3 , lo que indica una mayor dispersión entre muestras y sugiere que su desempeño depende en mayor medida de factores locales de impresión o variabilidad en la geometría de los anillos internos.

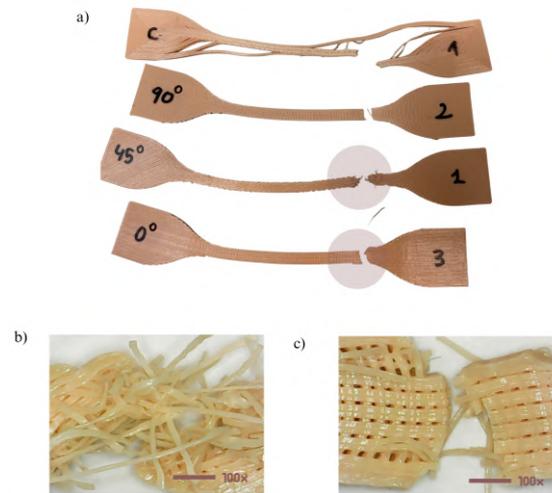


Figura 6: Modos de rotura observados en las probetas de TPU 82A tras el ensayo de tracción. a) Vista general de las probetas fracturadas correspondientes a cada patrón de relleno: concéntrico (C), 90°, 45° y 0°. b) Detalle microscópico del área de rotura del patrón de relleno de 45°. c) Detalle microscópico del área de rotura del patrón de relleno de 0°.

Para complementar los datos experimentales obtenidos en los ensayos de tracción uniaxial se presentan en la Figura 6 imágenes de los modos de rotura correspondientes a los distintos patrones de relleno evaluados. En la Figura 6a se aprecian las roturas limpias y bien definidas de las probetas con patrones de relleno concéntrico (C) y ángulos de relleno de 0°, 45° y 90°. Para 0° (Figura 6c) se aprecia una rotura alineada con la dirección de extrusión, lo cual sugiere una tracción pura provocada por una separación axial progresiva del filamento depositado. En contraste, la rotura observada en la orientación del patrón de relleno de 45° (Figura 6b) muestra desplazamiento de los cordones y una

ruptura menos uniforme, lo que sugiere un mecanismo de fallo asociado al deslizamiento interno entre los filamentos depositados y a la dirección oblicua de carga, consistente con las fluctuaciones observadas al final de la curva esfuerzo-deformación. Por otro lado, destaca la rotura incompleta de las probetas con patrón concéntrico, lo cual sugiere un fallo más distribuido y progresivo, causado probablemente por la geometría circular del relleno que permite repartir las tensiones de forma más homogénea y evitar roturas abruptas localizadas.

Los resultados obtenidos evidencian la influencia que tiene la orientación del patrón de relleno en las propiedades mecánicas de piezas impresas con TPU 82A. Las variaciones observadas en resistencia a la tracción, rigidez inicial y deformación máxima de las muestras evaluadas demuestran cómo la dirección del filamento depositado durante el proceso de FFF define la forma en que se distribuyen las cargas aplicadas al material.

4. Conclusiones

En este estudio se han caracterizado mecánica y morfológicamente probetas de TPU 82A impresas mediante FDM con un patrón de relleno con distintas orientaciones: 0°, 45°, 90° y concéntrico. Las pruebas realizadas arrojaron evidencia de la influencia de este parámetro de impresión en propiedades mecánicas del material como módulo de Young, el esfuerzo a la rotura o la deformación máxima. El patrón de relleno con orientación 0°, al ofrecer elevada rigidez y resistencia con baja dispersión, es recomendable para fabricar articulaciones blandas que deban soportar carga axial manteniendo su estabilidad estructural. El ángulo del relleno de 45° evidencia una ductilidad notablemente superior, lo cual lo hace adecuado para robots blandos que se sometan a grandes deformaciones sin que se generen fallos localizados. Por otra parte, el patrón de 90°, con menor rigidez y resistencia, podría ser de utilidad en sistemas robóticos blandos donde se requieran articulaciones deformables con esfuerzos pequeños o en zonas de baja exigencia mecánica. Finalmente, el patrón concéntrico destaca por un buen compromiso entre rigidez y resistencia, siendo apropiado para fabricar estructuras blandas a las que se apliquen cargas multidireccionales, aunque su elevada variabilidad entre muestras implica una mayor sensibilidad a variaciones en el proceso de impresión en comparación con el resto de patrones.

Las relaciones establecidas en este trabajo resultan relevantes para el desarrollo de articulaciones blandas en el ámbito de la robótica, donde se requiere un compromiso entre flexibilidad estructural y capacidad de carga. La información obtenida posiciona al TPU 82A como un material deseable en la fabricación de sistemas robóticos blandos mediante impresión 3D, siempre que se optimice la orientación del patrón de relleno en función de los requerimientos mecánicos específicos de cada componente. Como trabajo futuro, se propone caracterizar dinámica-

mente al material bajo carga cíclica y a distintas velocidades, para evaluar su desempeño en condiciones más representativas de entornos reales.

Agradecimientos

Estos resultados de investigación se enmarcan dentro de los proyectos ADAPTA, con referencia PLEC2023- 010218, financiado por MICIU /AEI /10.13039/501100011033, y SIROCO, con referencia PID2023-147343OB-I00, financiado por MICIU /AEI /10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

Referencias

- Boubakri, A., Haddar, N., Elleuch, K., Bienvenu, Y., 2010. Impact of aging conditions on mechanical properties of thermoplastic polyurethane 31 (9), 4194–4201.
DOI: 10.1016/j.matdes.2010.04.023
- Buche, M. R., Silberstein, M. N., 2021. Chain breaking in the statistical mechanical constitutive theory of polymer networks. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 156, 104593.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2021.104593>
- Caprioli, M., Roppolo, I., Chiappone, A., Larush, L., Pirri, C. F., Magdassi, S., 4 2021. 3d-printed self-healing hydrogels via digital light processing. *Nature Communications* 2021 12:1 12, 1–9.
DOI: 10.1038/s41467-021-22802-z
- Holden, G., 2024. 5 - thermoplastic elastomers. In: Kutz, M. (Ed.), *Applied Plastics Engineering Handbook (Third Edition)*, third edition Edition. *Plastics Design Library*. William Andrew Publishing, pp. 97–113.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88667-3.00020-5>
- Khandagale, P., Breitzman, T., Majidi, C., Dayal, K., Jun 2023. Statistical field theory for nonlinear elasticity of polymer networks with excluded volume interactions. *Phys. Rev. E* 107, 064501.
DOI: 10.1103/PhysRevE.107.064501
- Lang, L., Antunes, R., Dutra, T. A., de Aguiar, M. L., Pereira, N., Gaspar, P. D., 2025. Mechanical characterization and computational analysis of tpu 60a: Integrating experimental testing and simulation for performance optimization 18 (2), 240.
DOI: 10.3390/ma18020240
- Martín-Sosa, E., Távara, L., Ojeda, J., Estefani, A., 2025. Anisotropic and hyperelastic mechanical response of 3d printed tpu parts. *Progress in Additive Manufacturing*.
DOI: 10.1007/s40964-024-00937-x
- Nace, S., Tiernan, J., Holland, D., Ní Annaidh, A., 12 2021. A comparative analysis of the compression characteristics of a thermoplastic polyurethane 3d printed in four infill patterns for comfort applications. *Rapid Prototyping Journal* 27, 24–36.
DOI: 10.1108/RPJ-07-2020-0155
- Qi, H. J., Joyce, K., Boyce, M. C., 05 2003. Durometer hardness and the stress-strain behavior of elastomeric materials. *Rubber Chemistry and Technology* 76 (2), 419–435.
DOI: 10.5254/1.3547752
- von Szczepanski, J., Roels, E., Siqueira, G., Danner, P. M., Wolf, J., Legrand, J., Brancart, J., Terryn, S., van Assche, G., Vanderborght, B., Opris, D. M., 12 2023. Printable polar silicone elastomers for healable supercapacitive strain sensors. *Advanced Materials Technologies* 8, 2301310.
DOI: 10.1002/ADMT.202301310
- Xiao, J., Gao, Y., 2017. The manufacture of 3d printing of medical grade tpu. *Progress in Additive Manufacturing* 2 (3), 117–123.
DOI: 10.1007/s40964-017-0023-1