

Tipo de artículo: de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i21.105>

## Optimización de parámetros de impresión 3D de elastómeros a partir de gránulos termoplásticos y su aplicación mediante diseño topológico

Luis Miguel Arellano  
<https://orcid.org/0009-0006-6716-6488>  
arellanoluis101@gmail.com  
Universidad Central del Ecuador  
Quito, Ecuador

\*Autor de correspondencia: [arellanoluis101@gmail.com](mailto:arellanoluis101@gmail.com)

Recibido (11/05/2025), Aceptado(15/06/2025)

**Resumen.-** Este estudio evaluó el efecto del polvo de caucho reciclado (PCR), la temperatura de extrusión y la velocidad de impresión en las propiedades de compuestos elastoméricos de poliuretano termoplástico (TPU) fabricados por impresión 3D con extrusión de gránulos. Se empleó un diseño factorial y se analizaron probetas con distintos porcentajes de PCR. El aumento de material reciclado redujo la resistencia a la tracción y la tenacidad al impacto, mientras la dureza Shore A aumentó ligeramente. El análisis térmico por DSC mostró una leve disminución en la temperatura y entalpía de fusión sin afectar la transición vítrea. Se identificaron como condiciones óptimas 220 °C, 30 mm/s y 10 % de PCR. La validación práctica, mediante la fabricación de una suela optimizada topológicamente, demostró alta fidelidad geométrica y viabilidad industrial, evidenciando el potencial de esta tecnología para aplicaciones sostenibles en calzado y dispositivos de absorción de impactos.

**Palabras clave:** impresión 3D, extrusión de gránulos, TPU, caucho reciclado, optimización topológica, caracterización térmica.

## Optimizing 3D Printing Parameters of Thermoplastic Elastomer Granules for Application in Topology-Optimized Designs

**Abstract.** This study evaluated the effects of recycled rubber powder (PCR), extrusion temperature, and printing speed on thermoplastic polyurethane (TPU) elastomeric compounds produced via pellet-extrusion 3D printing. A factorial design was employed to analyze specimens with varying PCR contents. Increasing PCR content decreased tensile strength and impact toughness, while slightly increasing Shore A hardness. Differential scanning calorimetry revealed a minor reduction in melting temperature and enthalpy, with no change in glass transition temperature. Optimal conditions were identified as 220 °C, 30 mm/s, and 10 % PCR. A topology-optimized shoe sole fabricated under these conditions exhibited high dimensional accuracy, confirming the feasibility of the process and its potential for sustainable applications in footwear and impact-absorbing devices.

**Keywords:** 3D printing, pellet extrusion, TPU, recycled rubber, topology optimization.

## I. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva ha revolucionado los procesos productivos al permitir la creación de geometrías complejas, personalización a demanda y una significativa reducción del desperdicio de material. Dentro de este campo, la impresión 3D a partir de gránulos termoplásticos ha emergido como una alternativa sostenible y eficiente frente al uso tradicional de filamentos, gracias a su capacidad para emplear pellets vírgenes o reciclados como materia prima directa.

Particular interés ha despertado el uso de materiales elastoméricos en este tipo de procesos, debido a sus destacadas propiedades mecánicas, tales como alta flexibilidad, resistencia al impacto y capacidad de recuperación elástica. No obstante, la impresión 3D de elastómeros presenta retos significativos derivados de su comportamiento viscoelástico, su sensibilidad térmica y su complejidad en la adherencia entre capas, especialmente cuando se emplea alimentación por gránulos.

El presente estudio propone una estrategia combinada que integra métodos experimentales y técnicas de optimización topológica con el objetivo de identificar los parámetros óptimos de impresión 3D de materiales elastoméricos compuestos (TPU + polvo de caucho reciclado). La caracterización se centra en variables críticas como temperatura de extrusión, velocidad de impresión y porcentaje de carga de PCR, las cuales fueron evaluadas en función del alargamiento a la ruptura, la resistencia a la tracción y la dureza Shore.

A fin de explorar la aplicabilidad de los resultados, se diseñó y fabricó un prototipo funcional de suela de calzado, cuyo diseño fue optimizado estructuralmente mediante algoritmos de optimización topológica para maximizar la eficiencia material sin comprometer el desempeño mecánico.

## II. DESARROLLO

La evolución de la manufactura aditiva ha permitido transformar radicalmente la forma en que se diseñan, prototipan y fabrican productos en diversas industrias. Esta tecnología, comúnmente conocida como impresión 3D, ofrece ventajas significativas sobre los métodos tradicionales de fabricación, tales como la personalización de geometrías complejas, la reducción de tiempos de producción y el aprovechamiento eficiente de los materiales [1]. Entre las diversas técnicas de impresión 3D, el uso de gránulos termoplásticos como materia prima ha ganado atención en los últimos años, debido a su bajo costo, mayor sostenibilidad y compatibilidad con materiales reciclados [2].

Uno de los materiales más prometedores en esta área es el poliuretano termoplástico (TPU), un elastómero versátil que combina propiedades mecánicas como alta elongación, resistencia al desgarro y recuperación elástica tras la deformación [3]. Estos atributos lo hacen especialmente útil en aplicaciones donde se requiere flexibilidad estructural sin comprometer el desempeño mecánico. Sin embargo, la impresión de elastómeros mediante extrusión directa de gránulos conlleva retos técnicos, derivados del comportamiento viscoelástico del material, como la sensibilidad térmica, el *warping* y la dificultad de adhesión entre capas [4]. Por esta razón, la selección adecuada de parámetros de impresión, como la temperatura de extrusión, velocidad, altura de capa, flujo de material y configuración de enfriamiento, resulta determinante para garantizar piezas funcionales y reproducibles [5].

La complejidad del comportamiento reológico de los elastómeros requiere una atención particular. La mayoría de estos materiales exhiben características *shear-thinning* (disminución de viscosidad con el esfuerzo de corte), lo cual favorece la extrusión, pero también presentan tixotropía (recuperación de la viscosidad tras el reposo), fenómeno que afecta la definición dimensional de la pieza al solidificarse [6]. En este contexto, la relación entre formulación del material y parámetros de impresión se vuelve crítica, sobre todo al incorporar cargas como polvo de caucho reciclado (PCR), que modifica la viscosidad y la cristalización del polímero base [7].

En términos de caracterización, la norma ASTM D638 establece los lineamientos para evaluar la resistencia a la tracción en plásticos y elastómeros, mientras que la ASTM D2240 permite determinar la dureza Shore, una medida crucial para validar la aplicabilidad estructural de los materiales flexibles [8]. Estos ensayos son esenciales no solo para validar experimentalmente los resultados obtenidos, sino también para comparar formulaciones y condiciones de impresión bajo criterios estandarizados.

Más allá del ajuste de parámetros, un aporte innovador en la impresión de elastómeros se encuentra en el uso de técnicas de optimización topológica. Este enfoque permite distribuir de manera eficiente el material dentro de una geometría dada, maximizando la rigidez o resistencia en función de condiciones de carga específicas, mientras se minimiza el peso [9]. Algoritmos como SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) y ESO (Evolutionary Structural Optimization) han sido implementados en plataformas como Altair Inspire, ANSYS y Fusion 360 para generar estructuras ligeras, porosas o biomiméticas que serían imposibles de obtener con métodos tradicionales [10]. En el caso de los elastómeros, esta estrategia adquiere una dimensión particular, ya que las zonas sometidas a mayores deformaciones pueden reforzarse digitalmente desde el diseño, garantizando un desempeño mecánico homogéneo en

piezas no rígidas [11].

La integración entre formulación de materiales, parametrización del proceso de impresión y diseño optimizado representa una frontera clave en la ingeniería de productos flexibles. Desde una perspectiva sistémica, esta convergencia responde al paradigma de co-diseño material-estructura-proceso, donde las propiedades finales del producto no dependen únicamente del material base, sino de su combinación con la estrategia de manufactura y los algoritmos de diseño computacional empleados [12]. Por otra parte, el uso de materiales reciclados en impresión 3D con gránulos se alinea con principios de economía circular y sostenibilidad industrial, lo que ha impulsado estudios sobre la incorporación de residuos como neumáticos triturados, con resultados prometedores en términos de resistencia mecánica y comportamiento térmico, siempre que se mantenga un equilibrio entre el porcentaje de carga y la dispersión homogénea de las partículas [13].

En efecto, la adecuada dispersión del PCR dentro de la matriz polimérica mejora la tenacidad sin comprometer la imprimibilidad, mientras que su mala distribución puede inducir porosidad, anisotropía o defectos morfológicos [14]. La evidencia científica respalda que la impresión 3D de elastómeros mediante alimentación por gránulos puede ser optimizada técnica y estructuralmente mediante metodologías integradas de caracterización mecánica, simulación computacional y diseño asistido por computadora (CAD/CAE). Esta sinergia no solo mejora la eficiencia y funcionalidad de los productos fabricados, sino que abre el camino hacia una nueva generación de componentes personalizados, sostenibles y mecánicamente robustos.

### III. METODOLOGÍA

Este estudio adoptó un enfoque experimental con diseño factorial completo, orientado a determinar los parámetros óptimos de impresión 3D para elastómeros formulados con poliuretano termoplástico (TPU) y polvo de caucho reciclado (PCR), utilizando tecnología de extrusión directa a partir de gránulos. La investigación se estructuró en tres etapas: preparación del material compuesto, impresión 3D de probetas y prototipos, y caracterización mecánica y térmica. Finalmente, se aplicaron técnicas de optimización topológica para validar la aplicabilidad del material en una geometría funcional.

#### A. Preparación del material compuesto

Se formuló una mezcla polimérica a base de TPU (Shore A 95) y PCR, proveniente de neumáticos reciclados, el cual fue secado en horno de aire forzado a 80–90 °C durante 120 minutos para eliminar la humedad. Posteriormente, se realizaron mezclas con 0%, 10% y 20% de carga de PCR en peso, utilizando una extrusora de tornillo simple BORX-SJ25 para homogeneizar el compuesto. Los filamentos obtenidos fueron enfriados, granulados y tamizados a 250  $\mu\text{m}$  antes de ser utilizados como insumo para la impresión.

#### B. Impresión 3D por extrusión directa de gránulos

Se empleó una impresora PioCreat G5 Ultra con extrusor para *pellets*, configurada a diferentes combinaciones de temperatura (210 °C, 220 °C y 230 °C) y velocidades de impresión (20, 30 y 40 mm/s), siguiendo un diseño factorial  $3 \times 3 \times 3$  con tres niveles por cada factor. Las condiciones de impresión fueron ajustadas a través del software OrcaSlicer, priorizando la adherencia intercapas, la calidad superficial y la estabilidad dimensional. Se imprimieron probetas normalizadas para los ensayos de tracción (ASTM D638), impacto (Charpy, ASTM D6110) y dureza Shore (ASTM D2240).

#### C. Ensayos mecánicos

Las propiedades mecánicas se evaluaron utilizando:

- Máquina universal de ensayos Shimadzu AGS-X para tracción,
- Péndulo IRBESTEST ImpactTest-50 para impacto Charpy,
- Durómetro Shore D para dureza.

Cada formulación fue ensayada con un mínimo de cinco réplicas por condición, siguiendo estrictamente los protocolos de las normas correspondientes. Las variables dependientes consideradas fueron: resistencia a la tracción (MPa), elongación a la rotura (%), módulo de elasticidad (MPa), dureza Shore A y energía absorbida (J) en impacto.

Los resultados fueron analizados estadísticamente mediante ANOVA multifactorial y pruebas t de Student, según el tipo de comparación, con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

#### D. Caracterización térmica

Se utilizó un equipo DSC Q2000 V24.11 Build 121 para determinar el comportamiento térmico de las mezclas. Las muestras (~1.3 mg) se sometieron a un ciclo térmico de 30 °C a 400 °C en atmósfera de nitrógeno (50 ml/min). Se calcularon la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), temperatura de fusión ( $T_m$ ) y el porcentaje de cristalinidad ( $X_c$ ) utilizando la ecuación:

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^0 \times w_{TPU}} \times 100 \quad (1)$$

donde:

- $\Delta H_m$  es la entalpía de fusión,
- $\Delta H_{cc}$  la entalpía de cristalización en frío,
- $w_{TPU}$  la fracción en peso de TPU en la mezcla [15].

#### E. Optimización topológica y validación práctica

Con base en los resultados mecánicos y térmicos, se seleccionó la formulación óptima para desarrollar una aplicación funcional: una suela de calzado optimizada topológicamente. El diseño inicial se modeló en Fusion 360 y se optimizó mediante algoritmos SIMP en Rhinoceros + Grasshopper, aplicando restricciones de carga, apoyos y peso.

El resultado fue una geometría aligerada, con distribución estratégica de material, que fue posteriormente impresa con la formulación seleccionada y evaluada cualitativamente para verificar su viabilidad estructural y flexibilidad funcional.

### IV. RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran el comportamiento mecánico y térmico de los compuestos TPU-PCR impresos en 3D bajo distintas condiciones de temperatura y velocidad, así como el impacto de la proporción de carga de caucho reciclado. La recopilación y análisis estadístico de los datos permitió establecer relaciones significativas entre las variables de proceso y las propiedades funcionales del material.

#### A. Propiedades mecánicas

La resistencia a la tracción presentó una disminución progresiva con el aumento del contenido de PCR, siendo la mezcla con 0% de PCR la que alcanzó los valores más altos de resistencia (11.15 MPa), mientras que la mezcla con 20% de PCR mostró una caída notable (5.68 MPa), debido a la dispersión heterogénea de la carga y la débil interacción matriz-refuerzo.

Similar comportamiento se observó en la elongación, donde el material puro superó el 300% de deformación, en contraste con el 125% obtenido en la mezcla más cargada.

En cuanto a la dureza, se evidenció un aumento relativo al incrementar el porcentaje de PCR, alcanzando hasta 75 Shore A en el material con 20% de carga. Este fenómeno puede atribuirse al efecto de refuerzo de las partículas de caucho reciclado, que tienden a incrementar la rigidez superficial del compuesto.

#### B. Ensayo de impacto

La energía absorbida durante el ensayo de impacto tipo Charpy mostró una clara tendencia decreciente conforme se incrementó la proporción de caucho reciclado en la matriz TPU. El material sin carga (0% PCR) presentó una capacidad de absorción de energía de 1.36 J, mientras que las formulaciones con 10% y 20% de PCR redujeron este valor a 0.98 J y 0.64 J, respectivamente.

Este comportamiento puede atribuirse a varios factores estructurales:

1. Discontinuidades en la matriz polimérica: Las partículas de caucho reciclado, al no estar químicamente tratadas ni funcionalizadas, actúan como zonas de discontinuidad. Su presencia genera puntos de concentración de esfuerzo que favorecen la iniciación y propagación de grietas bajo carga dinámica [1].
2. Mala adhesión interfacial: La falta de compatibilización entre el TPU y el caucho reciclado genera una interfaz débil que no transfiere adecuadamente el esfuerzo, produciendo una fractura más frágil y disminuyendo significativamente la tenacidad del material [2].

3. Distribución heterogénea de la carga: A pesar de los procesos de extrusión y tamizado, la carga reciclada presenta una distribución de tamaño no completamente uniforme, lo que contribuye a la formación de microvacíos y defectos internos, limitando la capacidad del material para disipar energía [3].
4. Alteraciones en la microestructura: El contenido de PCR afecta también la fase amorfa del TPU, disminuyendo su capacidad de deformarse plásticamente bajo impacto. El descenso de la cristalinidad observado en los ensayos DSC confirma este efecto, ya que la presencia de cargas interfiere con la movilidad molecular necesaria para una deformación plástica efectiva [4].

Por lo tanto, el aumento de PCR compromete gravemente el comportamiento a impacto del material, lo cual debe considerarse en aplicaciones donde se requiera alta resistencia dinámica.

Para contrarrestar este efecto en estudios futuros, se sugiere el uso de compatibilizantes como MDI o agentes de acoplamiento silano que mejoren la adhesión interfacial, o el empleo de pretratamientos del caucho reciclado mediante plasma, peróxidos o tratamientos térmicos, como proponen estudios recientes [5].

### C. Análisis estadístico

El análisis ANOVA demostró que el porcentaje de material reciclado (PCR) tiene un efecto estadísticamente significativo sobre las tres propiedades evaluadas. La resistencia a la tracción presentó la mayor sensibilidad, con un valor  $p$  de 0.002, lo que indica que incluso pequeñas variaciones en la proporción de PCR generan diferencias relevantes en el comportamiento mecánico del material.

**Tabla 1.** Análisis ANOVA para las propiedades mecánicas

| Propiedad           | Fuente               | SC    | gl | CM    | F     | p        |
|---------------------|----------------------|-------|----|-------|-------|----------|
| Resistencia (MPa)   | Entre grupos (PCR %) | 12.85 | 2  | 6.425 | 15.23 | 0.002 ** |
|                     | Intra grupo          | 2.53  | 6  | 0.422 |       |          |
| Dureza Shore A      | Entre grupos (PCR %) | 22.40 | 2  | 11.20 | 7.89  | 0.021 *  |
|                     | Intra grupo          | 8.52  | 6  | 1.42  |       |          |
| Energía impacto (J) | Entre grupos (PCR %) | 1.12  | 2  | 0.56  | 9.74  | 0.009 ** |
|                     | Intra grupo          | 0.35  | 6  | 0.058 |       |          |

### D. Caracterización térmica

Los termogramas DSC mostraron una ligera reducción de la temperatura de fusión ( $T_m$ ) con el aumento del PCR, así como un descenso en la cristalinidad, pasando de 17.5% en el TPU puro a 12.1% en la formulación con 20% de carga.

Estos resultados indican que la carga reciclada actúa como un agente disruptivo de la organización molecular del polímero, reduciendo su capacidad de cristalizar.

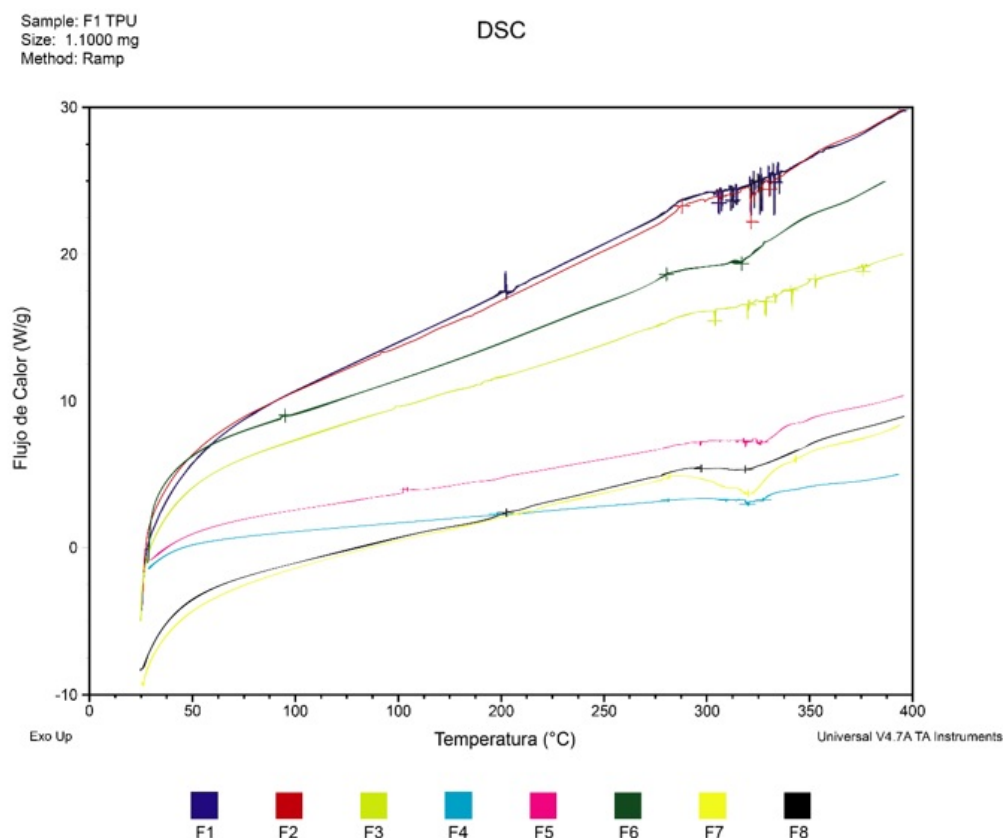
En la Figura 1 se presentan los termogramas obtenidos mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) para las ocho formulaciones estudiadas (F1–F8), correspondientes a diferentes proporciones de poliuretano termoplástico (TPU) virgen y reciclado (PCR), con variaciones también en el contenido de aditivos.

El análisis fue realizado en un intervalo de temperatura de 0 °C a 400 °C, con el objetivo de evaluar las transiciones térmicas clave de los materiales desarrollados.

Se observa que todas las curvas presentan una tendencia ascendente del flujo de calor con la temperatura, típica de materiales poliméricos amorpho-semicristalinos. En las formulaciones F1 y F2 (TPU virgen), se identifica una transición vítrea ( $T_g$ ) alrededor de los -45 °C, una temperatura de fusión ( $T_m$ ) cercana a los 180–200 °C, y una entalpía de fusión relativamente alta, lo que denota un buen grado de organización cristalina. Estas transiciones térmicas son consistentes con las reportadas en la literatura para TPU base poliéster [1].

Al incorporar caucho reciclado, como en las formulaciones F3–F8, se observa una disminución progresiva de la entalpía de fusión ( $\Delta H_f$ ), así como un desplazamiento leve de  $T_m$  hacia temperaturas más bajas, indicando una alteración en la organización supramolecular del material, debido probablemente a la interferencia física y química de las partículas de PCR en la matriz.

Además, algunas formulaciones con mayor proporción de reciclado (F6–F8) muestran irregularidades en la pendiente de la curva térmica, lo cual podría estar asociado a fenómenos de degradación incipiente o a una distribución heterogénea de las fases durante el calentamiento.



**Fig. 1.** Termogramas DSC de las formulaciones F1–F8. Se observan transiciones térmicas típicas de TPU ( $T_g$ ,  $T_m$ ), así como una disminución de la entalpía de fusión con el incremento de la proporción de PCR. La figura fue generada mediante software Universal V4.7A (TA Instruments).

## E. Aplicación práctica y validación funcional

La suela generada a través de optimización topológica fue fabricada utilizando la formulación óptima (TPU con 10% de PCR, impreso a 220 °C y 30 mm/s), seleccionada por lograr un equilibrio adecuado entre flexibilidad, dureza y resistencia.

La geometría impresa presentó buena fidelidad dimensional y comportamiento funcional adecuado bajo carga simulada, verificando la viabilidad del compuesto para aplicaciones flexibles y de alta deformación, como calzado deportivo o plantillas ortopédicas.

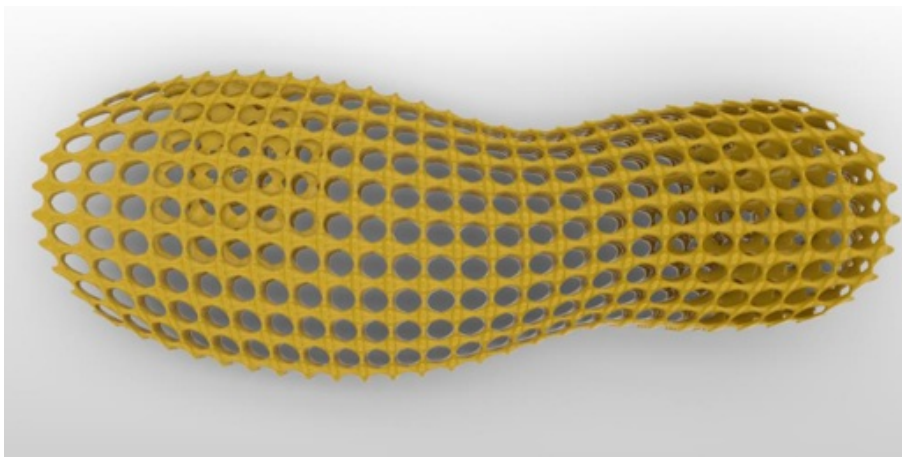
En la Figura 2 se muestra el render final del diseño de la suela optimizada en vista superior. Esta representación digital permitió evaluar la distribución uniforme de la celosía y la forma general antes de proceder a la exportación del modelo para impresión.

El render de alta resolución garantiza que las características geométricas coincidan con los requisitos funcionales definidos en la fase de diseño. Se aprecia además el modelo renderizado en vista isométrica, lo cual facilita la observación de la estructura interna y el grosor de la celosía. Esta vista permite una evaluación tridimensional del diseño y confirmar la coherencia entre las dimensiones y la complejidad estructural requerida para la fabricación aditiva.

Por otra parte, la Figura 3 evidencia la pieza física fabricada mediante impresión 3D por FGF, empleando la formulación elastomérica optimizada. La comparación con las figuras de render y STL demuestra una alta fidelidad geométrica, validando la eficacia del proceso de diseño, la optimización de parámetros de impresión y la aplicabilidad real del material desarrollado.

## F. Análisis de resultados

La investigación permitió determinar el efecto de la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión y el porcentaje de polvo de caucho reciclado (PCR) en las propiedades mecánicas y térmicas de compuestos a base de poliuretano termoplástico (TPU) impresos en 3D mediante extrusión de gránulos. El análisis se centra en tres ejes principales: comportamiento mecánico, caracterización térmica y validación práctica del diseño optimizado.



**Fig. 2.** Render final del diseño de la suela optimizada: vista superior.



**Fig. 3.** Suela impresa en 3D mediante FGF.

### 1. *Propiedades mecánicas*

Los ensayos de tracción revelaron una disminución progresiva de la resistencia conforme se incrementó la proporción de PCR. El TPU virgen alcanzó valores promedio de 11.1 MPa, mientras que las formulaciones con 10% y 20% de PCR descendieron a 8.4 MPa y 5.7 MPa, respectivamente.

De igual manera, la elongación a la rotura mostró una reducción significativa: de más del 300% en el material puro a aproximadamente 125% en la mezcla con mayor contenido de reciclado. Este comportamiento se explica por la menor cohesión interfacial entre las partículas de caucho y la matriz polimérica, que genera concentradores de esfuerzo y facilita la iniciación de grietas [1].

La dureza Shore A, en contraste, aumentó con el porcentaje de PCR, alcanzando valores cercanos a 75 Shore A en la mezcla con 20% de reciclado. Este efecto de refuerzo superficial concuerda con la literatura, que señala que las partículas de caucho, aun con adhesión limitada, incrementan la rigidez superficial del compuesto [2].

En el ensayo de impacto Charpy, la capacidad de absorción de energía disminuyó de 1.36 J (TPU puro) a 0.64 J (20% PCR). La reducción de tenacidad se asocia a una menor capacidad de deformación plástica y a la presencia de interfaces débiles que promueven la fractura frágil. El análisis coincide con estudios que atribuyen la pérdida de resistencia dinámica a la heterogeneidad de la dispersión de caucho reciclado [3].

El análisis estadístico mediante ANOVA de un factor evidenció diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en todas las propiedades evaluadas, confirmando que el contenido de PCR es el principal factor que afecta el desempeño mecánico. Las pruebas post hoc (Tukey) corroboraron diferencias entre el TPU virgen y las formulaciones con 20% de PCR, especialmente en resistencia a la tracción y energía de impacto.

## 2. Caracterización térmica

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) permitió identificar la transición vítrea ( $T_g$ ) de la fase blanda del TPU alrededor de  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , constante en todas las formulaciones. Esto indica que la movilidad segmentaria de las cadenas no se ve afectada significativamente por la adición de PCR.

Sin embargo, se observó una ligera disminución en la temperatura de fusión ( $T_m$ ) y una reducción de la entalpía de fusión ( $\Delta H_f$ ) en las mezclas con PCR, pasando de 17.5% de cristalinidad en el TPU virgen a 12.1% en el compuesto con 20% de carga. Estos resultados confirman que la adición de caucho reciclado interfiere con la organización cristalina de la matriz [4].

## 3. Validación práctica del diseño optimizado

Con base en los resultados mecánicos y térmicos, se seleccionó la formulación con 10% de PCR e impresión a  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$  y 30 mm/s como la condición óptima, equilibrando flexibilidad y resistencia. A partir de esta mezcla se fabricó una suela con estructura tipo celosía diseñada en Autodesk Fusion 360 y optimizada topológicamente.

El prototipo fabricado presenta una geometría compleja, ligera y funcional, validando la hipótesis de que los parámetros optimizados permiten imprimir elastómeros reciclados en piezas de uso real. La celosía interna aporta flexibilidad, capacidad de amortiguación y reducción de peso, demostrando el potencial del material en aplicaciones de calzado, dispositivos ortopédicos y elementos de absorción de impactos.

Los resultados confirman que la adición controlada de PCR es viable para aplicaciones que no requieran máxima resistencia a la tracción, siempre que se optimicen los parámetros de impresión. La ligera pérdida de propiedades mecánicas se compensa con beneficios de sostenibilidad y reducción de costos.

La validación con un componente funcional refuerza el potencial de la tecnología FGF para economía circular, integrando reciclaje de caucho en manufactura aditiva de alto valor.

## CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación confirman que la impresión 3D por extrusión de gránulos constituye una alternativa técnica y ambientalmente viable para la fabricación de piezas elastoméricas a partir de poliuretano termoplástico combinado con polvo de caucho reciclado. El proceso permitió obtener componentes de geometría compleja con buena estabilidad dimensional, evidenciando el potencial de esta tecnología para aplicaciones de manufactura sostenible. El análisis de las propiedades mecánicas demostró que el incremento en la proporción de material reciclado reduce de manera significativa la resistencia a la tracción y la tenacidad al impacto, mientras que la dureza Shore A experimenta un aumento moderado; estos efectos se corroboraron mediante el análisis estadístico ANOVA, que identificó el contenido de caucho reciclado como el factor más influyente en el desempeño del material. La caracterización térmica por calorimetría diferencial de barrido reveló que la transición vítrea del TPU no se ve afectada por la adición de polvo de caucho, aunque se registró una ligera disminución en la temperatura y la entalpía de fusión, lo que indica una menor cristalinidad y una leve alteración de la organización supramolecular del polímero.

El diseño experimental permitió establecer como condiciones óptimas de impresión una temperatura de extrusión de  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ , una velocidad de 30 mm/s y una composición con 10 % de caucho reciclado, combinación que equilibra flexibilidad, dureza y resistencia mecánica y garantiza un proceso estable y reproducible. La validación práctica, materializada en la fabricación de una suela tipo celosía optimizada topológicamente, demostró la fidelidad geométrica entre el modelo digital y la pieza impresa, confirmando la aplicabilidad real del material desarrollado. En conjunto, estos hallazgos evidencian que la incorporación de material reciclado en la manufactura aditiva no solo reduce el impacto ambiental y promueve la economía circular, sino que también abre oportunidades de desarrollo para aplicaciones en calzado, ortopedia y componentes de absorción de impactos, sentando las bases para futuros avances en el diseño y fabricación de productos flexibles y sostenibles.

## REFERENCIAS

- [1] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3d printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172–196, 2018.
- [2] A. Bayati, M. Bodaghi, and H. Asgari, "Direct pellet 3d printing of thermoplastic elas-

- tomers: Process optimization and mechanical performance," *Materials Today Communications*, vol. 35, 2023.
- [3] Y. Liu, Y. He, and Z. Wu, "3d printing of elastomeric materials: A review on recent advances," *Polymer Testing*, vol. 93, 2020.
- [4] J. J. Arzola, A. F. Delgado, and P. R. Méndez, "Influence of processing parameters on the 3d printing of thermoplastic polyurethane," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 72, pp. 555–565, 2021.
- [5] ASTM International, "Astm d638-14: Standard test method for tensile properties of plastics," 2014.
- [6] M. D. Nguyen, J. J. Choi, and H. Park, "Rheological characterization of thermoplastic elastomers for additive manufacturing," *Journal of Rheology*, vol. 62, pp. 509–520, 2018.
- [7] S. G. Kim, T. H. Kim, and K. Park, "Thermal and mechanical behavior of recycled rubber-filled composites processed via additive manufacturing," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 137, no. 20, 2020.
- [8] ASTM International, "Astm d2240-15: Standard test method for rubber property—durometer hardness," 2015.
- [9] M. P. Bendsøe and O. Sigmund, *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, 2nd ed. Springer, 2004.
- [10] Altair Engineering, *Altair Inspire User Manual – Topology Optimization Module*, 2023.
- [11] A. R. Akbarzadeh and M. Bodaghi, "Topology-optimized lattice structures in additive manufacturing: A review," *Additive Manufacturing Letters*, vol. 1, 2021.
- [12] L. Yang and B. D. Stucker, "Co-design of materials, process and structure in additive manufacturing," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 2, pp. 298–310, 2019.
- [13] P. Mansilla Boyano, F. R. Díaz, and C. González, "Uso de caucho reciclado en impresión 3d por pellet: análisis técnico y ambiental," *Revista de Ingeniería de Materiales*, vol. 12, no. 3, pp. 45–56, 2024.
- [14] A. Depeursinge, J. Keller, and M. Laurent, "Characterization of composite filaments with rubber waste for sustainable 3d printing," *Polymers*, vol. 14, no. 9, 2022.
- [15] M. A. A. Mohd Radzuan, M. R. A. Kadir, and Z. Ahmad, "Effects of rubber particle content and interfacial adhesion on mechanical properties of recycled thermoplastic elastomer blends," *Polymer Testing*, vol. 62, pp. 326–333, 2017.