UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"ESTUDIO COMPARATIVO DEL TPU IMPRESO EN 3D BASADO EN LOS EFECTOS DE VARIACIONES DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO"

Trabajo de grado previo a la obtención de título de Ingeniero en Mecatrónica

Línea de investigación: Producción Industrial y tecnología sostenible.

AUTOR:

Hadee Merary Cerdán Granizo

Director:

PhD. Brizeida Nohemí Gámez Aparicio

Asesor:

MSc. Fernando Vinicio Valencia Aguirre

Ibarra- Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Cerdán Granizo Hadee Merary

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Estudio comparativo del TPU impreso en 3D basado en los efectos de variaciones de los parámetros del proceso.
AUTOR (ES):	Cerdán Granizo Hadee Merary
FECHA: DD/MM/AAAA	14/07/2026
PROGRAMA:	■ PREGRADO ☐ POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
DIRECTOR/ASESOR:	PhD. Brizeida Gámez/ MSc. Fernando Valencia

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 14 días del mes de julio de 2026

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
HADEE MERARY CERDAN GRANIZO

Nombre: Cerdán Granizo Hadee Merary

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 14 de julio de 2026

PhD. Brizeida Nohemí Gámez Aparicio

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
BRIZEIDA NOHEMI GAMEZ APARICIO

(f)……

PhD. Brizeida Nohemí Gámez Aparicio
C.C.: 1758387383

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular "ESTUDIO COMPARATIVO DEL TPU IMPRESO EN 3D BASADO EN LOS EFECTOS DE VARIACIONES DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO." elaborado por HADEE MERARY CERDAN GRANIZO, previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
BRIZEIDA NOHEMI GAMEZ APARICIO

(f)……

PhD. Brizeida Nohemí Gámez Aparicio
C.C.: 1758387383

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FERNANDO VINICIO VALENCIA AGUIRRE

(f)……

MSc. Fernando Vinicio Valencia Aguirre
C.C.: 1003188669

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado, con todo mi corazón, a mi mamá Jenny, quien siempre soñó con verme seguir estudiando y superarme. Este logro le pertenece, porque cada paso que di estuvo acompañado de su esfuerzo, su fe y su amor. Sé que siente mis logros como propios, y por eso esta meta alcanzada es, en gran parte, el reflejo de todo lo que ella sembró en mí.

A mi papá Sergio, por estar siempre presente, guiándome con valores, ética y principios. Por enseñarme a dar lo mejor de mí, a caminar con rectitud y a enfrentar la vida con responsabilidad y carácter, siendo junto a mi madre un pilar fundamental en mi formación personal y profesional.

A mi hermana Thali, quien, con su fortaleza y sus propios logros, ha sido una constante fuente de inspiración. En ella aprendí que las cosas grandes sí se pueden alcanzar y que los sueños se construyen con esfuerzo y determinación.

A mi hermanito Nirel, mi mayor motor, por ser la razón que me impulsa a ser mejor cada día y a convertirme en un ejemplo de perseverancia y superación.

A mi abuelita Donatila, que ya no está físicamente con nosotros, pero cuyo recuerdo permanece vivo en mi corazón y en mis oraciones. Su memoria ha sido una fuente de fortaleza y guía espiritual durante este proceso.

A Josselyn, por su amistad sincera e incondicional, llena de apoyo genuino y palabras nacidas del corazón. Gracias por escuchar, acompañar y siempre desear lo mejor para mí.

Y a Jesús, por ser compañía en los momentos de soledad, por su apoyo constante, su paciencia, su comprensión y por caminar a mi lado en este proceso, brindándome fuerza y calma cuando más lo necesitaba.

A todos ustedes, gracias por ser parte esencial de este logro y por darle sentido a cada esfuerzo realizado.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, por la fuerza recibida, por las oportunidades, por los aprendizajes y por haber puesto en mi camino las personas y experiencias necesarias para llegar hasta aquí.

A mi familia, por su apoyo constante, su paciencia y su confianza incondicional. Su acompañamiento fue fundamental para no rendirme y para mantenerme firme en cada desafío enfrentado a lo largo de este trayecto.

A mis compañeros de la universidad, quienes hicieron que mi paso por la universidad fuera más llevadero, compartiendo conocimientos, experiencias y momentos que marcaron positivamente esta etapa de mi formación.

A todas las personas que me abrieron las puertas de su hogar y de su corazón mientras me encontraba lejos de mi familia, mi sincero agradecimiento a Anderson y Carmita por su solidaridad, generosidad y apoyo; su ayuda fue clave para continuar este proceso con tranquilidad y esperanza.

Mi profundo agradecimiento a la Ing. Brizeida Gámez y al Ing. Fernando Valencia, por su empatía, compromiso y generosidad al compartir sus conocimientos, así como por su guía constante durante el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, gracias infinitas a todos quienes, de una u otra manera, estuvieron detrás de este logro, brindándome apoyo, inspiración y confianza.

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se estudia el desempeño mecánico del poliuretano termoplástico 95A a través de probetas fabricadas con este material mediante el proceso de Modelado por Deposición Fundida en impresión 3D. Estas muestras fueron elaboradas y fabricadas con diferentes configuraciones de patrón y porcentaje de relleno, para evaluar su efecto de resistencia a la tracción. Los parámetros de impresión 3D se implementaron de acuerdo al rango recomendado por el fabricante del filamento, considerando valores intermedios que garantizan la estabilidad en el proceso de fabricación y adecuada adhesión entre capas. Las probetas fueron elaboradas conforme a la norma ASTM D638, y posteriormente sometidas al ensayo de tracción bajo norma para obtener las curvas esfuerzo-deformación y determinar propiedades como esfuerzo máximo y comportamiento elástico. Se compararon configuraciones con patrón de relleno rejilla, triangular, zigzag, trihexagonal y giroide al 40%,60% y 80%. Se evidenció que las configuraciones de giroide al 40%, triangular al 40% y zigzag al 80% destacaron en diferentes propiedades mecánicas, el patrón giroide al 60% presentó el mejor equilibrio entre desempeño mecánico, consumo de material y tiempo de fabricación, constituyéndose como la alternativa más eficiente evaluada. Los resultados evidencian que la distribución de la geometría interna del relleno incide considerablemente en el rendimiento mecánico del TPU, con lo cual se logra establecer criterios de selección según se destaque la capacidad estructural o el desempeño productivo para aplicaciones de manufactura aditiva.

Palabras clave: Poliuretano termoplástico 95A, manufactura aditiva, FDM, ensayo de tracción, patrón de relleno, norma ASTM D638.

ABSTRACT

This thesis project studies the mechanical performance of thermoplastic polyurethane 95A through specimens made from this material using the Fused Deposition Modeling process in 3D printing. These samples were made with different pattern configurations and infill percentages to evaluate their effect on tensile strength. The 3D printing parameters were set according to the range recommended by the filament manufacturer, considering intermediate values that ensure stability in the manufacturing process and proper layer adhesion. The specimens were made following ASTM D638 standards and were then subjected to tensile testing under the standard to obtain stress-strain curves and determine properties like maximum stress and elastic behavior. Configurations with grid, triangular, zigzag, trihexagonal, and gyroid infill patterns at 40%, 60%, and 80% were compared. It was found that the 40% gyroid, 40% triangular, and 80% zigzag infill patterns stood out in different mechanical properties, while the 60% gyroid pattern showed the best balance between mechanical performance, material use, and manufacturing time, making it the most efficient option evaluated. The results show that the distribution of the internal filler geometry significantly affects the mechanical performance of TPU, allowing for selection criteria to be established depending on whether structural capacity or production performance is prioritized for additive manufacturing applications.

Keywords: Thermoplastic polyurethane 95A, additive manufacturing, FDM, tensile testing, infill pattern, ASTM D638 standard.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA ii

2. CONSTANCIAS ii

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR iii

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR iv

DEDICATORIA v

AGRADECIMIENTO vi

RESUMEN vii

ABSTRACT viii

ÍNDICE DE CONTENIDOS ix

ÍNDICE DE FIGURAS xii

ÍNDICE DE TABLAS xiv

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA 1

1.1 Planteamiento del problema 1
1.2 Objetivos 2
1.2.1 General 2
1.2.2 Específicos 2
1.3 Alcance y delimitación 3
1.4 Justificación 3

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO 5

2.1 Antecedentes 5
2.2 Bases Teóricas 10

2.2.1 Impresión 3D 10
2.2.2 Tecnologías de impresión 3D 11
2.2.2.1 SLA (Stereolithography) 11
2.2.2.2 PolyJet 12
2.2.2.3 FDM (Modelado por deposición fundida) 13
2.2.3 Proceso de impresión 3D mediante FDM 14
2.2.3.1 Materiales de impresión 3D por FDM. 16
2.2.3.2 Laminadores para FDM 17
2.2.3.3 Parámetros de impresión 18
2.2.4 Material TPU 20
2.2.4.1 Composición del TPU 21
2.2.4.2 Propiedades del TPU para impresión 3D 23
2.2.5 Ensayos mecánicos y normativas aplicables 25
2.2.5.1 Norma ASTM D638 para ensayos de tracción 26
2.2.5.2 Tipos de probetas según la Norma ASTM D638 26
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO 30

3.1 Enfoque y tipos de investigación 30
3.2 Diseño de la Investigación 31
3.2.1 Fase 1: Determinar los principales parámetros de configuración de la impresora 3D. 31
3.2.2 Fase 2: Evaluar el comportamiento del TPU al emplear técnicas de modelado de deposición fundida FDM. 32
3.2.3. Fase 3: Seleccionar las variables requeridas para los ensayos de tracción en el TPU de acuerdo con la norma correspondiente. 33
3.2.4. Fase 4: Analizar los resultados obtenidos en los ensayos realizados. 34
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS 36

4.1 Diseño de la probeta para el ensayo de tracción 36
4.2 Materiales utilizados en el ensayo experimental 37
4.3 Impresión 3D de las probetas para el ensayo. 38
4.4 Ensayo de tracción de los materiales 42
4.5 Cálculo de los parámetros mecánicos principales a partir de los datos experimentales. 46

4.5.1 Cálculo del área efectiva de la sección transversal 47
4.6 Resultados de los ensayos a tracción 55
4.6.1 Patrón de relleno tipo rejilla 56
4.6.2 Patrón de relleno tipo triangular 59
4.6.3 Patrón de relleno tipo zig zag 62
4.6.4 Patrón de relleno tipo trihexagonal 66
4.6.5 Patrón de relleno tipo giroide 70
4.7 Estudio comparativo de la respuesta mecánica del TPU dependiendo del patrón de relleno y la densidad. 73
4.7.1 Comparación del esfuerzo último entre patrones de relleno 74
4.7.2 Comparación del módulo de elasticidad en función del patrón y densidad de relleno 76
4.7.3 Comparación de la deformación en función del patrón y la densidad de relleno 79
4.8 Análisis integral y determinación de la configuración óptima 81
4.8.1 Criterio de evaluación integral del desempeño mecánico 82
4.9 Influencia de la temperatura de impresión en el desempeño mecánico del TPU .. 87
4.10 Comparación con especificaciones del fabricante (SUNLU – Ensayos ISO) 91
CONCLUSIONES 93
RECOMENDACIONES 95
Referencias 96
ANEXOS 100

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2. 1 *Primera impresora 3D RepRap Darwin [16].* 11
Fig. 2. 2 *Tecnologías de impresión (a) SLA, (b) Inyección de fotopolímeros [18].* 13
Fig. 2. 3 *Diagrama de impresión para tecnología FDM [19].* 14
Fig. 2. 4 *Etapas del proceso de impresión 3D mediante FDM.* 15
Fig. 2. 5 *Efectos de la altura de capa en distintos termoplásticos [31].* 19
Fig. 2. 6 *Comparación entre porcentaje-densidad del relleno [32].* 19
Fig. 2. 7 *Patrones de relleno para impresión 3D [33].* 20
Fig. 2. 8 *Modelo representativo de un polímero basado en ciclohexano y grupos éster [39].* 22
Fig. 2. 9 *Modelo Tipo de probetas según la Norma ASTM D638 (a) Probeta tipo I,II,III y V (b)Probeta tipo IV [45].* 27

Fig 4. 1 *Modelo CAD de la probeta IV según la Norma ASTM D638-22 a) Vista isométrica b)Vista frontal c) Vista lateral.* 36
Fig 4. 2 *Proceso de Impresión 3D por FDM.* 39
Fig 4. 3 a) *Grupo de cinco 5 probetas a ensayar con distintos porcentajes de relleno* ***b)*** *40%* ***c)*** *60%* ***d)****80%.* 42
Fig 4. 4 *Carga de la probeta en el dinamómetro James Heal Titan 5kN.* 44
Fig 4. 5 *Probeta ASTM D638 Tipo IV a) Distribución de las regiones b) Área de material sólido c)Área de paredes perimetrales d) Área de relleno interno e) Área efectiva total.* 47
Fig 4. 6 *Variación del área efectiva total en función del porcentaje de relleno.* 54
Fig 4. 7 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Rejilla al 40%* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* 57
Fig 4. 8 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Rejilla al 60%* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* 57
Fig 4. 9 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Rejilla al 80%* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* 58
Fig 4. 10 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Triángulo al 40%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* 61
Fig 4. 11 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Triángulo al 60%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* 61
Fig 4. 12 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Triángulo al 80%.* ***a)****Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* 61
Fig 4. 13 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón zig zag al 40%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* 64
Fig 4. 14 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón zig zag al 60%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* 65
Fig 4. 15 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón zig zag al 80%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* 65
Fig 4. 16 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón trihexagonal al 40%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* 68
Fig 4. 17 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón trihexagonal al 60%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura* 68
Fig 4. 18 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón trihexagonal al 80%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* 69
Fig 4. 19 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Giroide al 40%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* 71

Fig 4. 20 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Giroide al 60%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* *72*
Fig 4. 21 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Giroide al 80%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.* *72*
Fig 4. 22 *Variación del esfuerzo último promedio en función del patrón de relleno para diferentes densidades (40 %, 60 % y 80 %), incluyendo barras de error correspondientes a la desviación estándar.* *75*
Fig 4. 23 *Módulo de elasticidad promedio del TPU impreso en 3D para los patrones de relleno a densidades de 40 %, 60 % y 80 % y barras de error correspondientes a la desviación estándar.* *77*
Fig 4. 24 *Deformación promedio del TPU impreso en 3D en función del patrón y la densidad de relleno (barras de error: desviación estándar).* *79*
Fig 4. 25 *Índice de desempeño mecánico normalizado para las configuraciones de impresión evaluadas.* ... *85*
Fig 4. 26 *Curva esfuerzo-deformación de los resultados obtenidos de las probetas Giroide 60% y temperatura de 200 °C.* *88*
Fig 4. 27 *Curva esfuerzo-deformación de los resultados obtenidos de las probetas Giroide 60% y temperatura de 205 °C* *89*
Fig 4. 28 *Variaciones de las propiedades mecánicas evaluadas para TPU 95A a temperatura de 200 °C y 205 °C.* *90*

Fig D. 1 *Maquina universal de ensayos utilizada para las pruebas de tracción.* *103*
Fig D. 2 *Colocación de la probeta ASTM D638 Tipo VI en las mordazas de la máquina.* *103*
Fig D. 3 *Inicio del ensayo de tracción.* *104*
Fig D. 4 *Probeta durante la aplicación de la carga.* *104*
Fig D. 5 *Fractura de la probeta al finalizar el ensayo de tracción* *105*

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 *Comparación del coste de fabricación y el tiempo de ciclo [17].* *12*
Tabla 2. 2 *Comparación del coste de fabricación y el tiempo de ciclo.* *17*
Tabla 2. 3 *Características del TPU generales [40].* *23*
Tabla 2. 4 *Propiedades del filamento TPU en distintas marcas.* *23*
Tabla 2. 5 *Propiedades del TPU 95A para impresión 3D [41].* *24*
Tabla 2. 6 *Datos técnicos del TPU 95A para impresión 3D marca SUNLU [41]* *25*
Tabla 2. 7 *Tipo de probetas según la Norma ASTM D638 [45].* *27*
Tabla 2. 8 *Símbolos de la probeta según ASTM D638.* *27*
Tabla 2. 9 *Ecuaciones fundamentales para pruebas de tracción según la norma ASTM D638 [45]* *28*

Tabla 4. 1 *Dimensiones de la probeta IV según la Norma ASTM D638-22.* *37*
Tabla 4. 2 *Configuración de impresión de las probetas en el software Ultimaker Cura 5.11.* *40*
Tabla 4. 3 *Características técnicas de la máquina universal de ensayos.* *43*
Tabla 4. 4 *Distribución de probetas según patrón y densidad de relleno* *45*
Tabla 4. 5 *Configuración del ensayo de tracción en el software TestWise.* *46*
Tabla 4. 6 *Cálculo del área efectiva total según los parámetros de impresión.* *51*
Tabla 4. 7 *Área efectiva de la sección transversal por cada porcentaje de relleno.* *54*
Tabla 4. 8 *Resultados del ensayo a tracción de probetas de TPU con patrón Rejilla y 40 %, 60% y 80% de densidad de relleno* *56*
Tabla 4. 9 *Módulo de elasticidad aparente para probetas de TPU con patrón rejilla.* *57*
Tabla 4. 10 *Resultados del ensayo a tracción de probetas de TPU con patrón Triángulo y 40 %, 60% y 80% de densidad de relleno* *60*
Tabla 4. 11 *Módulo de elasticidad aparente para probetas de TPU con patrón triangular.* *60*
Tabla 4. 12 *Resultados del ensayo a tracción de probetas de TPU con patrón zig zag y 40 %, 60% y 80% de densidad de relleno* *63*
Tabla 4. 13 *Módulo de elasticidad aparente para probetas de TPU con patrón zig zag.* *64*
Tabla 4. 14 *Resultados del ensayo a tracción de probetas de TPU con patrón trihexagonal y 40 %, 60% y 80% de densidad de relleno* *67*
Tabla 4. 15 *Módulo de elasticidad aparente para probetas de TPU con patrón trihexagonal.* *67*
Tabla 4. 16 *Resultados del ensayo a tracción de probetas de TPU con patrón Giroide y 40 %, 60% y 80% de densidad de relleno* *70*
Tabla 4. 17 *Módulo de elasticidad aparente para probetas de TPU con patrón Giroide.* *71*
Tabla 4. 18 *Propiedades mecánicas del TPU 95A marca SUNLU obtenidas del ensayo a tracción.* *74*
Tabla 4. 19 *Índice de Desempeño Mecánico (IDM) por patrón y porcentaje de relleno* *83*
Tabla 4. 20 *Índice de Desempeño Mecánico (IDM) por patrón y porcentaje de relleno* *85*
Tabla 4. 21 *Resultados del ensayo a tracción en la máquina de ensayos James Heal 5kN para temperaturas de 200 °C y 205 °C en 5 probetas de TPU 95ª marca SUNLU.* *88*
Tabla 4. 22 *Valores promedio de las propiedades obtenidas con temperatura de 200 °C y 2005 °C* *89*

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA

En este capítulo se presenta el problema de la investigación, así como los objetivos que se persiguen con su desarrollo. Por otra parte, se indican los aspectos que justifican la realización de este trabajo y el alcance considerado de acuerdo con el plan específico.

1.1 Planteamiento del problema

Los efectos de los parámetros de impresión en materiales poliméricos como el TPU (Poliuretano Termoplástico) son relevantes para distintas aplicaciones tecnológicas e industriales; se utiliza en la manufactura de componentes flexibles, dispositivos médicos, y partes funcionales en el sector automotor y la electrónica, destacándose por su flexibilidad, resistencia al desgaste y su capacidad de absorción al impacto [1].

En Ecuador, el uso de impresión 3D ha experimentado un incremento notable desde la popularización de las impresoras de modelado por deposición fundida FDM a partir de 2018 principalmente en entornos académicos, talleres de prototipado y pequeñas industrias, permitiendo su uso en la fabricación de distintas piezas con filamentos de materiales como PLA, ABS, PETG y TPU [2].

Los materiales termoplásticos son populares en la impresión 3D en FDM, debido a su accesibilidad y versatilidad. Sin embargo, su uso se limita a ciertas propiedades mecánicas, como la resistencia y durabilidad; debido a la porosidad, bajo soporte estructural interno y baja adhesión entre capas, efectos directamente influenciados por los parámetros del proceso en la impresión 3D [3].

La manufactura aditiva permite simbólicas ventajas durante el desarrollo de prototipos, principalmente por la reducción de costos. No obstante, en la fabricación de piezas a gran

escala este proceso se vuelve menos eficiente ya que presenta tiempos considerablemente más largos y en algunos casos, con una mala configuración o calibración, las piezas no cumplen las especificaciones requeridas, generando pérdidas tanto en materiales y en recursos como tiempo, energía y desgaste del equipo [4].

Debido a la escasa documentación técnica local sobre la optimización del proceso de impresión que no considera la naturaleza flexible y térmicamente sensible del TPU, causan la fabricación de piezas con baja precisión, fallas mecánicas o comportamiento inadecuado, lo que limita el aprovechamiento completo de este material en aplicaciones funcionales o estructurales.

Si bien existen estudios que demuestran el potencial del TPU en diversas aplicaciones, muchos de estos se enfocan en aspectos específicos de cada investigación, lo que evidencia una falta de información detallada sobre cómo las variaciones en los parámetros del proceso influyen en sus propiedades físicas y mecánicas. Por ello, se plantea un estudio comparativo que permita encontrar los parámetros ideales para su uso en impresión 3D funcional.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Comparar los efectos de la variación de los parámetros del proceso de impresión 3D en filamentos de TPU sobre sus propiedades mecánicas, considerando condiciones controladas.

1.2.2 Específicos

- Determinar los principales parámetros de configuración de la impresora 3D.
- Evaluar el comportamiento del TPU al emplear técnicas de modelado de deposición fundida FDM.

- Seleccionar las variables requeridas para los ensayos de tracción en el TPU de acuerdo con la norma correspondiente.
- Analizar los resultados obtenidos en los ensayos realizados

1.3 Alcance y delimitación

Este estudio se centrará en analizar los efectos de las variaciones en los parámetros del proceso de impresión 3D sobre las propiedades mecánicas a tracción del filamento TPU. Para ello, se determinarán los principales parámetros de configuración de la impresora 3D, y se evaluará el comportamiento de las muestras impresas con la técnica FDM. Además, se realizará la selección de las variables requeridas para el ensayo mecánico de tracción, con base en la norma correspondiente, utilizando un conjunto de probetas bajo condiciones controladas. El trabajo se enfocará únicamente en el análisis experimental de las probetas, cuyos resultados permitirán identificar configuraciones ideales para mejorar el rendimiento estructural del TPU en futuras aplicaciones funcionales.

1.4 Justificación

El análisis del desempeño mecánico del TPU bajo los distintos parámetros de impresión 3D existentes, es necesario para su aplicación en componentes funcionales, donde requieren de materiales que tengan alta resistencia, flexibilidad y estabilidad térmica. Aunque existe un creciente uso en la manufactura aditiva, aún existe una brecha para el entendimiento técnico de cómo cada variable del proceso de fabricación afecta el rendimiento estructural del material.

Desde el ámbito educativo, esta investigación permitirá fortalecer conocimientos prácticos y teóricos sobre el uso de impresión 3D, materiales flexibles como el TPU y ensayos mecánicos, que es esencial para la formación integral de estudiantes en carreras técnicas e ingenierías.

En el ámbito investigativo, el estudio permitirá recopilar datos experimentales sobre la influencia de los parámetros de impresión 3D en la resistencia del poliuretano termoplástico, siendo util como base para futuras investigaciones aplicadas en manufactura aditiva.

En el ámbito económico, la investigación busca contribuir en la mejora de materiales y procesos, reduciendo costos de producción sin comprometer la calidad estructural. El análisis resulta muy relevante en contextos sonde se necesita fabricar piezas funcionales con recursos limitados, impulsando soluciones viables y sostenibles para pequeñas industrias o emprendimientos tecnológicos.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Una de las primeras investigaciones consideradas en este trabajo plantea una estrategia de impresión 3D que permite mejorar el desempeño mecánico de piezas de TPU fabricadas mediante FDM. El estudio analiza cómo la variación en la rigidez de los filamentos y el ajuste de parámetros como la velocidad de impresión influyen en la reducción de porosidad. Los resultados mostraron que, con la estrategia optimizada, las piezas impresas alcanzaron hasta el 95 % de la resistencia a la tracción y el 126,8 % de la resistencia al desgarro en comparación con las obtenidas por moldeo por inyección, lo que representa una mejora significativa en la calidad del material [5].

Luego, se presenta un trabajo que analiza la manera en que los parámetros de impresión 3D afectan las propiedades de tracción de dos elastómeros termoplásticos, PEBA y TPU. Se evaluaron parámetros como la altura de capa y la densidad de relleno mediante un diseño experimental. Los resultados mostraron que el TPU tuvo mejores propiedades mecánicas usando una altura de capa de 0.2 mm y un 75% de densidad de relleno. Por otro lado, el PEBA presentó un comportamiento menos sensible a la variación de la altura de capa, utilizando una altura de 0.3 mm y densidad de relleno del 75%. Este trabajo resalta la necesidad de tratar cada elastómero termoplástico de manera independiente, dado que las diferencias en sus propiedades viscoelásticas afectan su comportamiento bajo las mismas condiciones de impresión [6].

Bajo la premisa de mejorar el rendimiento de las piezas impresas en 3D con TPU para ampliar sus aplicaciones en áreas como la ortopedia y el confort, se investigaron los parámetros del

proceso de impresión, como la temperatura de impresión, la densidad de relleno y el patrón de relleno. Los factores se evaluaron para determinar el impacto en la dureza de las piezas. Los resultados indicaron que la temperatura de impresión es el parámetro que más incide en la dureza y que el patrón de relleno tiene una influencia menor. El estudio destaca la importancia de una precisa calibración para obtener productos de alta calidad, estableciendo correlaciones entre la tasa de flujo y la temperatura de impresión [7].

Por otro lado, en una investigación sobre la resistencia mecánica de piezas impresas con modelado de deposición fundida en el cual emplean PLA y PETG, se evaluaron diversos patrones de relleno y densidades. El estudio demostró que el PETG tiene mayor resistencia a la tracción y capacidad de deformación, en el que se destaca especialmente en partes con baja densidad de relleno. En contraste, el PLA mostró una mayor elasticidad y resistencia en configuraciones con densidad de relleno del 75%, siendo el patrón giroide el más resistente en términos de tensión. Aunque el PETG requirió tiempos de impresión más largos, se recomendó su uso para aplicaciones que demanden mayor durabilidad, mientras que el PLA resultó más adecuado para partes con menores exigencias mecánicas [8].

Se presenta un estudio sobre la optimización de parámetros de impresión 3D para mejorar las propiedades mecánicas de compuestos de TPU conductivo reforzado con partículas de Lampblack. El enfoque del experimento emplea metodologías de superficie de respuesta y diseño de experimentos para evaluar la influencia de parámetros clave como la velocidad de enfriamiento, la temperatura de la boquilla y la temperatura de la cama sobre la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión. Los resultados obtenidos muestran que estos parámetros influyen significativamente en las propiedades mecánicas de las muestras impresas, identificándose combinaciones óptimas que mejoran el rendimiento.

Mediante un enfoque de optimización por deseabilidad, se seleccionaron los parámetros de impresión que resultaron en mejoras en las propiedades de tracción y flexión, lo cual abre nuevas oportunidades para su aplicación en electrónica flexible y dispositivos portátiles [9].

En un estudio reciente, se exploró cómo distintos parámetros del proceso de impresión 3D influyen en la resistencia a la tracción de piezas elaboradas con PLA y ABS. Para ello, los investigadores aplicaron un diseño experimental tipo hipercuadrado latino y emplearon algoritmos de aprendizaje automático, lo que les permitió analizar trece variables del proceso, entre ellas la altura de capa, la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión, la densidad y el patrón de relleno. Los hallazgos revelaron que ciertos factores, como una mayor densidad de relleno, un mayor grosor en las capas superior e inferior y una dirección adecuada del relleno, contribuyen positivamente a mejorar la resistencia mecánica. En cambio, una impresión más rápida, temperaturas elevadas en el entorno de trabajo y algunas orientaciones de línea afectaron negativamente el desempeño. También se observó que imprimir en ciertas posiciones, especialmente cuando las líneas de material siguen el eje Y, mejora significativamente la respuesta mecánica [10].

En el contexto de identificación de materiales impresos mediante FDM, se han realizado distintas comparaciones directas entre filamentos como PLA, ABS y TPU con la finalidad de evaluar su comportamiento frente a esfuerzos de tracción. Uno de estos estudios analizó las propiedades mecánicas de probetas impresas en 3D, en donde demuestra diferencias entre los materiales. El ABS como material demostró la mayor resistencia a la tracción (38,7 MPa) y un comportamiento dúctil bien definido, el PLA también se mantuvo en un buen rango con una resistencia de 29,6 MPa, aunque con una elongación reducida, que indica una respuesta más frágil. El TPU, en contraste, presentó una menor resistencia (12,1 MPa), pero una

elongación significativamente mayor (142,3 %), lo que refleja su naturaleza altamente elástica. Estos resultados destacan cómo el tipo de filamento influye de forma decisiva en las propiedades mecánicas de las piezas impresas, más allá de los parámetros de impresión, y subrayan la necesidad de considerar las características intrínsecas del material al momento de diseñar componentes funcionales mediante impresión 3D [11].

Otro estudio experimental investigó las distintas configuraciones de impresión 3D y su impacto en las propiedades mecánicas de probetas fabricadas en distintos materiales, incluyendo PLA, ABS, PETG y TPU. Permitió evaluar parámetros de impresión conocidos como el porcentaje de relleno, el grosor de capa, la orientación de impresión y el tipo de patrón de relleno, identificando combinaciones óptimas e ideales que permiten maximizar la resistencia a la tracción, el módulo de Young y la elongación. Estos resultados mostraron que el relleno concéntrico, una orientación adecuada y un relleno del 100 % fueron las condiciones que ofrecieron el mejor desempeño mecánico, aunque no siempre es la mejor configuración por el desgaste del material. Asimismo, se concluyó que las variables más relevantes como la temperatura de extrusión o la velocidad de los perímetros tienen un impacto mínimo en las propiedades mecánicas. Este trabajo también destacó la importancia de controlar factores externos como la humedad durante el almacenamiento de las probetas, ya que esta puede alterar significativamente los resultados de los ensayos. Al concluir se analiza la necesidad de evaluar los parámetros del proceso como las condiciones de posimpresión para garantizar la fiabilidad de las piezas fabricadas mediante FDM [12].

En una investigación enfocada en el desarrollo de una prótesis de mano mediante impresión 3D, se exploró el impacto de distintos parámetros de impresión sobre el desempeño mecánico de las piezas fabricadas. El diseño incluyó 24 componentes impresos con dos distintos

materiales, el PLA y PLA con fibra de carbono, variando el porcentaje de relleno de 20 % y 40 %, en donde incluían TPU en zonas específicas para tener flexibilidad. Se empleó el software de laminado para la configuración de impresión y se evaluó el comportamiento de las prótesis mediante pruebas con un dinamómetro digital. Los resultados mostraron que parámetros como el tipo de filamento, el porcentaje de relleno y la ubicación de los materiales influyen directamente en la resistencia, adaptabilidad y economía de la prótesis final. Este estudio resalta la importancia de una adecuada selección de condiciones de impresión para optimizar tanto el rendimiento mecánico como la eficiencia del proceso [13].

En un estudio orientado a la aplicación de herramientas estadísticas en la manufactura aditiva, se analizó la deformación de especímenes impresos en PLA utilizando tres impresoras FDM distintas, todas con un 30 % de relleno. En el análisis de varianza (ANOVA) de dos factores, se identificaron los parámetros más influyentes en el proceso de impresión, entre ellos: espesor de capa, densidad de relleno, configuración del material, uso de soportes, temperatura y velocidad de deposición. Los resultados evidenciaron que en las distintas impresoras en sí mismas representan un factor crítico, ya que determinan el control sobre los parámetros de fabricación. Este enfoque estadístico permitió establecer la variabilidad y fiabilidad del proceso, subrayando la relevancia de los parámetros de impresión en la calidad final de las piezas [14].

2.2 Bases Teóricas

En este capítulo se presentan las bases teóricas que sustentan la comprensión de los conceptos necesarios utilizados para el desarrollo de esta investigación. Se aborda el tema de la impresión 3D y las principales tecnologías utilizadas en manufactura aditiva, la más importante a destacar es la tecnología FDM por ser la empleada en este estudio. Posteriormente, se describen el proceso de impresión utilizado, los materiales necesarios para la elaboración de los ensayos, los distintos laminadores y los parámetros más importantes en impresión 3D que pueden influir en las propiedades de las piezas fabricadas. Además, se presentan la composición y propiedades del poliuretano termoplástico que lo hacen adecuado para estas aplicaciones. Finalmente, se describen los ensayos mecánicos y las normas utilizadas para evaluar el comportamiento de las probetas fabricadas, proporcionando el sustento teórico para el análisis de los resultados obtenidos.

2.2.1 Impresión 3D

La impresión 3D surgió en la década de 1980 como una respuesta innovadora a la necesidad de fabricar piezas complejas de manera más flexible y eficiente. Aunque los primeros intentos en Japón y Francia no lograron consolidarse, fue en Estados Unidos donde Chuck Hull patentó en 1986 el proceso de estereolitografía (SLA), considerado este el punto de partida de la manufactura aditiva. Su invención, junto con la creación del formato STL, estableció las bases para el desarrollo posterior de la tecnología [15].

Durante los años siguientes, surgieron nuevas técnicas como el sinterizado selectivo por láser (SLS), FDM y el sinterizado directo de metales (DMLS), las cuales ampliaron las posibilidades de aplicación de esta tecnología. Sin embargo, su verdadera masificación ocurrió a partir del año 2005, con el proyecto RepRap y la liberación de patentes clave que

permitieron el desarrollo de impresoras de bajo costo y de código abierto, presentando así la primera impresora RepRap funcional en 2007, ilustrada en la Fig. 2.1 [16].

Hoy en día, la impresión 3D se aplica en diversos sectores gracias a su adaptación a distintos materiales como el TPU y al continuo avance de los equipos y software de control.

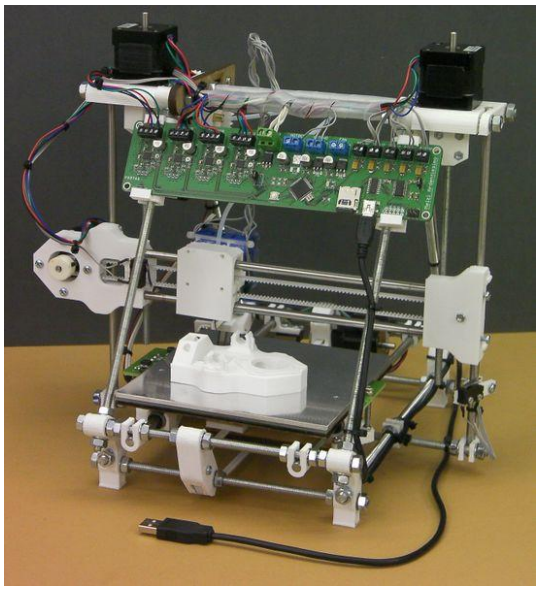


Fig. 2. 1 *Primera impresora 3D RepRap Darwin [16].*

2.2.2 Tecnologías de impresión 3D

Existen diversas tecnologías de impresión 3D, las cuales se diferencian por el método utilizado para fabricar las piezas y por los materiales que emplean. Cada una presenta ventajas y limitaciones según la aplicación requerida. En este apartado se describen las principales tecnologías de impresión 3D, con especial énfasis en la tecnología FDM, por ser la utilizada en el desarrollo de esta investigación.

2.2.2.1 SLA (Stereolithography)

La estereolitografía, conocida como SLA, fue una de las primeras tecnologías de impresión 3D en desarrollarse, y en la actualidad es muy valorada por su precisión y nivel de detalle. En lugar de usar filamento como en otras tecnologías, trabaja con una resina líquida que se

solidifica capa por capa usando luz ultravioleta. Un artículo que analiza su aplicación en procesos de diseño e ingeniería destaca varias ventajas importantes. Por ejemplo, permite hacer cambios al diseño sin alargar los tiempos de fabricación, lo que agiliza el ciclo de desarrollo. También facilita detectar errores a tiempo, ya que los prototipos ayudan a identificar fallas antes de pasar a producción. Además, usar modelos impresos en SLA para fundición evita algunos costos, como los que implicaría hacer pruebas mecánicas sobre piezas fundidas, y reduce el desperdicio de material porque se necesita menos mecanizado [17].

La Tabla 2.1 muestra una comparación clara entre SLA, el método tradicional con patrones de cera, y el mecanizado desde bloques de material. Se evidencia que integrar la impresión 3D con SLA en el proceso puede disminuir notablemente tanto el costo como el tiempo de producción.

Tabla 2. 1 *Comparación del coste de fabricación y el tiempo de ciclo [17].*

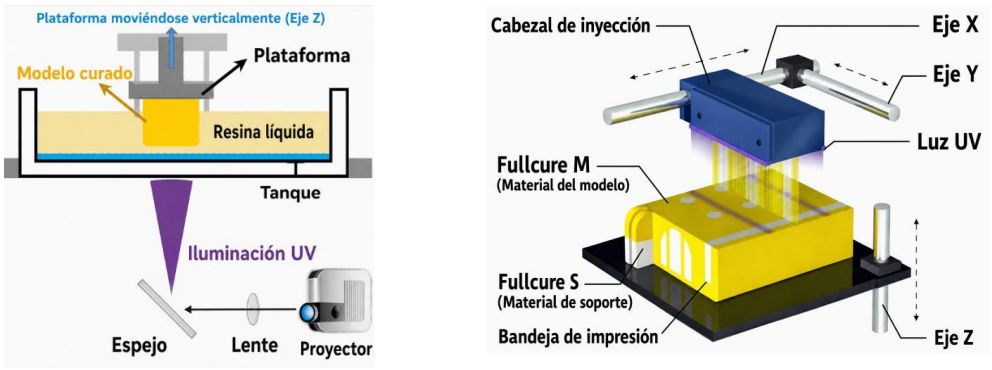
Características comparadas	Fundición con estereolitografía (SLA)	Patrón de cera tradicional	Mecanizado a partir de material en stock
Costo (en miles de dólares)	215	330	550
Tiempo de ciclo (meses)	5	8	7
Tiempo para incorporar cambios de diseño (meses)	2	1	1

2.2.2.2 PolyJet

Esta tecnología permite la fabricación de piezas con una gran precisión dimensional ya que se utiliza la proyección de resina líquida en capas muy delgadas, que luego se solidifican al instante con luz ultravioleta. Esta es una técnica utilizada principalmente en aplicaciones donde es necesario un alto nivel de detalle con acabados suaves, que los da la resina. Los parámetros clave como el grosor de capa, la escala y el estilo de construcción influyen considerablemente en la precisión dimensional. Las dimensiones externas dependen

principalmente del movimiento de la cuchilla y el grosor de capa, mientras que las internas se relacionan más con la escala y espesor. La dirección de impresión también afecta ciertos ejes. Con una configuración óptima, esta tecnología mejora la calidad, reduce errores y logra geometrías fieles al diseño original [18].

SLA y PolyJet son tecnologías de impresión 3D que usan resinas líquidas curadas con luz para crear piezas detalladas y con acabados lisos. SLA destaca por su precisión, mientras que PolyJet permite combinar materiales en una sola impresión. Ambas tecnologías son ideales para aplicaciones que requieren gran detalle y calidad superficial. La Fig. 2.2 presenta una representación de estas tecnologías de impresión.



(a) (b)

Fig. 2. 2 *Tecnologías de impresión (a) SLA, (b) Inyección de fotopolímeros [18].*

2.2.2.3 FDM (Modelado por deposición fundida)

Fused Deposition Modeling (FDM) es una técnica de impresión 3D desarrollada por Stratasys que crea objetos capa por capa usando filamento. En este proceso, un filamento sólido se calienta hasta fundirse y se va depositando sobre una plataforma, fusionándose con la capa anterior a medida que se enfría. El cabezal de impresión se mueve en dos direcciones para formar cada capa, mientras que la plataforma baja se mueve para dar paso a la siguiente [19].

Como se muestra en la Fig. 2.3, el modelado por deposición fundida utiliza un segundo material para construir soportes en partes que sobresalen o tienen ángulos pronunciados; estos soportes se pueden quitar fácilmente después.

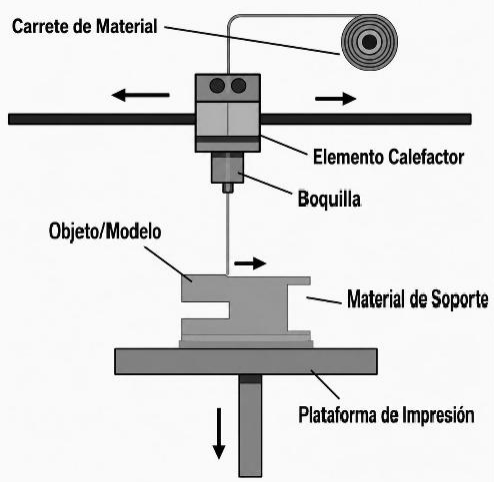


Fig. 2. 3 *Diagrama de impresión para tecnología FDM [19].*

Entre las distintas técnicas de impresión 3D, el proceso de modelado por deposición fundida es el más utilizado debido a su bajo costo de fabricación, operación sencilla, materiales económicos y fácil mantenimiento. Aunque su precisión es menor en comparación con otras tecnologías, su costo-beneficio lo hace muy popular [20].

2.2.3 Proceso de impresión 3D mediante FDM

El proceso de impresión 3D mediante FDM ilustrado en la Fig. 2.4, es sencillo y está automatizado en tres etapas principales que garantizan la correcta fabricación de una pieza desde el diseño digital hasta el objeto final listo para usar. Estas etapas son: preprocesado, construcción y posprocesado [21].

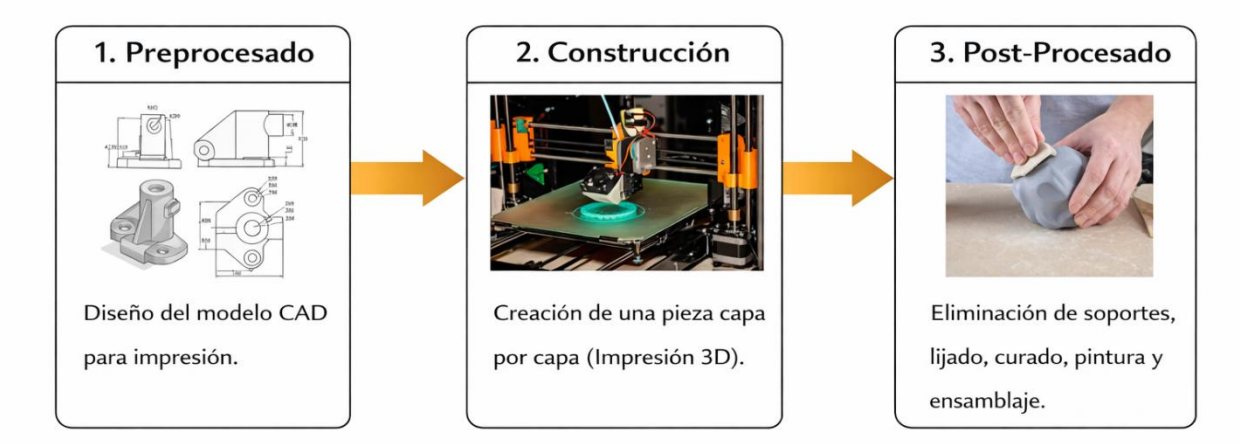


Fig. 2. 4 *Etapas del proceso de impresión 3D mediante FDM.*

Preprocesado:

A partir del diseño 3D realizado en un software CAD, el modelo se exporta en formato STL. Este archivo se abre en un software de laminado o slicer, que traduce el modelo a un conjunto de instrucciones que la impresora pueda interpretar, llamado código G. Dado que el hardware de la impresora solo entiende comandos relacionados con el movimiento de motores y el control de temperatura, el slicer divide el modelo en finas capas horizontales y genera el código para guiar el cabezal de impresión y el extrusor [22].

Construcción:

Durante la impresión, la máquina utiliza de dos maneras el material: uno principal para formar la pieza y otro que actúa como soporte. La boquilla por donde sale el material está montada sobre un sistema de posicionamiento tridimensional que se mueve con precisión según las coordenadas X, Y y Z. A medida que la impresora se desplaza, se depositan pequeñas líneas o gotas de plástico fundido capa por capa, que se alternan entre el material de la pieza y el de soporte, completando la forma final del objeto [23].

Postprocesado:

Una vez terminada la impresión, se procede a retirar la pieza de la impresora y se elimina el

material de soporte según configuración, desprendiéndolo manualmente o con algún objeto o equipo necesario, dejando así la pieza lista para su uso o para el siguiente acabado.

2.2.3.1 Materiales de impresión 3D por FDM.

Los polímeros termoplásticos fueron los primeros materiales usados en impresión 3D y siguen siendo los más comunes hoy en día. Esto se debe a que tienen las propiedades ideales, como la viscosidad y la temperatura de transición vítrea, que facilitan su fabricación en forma de filamentos. Las marcas más populares de filamentos para impresión 3D en Ecuador suelen ser Ultimaker, conocida por la calidad y precisión de sus materiales como PLA y ABS; eSUN, que incluye filamentos flexibles como TPU y resistentes como PETG; y SUNLU, que se ha ganado un lugar gracias a su buena relación calidad-precio, facilidad para imprimir y una amplia gama de colores y materiales [24]. En la Tabla 2.2 se presentan los termoplásticos más usados:

Tabla 2. 2 *Comparación del coste de fabricación y el tiempo de ciclo.*

Material	Composición	Características clave	Aplicaciones
ABS	Acrilonitrilo, butadieno y estireno	Resistente al calor, liviano, moldeable, reciclable [25].	Carcasas, piezas técnicas, automoción
PLA	Ácido láctico (lactido)	Biodegradable, fácil de imprimir, renovable [26].	Prototipos, decoración, piezas de bajo esfuerzo
TPU	Poliuretano termoplástico	Flexible, elástico, resistente a desgaste y químico [27].	Fundas, juntas, amortiguadores, usos industriales
PETG	Polietileno tereftalato modificado con glicol	Buena resistencia mecánica y baja absorción de humedad [28].	Envases, piezas funcionales, componentes mecánicos

2.2.3.2 Laminadores para FDM

El software de laminado, o también llamado slicer, es una herramienta esencial en la impresión 3D, ya que traduce el modelo digital en instrucciones específicas para que la impresora construya el objeto capa por capa. Existen diferentes opciones a utilizar, en cada una se debe considerar funciones y niveles de control distintos que permitan adaptarse a las necesidades del usuario y del equipo de impresión.

Ultimaker Cura: Este es uno de los programas más populares de código abierto, conocido por la facilidad de su uso, compatibilidad con múltiples formatos en especial STL y la posibilidad de personalizar los distintos parámetros de impresión. Este laminador permite visualizar el proceso por capas y generar soportes automáticamente.

PrusaSlicer: Desarrollado por Prusa Research, es un laminador de código abierto y está optimizado en especial para impresoras Prusa, aunque se puede usar con otras. Se destaca por

tener una interfaz intuitiva, perfiles preconfigurados para distintos materiales y herramientas para mejorar la calidad de impresión.

Simplify3D: Simplify3D es una alternativa de pago que destaca por ofrecer un control sobre cada el aspecto del proceso de impresión 3D, además de que cuenta con herramientas de simulación para evitar posibles errores.

OrcaSlicer: OrcaSlicer está basado en Bambu Studio y es compatible con diversas impresoras. Se caracteriza por su interfaz limpia, alto rendimiento, y actualizaciones constantes que integran funciones avanzadas de calibración, control de temperatura y visualización optimizada.

La elección del slicer depende de factores como el tipo de impresora, el material usado y el nivel de precisión requerido por el usuario [29].

2.2.3.3 Parámetros de impresión

En el proceso de impresión 3D, los parámetros de configuración juegan un papel importante en la calidad, el tiempo de fabricación y las propiedades mecánicas de las piezas. Ajustarlos correctamente permite adaptar la impresión al uso que se le dará al objeto, optimizando desde el detalle visual hasta la resistencia estructural. A continuación, se describen los parámetros de impresión más relevantes [30].

- **Altura de capa (Layer Height):** Se refiere al grosor de cada capa depositada durante la impresión. Una altura mayor reduce el tiempo de impresión, pero disminuye el nivel de detalle; mientras que una altura menor mejora la calidad visual y la unión entre capas, aunque alarga el proceso [31]. Véase la Fig. 2.5.

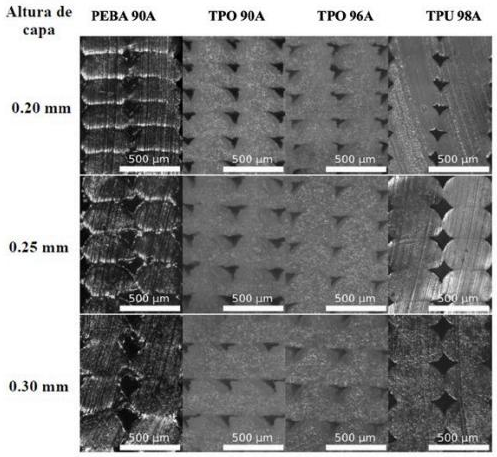


Fig. 2. 5 *Efectos de la altura de capa en distintos termoplásticos [31].*

- **Densidad de relleno (Fill Density):** Como se muestra en la Fig. 2.6 la densidad de relleno, indica qué porcentaje del interior de la pieza estará relleno. Puede ir desde 0% (pieza hueca) hasta 100% (pieza maciza). A mayor densidad, se incrementan la resistencia estructural, el consumo de material y el tiempo de impresión [32].

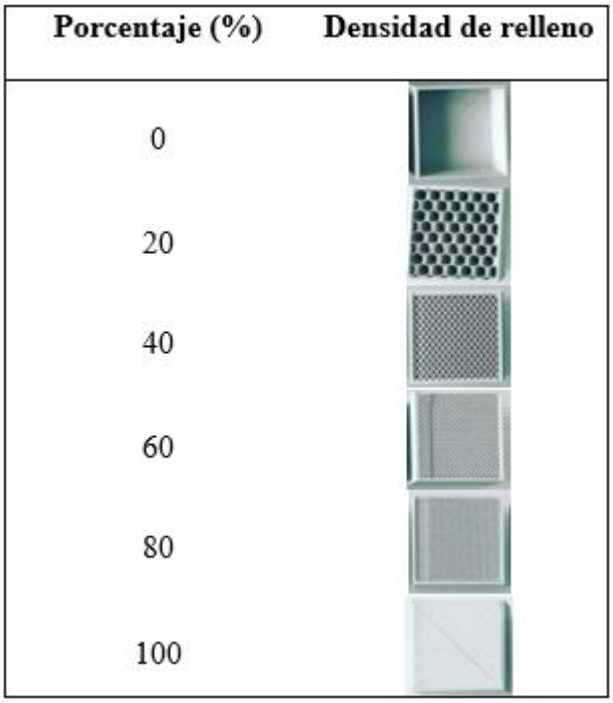


Fig. 2. 6 *Comparación entre porcentaje-densidad del relleno [32].*

- **Patrón de relleno (Fill Pattern):** Es el diseño geométrico que forma el material dentro de la pieza (excepto en las capas superior e inferior). Existen patrones como rectilíneo, en panal, concéntrico, giroide, triangular entre otros, que permiten ajustar la estructura interna según las necesidades de resistencia o forma [33]. Véase Fig. 2.7.

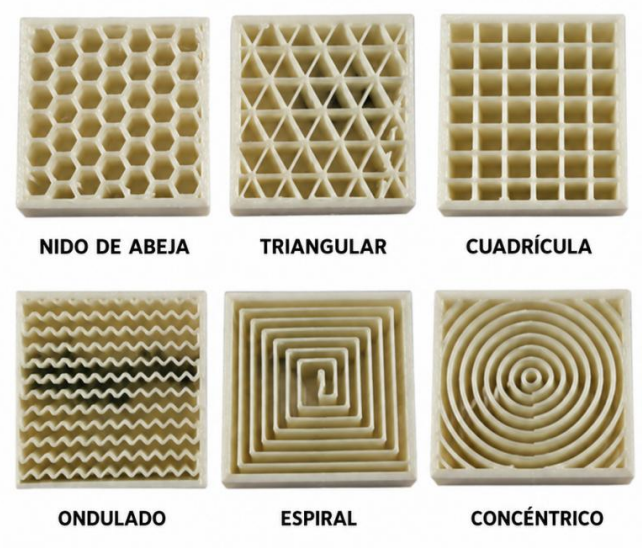


Fig. 2. 7 *Patrones de relleno para impresión 3D [33].*

- **Espesor de pared:** El espesor de pared en impresión 3D es clave para lograr piezas resistentes y bien impresas. En tecnologías como FDM y SLA este parámetro de impresión influyen significativamente en la rugosidad superficial en el material procesado [34].
- **Velocidades de impresión:** Existen distintas velocidades configurables dependiendo de la zona que se esté imprimiendo (perímetros, rellenos, soportes, primera capa, etc.). Normalmente, se hace énfasis en las velocidades de relleno y perímetros por ser las más frecuentes [35].

2.2.4 Material TPU

El TPU es un material con gran elasticidad y resistencia, capaz de soportar impactos, fricción y desgaste. Sus capas se fusionan de forma eficiente durante el proceso de fabricación, lo que

permite obtener piezas con propiedades mecánicas uniformes en todas las direcciones. Aunque presenta buenas cualidades para aplicaciones exigentes, no es adecuado para ambientes con altas temperaturas. Gracias a su versatilidad, se utiliza en la producción de piezas finales, prototipos funcionales, modelos conceptuales y componentes personalizados. Además, tiene aplicaciones en sectores como el textil, deportivo, agrícola y en elementos que requieren absorber impactos, demostrando su amplio campo de uso [36].

El TPU es un material sintético el cual combina la flexibilidad del caucho con la facilidad de trabajo de los plásticos. Este es un termoplástico, que al calentarse puede darle forma, y al enfriarse, mantiene esa forma, de esta manera se reutiliza y moldea varias veces.

Su estructura permite una buena elasticidad, resistencia al desgaste y a la tracción. Estas cualidades, se usa en aplicaciones que necesitan la utilización de materiales fuertes y flexibles, como en la industria automotriz, electrónica, deportiva y textil. Además, se puede procesar de diferentes maneras, como por inyección, extrusión o moldeo por soplado, lo que lo hace aún más útil y adaptable en distintos entornos industriales y comerciales [37].

2.2.4.1 Composición del TPU

El TPU Fig. 2.8, se obtiene a partir de una reacción química que forma una estructura con dos tipos de segmentos: unos blandos y flexibles, y otros duros y resistentes. Esta combinación es la clave de su versatilidad, ya que permite ajustar su dureza y comportamiento según la proporción entre ambos tipos de segmentos. Los componentes blandos, hechos generalmente de polioles como poliéster o poliéster, le dan elasticidad, mientras que los segmentos duros, que dependen del tipo de isocianato utilizado, le aportan rigidez y resistencia. Cuanto mayor es la cantidad de segmentos duros, más rígido se vuelve el material. Gracias a esta estructura,

el TPU puede adaptarse a diferentes necesidades industriales y comerciales, dando una amplia variedad de propiedades mecánicas según su composición [38].

A diferencia de otros plásticos, el TPU puede fundirse y moldearse varias veces sin perder sus propiedades, lo que lo hace parcialmente reciclable. Al ser un material termoplástico, permite su reprocesamiento térmica sin degradarse de forma significativa, lo que facilita su uso en distintos métodos de fabricación como la inyección, extrusión, moldeo por soplado e incluso en impresión 3D [39].

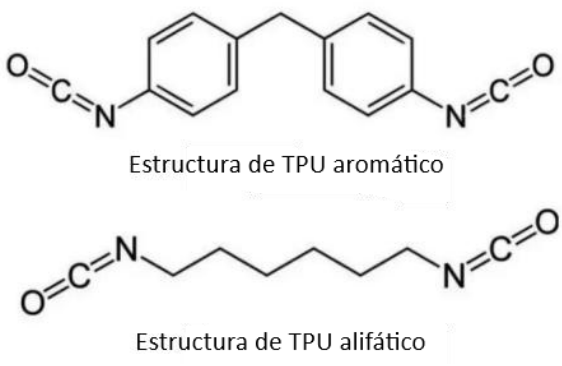


Fig. 2. 8 *Modelo representativo de un polímero basado en ciclohexano y grupos éster [39].*

A continuación, se presentan las propiedades físicas y mecánicas del TPU, las cuales permiten entender mejor su comportamiento frente a diferentes condiciones de uso [40].

La Tabla 2.3 incluye datos como densidad, temperaturas características, resistencia mecánica, capacidad de deformación, entre otras variables clave que definen su rendimiento en aplicaciones industriales y comerciales:

Tabla 2. 3 *Características del TPU generales [40].*

Propiedad	Valor
Densidad	1,18 × 10^3 – 1,21 × 10^3 kg/m^3
Temperatura de fusión	135 – 164 °C
Temperatura de transición vítrea	-43 – -30 °C
Módulo de Young	0.0285 – 0.0398 GPa
Límite elástico	38 – 49,4 MPa
Tensión de rotura (tracción)	38 – 49.4 MPa
Tensión al 300% de alargamiento	9.58 – 14.5 MPa
Alargamiento	502 – 653 %
Coeficiente de Poisson	0,48 – 0.495
Esfuerzo de compresión	45.6 – 59.3 MPa
Dureza (Vickers)	11 – 15 HV
Conductividad térmica	0.151 – 0.172 W/m·°C
Calor específico	1.54 10^3 – 1.6 × 10^3 J/kg·°C

2.2.4.2 Propiedades del TPU para impresión 3D

Las propiedades de impresión del filamento TPU pueden variar según la marca, ya que cada fabricante ajusta su fórmula para lograr características específicas como flexibilidad, facilidad de extrusión o resistencia mecánica. Por eso, es importante consultar las recomendaciones técnicas de cada proveedor, especialmente en lo que respecta a temperatura, velocidad, retracción y secado del material. En la Tabla 2.4 se hace una comparación con las condiciones recomendadas para tres marcas populares de TPU utilizadas en impresión 3D.

Tabla 2. 4 *Propiedades del filamento TPU en distintas marcas.*

Marca / Modelo	Temperatura del extrusor (°C)	Temperatura de la cama (°C)	Velocidad de impresión (mm/s)
SUNLU TPU 95A	195 – 210 °C	50 – 60 °C	50 – 120 mm/s
Polymaker PolyFlex TPU 95A	210 – 230 °C	25 – 60 °C	20 – 40 mm/s
eSUN eTPU-95A	220 – 250 °C	45 – 60 °C	20 – 50 mm/s

El TPU es un filamento semiflexible diseñado para aplicaciones industriales que requieren la elasticidad del caucho junto con la resistencia y precisión del plástico. Las propiedades que se reportan corresponden al promedio de un lote típico obtenido del filamento de TPU 95A de ultimaker, obtenido a partir de muestras impresas bajo condiciones controladas. Para ensayos de tracción reportados, utilizaron parámetros como una tobera de 0,8 mm a 260 °C, cama a 45 °C y flujo del 107 %. En los ensayos de flexión e impacto, las muestras fueron impresas en el plano XY con una boquilla de 0,4 mm a 235 °C, cama a 70 °C y relleno del 90 %. La dureza Shore D se evaluó sobre piezas de 7 mm de grosor impresas con relleno completo [41]. Los resultados obtenidos bajo estas condiciones se reflejan en la Tabla 2.6.

En la Tabla 2.5 se muestran las propiedades físicas y mecánicas del TPU 95A de la marca SUNLU bajo norma con configuraciones de impresión recomendadas de 50-80 mm/s de velocidad de impresión, temperatura de impresión de 190-210 ºC y temperatura de cama de 50-60 ºC.

Tabla 2. 5 *Propiedades del TPU 95A para impresión 3D [41].*

Propiedad	**Valor típico**	**Método de ensayo**
Módulo de elasticidad a la tracción	26,0 MPa	ASTM D638
Esfuerzo de tracción a la deformación	8,6 MPa	ASTM D638
Esfuerzo de tracción a la rotura	39,0 MPa	ASTM D638
Alargamiento a la deformación	55,0 %	ASTM D638
Alargamiento a la rotura	580,0 %	ASTM D638
Resistencia a la flexión	4,3 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	78,7 MPa	ISO 178
Resistencia a impacto Izod (con mella, 23 °C)	34,4 kJ/m²	ISO 180
Dureza	95 Shore A / 46 Shore D	ASTM D2240
Resistencia a la abrasión	0,06 g	ASTM D4060
Índice de fluidez (MFR)	15,9 g/10 min	ISO 1133 (225 °C)
Deformación térmica (HDT) a 0,455 MPa	74 °C	ASTM D648

Deformación térmica (HDT) a 1,82 MPa	49 °C	ASTM D648
Temperatura de transición vítrea	-24 °C	DSC
Coeficiente de expansión térmica	$100 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}	ASTM E693
Temperatura de fusión	220 °C	DSC

Tabla 2. 6 *Datos técnicos del TPU 95A para impresión 3D marca SUNLU [41]*

Propiedad	**Valor típico**	**Método de ensayo**
Densidad	1,23 g/cm^3	ISO1183
Índice de fluidez de la masa fundida	23,5 g/10 min	ISO1133
Resistencia a la tracción	34,4 MPa	ISO527/2
Alargamiento de rotura	1063 %	ISO527/2
Resistencia a la flexión	4,26 MPa	ISO178
Módulo de flexión	87,6 MPa	ISO178
Módulo de Young	34,4 MPa	ISO527/2

2.2.5 Ensayos mecánicos y normativas aplicables

Las normas técnicas emitidas por ISO y ASTM permiten estandarizar métodos de evaluación en ingeniería de materiales, facilitando la caracterización precisa de componentes fabricados mediante tecnologías como la impresión 3D. Estas especificaciones se usan fundamentalmente para obtener ciertos datos necesarios que sean comparables y reproducibles sobre el comportamiento mecánico de los polímeros. En los ensayos más significativos, se encuentra el ensayo de tracción ya que ocupa un lugar central al momento de determinar propiedades como la resistencia máxima, el módulo elástico y el alargamiento antes de la fractura. Las mediciones mencionadas son esenciales para analizar el funcionamiento estructural de las piezas impresas y lograr entender cómo factores de

impresión según la geometría de la probeta o la orientación de impresión afectan su desempeño bajo carga [42].

La norma ISO 527, establecida por la Organización Internacional de Normalización, es utilizada para desarrollar un análisis en base al comportamiento a tracción de materiales plásticos, definiendo los procedimientos de ensayo y los parámetros clave como la resistencia, el módulo elástico y la elongación.

Por otro lado en el caso de materiales más flexibles, como los elastómeros o cauchos termoplásticos, la norma ISO 37 es la esencial ya que tiene una metodología específica para determinar sus propiedades de tracción, utilizando su adaptación a la naturaleza deformable de estos materiales. Ambas normas permiten obtener datos confiables que facilitan la comparación entre materiales y su aplicación en contextos industriales [43].

2.2.5.1 Norma ASTM D638 para ensayos de tracción

Esta norma establece cómo evaluar las propiedades a tracción de plásticos, usando probetas en forma de "mancuerna", bajo condiciones controladas de temperatura, humedad y velocidad. Este ensayo permite obtener datos clave como la resistencia a la tracción, el alargamiento a la rotura y el módulo de elasticidad. Las muestras se estiran en una máquina universal hasta romperse, bajo condiciones controladas de velocidad y forma de sujeción. Es una metodología ampliamente utilizada para caracterizar mecánicamente materiales plásticos tanto en investigación como en control de calidad [44].

2.2.5.2 Tipos de probetas según la Norma ASTM D638

Para la norma ASTM D638-22 se contemplan cinco tipos principales de probetas normalizadas, las cuales se describen en la Tabla 2.7 [45] .

Tabla 2. 7 *Tipo de probetas según la Norma ASTM D638 [45].*

Tipo de Probeta	Uso común
Tipo I	Estándar para materiales de hasta 7 mm de espesor
Tipo II	Cuando el material no rompe en la sección estrecha del Tipo I
Tipo III	Para materiales entre 7 mm y 14 mm de espesor
Tipo IV	Ideal para plásticos no rígidos o comparaciones de rigidez
Tipo V	Usada cuando hay poco material o se requiere muchas muestras

Observando la Fig. 2.9 se nota que todas tienen formas específicas, y dimensiones como el ancho, largo de la zona estrecha, radios, y separación entre mordazas que se deben seguir estrictamente.

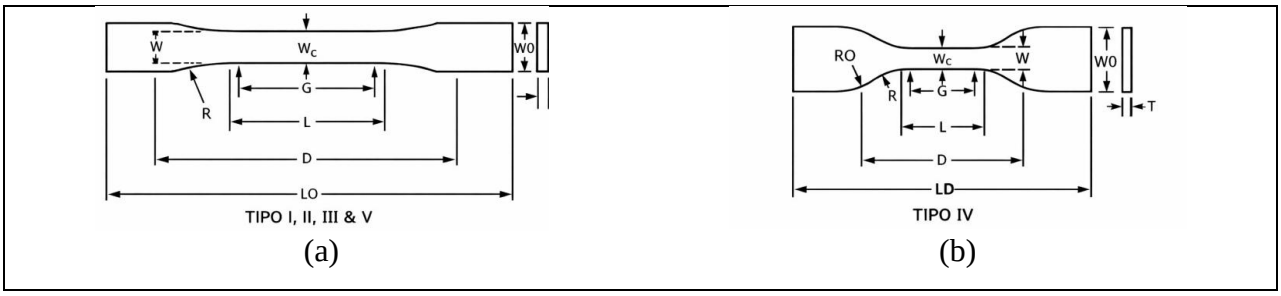


Fig. 2. 9 *Modelo Tipo de probetas según la Norma ASTM D638 (a) Probeta tipo I,II,III y V (b)Probeta tipo IV [45].*

Tabla 2. 8 *Símbolos de la probeta según ASTM D638.*

Símbolo	Descripción
W	Ancho de la sección de sujeción
W_o	Ancho en la zona reducida
Wc	Ancho en la sección calibrada
G	Longitud de la sección calibrada (longitud de medición)
L	Longitud de la sección paralela
D	Distancia entre marcas de referencia
L_o	Longitud total de la probeta
LD	Longitud total para probetas tipo IV
R	Radio de curvatura
RO	Radio exterior
T	Espesor de la probeta

Los parámetros medidos en el ensayo de tracción según la norma ASTM D638-22 permiten caracterizar el comportamiento mecánico de los plásticos ante esfuerzos de estiramiento. Entre las características se encuentran la resistencia a la tracción, que es la encargada de indicar la fuerza máxima que logra soportar la probeta antes de romperse; el módulo de elasticidad, que refleja cuanto es más rígido el material; la elongación, que representa cuánto se estira respecto a su longitud inicial; el punto de cedencia, es donde comienza la deformación plástica; y la relación de Poisson, que es la contracción transversal frente al alargamiento longitudinal [45].

Por lo tanto, para calcular estos valores se emplean fórmulas fundamentales como se muestran en la Tabla 2.9:

Tabla 2. 9 *Ecuaciones fundamentales para pruebas de tracción según la norma ASTM D638 [45]*

Tensión (σ) : Fuerza (W) / Área original ($\mathbf{A_0}$)	$\boldsymbol{\sigma = \frac{W}{A_0}}$	(2.1)
Elongación (%) : Cambio de longitud de la probeta (mm) ($\Delta\mathbf{L}$) /Longitud inicial de la probeta (mm) ($\mathbf{L_0}$)	$\frac{\Delta L}{L_0} \times 100$	(2.2)
Módulo de elasticidad (**E**) **:** Valores de tensión ($\boldsymbol{\sigma_2, \sigma_1}$) /Valores de deformación ($\boldsymbol{\varepsilon_2, \varepsilon_1}$)	$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$	(2.3)
Esfuerzo verdadero (σT) : Fuerza aplicada (W) en N / Área instantánea de la sección transversal (mm²) (A)	$\sigma T = \frac{W}{A}$	(2.4)
Deformación verdadera (εT): Longitud instantánea (L) / Longitud inicial ($\mathbf{L_0}$) (mm)	$\varepsilon T = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$	(2.5)

Para materiales termoplásticos flexibles como el TPU, aplicar esta norma es necesario porque ayuda a entender el comportamiento del material bajo esfuerzos de tracción, siendo así una de las propiedades mecánicas fundamentales para evaluar su desempeño y durabilidad. Además, permite comparar diferentes configuraciones de impresión, que aseguran que las piezas impresas mediante modelado de deposición fundida cumplan con los requerimientos mecánicos que se esperan. La norma ASTM D638-22 garantiza que la obtención de estos datos sean consistentes y comparables, lo que permite optimizar procesos y garantizar la calidad en productos.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque y tipos de investigación

El presente trabajo de titulación se enmarca en una investigación aplicada, ya que es la que busca aplicar el conocimiento que existe y darle marcha en soluciones a problemas reales [46]. Específicamente, se pretende conocer las propiedades del TPU usando tecnología FDM en impresión 3D. Para ello, se aplica investigación documental, a través del estudio de fuentes impresas, audiovisuales o digitales [47]; partiendo del análisis e interpretación de información del TPU y sus procesos asociados, publicada por otros investigadores o instituciones.

Además, se trata de una investigación descriptiva, puesto que se enfoca en observar y describir el comportamiento y funcionamiento de todos elementos que conforman el ensayo y sus resultados, permitiendo registrar, analizar y describir variables del proceso de impresión [48]. Igualmente, es una investigación experimental, ya que implica intervenir activamente en el fenómeno que se estudia, mediante la manipulación de una o más variables independientes [49]. En este caso se lleva a cabo la fabricación de probetas impresas con diferentes configuraciones de parámetros, y posteriormente, se realizan ensayos de tracción conforme a una norma técnica específica para medir su comportamiento mecánico.

En cuanto a la metodología empleada, se optó por una estructura organizada basada en el modelo de cascada evolutiva que permite avanzar, paso a paso, en el desarrollo del experimento. Este enfoque se divide en cuatro fases consecutivas: análisis de requerimientos, diseño, implementación y pruebas. Cada una de estas etapas implica realizar tareas específicas a completarse antes de continuar con la siguiente tarea, de esta manera se asegura un desarrollo ordenado y coherente del proceso [50].

3.2 Diseño de la Investigación

En este apartado se introduce a la metodología utilizada para el presente trabajo, detallando el diseño de investigación, las fases que tomó el proceso y las actividades realizadas para cumplir con los objetivos planteados. Además, se presentan los procedimientos empleados para la fabricación de las probetas, la realización de los ensayos de tracción y el análisis de los resultados obtenidos, con el fin de garantizar un desarrollo ordenado y confiable del estudio.

3.2.1 Fase 1: Determinar los principales parámetros de configuración de la impresora 3D.

Actividad 1: Investigación teórica en manuales y artículos sobre impresión 3D.

Se realiza la investigación en manuales técnicos, artículos científicos y fuentes confiables en línea sobre impresión 3D, con el propósito de comprender los parámetros clave del proceso. Se hace énfasis en características principales como la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión, la altura de capa, el tipo de material a utilizar, entre otros factores que se considere relevantes y que influyen directamente en la calidad final de las probetas.

Actividad 2: Análisis del software de laminado y configuración.

Se analiza el funcionamiento de distintos softwares de laminado como Cura, PrusaSlicer, Orca Slicer y Simplify3D, para entender el uso de los mismos y en cómo cada uno permite laminar según los parámetros de impresión. Este estudio identifica las herramientas más adecuadas para este proceso según las necesidades del diseño.

Actividad 3: Pruebas de impresión con diferentes configuraciones.

Se realizan las respectivas pruebas de impresión con distintas configuraciones de parámetros identificados, para evaluar la calidad y precisión de las probetas obtenidas. Durante esta etapa,

varian las configuraciones como la temperatura, la velocidad, el relleno o la altura de capa, permitiendo observar la manera en la que influye en el resultado final.

Actividad 4: Ajuste de los parámetros de impresión para obtener mejores resultados.

Los resultados iniciales de las pruebas de impresión son analizados para proceder con el ajuste de parámetros ideales y que son necesarios, como la temperatura de la boquilla, la velocidad de impresión dependiendo del material, la altura de capa y el porcentaje de relleno. Dichos cambios permiten mejorar el proceso dando una mejor calidad en las piezas fabricadas, adaptando la configuración de la impresora a las características del filamento TPU y mejorando su desempeño en precisión y resistencia.

Actividad 5: Registro condiciones de impresión.

Registro detallado de las condiciones de impresión utilizadas en cada prueba. Esto incluye información como temperatura de boquilla y cama, velocidad de impresión, tipo de relleno, altura de capa y cualquier otro ajuste relevante.

3.2.2 Fase 2: Evaluar el comportamiento del TPU al emplear técnicas de modelado de deposición fundida FDM.

Actividad 1: Revisión de estudios previos sobre la impresión de TPU.

Se realiza una revision de estudios relacionados con la impresión 3D usando material poliuretano termoplástico, y de esta manera comprender sus propiedades mecánicas, térmicas y de adhesión. Esta búsqueda se enfoca en distintas investigaciones académicas, artículos científicos y otras fuentes que permitan identificar el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de impresión.

Actividad 2: Selección de parámetros ideales para TPU.

Selección de los parámetros de impresión más adecuados. Incluyendo ajustes como la temperatura de extrusión, velocidad de impresión, flujo de material, altura de capa, porcentaje de relleno, velocidad de enfriamiento y distribución de los soportes.

Actividad 3: Pruebas de impresión con distintas configuraciones.

En esta actividad se realizan pruebas de impresión con diferentes configuraciones que permitan evaluar características como la flexibilidad, la adhesión entre capas y la resistencia a la deformación. Estas pruebas identifican la manera en la que las variables afecta el comportamiento mecánico del TPU impreso.

3.2.3. Fase 3: Seleccionar las variables requeridas para los ensayos de tracción en el TPU de acuerdo con la norma correspondiente.

Actividad 1: Revisión de la norma ASTM D638 para la selección de la probeta.

Revisión de normativas basadas en estándares internacionales, específicamente la ASTM D638, que establece los procedimientos para ensayos de tracción en polímeros, con el fin de definir la geometría y dimensiones de la probeta a utilizar en los ensayos, garantizando el cumplimiento de los requisitos normativos.

Actividad 2: Identificación de los parámetros de ensayo.

Se identifica y define de los parámetros clave para los ensayos, como la velocidad de prueba según la máquina de ensayo, la temperatura de operación, incluyendo la temperatura del ambiente, las dimensiones específicas de las probetas según norma y las condiciones ambientales bajo las cuales se realizarán las mediciones dependiendo el software utilizado.

Actividad 3: Evaluación de la máquina de ensayo de tracción y sus configuraciones.

Se realiza la evaluación detallada de la máquina de ensayo de tracción incluyendo sus configuraciones, para asegurar que las mediciones sean confiables durante la realización de los ensayos.

Actividad 4: Fabricación de las probetas.

Se fabrican las probetas siguiendo los parámetros definidos, garantizando que cada muestra cumpla con las especificaciones necesarias para los ensayos de tracción y análisis posteriores.

Actividad 5: Acondicionamiento de las muestras de TPU según norma.

Se acondicionan las muestras de TPU conforme a lo que requiere de la norma correspondiente.

Actividad 6: Realización de pruebas preliminares de validación.

Se llevan a cabo pruebas preliminares que permitan validar la selección de variables según su confiabilidad, en caso necesario, ajustar los parámetros necesarios para obtener los resultados ideales.

3.2.4. Fase 4: Analizar los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

Actividad 1: Organización y tabulación de datos

Se realiza la organización y tabulación de los datos recolectados para facilitar su análisis y comparación posterior.

Actividad 2: Comparación con estándares.

Se lleva a cabo diferentes comparaciones de los resultados obtenidos con los estándares establecidos para evaluar el cumplimiento y la calidad de las muestras impresas.

Actividad 3: Análisis de los resultados mecánicos del TPU.

Análisis de los patrones según los resultados obtenidos de acuerdo con el módulo de elasticidad, resistencia mecánica, entre otros.

Actividad 4: Identificación de valores atípicos o inconsistencias en los ensayos.

Desarrollar la identificación de los valores atípicos o inconsistencias encontrados en los datos que puedan indicar la necesidad de repetir alguna prueba según el margen de error.

Actividad 5: Relación de variables del ensayo

Se establece la relación entre las variables del ensayo que permita comprender la manera en la que influyen en el comportamiento del material durante las pruebas.

Actividad 6: Interpretación de resultados.

Se extrae conclusiones de los resultados que se considere más relevantes y que apoyen el análisis de los resultados y la comprensión del comportamiento del material.

Actividad 7: Elaboración del documento

Se procede a la elaboración del documento final, integrando todos los hallazgos, análisis, graficas comparativas y conclusiones de la investigación.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Diseño de la probeta para el ensayo de tracción

Mediante la utilización del software de diseño CAD SolidWorks se desarrolló la elaboración de la probeta tipo IV conforme a la norma ASTM D638-22 (véase la Fig. 4.1), así mismo la elaboración del plano correspondiente, el cual se presenta en el Anexo A. Esta geometría fue seleccionada debido a que se encuentra diseñada específicamente para materiales flexibles y de baja rigidez, siendo así el poliuretano termoplástico (TPU) el material empleado en el desarrollo de todos los ensayos de este estudio, garantizando así el cumplimiento de las dimensiones establecidas para las probetas de ensayo a tracción.

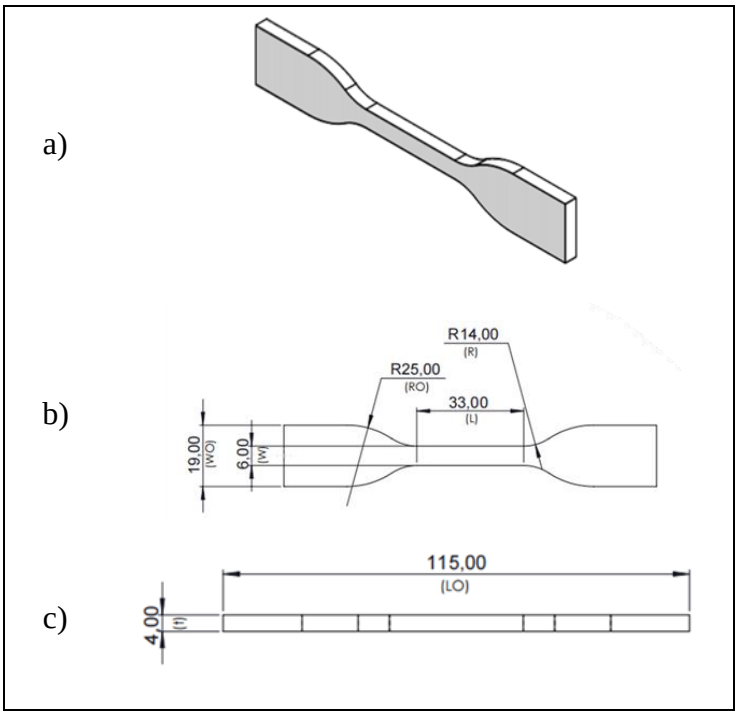


Fig 4. 1 *Modelo CAD de la probeta IV según la Norma ASTM D638-22 a) Vista isométrica b)Vista frontal c) Vista lateral.*

Las dimensiones correspondientes para esta probeta descritas en la Tabla 4.1, permiten la medición precisa del alargamiento y reducen el riesgo de deslizamiento o fallo en las mordazas durante el ensayo, es altamente recomendada para polímeros elastómeros y

materiales con alto porcentaje de elongación. Su construcción geométrica, localiza los esfuerzos en la zona central de la probeta, lo que garantiza que la rotura ocurra en esa área.

Tabla 4. 1 *Dimensiones de la probeta IV según la Norma ASTM D638-22.*

Símbolo	**Parámetro**	**Dimensión nominal (mm)**	**Tolerancia (mm)**
W	Ancho de la sección estrecha	6	±0,5
L	Longitud de la sección estrecha	33	±5,0
WO	Ancho total mínimo	19	+6,4
LO	Longitud total mínima	115	sin máximo
G	Longitud de calibración (gage length)	25	±0,25
D	Distancia entre mordazas	65	±5,0
R	Radio del filete	14	±1,0
RO	Radio exterior	25	±1,0
t	Espesor	4	

4.2 Materiales utilizados en el ensayo experimental

Para el desarrollo de estos ensayos experimentales se emplea exclusivamente como material de impresión al TPU, este material se caracteriza por su flexibilidad, elasticidad similar a la del caucho, dándole un comportamiento mecánico altamente flexible. Su alta ductilidad genera grandes deformaciones antes de la fractura; asimismo, la dureza del poliuretano termoplástico presenta un amplio rango de valores, dando la posibilidad de regular su comportamiento mecánico según las aplicaciones.

4.3 Impresión 3D de las probetas para el ensayo.

Con el fin de realizar pruebas posteriores, se ajustaron las dimensiones correspondientes para que la probeta cumpla con las medidas establecidas por la norma ASTM D638-22, manteniéndose dentro de una tolerancia dimensional de ±0.05 mm. Una vez finalizado el diseño CAD de la probeta ajustada, este fue exportado en formato STL, el cual permite que la máquina interprete la geometría del modelo y lo procese correctamente en el laminador Ultimaker Cura versión 5.11, software de licencia libre, ya que el archivo STL facilita la comunicación entre el diseño y el software de impresión.

En el laminador se establecieron los parámetros de impresión 3D, empleando una impresora Artillery Sidewinder X2, con un volumen de impresión de 300x300x400 mm^3, utilizada en su configuración estándar de fábrica, sin modificaciones estructurales o mecánicas adicionales. El archivo generado fue transferido a la impresora mediante un dispositivo USB, permitiendo la ejecución del proceso de impresión.

El proceso de impresión 3D se aplicó considerando el acondicionamiento previo del equipo, ubicándolo en un entorno estable y a temperatura ambiente controlada, la cual, debido a la zona de trabajo, se mantuvo en un rango aproximado de 15 °C a 21 °C; la impresora 3D fue configurada de manera preliminar mediante la calibración de los principales parámetros de impresión, con el objetivo de garantizar una deposición uniforme del filamento TPU y una adecuada calidad dimensional de las probetas a partir de pruebas preliminares y recomendaciones del fabricante del material

Las configuraciones de los parámetros utilizadas corresponden a los principales factores para analizar el comportamiento del TPU. En este primer experimento se evaluó el patrón de relleno como variable principal que influye en la resistencia del material. El proceso general de impresión 3D seguido en este estudio se resume en el diagrama de flujo presentado en la Fig 4.2.



Fig 4. 2 *Proceso de Impresión 3D por FDM.*

Las configuraciones de los parámetros de impresión 3D empleadas se presentan en la Tabla 4.2, que se mantienen constantes mientras se varía la densidad de relleno en 40 %, 60 % y 80 %.

Tabla 4. 2 *Configuración de impresión de las probetas en el software Ultimaker Cura 5.11.*

Configuración	**Parámetro**	**TPU (SUNLU)**
Calidad	Altura de capa	0,2 mm
Paredes	Grosor de la pared	0,8 mm
	Número de líneas de pared	2
Superficies	Grosor superior	0,8 mm
	Capas superiores	4
	Grosor inferior	0,8 mm
	Capas inferiores	4
Relleno	Densidad de relleno	40 %, 60 %, 80 %
	Patrón de relleno	Rejilla, Triangular, Zigzag, Giroide, Trihexagonal
Temperatura	Temperatura de impresión	195 °C
	Temperatura de la placa de impresión	50 °C
Velocidad	Velocidad de impresión	40 mm/s
	Velocidad de desplazamiento	150 mm/s
Retracción	Distancia de retracción	4,0 mm
	Velocidad de retracción	50 mm/s

La producción de las probetas se realizó empleando filamento nuevo de TPU 95 A, marca SUNLU, el cual no ha sido expuesto previamente a condiciones de humedad ambiental, con el fin de evitar variaciones en el proceso de extrusión y posibles defectos de impresión asociados a la absorción de humedad del material, los cuales influyen en la calidad superficial y en las propiedades mecánicas de las probetas.

Antes del inicio de la impresión, la impresora fue verificada y calibrada, asegurando el correcto funcionamiento del equipo y la adecuada alimentación del material. El tiempo que ha tomado cada probeta al imprimir fue en un rango de 30-45 minutos según la densidad y patrón del relleno.

Posteriormente, se carga en el software de laminado el modelo digital de la probeta correspondiente para que el proceso de impresión se desarrolle mediante la deposición controlada del material en capas sucesivas, hasta completar la geometría definida.

Durante la fabricación, la probeta se construye comenzando con 4 capas inferiores, seleccionadas con el objetivo de garantizar una adecuada adhesión a la base de impresión y estabilidad dimensional durante el proceso. La estructura interna se definió por el relleno, cuya densidad se establece en 40 %, 60 % y 80 %, y el patrón varió entre rejilla, triangular, zigzag, giroide y trihexagonal. Finalmente, la pieza se completa con 4 capas superiores, asegurando la integridad estructural del espécimen y una adecuada terminación superficial.

Para cada combinación de los parámetros de relleno se elaboran cinco probetas según norma, como se muestra en la Fig. 4.3, lo que da lugar a un conjunto total de 75 muestras, destinadas a la realización de los ensayos mecánicos de tracción.

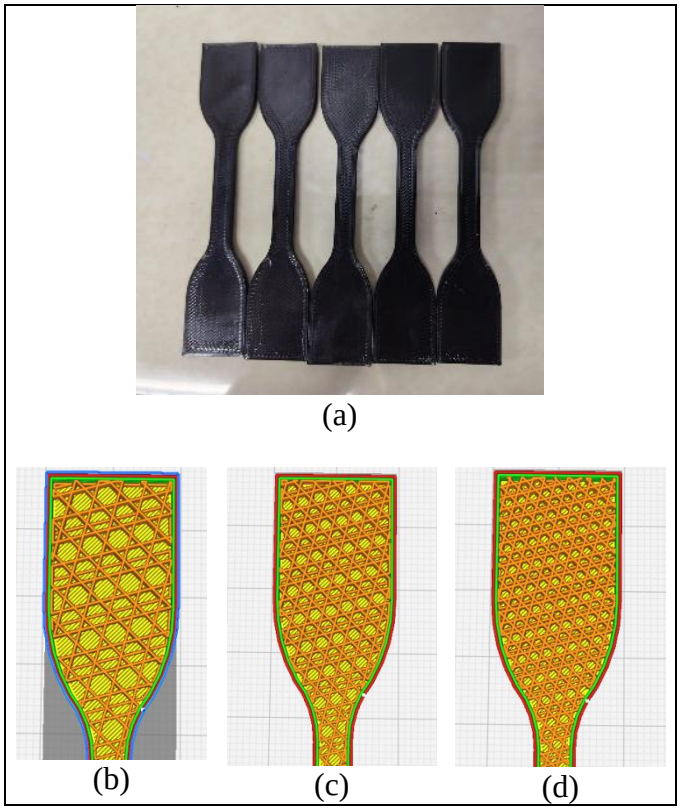


Fig 4. 3 a) *Grupo de cinco 5 probetas a ensayar con distintos porcentajes de relleno* ***b)*** *40%* ***c)*** *60%* ***d)****80%.*

4.4 Ensayo de tracción de los materiales

Los ensayos mecánicos se realizaron utilizando una máquina universal de ensayos ubicada en el laboratorio de la carrera de Ingeniería Textil de la Universidad Técnica del Norte, en la ciudad de Ibarra, Ecuador. Las pruebas se llevaron a cabo empleando un dinamómetro correspondiente a la marca James Heal, modelo Titan, con una capacidad máxima de carga de 5 kN y un rango de velocidad de ensayo configurable entre 1 mm/min a 2000 mm/min, equipo diseñado para la evaluación de las propiedades mecánicas de materiales bajo diferentes tipos de carga, lo que garantiza flexibilidad para adaptar el ensayo a los requerimientos normativos y características del material.

La máquina de ensayo utilizada dispone de un sistema de control computarizado, el cual permite la regulación en lazo cerrado de parámetros fundamentales como la fuerza aplicada,

la deformación de la probeta y el desplazamiento del travesaño. Durante el desarrollo del ensayo, el sistema registra los datos en tiempo real, mostrando en la pantalla del equipo las curvas esfuerzo–deformación y generando reportes automáticos de los resultados obtenidos.

Las características técnicas de la máquina universal de ensayos empleada se presentan en la Tabla 4.3, la cual resume las condiciones operativas y capacidades del equipo utilizado para la caracterización mecánica del TPU impreso mediante FDM.

Tabla 4. 3 *Características técnicas de la máquina universal de ensayos.*

Propiedad	**Valor**
Marca	James Heal
Modelo	Titan
Célula de carga	5000 N
Temperatura de ensayo	21 °C
Plan de mordazas	T27
Tipos de ensayo	Tracción / Compresión
Exactitud del sistema	±0,5 %
Software de ensayo	TestWise
Ubicación	Laboratorio de Ingeniería Textil – UTN

El dinamómetro, permite la realización de pruebas de tracción, compresión y flexión, dependiendo del accesorio utilizado. En el presente estudio se empleó únicamente el ensayo de tracción, debido a que este resulta más adecuado para caracterizar el comportamiento mecánico del TPU, material de naturaleza flexible.

El proceso experimental para la determinación de las propiedades mecánicas a tracción se desarrolló conforme a la norma ASTM D638-22. Las probetas de TPU obtenidas mediante impresión 3D, considerando distintas configuraciones de patrón y porcentaje de relleno, fueron colocadas y aseguradas en los cabezales de la máquina universal de ensayos, a temperatura ambiente empleando mordazas mecánicas para materiales flexibles correspondientes a la máquina de ensayo. Las muestras ensayadas se configuraron a una velocidad admisible para TPU de 50 mm/min en todas las probetas, estos ensayos se realizaron consecutivamente sin haber pasado las 48 horas posteriores a la impresión 3D de las muestras para minimizar la absorción de humedad y acondicionarlas uniformemente. Debido a la elasticidad del material, fue necesario acondicionar las muestras adhiriendo caucho a las probetas para evitar su deslizamiento en la máquina, seguidamente se ubicó las probetas en las mordazas del dinamómetro y se ajustó el agarre para iniciar el ensayo como se muestra en la Fig 4.4. En este estudio no se ha evaluado la influencia de este acondicionamiento adicional del caucho a los resultados del experimento.

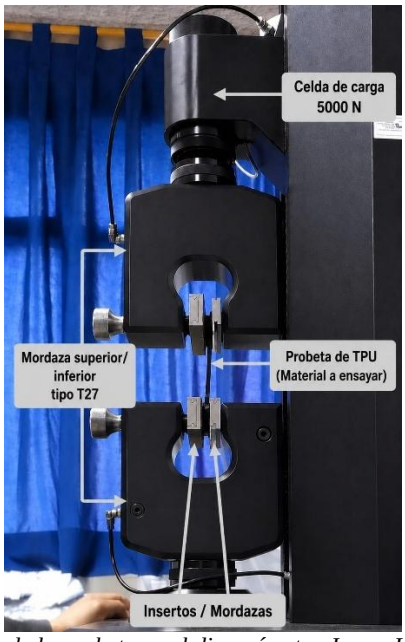
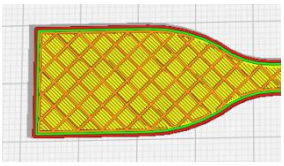
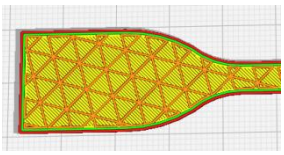
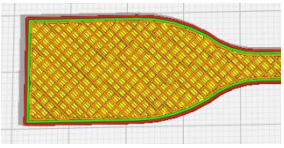
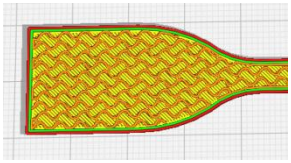
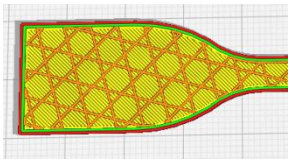


Fig 4. 4 *Carga de la probeta en el dinamómetro James Heal Titan 5kN.*

En la Tabla 4.4 se detallan los parámetros y condiciones bajo las cuales se realizaron los ensayos de tracción a las probetas evaluadas.

Tabla 4. 4 *Distribución de probetas según patrón y densidad de relleno*

N.º de probeta	Patrón de relleno	Porcentajes de relleno	Probetas de ensayo
1	Rejilla 	40%,60%,80%	5
2	Triangular 	40%,60%,80%	5
3	Zigzag 	40%,60%,80%	5
4	Giroide 	40%,60%,80%	5
5	Trihexagonal 	40%,60%,80%	5

Una vez concluido el ensayo de tracción, momento en el cual el material alcanza su límite y se produce la fractura de la probeta, el software de la máquina universal de ensayos genera

automáticamente un archivo digital que incluye la curva correspondiente al comportamiento del material durante la prueba, así como una tabla con los parámetros más relevantes, los cuales son utilizados posteriormente para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos. Las configuraciones previas para la utilización de la máquina se realizan a través del software TesWide en donde se especifica la velocidad del ensayo, cantidad de probetas y dirección del ensayo mostradas en la Tabla 4.5.

Tabla 4. 5 *Configuración del ensayo de tracción en el software TestWise.*

Parámetro	**Configuración**
Velocidad del ensayo	50 mm/min
Número de probetas	5
Dirección	Urdimbre

La velocidad del ensayo se estableció en 50 mm/min, manteniéndose constante para todas las probetas, con el fin de garantizar condiciones homogéneas durante el ensayo de tracción y permitir la comparación directa de los resultados obtenidos entre los diferentes patrones y densidades de relleno del TPU impreso mediante FDM.

4.5 Cálculo de los parámetros mecánicos principales a partir de los datos experimentales.

A partir de los datos experimentales registrados por la máquina de ensayos, tales como la fuerza aplicada y el alargamiento de la probeta, se calcularon los principales parámetros mecánicos que describen el comportamiento del material bajo carga para cada grupo de

$$\sigma = \frac{W}{A_e} \qquad (2.1)$$

probetas; utilizando la ecuación 2.1.

4.5.1 Cálculo del área efectiva de la sección transversal

La fuerza aplicada (W) fue obtenida directamente de los reportes generados por el software TestWise. Debido a que las probetas fueron fabricadas mediante FDM, la sección transversal no se encuentra completamente maciza, puesto que se compone de regiones sólidas, paredes perimetrales y una estructura de relleno interno (Véase Fig. 4.5).

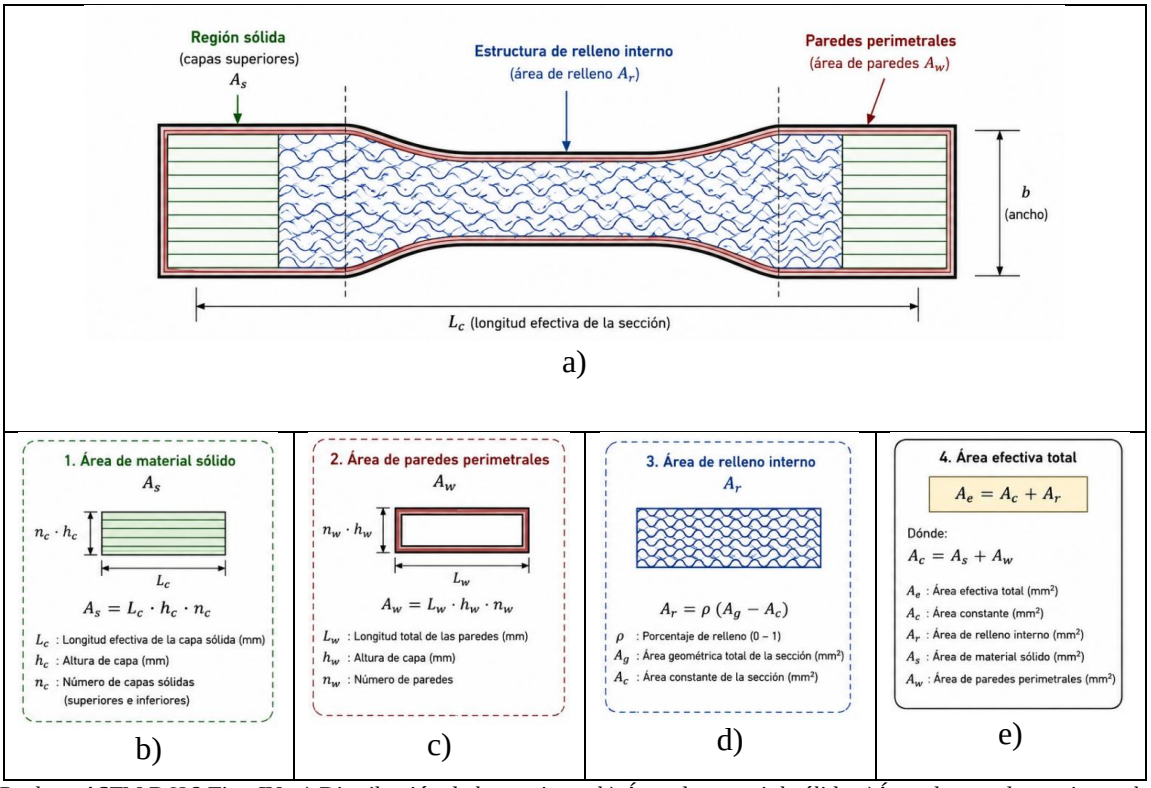


Fig. 4. 5 *Probeta ASTM D638 Tipo IV a) Distribución de las regiones b) Área de material sólido c)Área de paredes perimetrales d) Área de relleno interno e) Área efectiva total.*

En consecuencia, se determinó el área efectiva de la sección transversal (A_e) ,considerando únicamente el material realmente depositado, utilizando la ecuación 4.1.

$$A_e = A_c + A_r \qquad (4.1)$$

Donde:

A_e: área efectiva total de la sección transversal (mm^2).

A_c: área constante de la sección transversal (mm^2).

A_r: área efectiva del relleno interno (mm^2).

El área constante de la sección transversal se define como la suma del área de material sólido y el área de las paredes perimetrales, y se expresa mediante la ecuación (4.2).

$$A_c = A_s + A_w \tag{4.2}$$

Donde:

A_c: área constante de la sección transversal (mm^2).

A_s: área de material sólido correspondiente a las capas superiores e inferiores (mm^2).

A_w: área correspondiente a las paredes perimetrales (mm^2).

El área de material sólido correspondiente a las capas superiores e inferiores se calcula considerando el ancho de la sección transversal, la altura de capa y el número total de capas sólidas definidas en la configuración de impresión. Este cálculo se realiza mediante la ecuación (4.3).

$$A_s = W(h_c * n_c) \tag{4.3}$$

Donde:

A_s: área de material sólido (capas superiores e inferiores) (mm^2).

W: ancho de la sección transversal de la probeta (mm).

h_c: altura de capa (mm^2).

n_c: número de capas sólidas

La altura interna útil de la probeta se determina considerando el espesor total de la sección transversal y el espesor ocupado por las capas superiores e inferiores. Este cálculo se realiza mediante la ecuación (4.4).

$$h_i = t - (n_c * h_c) \tag{4.4}$$

Donde:

h_i: altura interna útil (mm).

t: espesor total de la probeta (mm).

h_c: altura de capa (mm).

n_c: número total de capas sólidas

El área correspondiente a las paredes perimetrales se determina a partir del grosor total de pared y la altura interna útil de la probeta. Este cálculo se realiza mediante la ecuación (4.5).

$$A_w = 2(e_w \cdot h_i) \tag{4.5}$$

Donde:

A_w: área correspondiente a paredes perimetrales (mm^2).

e_w: grosor total de pared (mm).

h_i: altura interna útil (mm).

El área efectiva del relleno representa la contribución del patrón de relleno a la sección transversal de la probeta. Para su determinación, se considera el porcentaje de relleno de la probeta a partir de la configuración de impresión obtenida en el software Ultimaker Cura.

Considerando que el área elemental del relleno es constante, el área efectiva del relleno se calcula mediante la ecuación (4.6).

$$A_r = p(A_g - A_c) \tag{4.6}$$

Donde:

A_r: área efectiva del relleno (área interna) (mm^2).

p: porcentaje de relleno expresado en forma decimal (0-1).

A_g: área geométrica total de la sección transversal (mm^2).

A_c: área constante de la sección transversales (mm^2).

El área geométrica total de la sección transversal se determina considerando el ancho y espesor de la probeta ASTM D638 tipo IV, mediante la ecuación (4.7).

$$A_g = W * t \tag{4.7}$$

Donde:

A_g: área geométrica total de la sección transversal (mm^2).

W: ancho de la sección transversal de la probeta (mm).

t: espesor de la probeta (mm).

En la tabla 4.6 se presentan los parámetros de impresión utilizados para un ejemplo de cálculo correspondiente a las probetas utilizadas en el ensayo con patrón de relleno rejilla y porcentaje de relleno del 40%, considerando los parámetros de impresión definidos en Ultimaker Cura.

Tabla 4. 6 *Cálculo del área efectiva total según los parámetros de impresión.*

Parámetros	**Valores**
Ancho de la sección transversal	W= 6 mm
Espesor de la probeta	t= 4 mm
Altura de capa	h_c=0.2 mm
Número total de capas sólidas	n_c=8 (4 capas superiores y 4 capas inferiores)
Grosor total de pared	e_w= 0.8 mm
Porcentaje de relleno	p= 0.40

Haciendo uso de la ecuación 4.7, se calcula el área geométrica total.

$$A_g = W * t$$

Sustituyendo valores:

$$A_g = 6 * 4$$

$$A_g = 24\ mm^2$$

Utilizando la ecuación 4.3 se calcula el área de material sólido.

$$A_s = W(h_c * n_c)$$

Sustituyendo valores:

$$A_s = 6(8 * 0.2)$$

$$A_s = 9.6\ mm^2$$

La altura interna útil se determina mediante la ecuación 4.4.

$$h_i = t - (n_c * h_c)$$

Sustituyendo valores:

$$h_i = 4 - (8 * 0.2)$$

$$h_i = 2.4\ mm$$

El área correspondiente a las paredes se calcula mediante la ecuación 4.5.

$$A_w = 2(e_w \cdot h_i)$$

Sustituyendo valores:

$$A_w = 2(0.8 \cdot 2.4)$$

$$A_w = 3.84\ mm^2$$

El área constante se calcula mediante la ecuación 4.2

$$A_c = A_s + A_w$$

Sustituyendo valores:

$$A_c = 9.6 + 3.84$$

$$A_c = 13.44\ mm^2$$

El área efectiva del relleno se calcula mediante la ecuación 4.6.

$$A_r = p(A_g - A_c)$$

Sustituyendo valores:

$$A_r = 0.40(24 - 13.44)$$

$$A_r = 4.224\ mm^2$$

Finalmente, el área efectiva total de la sección transversal se determina mediante la ecuación 4.1.

$$A_e = A_c + A_r$$

Sustituyendo valores:

$$A_e = 13.44 + 4.224$$

$$A_e = 17.664\ mm^2$$

Para el cálculo del área efectiva de la sección transversal correspondiente a cada patrón y porcentaje de relleno, se desarrolló un script en el software MATLAB R2022a (MathWorks Inc.), que permite calcular dichos resultados adjuntados en el Anexo B.

Este script permite automatizar los cálculos geométricos a partir de los parámetros de impresión definidos en Ultimaker Cura, considerando constantes las dimensiones externas de la probeta ASTM D638 tipo IV, así como los parámetros asociados a las capas sólidas y paredes perimetrales.

La Figura 4.6 muestra la variación del área efectiva total de la sección transversal en función del porcentaje de relleno. Se observa un incremento progresivo del área efectiva conforme aumenta la densidad de relleno, debido a la mayor cantidad de material depositado en la

región interna de la probeta. Esta relación evidencia que el porcentaje de relleno influye directamente sobre la capacidad resistente de la sección transversal durante el ensayo de tracción.

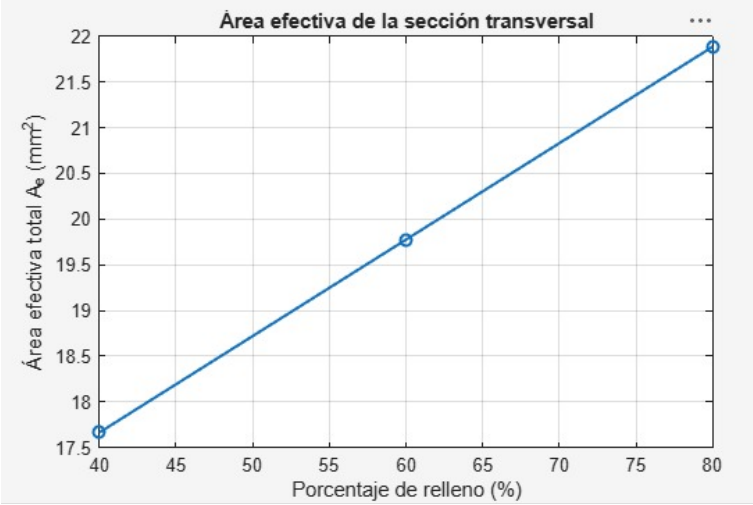


Fig 4. 6 *Variación del área efectiva total en función del porcentaje de relleno.*

El modelo emplea el porcentaje de relleno como variable principal, dado que este representa directamente la fracción de área ocupada por material en la región interna de la probeta. De esta manera, se obtiene el área efectiva del relleno y el área efectiva total de la sección transversal para cada configuración experimental como se muestra en la Tabla 4.7, facilitando la comparación entre distintos patrones y densidades de relleno.

Tabla 4. 7 *Área efectiva de la sección transversal por cada porcentaje de relleno.*

Relleno (%)	$A_c\,(mm^2)$	$A_r(mm^2)$	$A_e(mm^2)$
40%	13.44	4.224	17.664
60%	13.44	6.336	19.776
80%	13.44	8.448	21.888

Finalmente se define la deformación unitaria (ε) como la relación entre el cambio de longitud y la longitud inicial de la probeta, de acuerdo con la ecuación (2.2). En la práctica, estos valores fueron obtenidos directamente del software de la máquina universal de ensayos, el cual registra el desplazamiento del cabezal durante el ensayo y calcula automáticamente la deformación, permitiendo la generación directa de las curvas esfuerzo–deformación, a través de la formula (2.1).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{2.2}$$

$$\sigma = \frac{W}{A_e} \tag{2.1}$$

Estos parámetros permiten analizar de forma más realista el comportamiento del material, especialmente en la etapa plástica del ensayo.

4.6 Resultados de los ensayos a tracción

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los ensayos a tracción realizados a probetas de TPU impresas mediante tecnología FDM, con densidades de relleno del 40 %, 60 % y 80 % y distinto patrón de relleno, conforme a la norma ASTM D638-22.

Para cada configuración de impresión se reportan la fuerza máxima, el esfuerzo último, la deformación a la rotura, la extensión máxima y el módulo de elasticidad, obtenidos a partir de los datos registrados por el software TestWise. Así mismo se presentan las curvas esfuerzo–deformación, valores promedio y la desviación estándar de las principales propiedades mecánicas obtenidas a partir de cinco ensayos por condición.

4.6.1 Patrón de relleno tipo rejilla

En la Tabla 4.8, se muestran los resultados correspondientes a las probetas de TPU impresas con patrón de relleno tipo rejilla. En la Tabla 4.9 se reportan los valores del módulo de elasticidad aparente para el patrón rejilla en las distintas densidades evaluadas, junto con la media y desviación estándar.

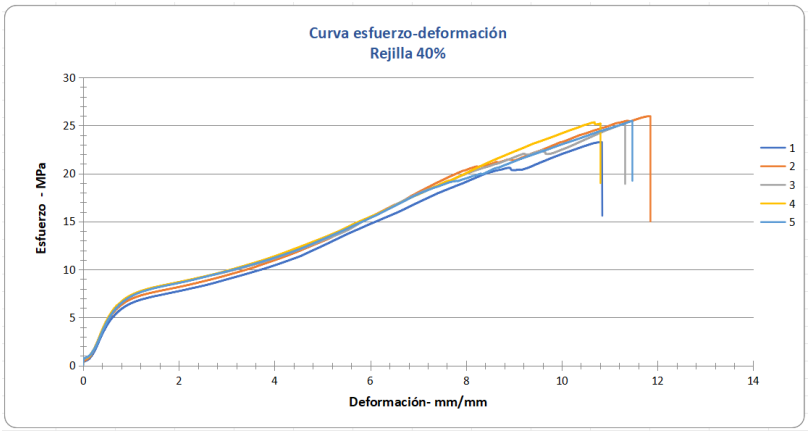
En la Fig. 4.7, Fig. 4.8 y Fig. 4.9 se presentan las curvas esfuerzo–deformación y micrografía digital de la superficie de fractura para densidades del 40 %, 60 % y 80 %, permitiendo observar el comportamiento mecánico del material bajo carga uniaxial.

Tabla 4. 8 *Resultados del ensayo a tracción de probetas de TPU con patrón Rejilla y 40 %, 60% y 80% de densidad de relleno*

N.º	**Fuerza máxima (N)**			**Extensión (mm)**			**Esfuerzo último (MPa)**			**Deformación (mm/mm)**		
	40%	**60%**	**80%**	**40%**	**60%**	**80%**	**40%**	**60%**	**80%**	**40%**	**60%**	**80%**
1	411,09	489,04	435,22	271	242	227	23,26	24,67	19,87	10,34	9,70	9,06
2	458,79	492,58	436,78	296	241	226	21,95	24,77	19,95	11,86	9,64	9,04
3	443,89	408,85	433,78	283	242	222	25,08	20,49	19,75	11,32	9,67	8,88
4	447,58	454,4	427,02	270	263	226	23,13	22,97	19,39	10,81	10,54	9,04
5	450,14	467,4	450,61	287	263	225	25,48	23,62	20,51	11,49	10,54	9,00
M	442,3	462,45	436,68	281,4	250,2	225,2	23,78	23,24	19,90	11,16	10,02	9,00
SD	18,29	35,09	8,63	11,01	11,69	1,92	1,47	1,74	0,41	0,44	0,48	0,07

Tabla 4. 9 *Módulo de elasticidad aparente para probetas de TPU con patrón rejilla.*

Módulo de elasticidad aparente (MPa)			
N.º	**40%**	**60%**	**80%**
1	7,97	9,08	9,09
2	8,89	7,86	10,27
3	8,63	8,17	9,44
4	8,75	9,53	9,17
5	8,2	9,56	10,71
M	8,48	8,81	9,71
SD	0,39	0,79	0,72

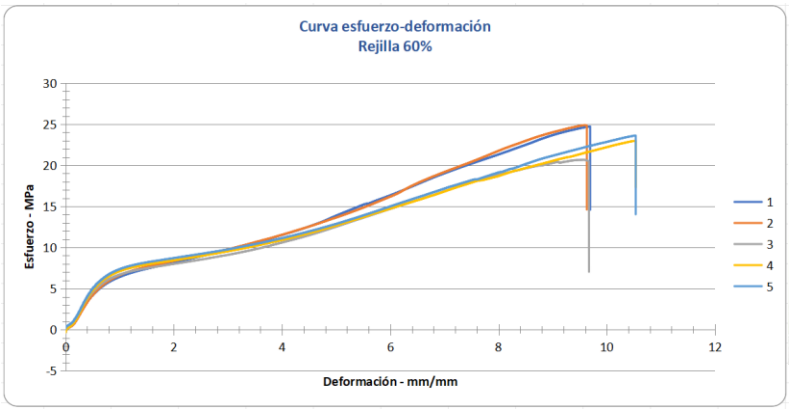


(a)



(b)

Fig 4. 7 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Rejilla al 40%* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*

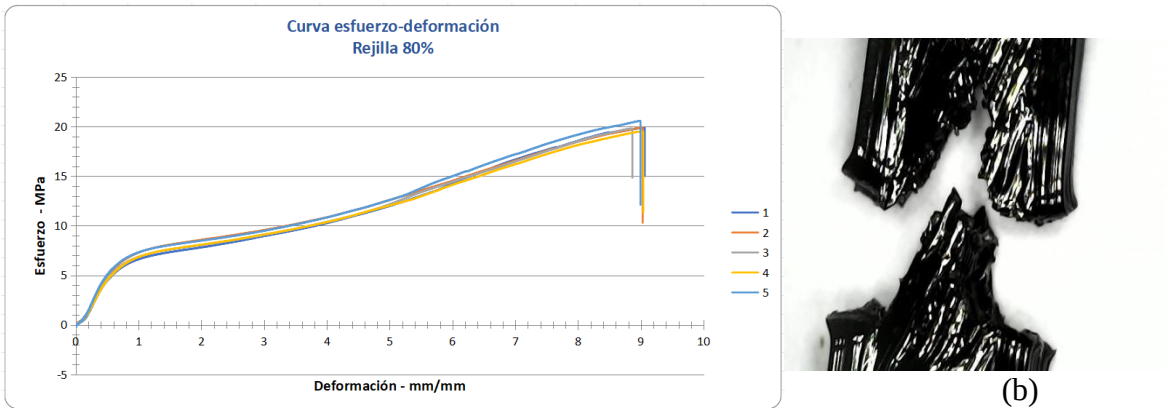


(a)



(b)

Fig 4. 8 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Rejilla al 60%* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*



(a) (b)

Fig 4. 9 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Rejilla al 80%* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*

Los resultados obtenidos muestran que la fuerza máxima promedio aumenta del 40 % (442,3 N) al 60 % de relleno (462,45 N), mientras que para el 80 % se registra un valor ligeramente inferior (436,68 N). La variabilidad que se observa es moderada, encontrándose mayor al 60 % de relleno y menor en el 80 %.

La relación con la extensión máxima y la deformación a la rotura, presencia una disminución que va progresivamente conforme se aumente la densidad de relleno. La extensión promedio pasa de 281,4 mm para el 40 % a 225,2 mm para el 80 %, por otro lado, la deformación promedio disminuye de 11,26 mm/mm a 9,00 mm/mm. De esta manera se puede observar que cuando se aumenta la densidad de relleno disminuye la deformación a la rotura, indicando una menor capacidad de elongación de las probetas con mayor contenido de material.

Por su parte, el esfuerzo último presenta valores promedio de 23,78 MPa, 23,24 MPa y 19,90 MPa para 40 %, 60 % y 80 %, respectivamente, mostrando variaciones moderadas entre las condiciones de impresión. Asimismo, el módulo de elasticidad aparente aumenta con la densidad de relleno, pasando de 8,48 MPa (40 %) a 9,71 MPa (80 %), El aumento del módulo

de elasticidad aparente con la densidad de relleno indica que las probetas con mayor contenido de material presentan mayor rigidez frente a la carga aplicada.

En general, los resultados presentan una dispersión relativamente baja, lo que confirma la repetibilidad de los ensayos realizados.

4.6.2 Patrón de relleno tipo triangular

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a las probetas de TPU impresas con patrón de relleno tipo triángulo, evaluadas con densidades del 40 %, 60 % y 80 %.

En la Tabla 4.10 se muestran los valores promedio y la desviación estándar de la fuerza máxima, extensión máxima, esfuerzo último y deformación a la rotura obtenidos en los ensayos a tracción. Las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12 presentan las curvas esfuerzo–deformación junto con las micrografías digitales de la superficie de fractura para cada porcentaje de relleno, permitiendo observar el comportamiento mecánico del material bajo carga uniaxial.

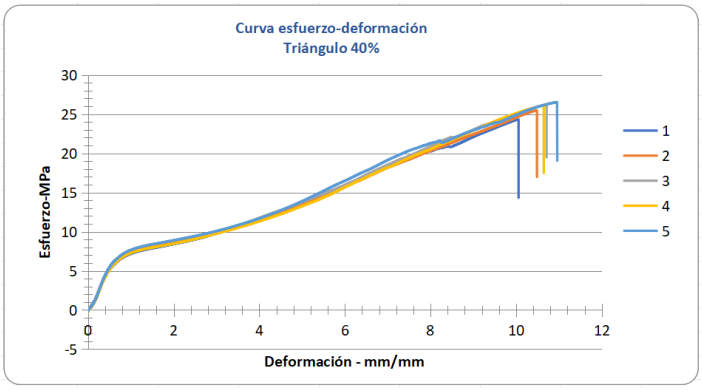
Asimismo, en la Tabla 4.11 se reportan los valores del módulo de elasticidad aparente para cada densidad evaluada, con sus respectivas medias y desviaciones estándar.

Tabla 4. 10 *Resultados del ensayo a tracción de probetas de TPU con patrón Triángulo y 40 %, 60% y 80% de densidad de relleno*

N.º	Fuerza máxima (N)			Extensión (mm)			Esfuerzo último (MPa)			Deformación (mm/mm)		
	40%	**60%**	**80%**	**40%**	**60%**	**80%**	**40%**	**60%**	**80%**	**40%**	**60%**	**80%**
1	429,64	432,93	480,61	251	230	235	24,31	19,28	21,89	10,06	9,23	9,43
2	449,8	435,98	476,69	262	217	230	25,41	21,96	21,78	10,49	8,70	6,77
3	462,77	420,65	491,04	268	216	232	26,20	21,23	22,25	10,72	8,66	9,30
4	461,62	424,52	496,48	266	212	240	26,13	21,31	22,65	10,66	8,50	9,63
5	468,86	420,87	478,06	274	212	234	26,50	21,20	21,84	10,96	8,49	9,38
M	454,54	426,99	484,58	264,2	217,4	234,2	25,70	20,75	22,08	10,58	8,72	8,9
SD	15,54	7,21	8,72	8,56	7,40	3,77	0,88	1,44	0,37	0,33	0,30	1,20

Tabla 4. 11 *Módulo de elasticidad aparente para probetas de TPU con patrón triangular.*

Módulo de elasticidad aparente (MPa)			
N.º	**40%**	**60%**	**80%**
1	10,11	9,60	10,73
2	11,09	10,34	8,79
3	11,23	10,23	11,28
4	10,63	10,21	10,66
5	11,48	10,49	10,50
M	10,90	10,17	10,36
SD	0,54	0,34	0,94

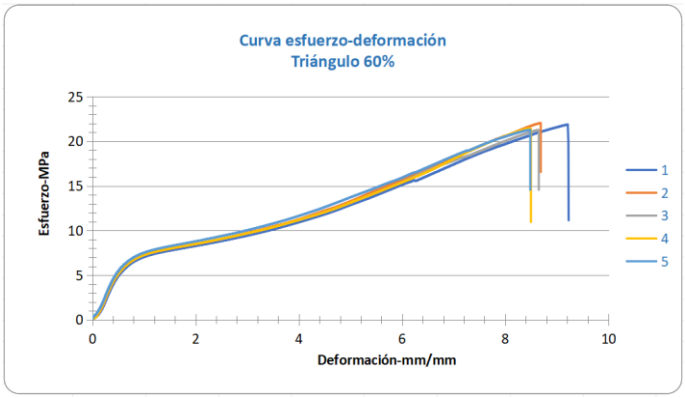


(a)

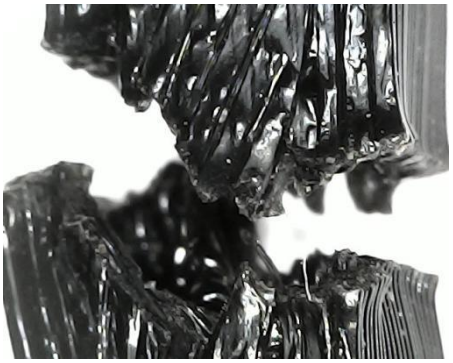


(b)

Fig 4. 10 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Triángulo al 40%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*

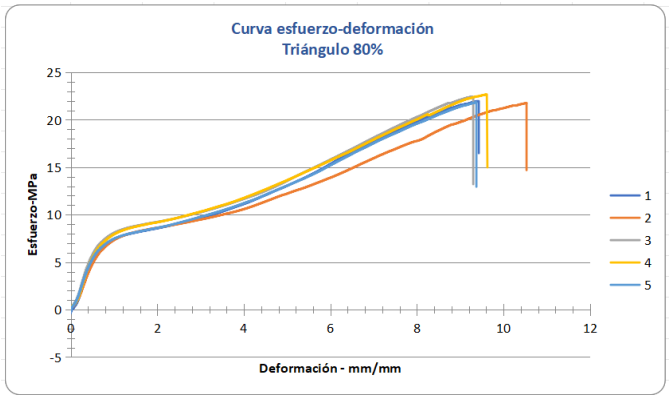


(a)



(b)

Fig 4. 11 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Triángulo al 60%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*



(a)



(b)

Fig 4. 12 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Triángulo al 80%.* ***a)****Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*

Los resultados obtenidos muestran que la fuerza máxima promedio presenta una ligera variación con la densidad de relleno, registrándose 454,54 N para el 40 %, 426,99 N para el 60 % y 484,58 N para el 80 %, siendo esta última condición la de mayor resistencia. La variabilidad fue moderada en todas las configuraciones evaluadas, con una dispersión ligeramente mayor en el 40 % de relleno.

Cuando se relaciona la extensión máxima y la deformación a la rotura, se identifica una disminución conforme aumenta la densidad de relleno. La extensión promedio va disminuyendo de 264,2 mm para el 40 % a 234,2 mm para el 80 %, por otro lado, en la deformación promedio se reduce de 10,58 mm/mm a 8,90 mm/mm. Estos datos indican una menor facilidad de elongación en las probetas con mayor contenido de material.

Por su parte, el esfuerzo último presenta valores promedio de 25,70 MPa, 20,75 MPa y 22,08 MPa para 40 %, 60 % y 80 %, respectivamente, mostrando variaciones moderadas entre las condiciones evaluadas. Asimismo, el módulo de elasticidad aparente muestra un incremento para el 80 % de relleno, alcanzando 10,90 MPa, en comparación con 10,17 MPa y 10,36 MPa obtenidos para 40 % y 60 %, lo que indica un aumento en la rigidez del material a mayor densidad de relleno.

4.6.3 Patrón de relleno tipo zig zag

En este apartado se analizan las probetas de TPU fabricadas con patrón de relleno tipo zig zag. La Tabla 4.12 reúne los resultados obtenidos en el ensayo de tracción para las densidades de 40 %, 60 % y 80 %, considerando la fuerza máxima alcanzada, la extensión, el esfuerzo último y la deformación a la rotura.

Las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15 se puede identificar las curvas esfuerzo–deformación, junto con la micrografía digital de la superficie de fractura, observándolas, permite examinar el comportamiento mecánico del material bajo carga uniaxial.

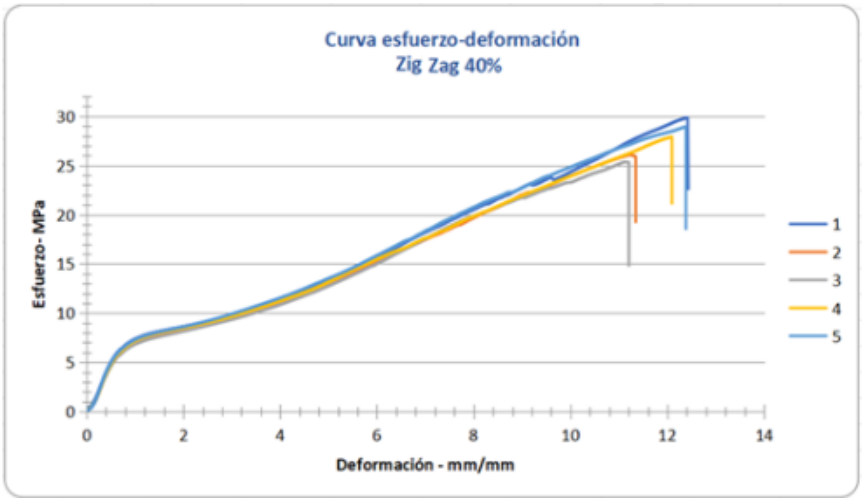
La Tabla 4.13 nos indica los respectivos valores del módulo de elasticidad aparente para cada condición evaluada, esto incluye el promedio y la desviación estándar, apuntando a comparar la rigidez inicial de este patrón de relleno.

Tabla 4. 12 *Resultados del ensayo a tracción de probetas de TPU con patrón zig zag y 40 %, 60% y 80% de densidad de relleno*

N.º	**Fuerza máxima (N)**			**Extensión (mm)**			**Esfuerzo último (MPa)**			**Deformación (mm/mm)**		
	40%	**60%**	**80%**	**40%**	**60%**	**80%**	**40%**	**60%**	**80%**	**40%**	**60%**	**80%**
1	527,3	528,72	605,34	310	283	290	29,85	26,70	27,64	12,43	11,35	11,62
2	460,77	534,3	599,53	283	286	278	25,85	27,01	27,38	11,35	11,46	8,15
3	448,33	512,01	592,23	280	282	287	25,26	25,84	26,95	11,22	11,31	11,51
4	493,22	504,93	562,51	302	284	273	27,91	25,52	25,52	12,09	11,39	10,94
5	511,61	488,89	605,3	309	275	296	28,96	24,63	24,63	12,38	11,01	11,84
M	488,3	513,8	592,9	296,8	282,0	284,8	27,51	25,92	26,39	11,9	11,3	10,8
SD	33,33	18,85	17,86	14,34	4,18	9,26	1,97	0,95	1,29	0,57	0,17	1,52

Tabla 4. 13 *Módulo de elasticidad aparente para probetas de TPU con patrón zig zag.*

Módulo de elasticidad aparente (MPa)			
N.º	**40%**	**60%**	**80%**
1	10,19	10,63	10,14
2	9,82	10,97	8,77
3	9,37	9,99	9,84
4	9,95	9,19	10,19
5	10,51	9,84	10,22
M	9,97	10,12	9,83
SD	0,43	0,70	0,61

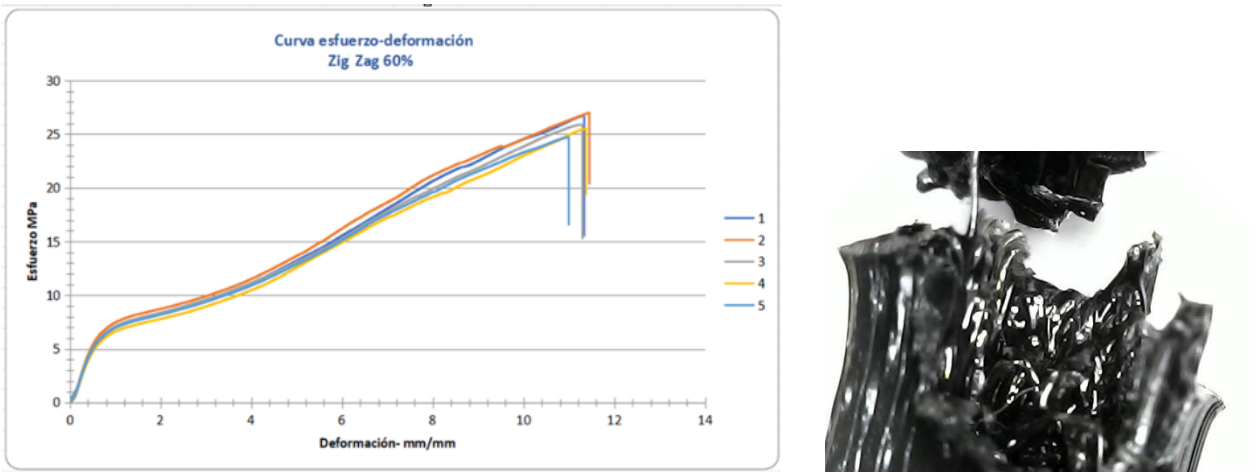


(a)



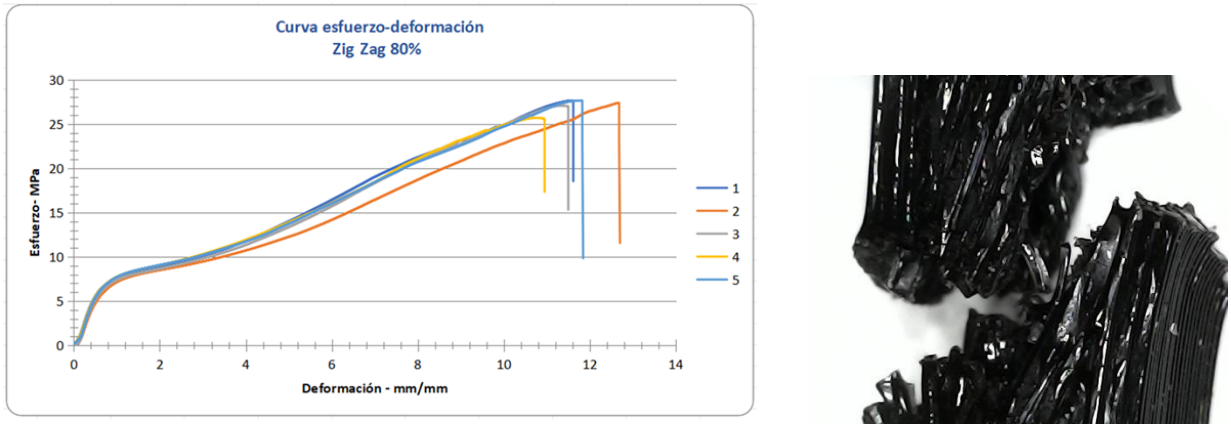
(b)

Fig 4. 13 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón zig zag al 40%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*



(a) (b)

Fig 4. 14 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón zig zag al 60%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*



(a) (b)

Fig 4. 15 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón zig zag al 80%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*

Los resultados del patrón zig zag evidencian un aumento de la fuerza máxima con la densidad de relleno, pasando de 488,3 N (40 %) a 592,9 N (80 %). Sin embargo, esta tendencia cambia en el esfuerzo último, cuyo valor más alto se obtuvo en el 40 % (27,51 MPa) y disminuyendo en el 80% a 26,39 MPa. La variabilidad fue baja en todas las condiciones evaluadas.

En cuanto al comportamiento en la extensión y la deformación a la rotura muestran una ligera disminución al incrementar la densidad. La deformación promedio pasó de 11,9 mm/mm en el 40 % a 10,8 mm/mm en el 80 %, indicando una leve reducción en la ductilidad.

Se puede apreciar que el módulo de elasticidad aparente aumentó progresivamente de 9,97 MPa a 10,12 MPa en 40% y 60% y disminuyó a 9,83 MPa en el 80 %, confirmando una vez más una mayor rigidez en las probetas con mayor contenido de material, aunque no necesariamente en el 80% de relleno.

El incremento de la densidad de relleno en el patrón zigzag se aprecia la mejora en la resistencia y la rigidez, con una disminución regular en la capacidad de deformación.

4.6.4 Patrón de relleno tipo trihexagonal

La Tabla 4.134 reúne los valores obtenidos de fuerza máxima, extensión, esfuerzo último y deformación a la rotura para cada condición experimental para las probetas de TPU fabricadas con patrón de relleno trihexagonal, evaluadas bajo ensayo de tracción para densidades de 40 %, 60 % y 80 %.

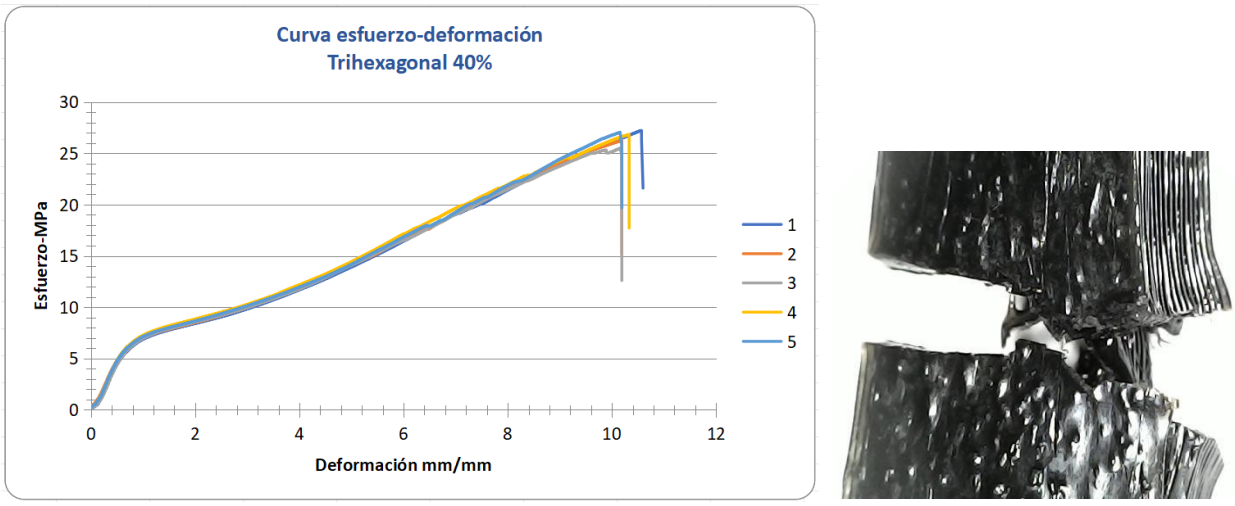
Las curvas esfuerzo–deformación correspondientes se muestran en las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18, donde se analiza la respuesta mecánica del material ante carga uniaxial. Asimismo, en la Tabla 4.15 se aprecia el módulo de elasticidad aparente calculado para cada densidad, esto incluye el promedio y la desviación estándar, para la comparación de la rigidez inicial de este patrón.

Tabla 4. 14 *Resultados del ensayo a tracción de probetas de TPU con patrón trihexagonal y 40 %, 60% y 80% de densidad de relleno*

N.º	Fuerza máxima (N)			Extensión (mm)			Esfuerzo último (MPa)			Deformación (mm/mm)		
	40%	60%	80%	40%	60%	80%	40%	60%	80%	40%	60%	80%
1	480,99	474,21	560,09	265	232	235	26,00	23,97	25,55	10,60	9,30	9,43
2	463,63	477,69	544,22	254	227	230	26,16	24,00	24,60	10,19	9,10	9,19
3	450,61	481,33	529,75	254	222	233	25,06	24,33	24,17	10,19	8,90	9,33
4	474,32	499,49	531,05	258	240	226	26,85	25,25	24,24	10,33	9,61	9,07
5	478	481,17	487,71	254	223	228	26,00	24,33	22,28	10,19	8,94	9,14
M	469,5	482,8	530,5	257,0	228,8	230,4	26,01	24,37	24,14	10,30	9,17	9,23
SD	12,44	9,86	26,91	4,80	7,40	3,65	0,64	0,52	1,19	0,18	0,29	0,15

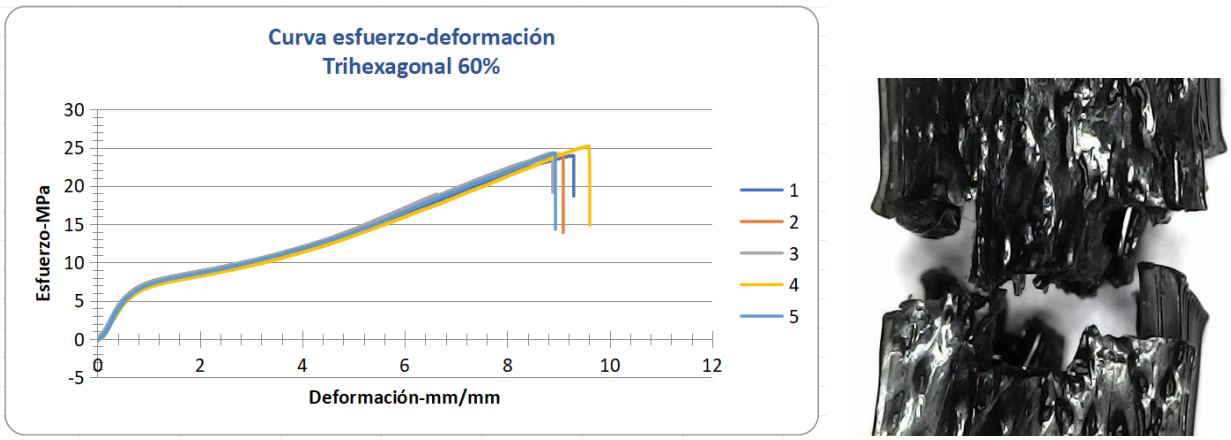
Tabla 4. 15 *Módulo de elasticidad aparente para probetas de TPU con patrón trihexagonal.*

Módulo de elasticidad aparente (MPa)			
N.º	**40%**	**60%**	**80%**
1	9,09	9,27	10,49
2	9,25	10,17	10,92
3	9,18	10,76	10,64
4	9,66	9,45	10,69
5	9,46	10,38	9,39
M	9,32	10,01	10,43
SD	0,23	0,63	0,60



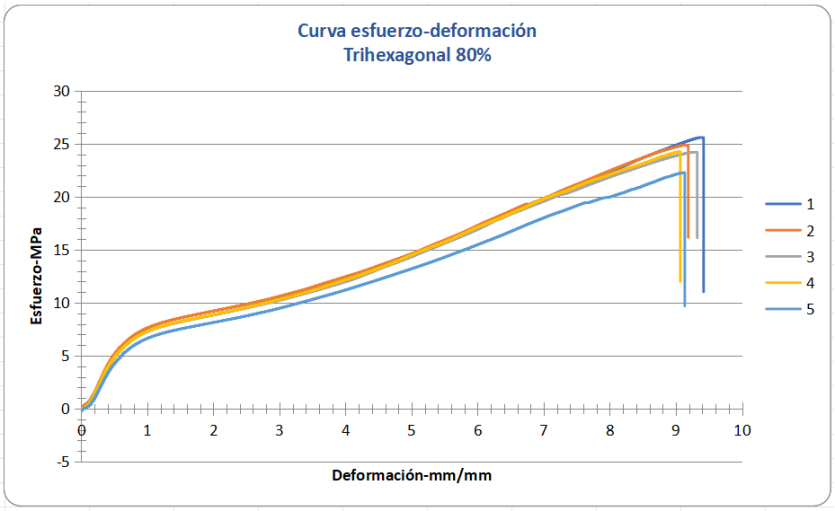
(a) (b)

Fig 4. 16 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón trihexagonal al 40%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*



(a) (b)

Fig 4. 17 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón trihexagonal al 60%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura .*



(a)



(b)

Fig 4. 18 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón trihexagonal al 80%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*

Los resultados del patrón trihexagonal muestran un incremento de la fuerza máxima con la densidad de relleno, pasando de 469,5 N en el 40 % a 530,5 N en el 80 %. El esfuerzo último presenta valores similares entre condiciones, con 26,01 MPa en el 40%, 24,37 MPa para el 60% y una disminución en el 80 % que llega a 24,14 MPa.

La extensión y la deformación disminuyen al aumentar la densidad, reduciéndose la deformación promedio de 10,30 mm/mm a 9,23 mm/mm, lo que indica una menor capacidad de elongación en las probetas más densas.

Por su parte, el módulo de elasticidad aparente aumenta progresivamente de 9,32 MPa (40 %) a 10,43 MPa (80 %), evidenciando una mayor rigidez con el incremento del contenido de material. En general, la dispersión de los resultados fue baja, confirmando consistencia experimental.

4.6.5 Patrón de relleno tipo giroide

Finalmente, se muestran los resultados obtenidos para las probetas de TPU impresas con patrón de relleno tipo giroide, evaluadas mediante ensayo de tracción en densidades del 40 %, 60 % y 80 %. La Tabla 4.16 presenta los valores de fuerza máxima, extensión, esfuerzo último y deformación a la rotura para cada condición estudiada.

Las curvas esfuerzo–deformación correspondientes se muestran en las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21, donde se aprecia la respuesta mecánica del material bajo carga uniaxial, así como las características observadas en la superficie de fractura.

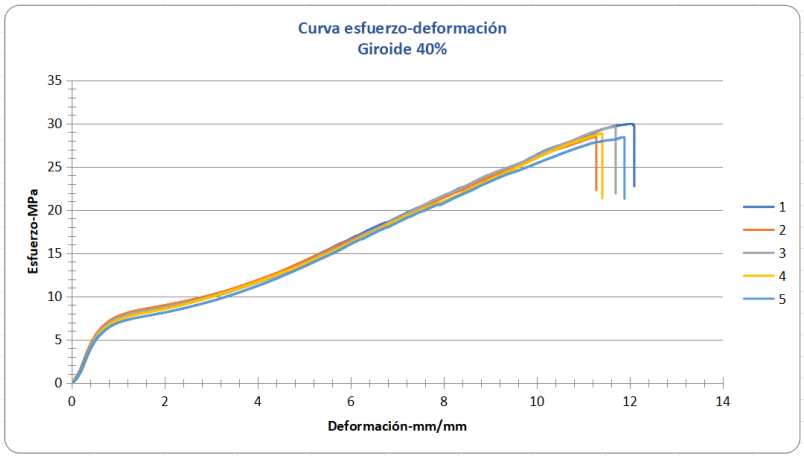
Adicionalmente, en la Tabla 4.17 se incluyen los valores del módulo de elasticidad aparente, junto con su media y desviación estándar, lo que permite evaluar la variación de la rigidez en función de la densidad de relleno para este patrón.

Tabla 4. 16 *Resultados del ensayo a tracción de probetas de TPU con patrón Giroide y 40 %, 60% y 80% de densidad de relleno*

N.º	**Fuerza máxima (N)**			**Extensión (mm)**			**Esfuerzo último (MPa)**			**Deformación (mm/mm)**		
	40%	60%	80%	40%	60%	80%	40%	60%	80%	40%	60%	80%
1	529,28	477,57	521,82	302	234	244	29,67	24,14	23,01	12,10	9,36	9,79
2	502,7	540,8	441,35	282	284	235	28,45	27,30	19,93	11,29	11,39	9,40
3	523,12	564,66	467,08	292	310	251	28,13	28,55	21,02	11,71	12,42	10,04
4	509,78	490,43	499,28	285	274	237	28,56	24,61	22,59	11,42	10,99	9,47
5	502,07	520,6	501,32	297	278	237	28,40	26,32	22,80	11,90	11,15	9,47
M	513,4	518,8	486,2	291,6	276,0	240,8	28,64	26,13	21,84	11,68	11,06	9,63
SD	12,27	31,46	31,80	8,26	27,35	6,65	0,60	1,84	1,34	0,33	1,10	0,27

Tabla 4. 17 *Módulo de elasticidad aparente para probetas de TPU con patrón Giroide.*

Módulo de elasticidad aparente (MPa)			
N.º	**40%**	**60%**	**80%**
1	11,15	10,38	8,57
2	11,52	9,91	5,69
3	10,89	9,60	6,51
4	10,33	9,74	9,52
5	9,92	10,46	7,84
M	10,76	10,02	7,63
SD	0,64	0,39	1,54

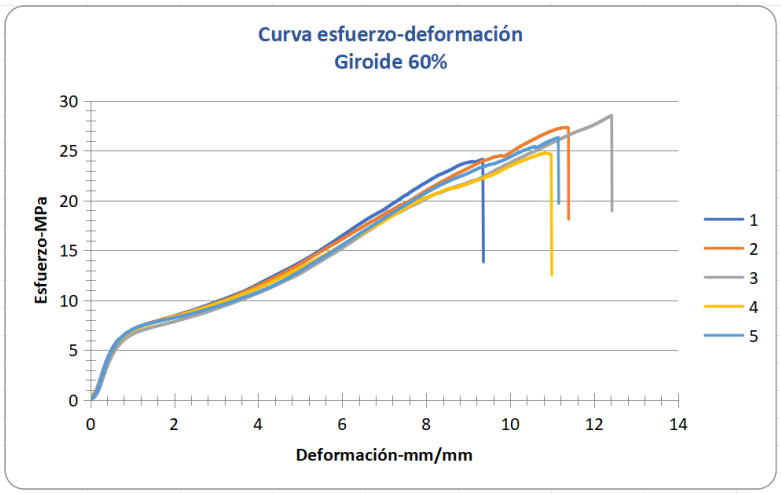


(a)



(b)

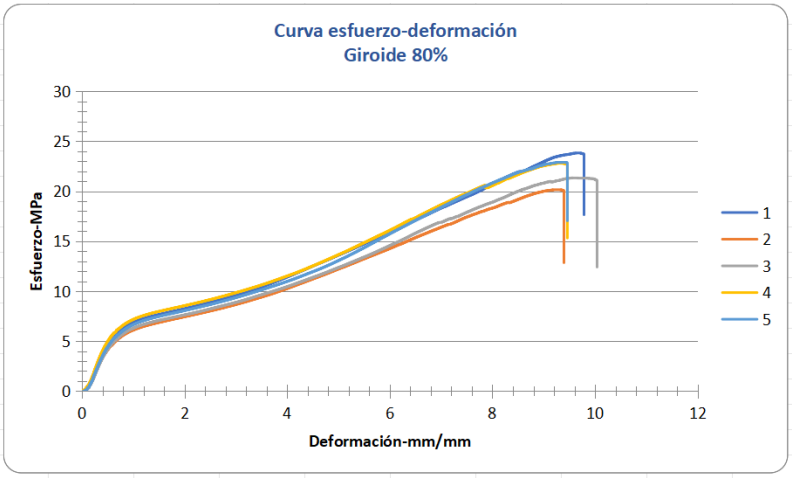
Fig 4. 19 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Giroide al 40%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*





(a) (b)

Fig 4. 20 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Giroide al 60%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*





(a) (b)

Fig 4. 21 *Comportamiento mecánico y superficie de fractura de la probeta con patrón Giroide al 80%.* ***a)*** *Curva esfuerzo–deformación* ***b)*** *micrografía digital de la superficie de fractura.*

Los resultados del patrón giroide muestran que la fuerza máxima promedio se mantiene similar entre 40 % y 60 % (513,4 N y 518,8 N), mientras que en el 80 % se observa una ligera disminución hasta 486,2 N. En cuanto al esfuerzo último, el 40 % presentó el valor más alto (28,64 MPa), seguido del 60 % (26,13 MPa), registrándose el menor valor en el 80 % (21,84 MPa).

La extensión y la deformación disminuyen conforme aumenta la densidad de relleno, reduciéndose la deformación promedio de 11,68 mm/mm en el 40 % a 9,63 mm/mm en el 80 %, lo que indica una menor capacidad de elongación en las probetas más densas.

Por su parte, el módulo de elasticidad aparente no muestra una tendencia creciente con la densidad, alcanzando su mayor valor en el 40 % (10,76 MPa) y disminuyendo en el 80 % (7,63 MPa). Además, se puede encontrar en la última condición, una mayor dispersión y esto sugiere una respuesta menos uniforme a alta densidad.

4.7 Estudio comparativo de la respuesta mecánica del TPU dependiendo del patrón de relleno y la densidad.

Con los resultados individuales ya presentados para cada tipo de patrón de relleno, se realizó un análisis comparativo global para identificar las tendencias generales y determinar la influencia en conjunto con todas del tipo de estructura interna y la densidad de relleno para el desarrollo del desempeño mecánico del TPU, manteniéndose constantes los demás parámetros de impresión.

El análisis se centró en la comparación del esfuerzo último, el módulo de elasticidad aparente y la deformación a la rotura (véase Tabla 4.18), al tratarse de propiedades mecánicas normalizadas que permiten evaluar la resistencia, rigidez y capacidad de elongación del material bajo carga uniaxial, independientemente de la geometría de la probeta.

Tabla 4. 18 *Propiedades mecánicas del TPU 95A marca SUNLU obtenidas del ensayo a tracción.*

Patrón de relleno	**Esfuerzo último (MPa)**			**Módulo de elasticidad aparente (MPa)**			**Deformación (mm/mm)**		
	40%	60%	80%	40%	60%	80%	40%	60%	80%
Rejilla	23,78	23,24	19,90	8,48	8,81	9,71	11,16	10,02	9,00
Triangular	25,70	20,75	22,08	10,90	10,17	10,36	10,58	8,72	8,90
Zigzag	27,51	25,92	26,39	9,97	10,12	9,83	11,90	11,30	10,80
Trihexagonal	26,01	24,37	24,14	9,32	10,01	10,43	10,30	9,17	9,23
Giroide	28,64	26,13	21,84	10,76	10,02	7,63	11,68	11,06	9,63

Asimismo, se examinó la respuesta del material frente a las tres densidades de relleno estudiadas (40 %, 60 % y 80 %), con el fin de establecer si el incremento del contenido de material produce una mejora proporcional en las propiedades mecánicas o si, por el contrario, existen configuraciones intermedias que optimizan el comportamiento estructural.

Una vez obtenidos los resultados experimentales de la máquina de ensayos, identificamos diferencias considerables entre los distintos patrones de relleno, los comportamientos resultaron no lineales de acuerdo al aumento de la densidad; esto sugiere que el desempeño mecánico del TPU no es dependiente del volumen de material depositado, sino también de la eficiencia de la geometría del patrón y de la interacción entre capas generada durante el proceso de impresión.

4.7.1 Comparación del esfuerzo último entre patrones de relleno

La Figura 4.22 presenta el comportamiento del esfuerzo último promedio en función de la densidad de relleno para los cinco patrones evaluados. A partir de estos resultados se observó

diferencias claras tanto entre geometrías como entre porcentajes de relleno, lo que permitió identificar tendencias particulares en cada configuración

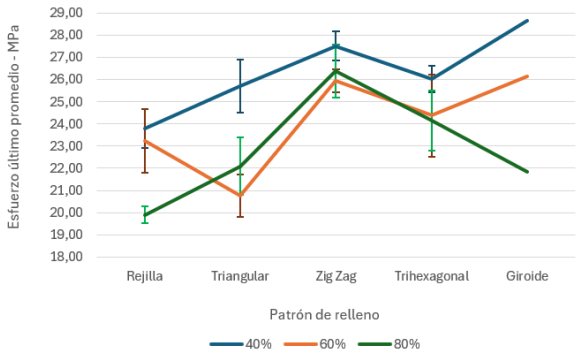


Fig 4. 22 *Variación del esfuerzo último promedio en función del patrón de relleno para diferentes densidades (40 %, 60 % y 80 %), incluyendo barras de error correspondientes a la desviación estándar*.

En la condición del 40 %, los valores fueron relativamente próximos entre sí. El patrón giroide alcanzó el mayor esfuerzo último (28,64 MPa), seguido del zig zag (27,51 MPa), mientras que el trihexagonal (26,01 MPa), el triangular (25,70 MPa) y rejilla (23,78 MPa) presentaron valores ligeramente inferiores. En esta densidad, la diferencia entre el valor máximo y el mínimo fue de aproximadamente 4,86 MPa, lo que indica que a bajo contenido de material la geometría comienza a influir, aunque sin generar variaciones extremadamente marcadas.

Cuando se aumenta la densidad al 60 %, el material reflejó un comportamiento no uniforme entre los patrones. El giroide por un lado mostró una disminución del 8,8% respecto al 40 %, alcanzando 26,13 MPa. El patrón triangular se redujo aproximadamente el 19,3 %, pasando de 25,70 MPa a 20,75 MPa. El patrón rejilla también presentó una leve disminución del 2,3 %, mientras que el trihexagonal disminuyó aproximadamente 6,3 %. Los valores obtenidos, reflejan que el aumento en el porcentaje de relleno no es el que entrega un incremento proporcional en su resistencia.

En el caso del porcentaje de relleno al 80 %, estas características en el comportamiento volvieron a modificarse. El patrón zigzag registró el valor más alto de todo el estudio de esta condición (26,39 MPa), lo que representa un incremento del 1,8 % respecto al 60 %. Sin embargo, el giroide también presentó una reducción significativa del 16,4 % en comparación con su valor a 60 %, descendiendo a 21,84 MPa. Igualmente, el patrón de relleno rejilla tuvo una disminución de un 16,3 % respecto a 40 %, alcanzando el valor más bajo dentro de este grupo (19,90 MPa). En el caso del patrón triangular, se observó un incremento moderado al pasar de 60 % a 80 %, mientras que el trihexagonal presentó una ligera disminución, aunque sin superar el desempeño máximo obtenido por el giroide al 40%.

Estos resultados muestran un comportamiento claramente no lineal en la mayoría de los patrones. Mientras que en algunos casos el incremento de densidad mejora la resistencia (como en el triangular y el zig zag), en otros genera una disminución del esfuerzo último, como ocurrió en el patrón giroide, rejilla y trihexagonal. Este comportamiento en desempeño mecánico del TPU impreso mediante FDM sugiere que no depende de la cantidad de material depositado como se evidencio antes, sino también de la geometría del patrón de relleno y de su distribución.

Finalmente, se evidencia que el patrón giroide es el que muestra el mejor desempeño a baja densidad (40%), mientras que el zig zag fue el más eficiente a alta densidad (80 %). Los resultados obtenidos indican que la densidad de relleno no siempre puede garantizar por sí sola un incremento en el esfuerzo último.

4.7.2 Comparación del módulo de elasticidad en función del patrón y densidad de relleno

Se evaluó la influencia del patrón interno y el porcentaje de relleno sobre el módulo de elasticidad del TPU impreso en 3D. El módulo de elasticidad representa la rigidez del

material en la zona elástica, es decir, su capacidad para oponerse a la deformación inicial bajo la aplicación de la carga.

La Figura 4.23 muestra los valores promedio del módulo de elasticidad obtenidos para cada patrón de relleno en las densidades de 40 %, 60 % y 80 %.

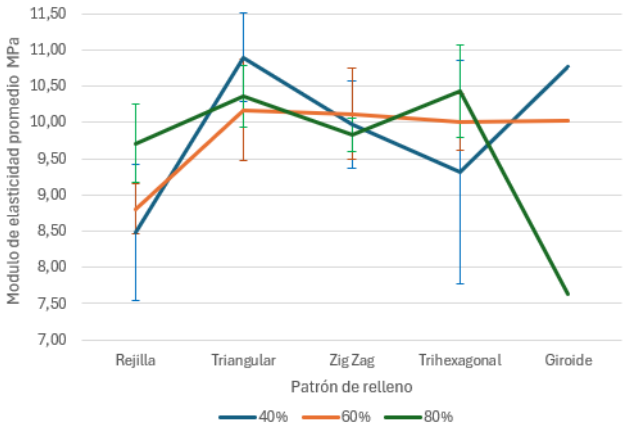


Fig 4. 23 *Módulo de elasticidad promedio del TPU impreso en 3D para los patrones de relleno a densidades de 40 %, 60 % y 80 % y barras de error correspondientes a la desviación estándar.*

Con patrón rejilla, el módulo de elasticidad promedio aumenta progresivamente de 8,48 MPa (40 %) a 8,81 MPa (60 %), esto representa un incremento del 3,9 %. Cuando cambia este valor al 80 %, alcanza 9,71 MPa, que equivale a un 14,5 % respecto al 40 %. El comportamiento refleja una tendencia creciente en conjunto con el aumento de la densidad.

En el patrón triangular, el módulo disminuyó ligeramente de 10,90 MPa (40 %) a 10,17 MPa (60 %), lo que corresponde a una reducción del 6,7 %. Sin embargo, a 80 % se registró un incremento significativo hasta 10,36 MPa, aunque este valor representa una disminución del 5,0% respecto al 40%. Esto confirma un comportamiento no lineal, recuperándose parcialmente a alta densidad sin alcanzar el valor inicial.

El patrón zig zag presentó un incremento continuo: de 9,97 MPa a 10,12 MPa (aumento del 1,5 % entre 40 % y 60 %); sin embargo, a 80 % el módulo descendió a 9,83 MPa, lo que implica una reducción total de 1,4 % respecto a 40 %. Esta tendencia indica una respuesta estructural relativamente estable, aunque sin una mejora sostenida al aumentar la densidad.

En el patrón trihexagonal, el módulo pasó de 9,32 MPa a 10,01 MPa (incremento del 7,4 % entre 40 % y 60 %) y finalmente, a 10,43 MPa a 80 %, representando un aumento total del 11,9 % respecto al valor inicial. El comportamiento fue progresivo y relativamente estable.

En contraste, el patrón giroide mostró un comportamiento diferente. En este tipo de patrón el módulo disminuye un poco de 10,76 MPa a 10,02 MPa entre 40 % y 60 % significando una reducción del 6,9 %, luego se reduce de forma considerable a 7,63 MPa con giroide al 80 %, representando un 29,1 % respecto al 40 %. La disminución en este patrón sugiere que, el incremento de su densidad no garantiza una mayor rigidez, esto puede deberse a cambios en su distribución interna y en la conjetura entre sus capas a alta compactación.

En unión de todos los resultados se demuestra que el módulo de elasticidad no es lineal al incrementar el porcentaje de relleno. En las gráficas de barras de error se puede evidenciar que, en ciertos patrones, como el giroide al 80 %, hay una mayor dispersión del experimento, que puede darse debido a una sensibilidad más alta causada por variaciones en la fabricación o a la unión entre capas.

Se puede observar que en la mayoría de los patrones estudiados existe un aumento progresivo con respecto a la rigidez con la densidad, pero en el caso del comportamiento del patrón giroide se registra que la geometría de este desempeña un papel altamente considerable en la transferencia de esfuerzos dentro de la región elástica. Aunque teóricamente un mayor

volumen de material debería traducirse en mayor rigidez, los resultados experimentales evidencian que la respuesta depende significativamente de la geometría interna del patrón.

4.7.3 Comparación de la deformación en función del patrón y la densidad de relleno

Se evaluó la deformación correspondiente al esfuerzo último con el objetivo de analizar la capacidad de elongación del TPU impreso en 3D bajo distintas configuraciones internas. Este parámetro permite caracterizar el comportamiento dúctil del material y establecer la manera en la que la densidad de relleno y la geometría interna influyen en la capacidad de deformación antes de la falla.

La Figura 4.24 presenta los valores promedio de deformación obtenidos para cada patrón a 40 %, 60 % y 80 % de densidad de relleno.

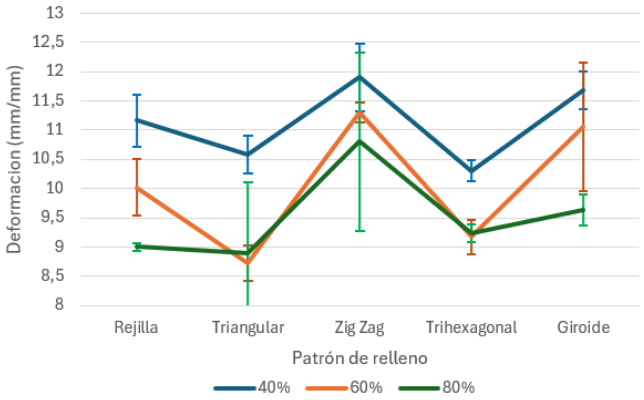


Fig 4. 24 *Deformación promedio del TPU impreso en 3D en función del patrón y la densidad de relleno (barras de error: desviación estándar).*

En el patrón rejilla, la deformación disminuyó de 11,26 mm/mm (40 %) a 10,02 mm/mm (60 %), lo que representa una reducción del 11,0 %. Al aumentar la densidad a 80 %, el valor descendió hasta 9,00 mm/mm, equivalente a una disminución total del 20,1 % respecto al 40 %. Este comportamiento indica una pérdida progresiva de ductilidad al incrementarse la densidad.

El patrón triangular mostró una reducción más marcada entre 40 % y 60 %, pasando de 10,58 mm/mm a 8,72 mm/mm (disminución del 17,6 %). EN el aumento del porcentaje a 80 % existe una ligera recuperación de hasta 8,90 mm/mm, aunque manteniéndose al 15,9 % menor que en el 40 %, mostrando un comportamiento no lineal.

En el patrón zigzag, la deformación disminuyó de 11,90 mm/mm a 11,30 mm/mm entre 40 % y 60 % (−5,0 %), y posteriormente a 10,80 mm/mm a 80 %, lo que representa una reducción total del 9,2 %. Este patrón mantuvo valores relativamente altos de deformación incluso a mayores densidades, indicando un equilibrio favorable entre rigidez y capacidad de elongación.

El patrón trihexagonal presentó una reducción del 10,9 % entre 40 % y 60 % (de 10,30 mm/mm a 9,17 mm/mm), con una ligera variación positiva a 80 % (9,23 mm/mm). En términos globales, la disminución respecto al 40 % fue del 10,4 %, mostrando un comportamiento relativamente estable.

Por su parte, el patrón giroide pasó de 11,68 mm/mm (40 %) a 11,06 mm/mm (60 %), lo que corresponde a una reducción moderada del 5,3 %. Sin embargo, a 80 % la deformación disminuyó hasta 9,63 mm/mm, representando una reducción total del 17,6 % respecto al valor inicial. El decremento mostrado nos dice que, a altas densidades la probeta pierde una parte de su capacidad de elongación, sugiriendo que pueda deberse a una mayor condicionante interna entre filamentos.

En conjunto con los resultados se puede apreciar una tendencia general que hace que disminuya la deformación al incrementar el porcentaje de relleno. Este comportamiento refleja que: a medida que la estructura se vuelve más rígida (mayor módulo), su capacidad de

deformarse antes de la falla se reduce. No obstante, la magnitud de esta reducción depende de la geometría del patrón, lo que demuestra que la selección del diseño interno debe considerar simultáneamente resistencia, rigidez y ductilidad según la aplicación requerida.

4.8 Análisis integral y determinación de la configuración óptima

Luego de analizar por separado el esfuerzo último, el módulo de elasticidad y la deformación, se consideró necesario realizar una evaluación conjunta que permitiera identificar cuál de las configuraciones estudiadas ofrecía el mejor desempeño mecánico global. El estudio individual de cada una de las propiedades de los datos obtenidos el ensayo permitió evidenciar tendencias esclarecedoras en función de las características evaluadas como el patrón y porcentaje de relleno, que permitió seleccionar una configuración ideal para este material integrando todos los criterios mecánicos evaluados.

Como se pudo detallar en las bases teóricas sobre los materiales poliméricos impresos por modelado por deposición fundida, el comportamiento estructural no se interpreta con la resistencia máxima alcanzada. Estos materiales presentan una rigidez y capacidad de deformación antes de fracturarse, influyendo de manera significativa en su desempeño. Esto confirma según las observaciones, que algunas configuraciones presentaban valores elevados de resistencia, pero que no necesariamente tenian el mismo comportamiento en términos de ductilidad o equilibrio estructural. De igual manera, al aumentar el porcentaje de relleno los resultados tendían a incrementar la rigidez; sin embargo, esta mejora no siempre se traducía en un desempeño proporcional cuando se analiza todas las propiedades en conjunto.

Por esta razón, se planteó un enfoque de evaluación multicriterio, este enfoque integra las tres propiedades mecánicas en un único parámetro comparativo. Esta metodología facilitó una valoración más objetiva de las configuraciones analizadas y permitió determinar cuál de ellas

ofrecía el mejor equilibrio entre resistencia, rigidez y deformación bajo las condiciones experimentales establecidas.

A partir de este análisis integral, se identificó la configuración que mostró el comportamiento mecánico más eficiente dentro del alcance definido.

4.8.1 Criterio de evaluación integral del desempeño mecánico

Con el fin de comparar de manera conjunta las propiedades mecánicas obtenidas, se estableció un criterio de evaluación integral que permitió valorar cada configuración considerando simultáneamente el esfuerzo último, el módulo de elasticidad y la deformación. Debido a que estas variables presentan diferentes unidades y magnitudes, fue necesario normalizarlas antes de integrarlas en un único parámetro comparativo.

La normalización se realizó tomando como referencia el valor máximo experimental registrado para cada propiedad, según las ecuaciones 4.8, 4.9 y 4.10:

$$\sigma_{norm} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{max}} \tag{4.8}$$

$$E_{norm} = \frac{E_i}{E_{max}} \tag{4.9}$$

$$\varepsilon_{norm} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{max}} \tag{4.10}$$

donde:

σ_{norm}: esfuerzo último normalizado.

E_{norm}: módulo de elasticidad normalizado.

ε_{norm}: deformación normalizada.

σ_i, E_iy ε_i: valores promedio obtenidos experimentalmente para cada configuración evaluada.

σ_{max}, E_{max}y ε_{max}: valores máximos registrados dentro del conjunto total de configuraciones analizadas.

De esta manera, todas las variables quedaron expresadas en una escala adimensional comprendida entre 0 y 1, lo que permitió evitar que una propiedad influyera de manera desproporcionada debido a su magnitud numérica.

Posteriormente, se definió un Índice de Desempeño Mecánico (IDM) como el promedio de las tres variables normalizadas (ecuación 4.11):

$$IDM = \frac{\sigma_{norm} + E_{norm} + \varepsilon_{norm}}{3} \tag{4.11}$$

Se adoptó una ponderación uniforme para cada propiedad, considerando que el estudio no establece una prioridad específica entre resistencia, rigidez o deformación, sino que buscó evaluar el comportamiento mecánico de forma integral.

Para éste cálculo se presenta la Tabla 4.19, en donde se consideran los datos calculados anteriormente de valores promedio de esfuerzo último, módulo de elasticidad aparente y deformación obtenidos para cada patrón de relleno y porcentaje de densidad.

Tabla 4. 19 *Índice de Desempeño Mecánico (IDM) por patrón y porcentaje de relleno*

Patrón de relleno	**Esfuerzo último**			**Módulo de elasticidad**			**Deformación**		
	40%	**60%**	**80%**	**40%**	**60%**	**80%**	**40%**	**60%**	**80%**
Rejilla	23,78	23,24	19,9	8,48	8,81	9,71	11,16	10,02	9

Triangular	25,7	20,75	22,08	10,9	10,17	10,36	10,58	8,72	8,9
Zig Zag	27,51	25,92	26,39	9,97	10,12	9,83	11,9	11,3	10,8
Trihexagonal	26,01	24,37	24,14	9,32	10,01	10,43	10,3	9,17	9,23
Giroide	28,64	26,13	21,84	10,76	10,02	7,63	11,68	11,06	9,63

A continuación, se presenta un ejemplo del procedimiento de cálculo aplicado para la configuración correspondiente al patrón de relleno tipo rejilla a densidad del 40%, haciendo uso de las ecuaciones 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11.

Normalización del esfuerzo último:

$$\sigma_{norm} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{max}}$$

$$\sigma_{norm} = \frac{23,78}{28,64}$$

$$\sigma_{norm} = 0,830$$

Normalización del módulo de elasticidad:

$$E_{norm} = \frac{E_i}{E_{max}}$$

$$E_{norm} = \frac{8,48}{10,76}$$

$$E_{norm} = 0,788$$

Normalización de la deformación:

$$\varepsilon_{norm} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{max}}$$

$$\varepsilon_{norm} = \frac{11,16}{11,90}$$

$$\varepsilon_{norm} = 0,938$$

Cálculo del IDM:

$$IDM = \frac{\sigma_{norm} + E_{norm} + \varepsilon_{norm}}{3}$$

$$IDM = \frac{0{,}830 + 0{,}788 + 0{,}938}{3}$$

$$IDM = 0{,}852$$

Los valores obtenidos en la Tabla 4.20 del índice para cada configuración evaluada se presentan en la Fig 4.25, donde se identifica comparativamente la alternativa con mejor equilibrio estructural bajo las condiciones experimentales consideradas.

Tabla 4. 20 *Índice de Desempeño Mecánico (IDM) por patrón y porcentaje de relleno*

Patrón de relleno	**40 %**	**60 %**	**80 %**
Rejilla	0,852	0,843	0,819
Triangular	0,882	0,772	0,863
Zigzag	0,944	0,920	0,959
Trihexagonal	0,894	0,846	0,857
Giroide	0,968	0,888	0,745

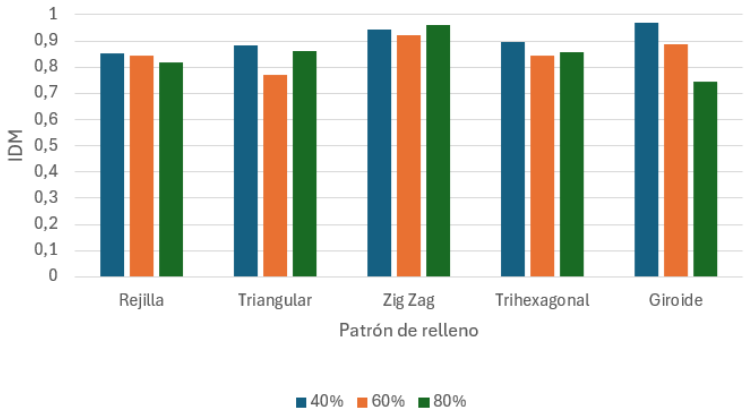


Fig 4. 25 *Índice de desempeño mecánico normalizado para las configuraciones de impresión evaluadas.*

Al analizar los valores del IDM presentados en la Fig. 4.25, se identificó, que la configuración correspondiente al patrón giroide al 40 % alcanzó el valor máximo del índice (IDM = 0,968), lo que representa el mayor desempeño mecánico integral dentro del conjunto de configuraciones evaluadas. Desde una perspectiva estrictamente orientada a la maximización de propiedades mecánicas, esta alternativa podría considerarse la más resistente y rígida bajo las condiciones experimentales establecidas, sin requerir elevados porcentajes de material.

No obstante, las configuraciones zigzag al 80 % (IDM = 0,959) y zigzag al 40 % (IDM = 0,944) presentaron valores muy cercanos al máximo registrado. Esta proximidad indica que el patrón zigzag mantiene un comportamiento estructural altamente competitivo incluso sin emplear el mayor porcentaje de relleno.

El patrón triangular presentó un comportamiento muy variable. Mientras que en configuraciones de 40% y 80% alcanzaron valores de 0,882 y 0,863, respectivamente, la condición al 60% registró el menor desempeño con un IDM de 0,772. Esto sugiere que el comportamiento mecánico no sigue una tendencia uniforme.

En el caso del patrón rejilla, los valores obtenidos fueron 0,852, 0843 y 0,819 para densidades de 40%, 60% y 80%, respectivamente, evidenciando una ligera disminución del índice conforme aumenta el porcentaje de relleno.

Se analizó que el comportamiento estructural del TPU impreso mediante FDM depende tanto del patrón geométrico como del porcentaje de relleno, y que la optimización no necesariamente se alcanza con la mayor densidad disponible, sino con la combinación más equilibrada de parámetros.

En conjunto, los resultados mostraron que la variación de los parámetros de impresión, particularmente el tipo de patrón y el porcentaje de relleno, modificó de manera directa las propiedades mecánicas a tracción del TPU. El patrón giroide al 40 % registró el mayor desempeño absoluto, mientras que el patrón zigzag al 80% destacó por mantener valores elevados de resistencia y rigidez.

4.9 Influencia de la temperatura de impresión en el desempeño mecánico del TPU

La temperatura de impresión constituye uno de los parámetros más influyentes en el proceso de fabricación mediante FDM, particularmente en el TPU ya que pertenece a los materiales elastoméricos. Este parámetro afecta directamente la calidad de la adhesión interlaminar, la fusión entre el filamento y la homogeneidad interna de la estructura impresa, lo que repercute de manera significativa en las propiedades mecánicas finales del material.

En la Tabla 4.21 se presentan los resultados obtenidos a partir del ensayo a tracción de la fuerza máxima, extensión, esfuerzo último, deformación y módulo de elasticidad aparente, con la maquina James Heal marca Titan de 5kN caracterizada anteriormente en la Tabla 4.3, en probetas fabricadas bajo condiciones controladas representadas en la Tabla 4.2 cambiando en los parámetros de patrón de relleno y temperatura de impresión a un único estudio con relleno Giroide al 60% de densidad y temperatura a 200 °C y 205 °C, con el fin de aislar la influencia del patrón de relleno y del porcentaje de densidad interna; también se incluyó las curvas esfuerzo-deformación en la Fig. 4.26 y 4.27 Esta decisión metodológica permitió evaluar de forma objetiva el comportamiento estructural asociado a la geometría interna, minimizando la variabilidad atribuible a parámetros térmicos.

Tabla 4. 21 *Resultados del ensayo a tracción en la máquina de ensayos James Heal 5kN para temperaturas de 200 °C y 205 °C en 5 probetas de TPU 95ª marca SUNLU.*

N.º	Fuerza máxima (N)		Extensión (mm)		Esfuerzo último (MPa)		Deformación (mm/mm)		Módulo de elasticidad aparente (MPa)	
	200 °C	**205 °C**	**200 °C**	**205 °C**	**200 °C**	**205 °C**	**200 °C**	**205 °C**	**200°C**	**205 °C**
1	568,84	591,43	330	348	28,76	29,9	13,20	13,95	9,18	8,81
2	573,46	567,91	316	335	28,97	28,71	12,67	13,41	9,49	9,43
3	579,56	566,87	338	327	29,3	28,66	13,54	13,08	8,90	9,10
4	588,65	583,37	331	334	29,74	29,43	13,26	13,36	9,56	9,31
5	571,71	535,77	322	315	28,9	27,9	12,90	12,62	9,01	9,23
M	576,45	569,07	327,4	331,8	29,13	28,91	13,11	13,28	9,23	9,18
SD	7,87	19,95	8,53	12,07	0,39	0,77	0,34	0,49	0,29	0,24

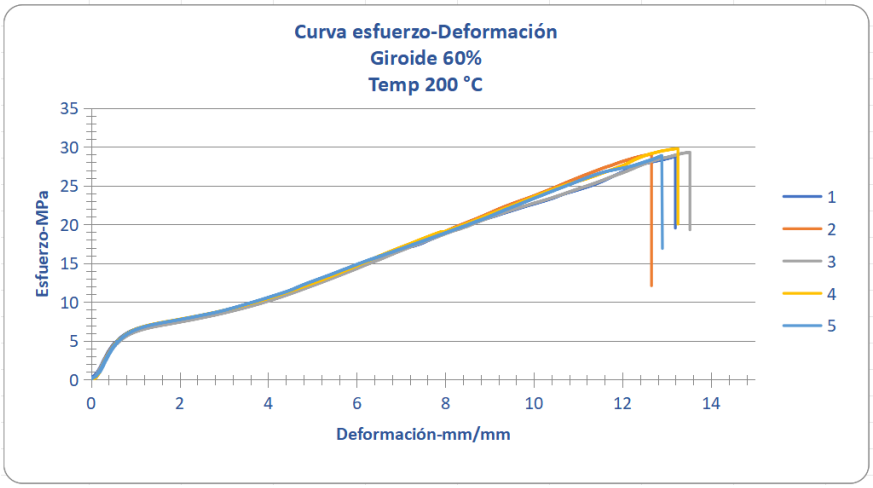


Fig 4. 26 *Curva esfuerzo-deformación de los resultados obtenidos de las probetas Giroide 60% y temperatura de 200 °C.*

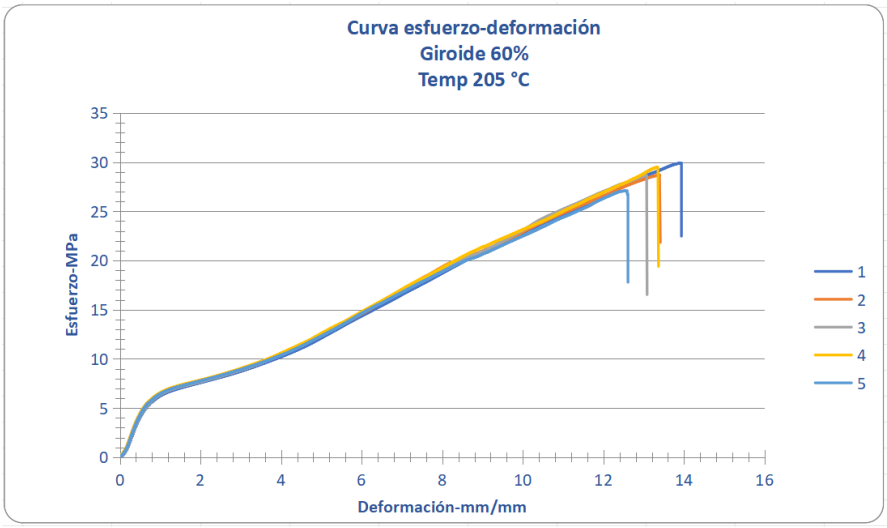


Fig 4. 27 *Curva esfuerzo-deformación de los resultados obtenidos de las probetas Giroide 60% y temperatura de 205 °C*

.

Con el fin de determinar si la variación de la temperatura de impresión generó diferencias estadísticamente significativas en el desempeño mecánico del TPU, se realizó una comparación directa de las medias obtenidas para 200 °C y 205 °C. En la Tabla 4.22 y Fig 4.28 se presenta el comparativo de los valores promedio de esfuerzo último, deformación y módulo de elasticidad.

Tabla 4. 22 *Valores promedio de las propiedades obtenidas con temperatura de 200 °C y 2005 °C*

Propiedad	**200 °C**	**205 °C**	**Diferencia absoluta**	**Variación %**
Esfuerzo último (MPa)	29,13	28,91	-0,22	-0,76 %
Deformación (mm/mm)	13,11	13,28	+0,17	+1,30 %
Módulo elasticidad (MPa)	9,23	9,18	-0,05	-0,54 %

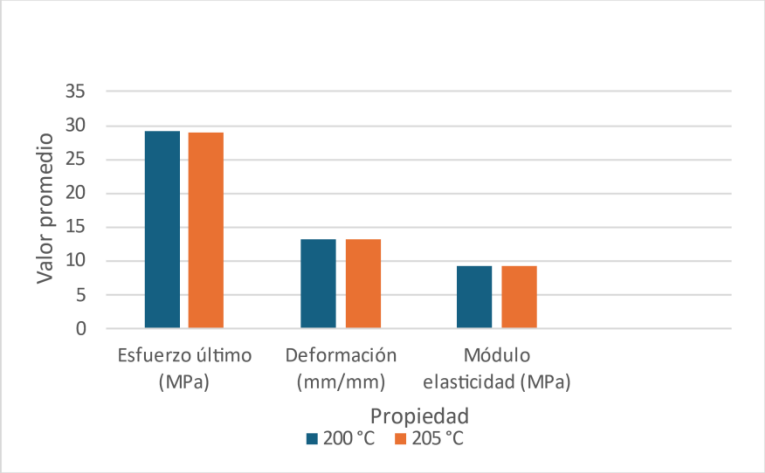


Fig 4. 28 *Variaciones de las propiedades mecánicas evaluadas para TPU 95A a temperatura de 200 °C y 205 °C.*

El análisis comparativo entre las temperaturas de 200 °C y 205 °C evidenció variaciones reducidas en las propiedades mecánicas evaluadas. El esfuerzo último disminuyó un 0,76 % al incrementar la temperatura, mientras que el módulo de elasticidad presentó una reducción del 0,54 %. Por su parte, la deformación mostró un ligero incremento del 1,30 %, lo que indicó un comportamiento marginalmente más dúctil a mayor temperatura.

La prueba t de Student aplicada a los valores de esfuerzo último arrojó un valor p=0,60, es decir que para muestras independientes no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos $\alpha > 0{,}05$, lo que confirmó que el incremento de 5 °C en la temperatura de extrusión no generó cambios mecánicos relevantes bajo las condiciones de fabricación establecidas.

En comparación con las variaciones, al modificar el patrón y el porcentaje de relleno en el cual sus cambios produjeron diferencias mayores al 15 % en el desempeño mecánico, la influencia del cambio de temperatura dentro de los intervalos analizados resultó considerablemente menor. Esto indicó que, en el rango de 200 °C a 205 °C, el poliuretano

termoplástico presentó estabilidad en su comportamiento, manteniendo sus niveles similares de resistencia, rigidez y capacidad de deformación.

Los resultados sugirieron que, una vez alcanzada una temperatura adecuada para garantizar la correcta fusión interlaminar del material, pequeñas variaciones adicionales no generaron mejoras proporcionales en el desempeño mecánico. En consecuencia, dentro del intervalo evaluado, la geometría interna y la densidad de relleno constituyeron factores de mayor impacto estructural que la variación térmica aplicada.

4.10 Comparación con especificaciones del fabricante (SUNLU – Ensayos ISO)

Con el propósito de contextualizar los resultados experimentales obtenidos, se realizó una comparación con las propiedades mecánicas reportadas por el fabricante del filamento TPU 95A SUNLU incluidas en el Anexo C, las cuales fueron presentadas previamente en la Tabla 2.7 y determinadas bajo condiciones normalizadas según la norma ISO 527/2.

El fabricante reporta una resistencia a la tracción de 34,4 MPa, un módulo de Young de 50,2 MPa y una elongación a la rotura de 1063 %, valores obtenidos mediante ensayos realizados en probetas estandarizadas y bajo condiciones controladas de laboratorio. En contraste, los valores máximos obtenidos en el presente estudio alcanzaron 28,64 MPa de esfuerzo último (patrón Giroide al 40 % de relleno) y 10,90 MPa de módulo de elasticidad aparente (patrón triangular al 40 % de relleno).

La comparación directa evidencia que los valores experimentales fueron inferiores a los reportados por el fabricante, particularmente en el módulo de elasticidad. Esta diferencia no representa una inconsistencia experimental, sino que responde como consecuencia a las características propias del proceso de manufactura aditiva mediante FDM.

A diferencia de los ensayos normalizados realizados sobre material macizo, las probetas fabricadas en este estudio incorporaron estructuras internas con porcentajes de relleno variables y patrones geométricos definidos, lo que implica la presencia de vacíos internos y una distribución no continua del material. En este contexto el proceso FDM nos da zonas de contacto entre las capaz que otorgan dependencia direccional mecánica, afectando la transmisión de esfuerzos.

Estos valores obtenidos experimentalmente reflejan el comportamiento mecánico real del TPU 95A bajo condiciones de impresión 3D y diseño estructural interno; los datos que presenta el fabricante tienen propiedades del material que han sido evaluadas en condiciones ideales de ensayo. Al realizar esta comparación permitió validar la concordancia de los resultados obtenidos y permitió confirmar que las variaciones se encuentran dentro del comportamiento esperado para piezas impresas en 3D con modelado de deposición fundida.

Finalmente, en el Anexo B se encuentra la ficha técnica completa del material proporcionada por el fabricante, con el fin de garantizar la trazabilidad y respaldo documental de la información del presente estudio.

CONCLUSIONES

Se identificaron los principales parámetros de impresión para la fabricación de probetas en TPU 95A mediante FDM, en las cuales se estableció configuraciones controladas de impresión, para obtener probetas con una adecuada calidad dimensional y repetibilidad experimental. La selección adecuada de parámetros como temperatura, patrón y porcentaje de relleno garantizó resultados confiables para su evaluación.

El estudio del comportamiento del poliuretano termoplástico mediante FDM demostró que las características mecánicas de este material dependen están determinadas por la arquitectura interna que se genera durante la impresión, este proceso modificó la repartición de esfuerzos y la respuesta estructural de las probetas, mostrando un impacto directo de los parámetros de fabricación en la capacidad mecánica final del TPU.

De acuerdo con la norma ASTM D638, se seleccionó las variables que permitieron caracterizar de forma adecuada el comportamiento mecánico a tracción del TPU. Se consideraron el esfuerzo último, la deformación y el módulo de elasticidad aparente, para proporcionar los datos suficientes que permitieron comparar las diferentes configuraciones de impresión evaluadas.

Los resultados observados evidenciaron que el patrón y la densidad de relleno influyen de manera significativa en la resistencia y rigidez del material. El mayor esfuerzo último se obtuvo con el patrón giroide al 40% de relleno, alcanzando 28,64 MPa, mientras que el mayor módulo de elasticidad aparente corresponde al patrón triangular al 40%, con un valor de 10,90 MPa que ofrecen un equilibrio adecuado entre desempeño mecánico y eficiencia productiva, representando una alternativa eficiente desde el punto de vista productivo. Así mismo, el

análisis mediante el IDM, permitió identificar al patrón zigzag al 80% de relleno con la configuración de mayor desempeño mecánico global (IDM=0,955).

Se compararon los efectos de la variación de los parámetros del proceso de impresión 3D sobre las propiedades mecánicas del TPU impreso mediante FDM. Estos efectos se vieron reflejados en los datos que demostraron que la geometría interna y la densidad de relleno tienen mayor influencia que otras variaciones como el cambio de temperatura dentro del rango estudiado. Además, se logró identificar que la configuración de giroide al 60 % ofrece un comportamiento mecánico más competitivo y con menor consumo de material, siendo una de las alternativas más eficientes para aplicaciones de fabricación mediante manufactura aditiva.

La comparación con los valores del fabricante que fueron realizadas con la norma ISO demostró diferencias considerables en comparación a la naturaleza estructural del proceso FDM, ya que depende de sus configuraciones. Además, la variación de temperatura entre 200 °C y 205 °C no presentó diferencias significativas ($p = 0,60$), indicando que dentro de este rango su influencia es limitada.

El estudio cumple con los objetivos planteados ya que caracteriza el desempeño mecánico del poliuretano termoplástico impreso por FDM y se pudo establecer criterios para la selección de configuraciones ideales, en el cual el patrón giroide al 60 % se destacó como una opción que equilibra resistencia y eficiencia de fabricación.

RECOMENDACIONES

Para respaldar el estudio se recomienda un análisis de la estructura interna de las probetas, haciendo uso de un microscopio o análisis de imagen, con la finalidad de comparar la presencia de vacíos y la calidad de unión entre capas con las propiedades mecánicas obtenidas.

Se sugiere extender el rango de temperaturas usadas en impresión para el estudio, tomando así intervalos mayores a los evaluados en esta investigación, debido a que la diferencia entre 200 °C y 205 °C no produjo cambios mecánicos significativos. De esta manera se pretende identificar con mayor precisión el efecto del cambio de temperatura sobre la resistencia, rigidez y deformación del material.

Evaluar el comportamiento del TPU 95A en ensayos de flexión o cargas cíclicas, debido a que este material suele usarse para otras aplicaciones donde se mantiene bajo carga. Esto permitiría caracterizar parámetros para condiciones reales de uso.

Se sugiere realizar un análisis comparativo que incluya indicadores de eficiencia, esto incluiría la resistencia en relación con el peso y el tiempo de impresión, permitiendo fundamentar de mejor manera la elección entre configuraciones que desean máxima resistencia (como zig zag al 80 %) y aquellas que optimizan material y tiempo (como giroide al 60 %).

Finalmente, los resultados experimentales se podrían respaldar con simulaciones computacionales para ayudar a predecir el comportamiento mecánico según el patrón y porcentaje de relleno, reduciendo la necesidad de múltiples ensayos físicos en futuras investigaciones.

Referencias

[1] G. Oertel, Polyurethane Handbook: Chemistry, Raw Materials, Processing, Application, Properties, 2nd ed, Hanser Publishers, 2013.

[2] M. V. U. Conumba, «Repositorio Digital, Escuela Politécnica Nacional» Mar. 2023. [En línea]. Available: https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/24345/1/CD%2013267.pdf.

[3] I. Karakurt y L. Lin, «3D printing technologies: techniques, materials, and postprocessing» *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 28, pp. 134–143, 2020.

[4] C. D. Palacios Herrera, «Análisis de defectología en procesos de manufactura aditiva FDM y su relación con las variables de proceso» Universidad Internacional SEK, 2022. [En línea]. Available: http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/4930. [Último acceso: 2025].

[5] X. Lin et *al*., «Desktop printing of 3D thermoplastic polyurethane parts with enhanced mechanical performance using filaments with varying stiffness,» *Additive Manufacturing*, vol. 47, Art. No. 102267, Nov. 2021.

[6] B. Adrover-Monserrat J. Rodríguez-Millán and J. Travieso-Rodríguez, «Study of the Influence of the Manufacturing Parameters on Tensile Properties of Thermoplastic Elastomers,» *Polymers*, vol. 14, no. 3, Art. no. 576, Jan. 2022.

[7] M. Iacob, D.Fillip, F. Buojoreanu, and D. M «Effect of Process Parameters on the Hardness of 3D-printed Thermoplastic Polyurethane that Includes Foaming Agent,» *Materiale Plastice*, vol. 61, no. 4, 2024.

[8] N. Ortega, B. Gámez, D. Ojeda, and V. Erazo, «Influence of Pattern and Infill Density on the Mechanical Strength of PLA and PETG Parts Printed by FDM.,» *Lecture Notes in Networks and Systems, part of the AENIT 2023 conference*, vol. 1134, pp. 285–293, 2024.

[9] I. R. A. Khan et *al*., «Investigation and Optimization of Processing Parameters Affecting the Mechanical Properties of Carbon Particle-Reinforced Thermoplastic Polyurethane Samples Fabricated via Fused Filament Fabrication,» *Journay of Materials. Engineering and Performance*, vol. 34, no. 4, pp. 567-575, Apr 2025.

[10] V. C. Guerrero, «Exploring the impact of 3D printing parameters on mechanical properties of ABS and PLA materials through machine learning analysis,» *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 12, no. 1, pp. 29-31, 2024.

[11] R. A. Cárdenas Yánez et *al.*, «Análisis de tracción de probetas impresas en 3d mediante deposición de hilo fundido PLA, ABS y TPU.,» *Revista Iberoamericana de Polímeros* , vol. 24, no 4, pp. 156-167.

[12] G. M. de Marcos, «Estudio de propiedades mecánicas en polímeros,» Escuela de ingeniería y Arquitectura, 2023.

[13] M. I. D. Guilcamaigua, «Construcción y Evaluación de parámetros óptimos para la Impresión 3D de

una prótesis mecánica de Mano Muñeca,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2023.

[14] J. V. González Sosa et *al.*, «Analysis of variance in additive manufacturing with 3D printing,» *DYNA-Universidad Nacional de Colombia,* vol. 90, pp. 167-175, Sep 2023.

[15] Innovación y Tecnología, «Impresión 3D por estereolitografía (SLA),» Oct.3, 2020. [En línea]. Available: https://innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/impresion-3d-por-estereolitografia-sla/.

[16] A. G. Ochoa, «Origen y Avance de la Impresion 3D,» *Ciencia,* vol. 1, pp. 24-28, 2020.

[17] M. Mukhtarkhanov, A. Perveen, and D. Talamona, «Application of Stereolithography Based 3D Printing Technology in Investment Casting,» *Micromachines,* vol. 11, no. 10, Art. no 946, Oct. 2020.

[18] J. Kechagias, P. Stavropoulos, A. Koutsomichalis, and N. Vaxevanidis, «Dimensional Accuracy Optimization of Prototypes produced by PolyJet Direct 3D Printing Technology,» *Advances in Engineering Mechanics and Materials,* no 978, pp. 61-65, 2014.

[19] P. DudeK, «FDM 3D Printing Technology in Manufacturing composite elements,» *Archives of Metallurgy and Materials,* vol. 58, no. 4, pp.1415-1418, 2013.

[20] K. Haghsefat and L.Tavakoli., «FDM 3D Printing Technology and Its Fundemental properties,» *International Conference on innovation and Research in Engineering Sciences*, 2020.

[21] J. Hiemenz, «La Impresion 3D con FDM: ¿Cómo funciona?,» *PIXEL SISTEMAS-Stratasys Inc,* p. 5.

[22] P. B. Pellicer, «Modelado e impresión 3D como recurso didáctico en el aprendizaje de la probabilidad,» *Revista de Educación Matemática,* vol. 34, no 95, pp. 99-106, 2017.

[23] E. Torres Barahona, J. Moreno, M. Delgado, «Sistema de posicionamiento aplicado a la técnica de impresión 3D modelado por deposición fundida,» *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación,* vol. 3, no. 1, pp. 25-32, 2012.

[24] J. P. Villar, Estudio y caracterización de materiales utilizados para la construcción de prótesis impresas mediante tecnología FDM., Trabajo Fin de Master, Madrid, España, 2019.

[25] S. Kumar Vishwakarma et *al.*, «Characterization of ABS Material: A Review,» *Journal of Research in Mechanical Engineering,* vol. 3, no 5, pp. 13-16, 2017.

[26] L. Serna, «Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones,» Ingeniería *y Competitividad,* vol. 5, no 1, 2003.

[27] A. Frick and A. Rochman, «Characterization of TPU-elastomers by thermal analysis (DSC),» *Polymer Testing,* vol. 23, no 4, pp. 413-417, 2004.

[28] J. M. Barrios Rodríguez, Mejora de las características superficiales de piezas obtenidas mediante fabricación aditiva, Córdoba, España: UCOPress, 2023.

[29] M. A. Salazar Guilcamaigua, Impresión 3D desde el diseño hasta la realidad, Guayaquil, Ecuador:

EXCED, 2024.

[30] B. M. Rodríguez, «Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM,» Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona, España, 2017.

[31] B. Adrover et *al.*, «Análisis de la formación de uniones inter e intra capa en termoplásticos elastoméricos procesados por la técnica de Impresión 3D de extrusión de material,» in Actas del XV Congreso Iberoamericáno de Ingeniería Mecánica, Madrid,España, pp. 1-8, Nov 2022.

[32] G. L. Velázquez, Resistencia a Compresión de probetas fabricadas en PLA con distinto relleno, Trabajo de Fin de Grado, Universidad de La Laguna, San Cristóbal de La Laguna, España, 2022.

[33] J. A. Acosta Camacho et *al.*, «Comparación tecnológica de patrones de relleno en impresión 3D por extrusión usando simulación,» Trabajo de Titulación Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil,Ecuador, 2021.

[34] A. Garcia et *al*, «Influencia de la dirección de impresión y el espesor de pared en las propiedades químicas, estructurales y superficiales en probetas de poliamida Nylon Pa 12 manufacturadas por Sinterizado Laser Selectivo,» in *Memorias del XXIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, no. 64, pp. 2954-4734, 2023.

[35] A. Mínguez et *al.*, «Determinación de la influencia en las características dimensionales de las piezas fabricadas en impresoras 3D de temperatura, velocidad de impresión y altura de capa durante la fabricación,» *Researchgate*, 2022.

[36] N. Rodiguez Torres et *al*, «Caracterización de las propiedades mecánicas a tensión y compresión de materiales celulares en HIPS y TPU obtenidos por fabricación de filamento fundido,» Trabajo de Grado Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2021.

[37] J. A. F. Alvear, Caracterización mecánica y térmica de TPU (Thermoplastic Polyurethane) para impresión 3D del guardapolvo de palanca de cambios del Nissan Sentra B13, Trabajo e Titulación, Universidad Internacional SEK, Quito, 2023.

[38] J.A. Pineda Marín et *al.*, Mezclas de Poliuretano Termoplastico con Polipropileno, (ITM),Medellín, Colombia, 2019.

[39] L. S. Fernando, Obtención por extrusión térmica de filamento a base de un termoplástico de poliuretano (TPU) y residuos de madera (aserrín) para inyección aditiva, Tesis, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México, 2024.

[40] H. Integration, «Additive Manufacturing & Additive Electronics for Heterogeneous Integration,» *Heterogeneous Integration*, vol. 1, no. 1, pp. 1-114, 2024.

[41] Ultimaker, Ficha de datos técnicos TPU 95A, Ultimaker B.V, 2017.

[42] R. F. Faidallah et *al.*, «Effect of Different Standard Geometry Shapes on the Tensile Properties of 3D-Printed Polymer,» *Polymers*, vol. 15, no. 14, Art. No.3062, Jul. 2023.

[43] ISO, ISO 527-1: 2019 Plastics - Determination of tensile properties-Part1: General Principles.

Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2019.

[44] ASTM International, ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.

[45] ASTM International, ASTM D638-22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.

[46] J. Castro, L. G., and E.C., «La investigación aplicada y el desarrollo experimental en elfortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI,» *Tecnura*, vol. 27, no. 75, pp. 140-174, 2023.

[47] F. A. Odón, «Investigación documental, investigación bibliométrica y revisiones,» *REDHECS*, vol. 22, no. 22, 2023.

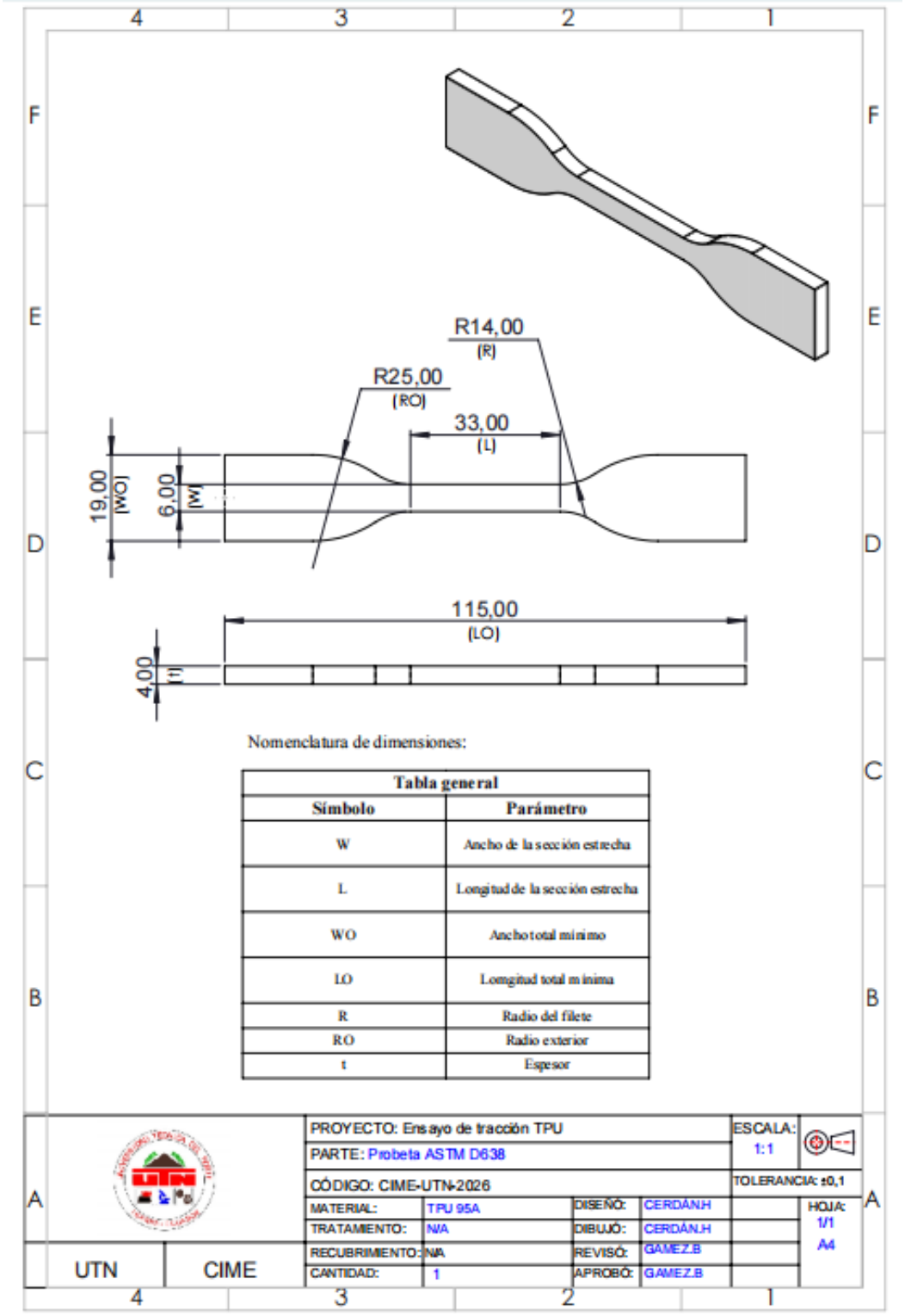
[48] G. Alban, A. Arguello and N. Molina, «Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción),» *RECIMUNDO*, vol. 4, no. 3, pp. 163-173, 2020.

[49] C. R. Galarza, «Diseños de Investigación Experimental,» *CienciAmerica*, vol. 10, no. 1, pp. 1-7, 2021.

[50] R. Cruz, «Metodologia de desarrollo en cascada y su similitud con la estructura del proyecto,» ResearchGate, Jun. 17, 2020. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-51-Metodologia-de-desarrollo-en-cascada-y-su-similitud-con-la-estructura-del_fig13_311535227.

ANEXOS

A. PLANO DE FABRICACIÓN DE LA PROBETA TIPO IV.



Nomenclatura de dimensiones:

Tabla general	
Símbolo	**Parámetro**
W	Ancho de la sección estrecha
L	Longitud de la sección estrecha
WO	Ancho total mínimo
LO	Longitud total mínima
R	Radio del filete
RO	Radio exterior
t	Espesor

UTN	CIME	PROYECTO: Ensayo de tracción TPU		ESCALA: 1:1	
		PARTE: Probeta ASTM D638			
		CÓDIGO: CIME-UTN-2026		TOLERANCIA: ±0,1	
		MATERIAL: TPU 95A	DISEÑÓ: CERDÁN.H		HOJA: 1/1 A4
		TRATAMIENTO: N/A	DIBUJÓ: CERDÁN.H		
		RECUBRIMIENTO: N/A	REVISÓ: GAMEZ.B		
		CANTIDAD: 1	APROBÓ: GAMEZ.B		

B. SCRIPT DE MATLAB PARA EL CÁLCULO DEL ÁREA EFECTIVA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL.

```
%% Cálculo del área efectiva de la sección transversal
% Probetas ASTM D638 Tipo IV impresas en TPU

clear; clc; close all;

W = 6;
t = 4;

A_g = W * t;

h_c = 0.2;
n_c = 8;

e_w = 0.8;

A_s = W * (n_c * h_c);

h_i = t - (n_c * h_c);

A_w = 2 * (e_w * h_i);

A_c = A_s + A_w;

relleno = [0.40 0.60 0.80];

A_r = relleno .* (A_g - A_c);

A_e = A_c + A_r;

Resultados = table( ...
    relleno'*100, ...
    A_c*ones(length(relleno),1), ...
    A_r', ...
    A_e', ...
    'VariableNames', ...
    {'Relleno_porcentaje','A_c_mm2','A_r_mm2','A_e_mm2'});

disp(Resultados)
```

C. FICHA TÉCNICA DEL FILAMENTO TPU 95A SUNLU.

SUNLU

TPU

广东三绿 2024.04.02 受控文件

Product features:
It has good flexibility and a rubber-like texture
Multiple colors

Main applications:
Ornaments, toys, ornaments, handcrafts

Points for attention:

Properties	Test Method	Test Condition	S.I. Units	Typical Values
Mechanical				
Tensile Strength (X-Y)	ISO527/2	50mm/min	MPa	34.4
Young' s Modulus (X-Y)	ISO527/2	1mm/min	MPa	50.2
Elongation at break (X-Y)	ISO527/2	50mm/min	%	1063
Flexural Strength (X-Y)	ISO178	2mm/min	MPa	4.26
Flexural Modulus (X-Y)	ISO178	2mm/min	MPa	87.6
IZOD Impact Notched (X-Y)	ISO180	23℃	KJ/m^2	不破坏
IZOD Impact Notched (Z-X)	ISO180	23℃	KJ/m^2	/
Shore hardness	ISO868	23℃	HD	95
Thermal				
Heat Deflection (HDT)	ISO75	0.45MPa	℃	52
Glass Transition(Tg)	ISO11357-3	10℃/min	℃	/
Melting Point	ISO11357-3	10℃/min	℃	/
@5%Decomposition Temp.	ISO11358	20℃/min	℃	≥300
Vicat Softening Temp.	ISO306	5kg,50℃/h	℃	/
Mold Shrinkage	ISO294	23℃	%	/
Coefficient of Thermal Exp.	ISO11359-2		μm (m·℃)	/
Others				
Melt Flow Rate	ISO1133	190℃/2.16kg	g/10min	23.5
Density	ISO1183	23℃	g/cm^3	1.23
Volume Resistivity	IEC60093	-	ohm-cm	$1.05*10^{12}$
Dielectric Constant	IEC60250	1kHz		3.4
Flammability	UL94	1.5mm	Class	HB
Chemical resistance				
Item			Class	
Weak Acid (pH 3-6)			Poor	
Strong Acid (pH<3)			Poor	
Weak Bases (pH 8-10)			Good	
Strong Bases (pH >10)			Good	
Deionized Water			excellent	
Alcohol			Good	
Ketone			Poor	
Petroleum Fuels			Good	

Documento completo: Sunlu TPU Data Sheet - SpoolScout

D. REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.



Fig D. 1 *Maquina universal de ensayos utilizada para las pruebas de tracción.*



Fig D. 2 *Colocación de la probeta ASTM D638 Tipo VI en las mordazas de la máquina.*

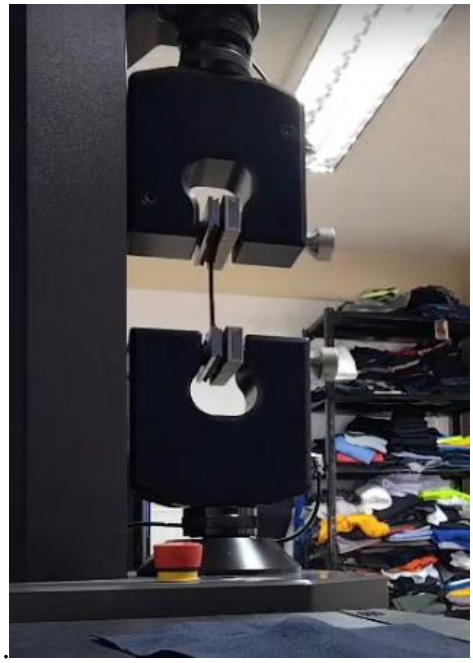


Fig D. 3 *Inicio del ensayo de tracción.*



Fig D. 4 *Probeta durante la aplicación de la carga.*



Fig D. 5 *Fractura de la probeta al finalizar el ensayo de tracción*