

## ANÁLISIS DE TRACCIÓN DE PROBETAS IMPRESAS EN 3D MEDIANTE DEPOSICIÓN DE HILO FUNDIDO PLA, ABS Y TPU

Rodrigo Andrés Cárdenas-Yáñez<sup>1\*</sup>, Mónica Janeth Guzmán-Cachiguango<sup>2</sup>, Mauricio Medardo Panamá-Panamá<sup>3</sup>, Luis Marcelo Arellano-Rodríguez<sup>4</sup>

1 Universidad de Investigación e Innovación de México (UIIX), México. [rcardenasy@comunidad.uiix.edu.mx](mailto:rcardenasy@comunidad.uiix.edu.mx)

2 Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. [monica.guzman@epn.edu.ec](mailto:monica.guzman@epn.edu.ec)

3 Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia, Ecuador. [mauriciopanama@itscv.edu.ec](mailto:mauriciopanama@itscv.edu.ec)

4 Ministerio de Educación de la República del Ecuador, Ecuador. [luism.arellano@educacion.gob.ec](mailto:luism.arellano@educacion.gob.ec)

Recibido: Septiembre 2023; Aceptado: Octubre 2023

### RESUMEN

Los materiales poliméricos, y especialmente los plásticos, tienen una amplia, constante y creciente aplicación en disímiles sectores de la industria y la vida cotidiana. El objetivo de esta investigación es establecer las propiedades mecánicas, mediante ensayos experimentales de esfuerzo a tracción, del material ácido poliláctico (PLA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y poliuretano termoplástico (TPU) utilizando probetas impresas en 3D mediante el proceso de deposición de hilo fundido. Las dimensiones de la probeta fueron modeladas y posteriormente impresas a partir de lo recomendado por la norma ASTM D638-14. El comportamiento de los materiales analizados tiene una amplia variabilidad; se observa que el ABS presenta el mayor valor del máximo esfuerzo tensional (MET) que es de 38,685 MPa y una elongación de 9,905 %. El PLA tiene un MET de 29,583 MPa y presentó una elongación de 5,496 %, este comportamiento está cercano a la fragilidad. En el caso de TPU presenta una alta capacidad de elongación con un valor de 142,310 % y un MET de 12,128 MPa. Se concluye que los ensayos experimentales de esfuerzo a tracción pura, desarrollados en esta investigación, de los materiales PLA, ABS y TPU obtenidos mediante la impresión 3D, permitieron caracterizarlos mecánicamente de manera particularizada.

**Palabras Clave:** Plásticos, Impresión 3D, Ensayos de tensión.

### ABSTRACT

Polymeric materials, and especially plastics, currently have a wide, constant and growing application in dissimilar sectors of industry and daily life. The objective of this research is to establish the mechanical properties, through tensile stress experimental tests, of polylactic acid (PLA), Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and thermoplastic polyurethane (TPU) material using 3D printed specimens through the molten wire deposition process. The specimen's dimensions were modeled and later printed based on the recommendations of ASTM D638-14 standard. The materials analyzed behavior has a wide variability; it is observed that the ABS presents the highest value of the maximum tensile stress (MTS) which is 38,685 MPa and an elongation of 9,905 %. The PLA has a MTS of 29,583 MPa and presented an elongation of 5,49 %, a behavior close to brittleness. In the case of TPU, it has a high elongation capacity with a value of 142,310 % and a MTS of 12,128 MPa. The experimental tests of pure tensile stress, developed in this research, of the PLA, ABS and TPU materials obtained through 3D printing, allowed them to be characterized mechanically in a particular way.

**Keywords:** Plastics, 3D printing, Stress test.

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido a sus múltiples propiedades, únicas y diversas, los polímeros han reemplazado de manera creciente a los componentes metálicos en aplicaciones como automóviles, aeronaves civiles y militares, artículos deportivos, juguetes, electrodomésticos y equipo de oficina [1].

Las cada vez mejores propiedades mecánicas de algunos plásticos permiten importantes reducciones de peso tanto directas como indirectas (la reducción del peso de los componentes sustituidos posibilita la disminución de los requerimientos exigidos a otros componentes metálicos) [2].

El moldeo de inyección del plástico es uno de los métodos más importantes en la industria de procesamiento de los polímeros [3]. En ese sentido, Suárez *et al.* [4] consideran que en el ámbito

global es de gran relevancia y de constante análisis la industria de los plásticos y, por consiguiente, el proceso de moldeo por inyección, que es el más común en el procesamiento de piezas creadas en materiales termoplásticos.

Sin embargo, la impresión 3D se ha convertido en una tecnología que ofrece una alternativa viable a la obtención de piezas de plástico. De acuerdo a Varela-Aldás [5] la impresión 3D ha ganado espacio en los últimos años, esto debido a la reducción de costos y la flexibilidad de diseño. La impresión 3D es un método de fabricación utilizado por diseñadores, científicos, ingenieros, estudiantes, etcétera. Debido a las grandes ventajas que posee con respecto a otras técnicas de manufactura, en la actualidad se utiliza en todas las áreas del conocimiento para el desarrollo de prototipos, partes y piezas [6].

Los plásticos presentan una alta gama de propiedades mecánicas a temperatura ambiente, entre las características que pueden ser deseables o no (lo que depende de la aplicación), se encuentran: baja resistencia y rigidez, alto coeficiente de expansión térmica, gama de temperatura útil baja, y menor estabilidad dimensional en servicio por cierto periodo [1].

El diseño de máquinas y estructuras para que funcionen apropiadamente requiere la comprensión del comportamiento mecánico de los materiales empleados. En general, la única forma para determinar cómo se comportan los materiales cuando se someten a cargas es realizar experimentos en el laboratorio. El procedimiento usual es colocar muestras pequeñas del material en máquinas de ensayo, aplicar las cargas y luego medir las deformaciones resultantes [7]. En tal sentido, los materiales plásticos son ensayados para establecer las propiedades mecánicas de manera particularizada, tanto de piezas plásticas fabricadas por inyección, como las piezas que se obtienen a partir de la impresión 3D.

El ensayo mecánico de materiales plásticos ha sido ampliamente estudiado, en tal sentido existen autores como Meza-de Luna *et al.* [8] que en su investigación analizan el comportamiento mecánico de plásticos, provenientes de residuos urbanos, mediante ensayos experimentales de tracción, haciendo uso de una máquina universal Shimadzu®. Con el propósito de estudiar materiales comunes, se emplearon botellas para aderezo, de agua y de leche, las cuales fueron cortadas y calibradas para ser sometidas a tensión.

Sin embargo, los materiales plásticos obtenidos mediante la impresión 3D aún constituyen un reto para los investigadores, pues la variabilidad de los parámetros del proceso de impresión constituye una fuente importante en la incertidumbre de las propiedades mecánicas de dichos materiales. Es así que, Alvarez *et al.* [6], analizan la influencia del porcentaje de relleno en la resistencia a la tracción de piezas fabricadas en ABS, con una impresora Makerbot Replicator 2X. Con tal propósito, los autores imprimieron probetas para ensayos de tracción, variando el porcentaje de relleno y

manteniendo los demás parámetros constantes. Luego fueron ensayadas y de esta manera se logró obtener la propiedad mecánica de resistencia a la tracción.

En ese mismo orden, Ruiz-Domínguez *et al.* [9] en su investigación proponen un estudio de las propiedades mecánicas de esfuerzo y deformación de partes fabricadas con FDM (del inglés *Fused Deposition Modeling*) con el fin de establecer reglas de fabricación de estas partes con este tipo de proceso en particular. Para lo cual emplean, como pasos metodológicos: la impresión 3D de probetas de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM-D698, la realización de ensayos de tensión efectuados en una máquina universal y el registro de los datos generados, luego desarrollan el análisis estadístico de los datos obtenidos y finalmente, se procede a una comparación contra los valores conocidos de las propiedades mecánicas del ABS.

Un procedimiento similar al anterior es propuesto por Martins-Galina *et al.* [10], quienes analizan las propiedades mecánicas del material ABS, y realizan experimentos de tracción haciendo uso de una máquina universal de ensayos EMIC–DL 10.000. Las muestras del material ABS fueron obtenidas mediante fabricación aditiva por medio de impresión 3D con tecnología de FDM con diferentes grosores de la capa.

De igual manera, autores como Alvarenga-Salinas *et al.* [11], estudian la resistencia mecánica, mediante ensayos experimentales de tracción, de materiales poliméricos biodegradables fabricados con impresoras 3D. Las probetas fueron impresas al 15% de relleno en la estructura interna con filamentos de PLA comercial, dispuestos en distintos patrones geométricos de mallado de impresión, tales como: hexágonos, triángulos, cuadrados, entre otros.

Las investigaciones de los autores antes mencionados evidencian que la caracterización particularizada de las propiedades de los materiales poliméricos, obtenidos mediante la impresión 3D, es una necesidad investigativa de la industria de la manufactura debido a la influencia que sobre dichas propiedades tiene el proceso. En tal sentido, el objetivo de la presente investigación es establecer las propiedades mecánicas, mediante ensayos experimentales de esfuerzo a tracción, de los materiales PLA, ABS y TPU utilizando probetas impresas en 3D mediante el proceso de deposición de hilo fundido.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Obtención del diseño de la probeta para el ensayo a tracción**

Se desarrolla el diseño de una probeta mediante la utilización del software CAD SolidWorks 2022, haciendo uso de las operaciones básicas en dicho programa de diseño. El modelo CAD de la probeta obtenido (Ver Figura 1a), cumple con el dimensionamiento de las probetas para el ensayo a tracción de materiales poliméricos establecido en la norma ASTM D638-14 [12] (Ver Figura 1b).

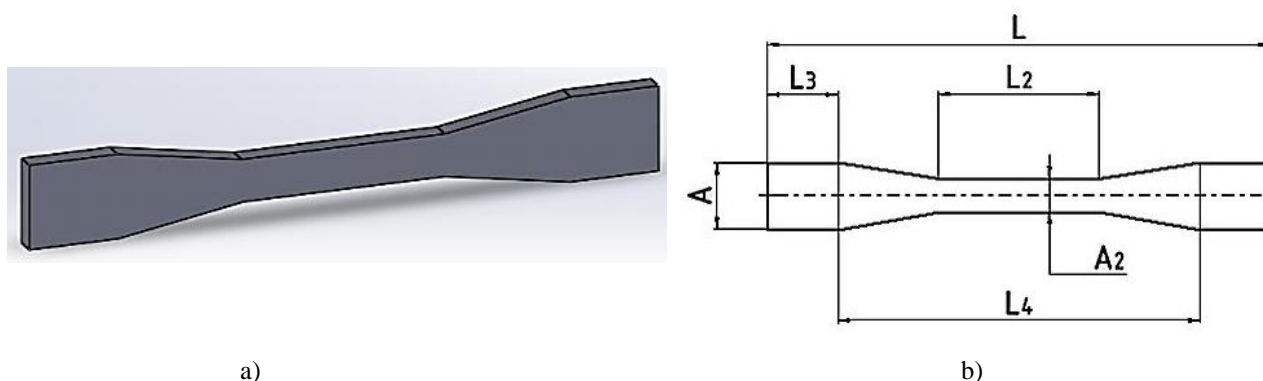


Figura 1. Obtención del modelo CAD de la probeta para el ensayo a tracción; a) Modelo CAD de la probeta y b) Dimensiones de acuerdo con la norma ASTM D638-14.

En la Tabla 1 se muestran las dimensiones establecidas por la norma de referencia, la cual es ampliamente utilizada como metodología de análisis para determinar las principales características mecánicas del material. La construcción geométrica de las muestras tiene como propósito localizar los esfuerzos en la zona central del espécimen de prueba, con lo cual se garantiza que la falla ocurra precisamente en esa área.

Tabla 1. Dimensiones de la probeta de ensayo a tracción de acuerdo con la norma ASTM D638.

| Dimensión      | Valor | Unidad de medida |
|----------------|-------|------------------|
| L              | 150   | mm               |
| L <sub>2</sub> | 48    | mm               |
| L <sub>3</sub> | 21    | mm               |
| L <sub>4</sub> | 108   | mm               |
| A              | 20    | mm               |
| A <sub>1</sub> | 10    | mm               |
| Espesor        | 3,6   | mm               |

## 2.2. Materiales utilizados en el ensayo experimental

Los materiales que se ensayan en esta investigación son de amplia utilización y acceso de la industria de manufactura. Según Samykano *et al.* [13] los filamentos de ABS y el PLA son los termoplásticos más ampliamente usados como materiales para la impresión por el proceso de FDM. Asimismo, Nofar *et al.* [14] plantea que el TPU es un polímero elastomérico con una combinación única de propiedades tales como una alta ductilidad, dureza, durabilidad, flexibilidad, biocompatibilidad y bioestabilidad.

## 2.3. Proceso de impresión en 3D de las probetas para el ensayo

Una vez terminado el diseño en el ambiente CAD, se procedió a exportar el archivo en formato STL (abreviatura del inglés *stereolithography*), que es un formato de archivo que permite la interoperabilidad entre los archivos informáticos que utilizan la tecnología CAD. Este formato es

ampliamente usado en el mundo de la impresión 3D y, prácticamente, todos los programas de dicha impresión soportan este formato.

Posteriormente, se emplea el programa *Ultimaker Cura* con el fin de dividir el archivo del modelo CAD en varias capas, en tal propósito se genera un código G de posicionamiento espacial, dicho código es empleado por la impresora 3D y sirve para la localización del cabezal de impresión respecto a las capas de la pieza. El código G se introduce en la impresora 3D por medio de un dispositivo de almacenamiento (Ver Figura 2).



Figura 2. Introducción del código G a la impresora 3D.

En el proceso de impresión en tres dimensiones se emplea una impresora marca Ender (Ver Figura 3). El patrón de impresión empleado es lineal, el cual posee líneas unidas y entrelazadas entre sí. La configuración de los parámetros para la impresión se muestra en la Tabla 2, es importante aclarar que dichos parámetros se mantuvieron invariables ante cada material impreso.

Tabla 2. Configuración de los parámetros para la impresión 3D.

| Parámetro                           | Valor | Unidad de medida |
|-------------------------------------|-------|------------------|
| Temperatura de impresión            | 200   | °C               |
| Temperatura de la cama de impresión | 60    | °C               |
| Velocidad                           | 50    | mm/s             |
| Altura de la capa                   | 0,12  | mm               |
| Retracción                          | 6-25  | mm/s             |
| Relleno                             | 20    | %                |

Un importante paso a realizar antes de imprimir es la calibración de la impresora y la carga de cada filamento de material a imprimir. El tiempo de impresión de las probetas oscila en un rango desde 40 min hasta 115 min de acuerdo con cada material, la probeta que menos tiempo de impresión consumió fue la de material de TPU, mientras que la que más tiempo consumió fue la de material PLA.

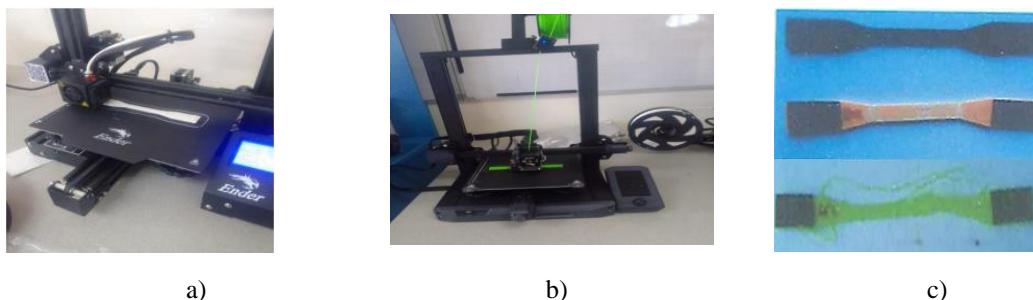


Figura 3. Proceso de impresión en 3D con impresora Ender; a) Impresión de la probeta de material PLA, b) Impresión de la probeta de material TPU y c) Probetas obtenidas mediante la impresión.

#### 2.4. Ensayo de tracción de los materiales

El ensayo de tracción de las probetas obtenidas mediante la impresión en 3D se realizó en el laboratorio del Centro Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero en la provincia de Tungurahua, Ecuador. Se empleó una máquina universal de ensayos electromecánicas MTE-10/25/50 Serie 8802M002 (Ver Figura 4), la cual tiene una avanzada y fiable estructura con un marco de ensayos electromecánico y 2 husillos de circulación a bolas.



Figura 4. Máquina de ensayos universal MTE-10/25/50 Serie 8802M002.

La máquina de ensayo cuenta con un sistema de control computarizado, el cual permite realizar el control en lazo cerrado de parámetros tales como: fuerza de ensayo, deformación de la probeta y recorrido del travesaño, etcétera. El sistema realiza en tiempo real, sobre la pantalla de la computadora asociada a la máquina de ensayos, diagramas, curvas y crea informes de los estudios realizados. Las características técnicas de la máquina de ensayo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características técnicas de la máquina de ensayos universal MTE-10/25/50 Serie 8802M002.

| Propiedades                | Valor                                     | Unidad de medida |
|----------------------------|---|------------------|
| Capacidad máxima de fuerza | 50  | kN               |
| Temperatura de ensayo      | 21,6                                      | °C               |
| Humedad relativa           | 53,6                                      | %                |
| Tipos de ensayos           | Tracción/Compresión/Flexión/Cizallamiento | ---              |
| Exactitud                  | ± 0,5                                     | %                |
| Software de ensayo         | METROTEST                                 | ---              |

El procedimiento para el ensayo estándar de las propiedades de tracción de los plásticos se realiza de acuerdo con la norma ASTM D638-14. Las probetas de cada material estudiado se fijan a los cabezales de la prensa. En la Tabla 4 se muestra las características del ensayo a tracción realizado a las probetas de los tres materiales de estudio.

Tabla 4. Características del ensayo a tracción realizado a las probetas de los tres materiales de estudio

| Número de probetas | Material | Velocidad | Probetas a ensayar |
|--------------------|----------|-----------|--------------------|
| 1                  | PLA      | 5 mm/min  | 5                  |
| 2                  | ABS      | 5 mm/min  | 5                  |
| 3                  | TPU      | 5 mm/min  | 5                  |

Una vez finalizado el proceso de tracción, es decir, cuando el material cede y se produce una rotura, el programa de la máquina universal genera otro archivo con la gráfica respectiva al proceso de tracción y también en una tabla con datos relevantes para el posterior análisis de las pruebas realizadas.

### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Las muestras de los plásticos fueron ensayadas a tracción pura, durante el proceso de ensayo se observa que la rotura ocurrió en la zona central de todas las probetas estudiadas. La caracterización del comportamiento mecánico se expresa en los diagramas de tensión-elongación.

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los valores de tensión y elongación de los ensayos realizados a las muestras de material PLA, para lo cual se tomaron ocho valores ascendentes de la elongación en los cinco ensayos y su correspondiente valor tensional. Finalmente, se muestra el valor de tensiones medio concerniente a los cinco ensayos, a partir del cual se construyó el diagrama de la Figura 5.

Tabla 5. Valores de tensión y elongación en los ensayos a tracción del material PLA.

| Elongación (%) | Tensiones del ensayo 1 (MPa) | Tensiones del ensayo 2 (MPa) | Tensiones del ensayo 3 (MPa) | Tensiones del ensayo 4 (MPa) | Tensiones del ensayo 5 (MPa) | Tensiones promedio (MPa) |
|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,132          | 0,235                        | 0,231                        | 0,232                        | 0,229                        | 0,234                        | 0,232                    |
| 1,144          | 3,217                        | 3,218                        | 3,221                        | 3,215                        | 3,219                        | 3,218                    |
| 2,096          | 9,644                        | 9,642                        | 9,640                        | 9,646                        | 9,641                        | 9,643                    |
| 3,049          | 16,711                       | 16,712                       | 16,715                       | 16,713                       | 16,715                       | 16,713                   |
| 4,008          | 23,011                       | 23,013                       | 23,012                       | 23,010                       | 23,014                       | 23,011                   |
| 5,349          | 29,584                       | 29,584                       | 29,580                       | 29,583                       | 29,586                       | 29,583                   |
| 5,496          | 24,621                       | 24,624                       | 24,620                       | 24,625                       | 24,622                       | 24,622                   |
| 5,505*         | 0,081*                       | 0,083*                       | 0,0811*                      | 0,0814*                      | 0,0815*                      | 0,082*                   |

\*Valores de tensión-deformación resistivamente irrelevantes al ya alcanzarse el punto de rotura.

La falla, ante el esfuerzo de tracción en la probeta del material PLA, tiene un comportamiento cercano a la fragilidad, pues se observa una escasa deformación plástica. El comportamiento, antes descrito, de la probeta estudiada muestra un MET de 29,583 MPa y una elongación de 5,349 %. Mientras, muy cerca del punto del MET, se encuentra el límite de rotura, con un valor de 24,622 MPa y una elongación de 5,496 %.

El comportamiento resistivo del material PLA muestra la cercana proximidad entre los valores del MET y el límite de rotura, lo cual provoca que las piezas fabricadas con este material presenten la peculiaridad de fallar de manera súbita, sin presentar una deformación plástica.

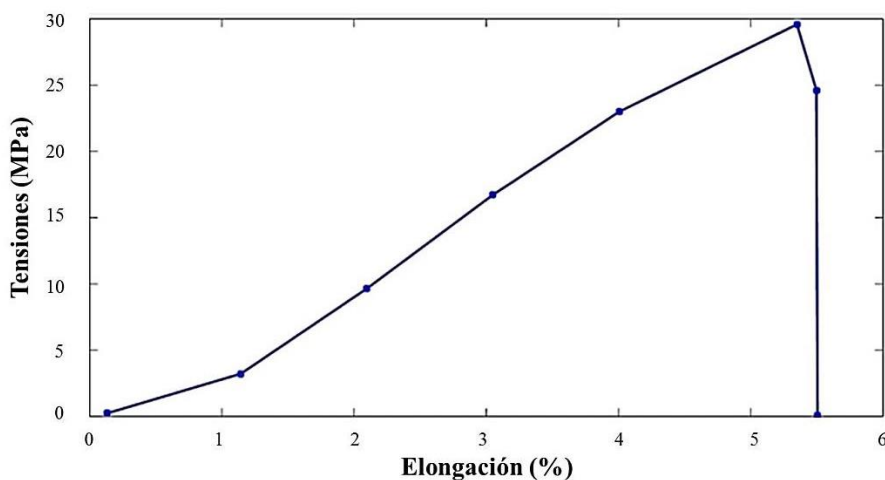


Figura 5. Gráfico de tensión-elongación de la probeta del material PLA.

En la Tabla 6 se muestran los resultados de los valores de tensión y elongación de los cinco ensayos de tracción realizados a las muestras de las probetas del material ABS.



Tabla 6. Valores de tensión y elongación en los ensayos a tracción del material ABS.

| Elongación (%) | Tensiones del ensayo 1 (MPa) | Tensiones del ensayo 2 (MPa) | Tensiones del ensayo 3 (MPa) | Tensiones del ensayo 4 (MPa) | Tensiones del ensayo 5 (MPa) | Tensiones promedio (MPa) |
|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,005          | 0,026                        | 0,024                        | 0,028                        | 0,021                        | 0,025                        | 0,025                    |
| 1,307          | 5,806                        | 5,807                        | 5,801                        | 5,804                        | 5,805                        | 5,805                    |
| 2,502          | 14,869                       | 14,872                       | 14,867                       | 14,868                       | 14,870                       | 14,869                   |
| 6,076          | 36,314                       | 36,315                       | 36,318                       | 36,311                       | 36,312                       | 36,314                   |
| 6,811          | 38,685                       | 38,689                       | 38,682                       | 38,685                       | 38,684                       | 38,685                   |
| 7,726          | 37,141                       | 37,145                       | 37,143                       | 37,142                       | 37,146                       | 37,143                   |
| 9,905          | 33,393                       | 33,390                       | 33,391                       | 33,395                       | 33,392                       | 33,392                   |
| 10,047*        | 7,974*                       | 7,971*                       | 7,974*                       | 7,975*                       | 7,978*                       | 7,974*                   |

\*Valores de tensión-deformación resistivamente irrelevantes al ya alcanzarse el punto de rotura.

El comportamiento resistivo de la probeta del material ABS es consistente con el de un material dúctil (Ver Figura 6). En la curva están claramente definidas la región elástica (el desplazamiento del material tiene un comportamiento de proporcionalidad lineal con los valores tensionales) y la región plástica (no existe proporcionalidad lineal entre los valores tensionales y el desplazamiento).

El MET observado es de 38,685 MPa ante a un valor de elongación de 6,811 %; luego de este punto existe un comportamiento plástico en el material, la probeta se va alargando. Es así que el valor del límite de rotura es de 33,392 MPa, esta magnitud es alcanzada con un valor de elongación de 9,905 %.

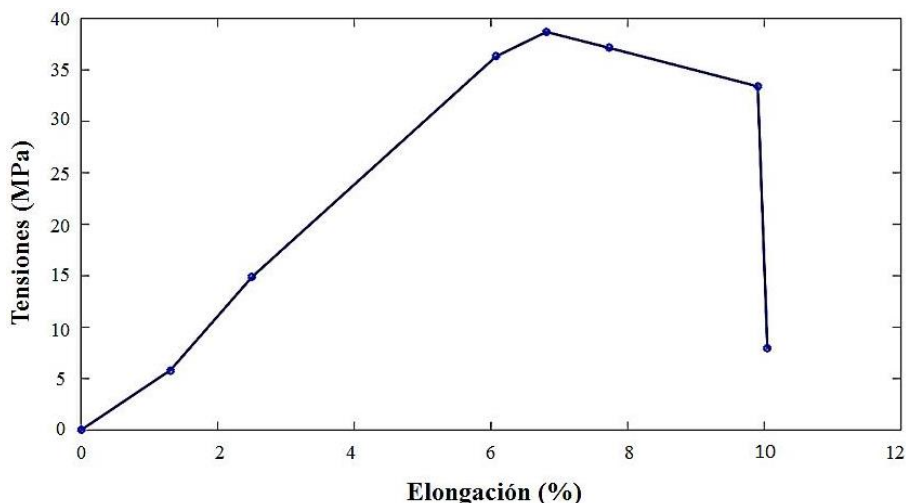


Figura 6. Gráfico de tensión- elongación de la probeta de material ABS.

En la Tabla 7 se observa los resultados de los valores de tensiones y deformación de los ensayos realizados a la probeta del material TPU.

Tabla 7. Valores de tensión y elongación en los ensayos a tracción del material TPU.

| Elongación (%) | Tensiones del ensayo 1 (MPa) | Tensiones del ensayo 2 (MPa) | Tensiones del ensayo 3 (MPa) | Tensiones del ensayo 4 (MPa) | Tensiones del ensayo 5 (MPa) | Tensiones promedio (MPa) |
|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 0,015          | 0,008                        | 0,008                        | 0,007                        | 0,008                        | 0,009                        | 0,008                    |
| 9,699          | 1,275                        | 1,281                        | 1,278                        | 1,275                        | 1,279                        | 1,277                    |
| 24,028         | 2,393                        | 2,394                        | 2,391                        | 2,388                        | 2,392                        | 2,392                    |
| 58,037         | 4,256                        | 4,259                        | 4,259                        | 4,255                        | 4,260                        | 4,258                    |
| 100,590        | 7,817                        | 7,817                        | 7,817                        | 7,818                        | 7,816                        | 7,817                    |
| 136,751        | 12,126                       | 12,127                       | 12,131                       | 12,127                       | 12,126                       | 12,128                   |
| 142,310        | 11,924                       | 11,920                       | 11,923                       | 11,926                       | 11,922                       | 11,923                   |
| 142,323*       | 0,592*                       | 0,591*                       | 0,591*                       | 0,594*                       | 0,593*                       | 0,592*                   |

\*Valores de tensión-deformación resistivamente irrelevantes al ya alcanzarse el punto de rotura.

En cuanto a la probeta del material TPU, esta presenta una gran capacidad de elongación en comparación a los materiales previamente analizados (Ver Figura 7), el valor de la elongación promedio es de 136,751 % en el MET, el cual es de 12,128 MPa. De igual manera, se aprecia que el valor del límite de rotura del material, que es de 11,923 MPa con una elongación de 142,310 %, se encuentra bastante próximo al MET.

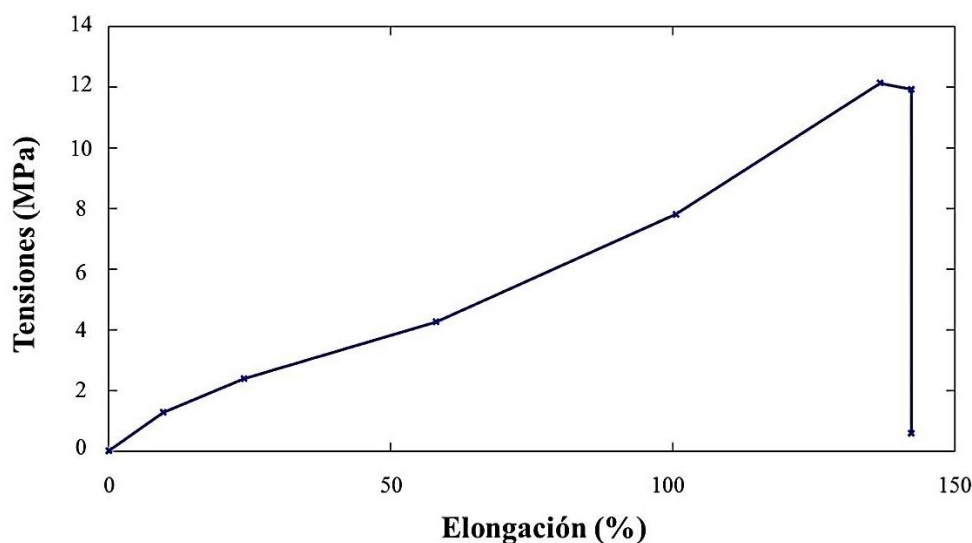


Figura 7. Gráfico de tensión-elongación de la probeta del material TPU.

En la Tabla 8 se muestran los resultados de las propiedades mecánicas que son determinadas en los ensayos de tracción a las probetas y, de igual manera, se proporcionan los resultados que se determinan mediante cálculos analíticos recopilados a partir de los ensayos.

Tabla 8. Resultados de los experimentos de los ensayos a tracción de los materiales PLA, ABS y TPU.

| Material | Fuerza máxima (N) | Fuerza de rotura (N) | Tensión máxima (MPa) | Tensión de rotura (MPa) | Elongación total (%) | Desplazamiento máximo (mm) |
|----------|-------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|
| PLA      | 998,05            | 980,01               | 29,583               | 24,622                  | 5,496                | 3,664                      |
| ABS      | 1 390,07          | 1 202,06             | 38,685               | 33,392                  | 9,905                | 6,603                      |
| TPU      | 384,02            | 378,02               | 12,128               | 11,923                  | 142,310              | 363,465                    |

En este análisis comparativo se observa que el material de mayor resistencia mecánica es el ABS, pues se evidencia que tiene el mayor valor del MET, con respecto a las otras probetas de los materiales ensayados.

Existen autores como Alvarez *et al.* [6] y Samykano *et al.* [13] que determinaron que el MET para este material se encuentra en el rango entre 30 MPa y 35 MPa; en ese rango se encuentra circunscripto el valor del MET determinado en esta investigación. Es importante establecer que el comportamiento de la curva de esfuerzo-deformación de las probetas ABS tiene dos zonas claramente definidas: la zona elástica, donde ocurre una variación lineal del esfuerzo tensional proporcional a la elongación, y la zona plástica donde existe una elongación no proporcional al esfuerzo tensional.

Por otro lado, el material de la probeta de PLA presenta unos adecuados valores de resistencia mecánica (límite de rotura y MET), similares a los del material ABS, sin embargo, la elongación de la probeta es inferior.

Para autores como Alvarenga-Salinas *et al.* [11], en su investigación plantean que los valores del MET promedio son de 25,1 MPa en las probetas de PLA obtenidas a partir de la impresión 3D y analizadas mediante ensayos de tracción. El valor tensional reportado por los autores difiere en 4,483 MPa con respecto al determinado en esta investigación. De igual manera, los autores establecen que no se observa una zona definida de plasticidad en el diagrama de tensión-deformación.

En el caso del material TPU es apreciable el alto valor de elongación que presenta la probeta en el ensayo realizado, sin embargo es de destacar el bajo valor de resistencia tensional a la rotura. Este resultado es coincidente con lo planteado y analizado por Xu *et al.* [15]. Por lo que, este material es recomendable utilizarlo en piezas de poca responsabilidad resistiva.

#### 4. CONCLUSIONES

Los ensayos experimentales de esfuerzo a tracción pura, desarrollados en esta investigación, de los materiales PLA, ABS y TPU obtenidos mediante la impresión 3D, permitieron caracterizarlos mecánicamente de manera particularizada.

El material, de los estudiados en esta investigación, de mayor resistencia mecánica es el ABS debido a que tiene el mayor valor de tensión que es de 38, 685 MPa y las zonas de elasticidad y plasticidad están claramente definidas, con una elongación de 9,905 %. El material PLA tiene un MET de 29,583 MPa y un valor de elongación de 5,496 %; comportamiento cercano a la fragilidad. El material TPU tiene un MET de 12,128 MPa y una alta capacidad de elongación con valor de 142,310 %.

El tipo de filamento influye de manera significativa en las propiedades mecánicas del material obtenido a partir del proceso de impresión 3D, mediante deposición de hilo fundido, independientemente de los parámetros de dicho proceso.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kalpakjian, S. y Schmid, S.R., "Manufactura, Ingeniería y Tecnología", Pearson Educación, México (2008)
2. Aretxabalea, L., Aurrekoetxea, J., Urrutibascoa, I., Mateos, M., y Castillo, G., "Simulación de ensayos de impacto tracción sobre probetas de plástico mediante el Método de Elementos Finitos", Anales de la Mecánica de Fractura 1, 251-256 (2007)
3. Ozcelik, B., Kuram, E., y Topal, M.M., "Investigation the effects of obstacle geometries and injection molding parameters on weld line strength using experimental and finite element methods in plastic injection molding", International Communications in Heat & Mass Transfer 39, 275-281 (2012)
4. Suárez, A., Tafur, W., y Calderón, P., "Aplicación de herramientas CAD/CAM para el diseño y fabricación de prototipos de moldes de inyección de plásticos", Tecnura 19, 115-121 (2015)
5. Varela-Aldás, J., "Impresión 3D y COVID-19", CienciAmérica 9, 1-7 (2020)
6. Alvarez, K., Lagos, R., y Aizpun, M., "Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM)", Ingeniare. Revista chilena de ingeniería 24, 17-24 (2016)
7. Gere, J. y Goodno, B., "Mecánica de materiales", Cengage Learning, México (2009)
8. Meza-de Luna, A., Moreno-Virgen, R., Beltrán-García, C.A., Martínez- Domínguez, J.A., Villarreal-Varela, C.D., y Cardona-Avalos, L.F., "Comportamiento mecánico del plástico proveniente de residuos urbanos con carga de tensión", Conciencia Tecnológica (2017)
9. Ruiz-Domínguez, G.A., Rivera-Landaverde, R.U., Orrantia-Daniel, G., Tellez-Moroyoqui, M.d.J., y Valenzuela-Martínez, Á.A., "Estudio de esfuerzo y deformación de piezas de impresión 3D", Conciencia Tecnológica 57, 1-9 (2019)
10. Martins-Galina, D., Pereira-Garcia, D., Gonçalves de Souza, G., Resende da Silva, L.R., y Maziero, R., "Caracterización de las propiedades mecánicas de los cuerpos de prueba ABS confeccionados con diferentes parámetros de extrusión vía impresión 3D", Revista Iberoamericana de Polímeros 17, 303-309 (2016)
11. Alvarenga-Salinas, G.A., Giangreco, E., Bobadilla, W., Sastoque, J., Sánchez, C., y Maíz, M., "Caracterización mecánica de materiales con matrices biodegradables impresas en 3D", Investigaciones y Estudios-UNA 13, 3-15 (2022)
12. ASTM, "Norma internacional de métodos estándar de pruebas para las propiedades de tracción de los plásticos", in D638-14. (2015), Departamento de Defensa: Estados Unidos.
13. Samykano, M., Selvamani, S.K., Kadirgama, K., Ngui, W.K., Kanagaraj, G., y Sudhakar, K., "Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters", International Journal of Advanced Manufacturing Technology 102 (2019)
14. Nofar, M., Mohammadi, M., y Carreau, P.J., "Effect of TPU hard segment content on the rheological and mechanical properties of PLA/TPU blends", Journal of Applied Polymer science e49387, 1-11 (2020)
15. Xu, T., Shen, W., Lin, X., y Xie, Y.M., "Mechanical properties of additively manufactured thermoplastic polyurethane (TPU) material affected by various processing parameters", Polymers 12, 1-16 (2020)