

Materiales para impresión 3D: Análisis de resistencia mecánica y comportamiento bajo carga frente a estados de sollicitación simple.

Matías Orué, Rodrigo Leurino, Martín Bär, Ian Carbonel Medina.

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Fe

GIEDI (Grupo de Investigación para la Enseñanza de Ingeniería)

Correo Electrónico: giedifrsfutn@gmail.com

Dirección: Lavaisse 610, (CP 3000) Santa Fe, Argentina.

Tópicos: Ensayos, Enseñanza

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | | |
|-------------|-----------------------------------|------------|
| I. | Objetivos | Pag. 3 |
| II. | Justificación | Pag. 3 |
| III. | Alcance | Pag. 3 |
| IV. | Desarrollo del Trabajo | Pag. 4-8 |
| V. | Conclusiones | Pag. 9-10 |
| VI. | Bibliografía / Referencias | Pag. 10 |
| VII. | Anexos | Pag. 11-12 |

I. Objetivos

El objetivo fundamental de este proyecto es obtener valores de resistencia mecánica lo más representativos de la realidad, en piezas generadas mediante impresión 3D por tecnología FDM (Fused Deposition Modeling). Normalmente, en las hojas de datos de los filamentos plásticos empleados (insumo principal de esta tecnología), podemos encontrar las propiedades mecánicas del material base determinadas con otros métodos de fabricación (inyección principalmente). Esto ocasiona una incertidumbre sobre los coeficientes de seguridad a adoptar en el diseño de componentes ya que la tecnología de fabricación es muy diferente.

Las piezas impresas por tecnología FDM se encuentran comprometidas a un gran número de factores, tales como las condiciones de humedad del polímero (son higroscópicos), velocidad y temperatura de impresión, orientación de las capas, entre muchos otros. La conjunción de estos parámetros hace que la resistencia final de la probeta/pieza se vea comprometida drásticamente, lo cual genera una incertidumbre sobre el estado tensional de la misma. De nuevo, se suma más incertidumbre debido a que el diseñador o proyectista dimensionará la pieza a partir de los datos del material base ya que es la información que se encuentra disponible actualmente.

II. Justificación

La obtención de piezas plásticas por medio de impresión 3D, es un método sin mucho desarrollo en la industria local, por lo que no existen datos útiles para la ingeniería sobre la resistencia de estos procesos. Además, las normas de ensayos para plásticos, no contemplan este proceso de fabricación.

Se plantea entonces la discusión de anexar y certificar el trabajo descrito en el presente informe para lograr incorporar un estudio y aplicación práctica del plástico impreso en 3D a la formación ingenieril. A su vez, se fomenta la generación de actividades de valor transversales desde los grupos y centros de investigación académicos hacia los desarrollos tecnológicos para la industria moderna.

III. Alcance

Por lo expuesto anteriormente, con el presente trabajo se pretende obtener valores representativos de los límites a los cuales puede ser sometido el material impreso definiendo factores de corrección adecuados. Con esto nos referimos a encontrar tensiones admisibles máximas de tracción de materiales impresos y factores que permitan correlacionar dicha tensión admisible con la del material base (propuesta en los catálogos comerciales), para finalmente poder emplearlo en cálculos de dimensionamiento con el fin de incorporar este método de fabricación al diseño de componentes.

Por otro lado, se prevé definir la tipología de esfuerzos a los que está sometida la probeta en un ensayo de tracción normal simple ya que por el método de fabricación pueden llegar a presentarse otros esfuerzos no esperados.

Por último, se aspira obtener conclusiones a lo largo del proyecto para aportar a la comunidad de diseñadores, tanto profesionales de la ingeniería, como alumnos y docentes del área del conocimiento específico donde aplique esta tecnología, cuyos resultados obtenidos puedan ser empleados con el soporte técnico adecuado.

IV. Desarrollo del Trabajo

Como primera instancia, se iniciará por explicar forma breve y concreta, el procedimiento a realizar para obtener resultados, que posteriormente serán analizados. El mismo, se respaldará con las normas necesarias para ser ejecutado.

Metodología de Fabricación

Hoy en día, la impresión 3D se encuentra en auge respecto a otras metodologías de fabricación, lo que da lugar a investigar y ampliar sobre el tema.

La impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. Estas ofrecen a los desarrolladores del producto la capacidad para imprimir partes y montajes hechos de diferentes materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas, a menudo con un simple proceso de ensamble. Pueden incluso ofrecer modelos que pueden servir como prototipos funcionales de producto.

Existen diferentes tipos de impresión 3D, la cuales dependen de lo que se pretenden fabricar. En este trabajo se centra la tecnología de impresión por FDM, modelado por deposición fundida, que luego es desarrollado.

Funcionamiento estándar

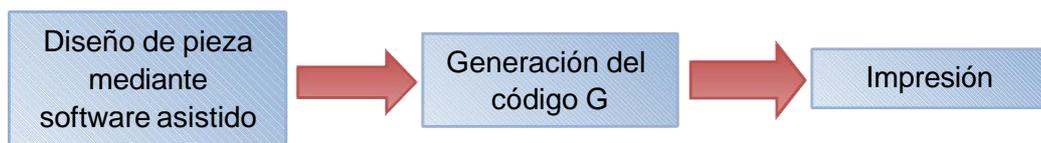


Fig. 1 – Procedimiento de impresión

El funcionamiento de este tipo de tecnología, como se exhibe en la Fig.1, en general no se aparta de una línea bien establecida, a no ser que se trate de algún modelo en especial. La metodología consiste en diseñar un modelo tridimensional en algún software CAD, y al mismo lo exportamos a un traductor, que lo “particiona” en capas y eso lo codifica en Código G, a fin de que la impresora pueda interpretarlo, y a partir de ello comenzar a mover sus partes para fabricar la pieza.

Modelado FDM

El modelado por deposición fundida comienza con un proceso de software, que parte de un archivo estereolitográfico (stl). El modelo es orientado para poder ser impreso, dividido en capas y se calculan las trayectorias que la boquilla deberá seguir para depositar el material, capa a capa, para conformar la pieza. Si son necesarias, se pueden generar estructuras de soporte que, tras finalizar la creación de la pieza, será retirado.

El termoplástico es fundido y depositado por la boquilla en capas del grosor requerido una a una, posicionándose éstas de abajo hacia arriba. La altura de cada capa define el acabado superficial de la pieza, en algunos materiales, es posible trabajar con vapor de solvente para dar un tratamiento superficial para menor rugosidad.

Los materiales más usados hoy en día en estas impresiones son el ABS, PLA, PETg, HIPS y Nylon.

Para el presente trabajo se analizarán probetas de ABS y PETg ya que por sus propiedades pueden tener un uso más significativo en el ámbito ingenieril.

Metodología para la obtención de la tensión admisible.

Se dará comienzo a este ensayo definiendo la probeta adecuada a utilizar, la cual será fabricada acorde a la norma ASTM D638-14, en la misma se especifica la geometría exacta que la probeta debe tener. Ver Fig. 2 adjunta a continuación.

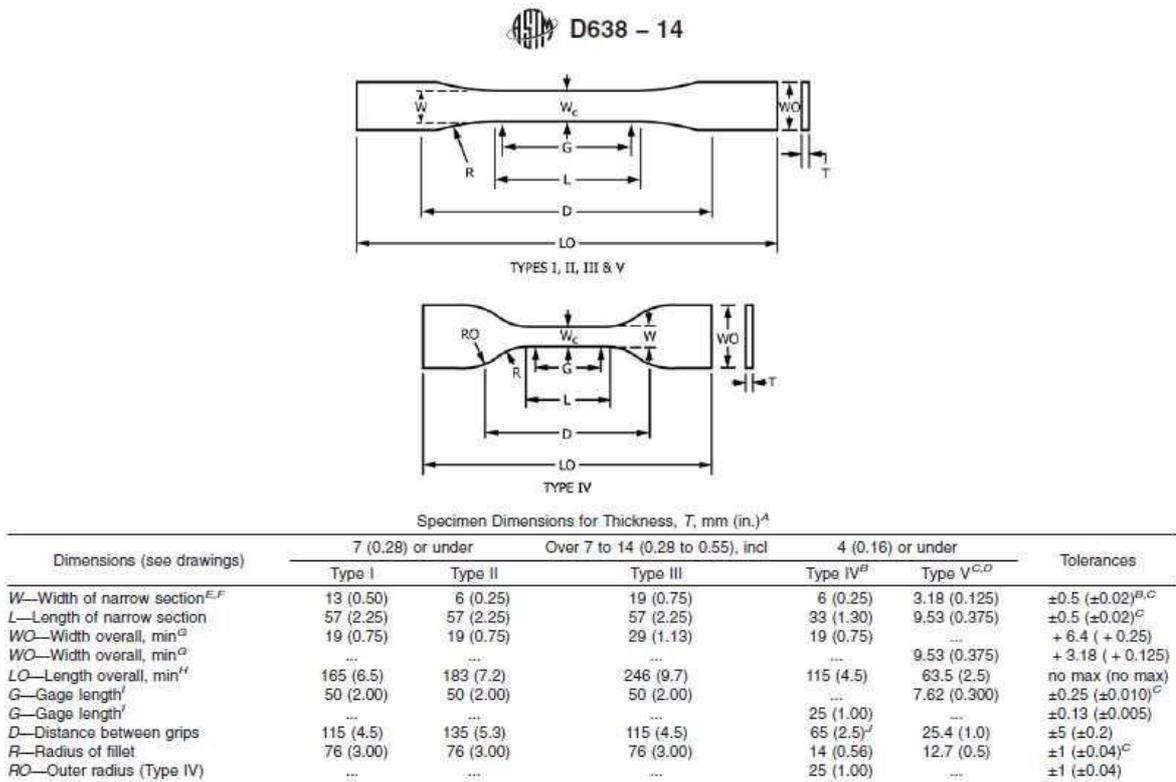


Fig. 2 – Geometría de la probeta

Debido a que no existe una normativa específica para ensayar probetas impresas, intentaremos aproximarnos lo más posible a la normativa existente, es por esto que decidimos adoptar una geometría de probeta “Type I” ya que es la normalizada para ensayar materiales laminados altamente ortotrópicos.

Una vez definida la geometría, establecemos los parámetros de impresión (citados en la Tabla 1). Lo que haremos es mantener todos constantes a lo largo de la producción de las probetas e ir variando la temperatura de impresión de la boquilla para estudiar su efecto sobre la resistencia. El porcentaje de relleno lo mantendremos en un 98% de manera de aproximarnos lo más posible a un material macizo.

Tabla 1 – Parámetros de impresión definidos

| Capa (Linea) | | Superficies | | | Relleno | | | Velocidad |
|--------------|--------|-------------|----------|----------|---------|-----------------------|---------------|-----------|
| Altura | Ancho | Perímetro | Superior | Inferior | % | Patrón | Superposición | |
| 0,2 mm | 0,4 mm | 3 | 4 | 4 | 98 | Lineas longitudinales | 30% | |

Por su parte, en la Tabla 2 se presentan las series de probetas impresas. Las codificadas de a 3 o su múltiplo se imprimieron a la misma vez en una sola impresión. De igual manera las que son codificadas en series de a 2.

Tabla 2 – Parámetros de temperatura de probetas

| Codificación | Temperatura | | Material |
|------------------|-------------|------|----------|
| | Boquilla | Base | |
| 6 A/B/C/D/E/F | 235 | 90 | ABS |
| 6 G/H/I | 240 | 90 | ABS |
| 7 A/B | 235 | 60 | PETg |
| 7 C/D | 240 | 60 | PETg |
| 8 A/B/C | 245 | 90 | PETg |
| 8 D/E | 245 | 60 | PETg |
| 9 A/B/C | 235 | 60 | PETg |

Para la impresión de las probetas se utilizó una impresora Hellbot Magna 1 (Fig. 3).

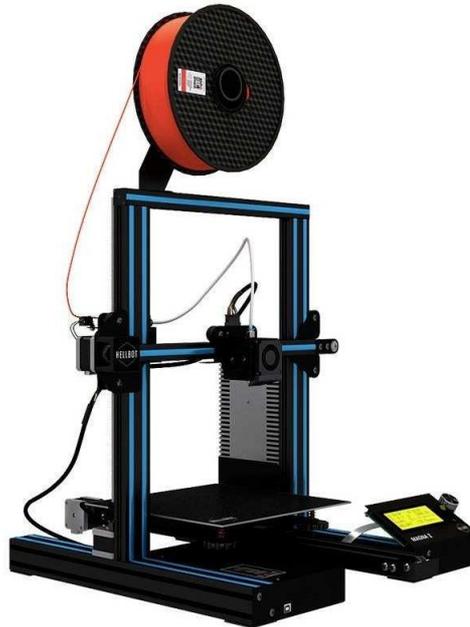
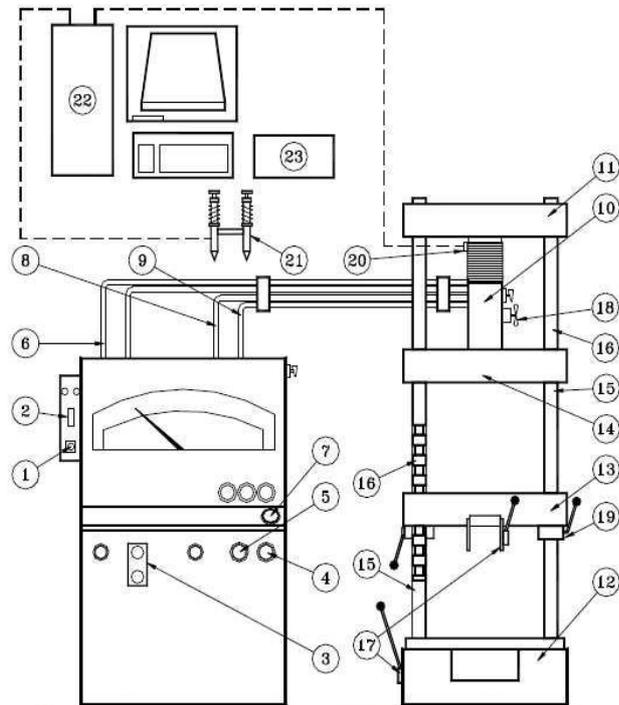


Fig. 3 – Modelo de impresora empleada

Una vez obtenida la probeta a ensayar, se empleará una Máquina Universal (Ver Fig. 4) de Ensayo, en esta se llevará a cabo un ensayo de tracción simple. En dicho ensayo, se obtendrá la resistencia de ruptura por tracción normal simple. Dicha máquina se encuentra en el Laboratorio Industrial Metalúrgico (LIM) en la UTN Regional Santa Fe.



CONSOLA DE MANDO

- 1- Interruptor eléctrico
- 2- Interruptor contactor bomba
- 3- Botonera de arranque/parada
- 4- Válvula de accionamiento émbolo
- 5- Válvula derrame circuito hidráulico
- 6- Cañería rebosadero cilindro
- 7- Parada de Emergencia

MODULO DE CARGAS

- 8- Cañería carga/descarga
- 9- Conexiones eléctricas
- 10- Cilindro hidráulico
- 11- Puente estructural móvil
- 12- Puente fijo inferior
- 13- Puente móvil
- 14- Puente fijo superior
- 15- Columna estructural
- 16- Columna móvil ranurada
- 17- Mecanismo apertura mordazas
- 18- Interruptor fin de carrera
- 19- Mordaza traba puente
- 20- Celda de carga
- 21- Extensómetro LVDT
- 22- PC
- 23- Impresora

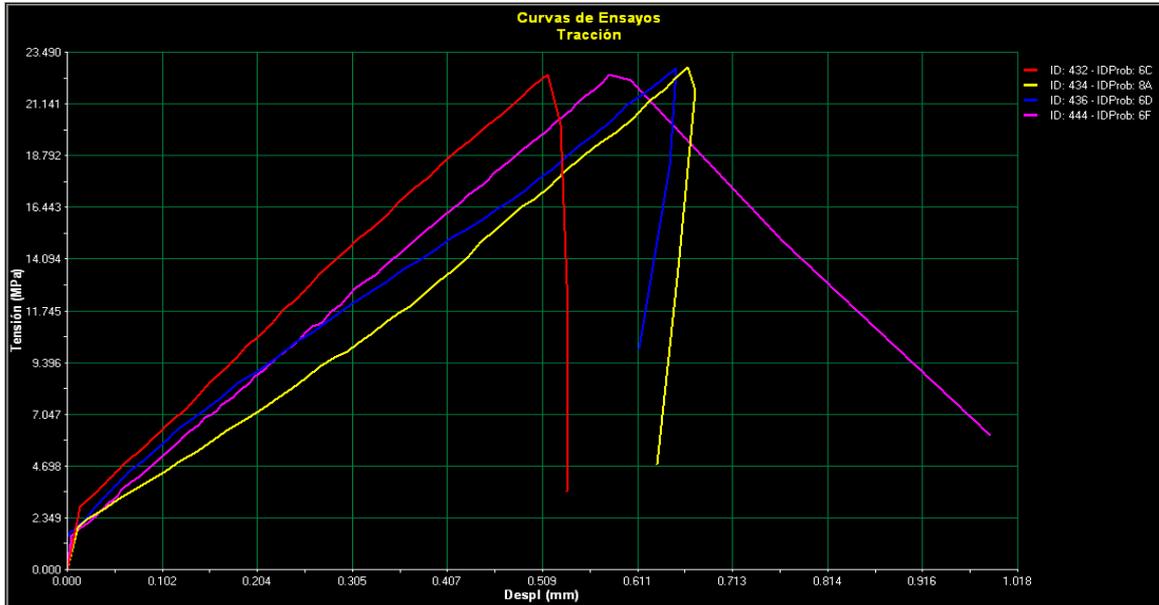
Fig. 4 – Máquina de ensayos utilizada

Luego se observará como se comportó la probeta al ensayo, para ello la máquina dispone de una pantalla donde se visualiza fuerza frente a deformación o tensión frente desplazamiento. En definitiva, se buscará observar el comportamiento de la probeta para identificar la posible existencia de proporcionalidad, si presenta fluencia, las tensiones máximas y las zonas de ruptura. Dicho procedimiento será representativo una vez realizados varios ensayos.

Por último, se realiza un análisis de la forma de fractura, más allá de las imágenes y gráficos obtenidos en dicho procedimiento, es valioso observar físicamente donde se generó la ruptura, con esto, se hará una inferencia sobre los esfuerzos que están aconteciendo sobre la sección transversal de la pieza.

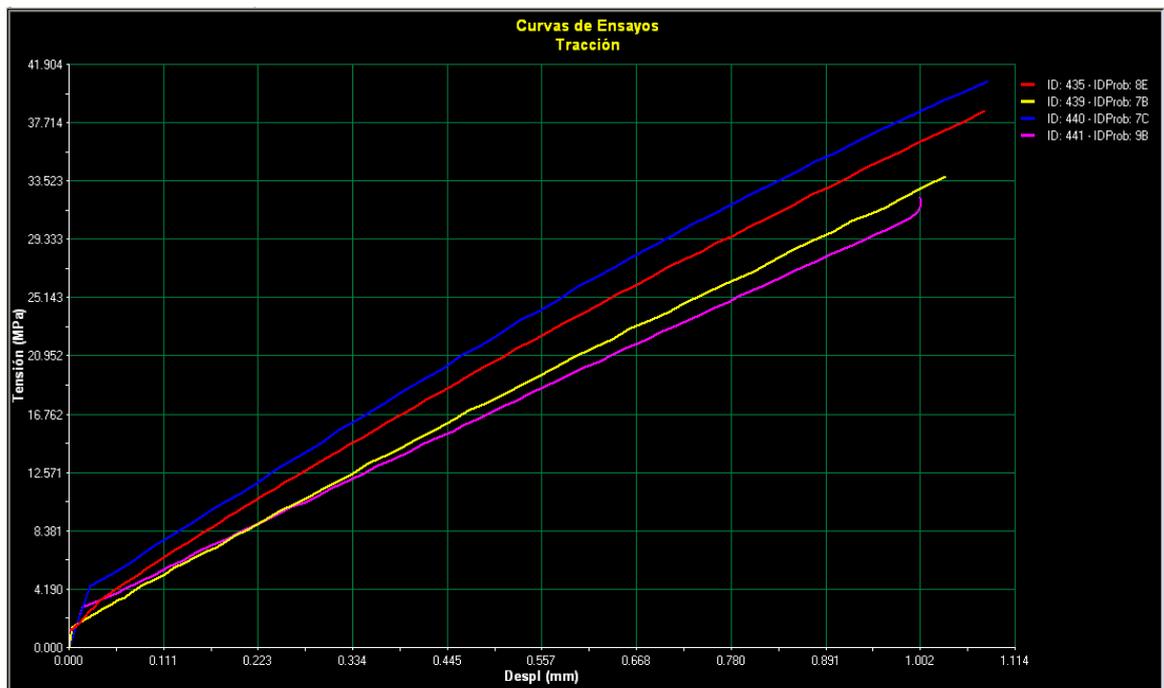
Resultados obtenidos

ABS: Las fallas se presentaron muy por debajo del valor de tensión admisible brindado obtenido de la hoja de datos, llegando a ser inferiores a la mitad del mismo. La comparativa puede visualizarse en la Gráfica 1.



Gráfica 1 – Comparativa de gráficas Tensión vs Deformación para ABS

PETg: También presento valores de tensiones admisibles menores a los que obtenemos de los materiales base, aunque las muestras obtenidas no permitieron obtener con claridad un valor específico. La comparativa puede visualizarse en la Gráfica 2.



Gráfica 2 – Comparativa de gráficas Tensión vs Deformación para PETg

V. Conclusiones

Conclusiones sobre la rotura

Las conclusiones obtenidas se analizarán en base a los ensayos que se han efectuado. Por esto inicialmente exhibimos una imagen previo al ensayo y posterior al mismo (ver Fig. 5) a fin de evidenciar las formas de rotura que han presentado las probetas.



Fig. 5 – Probetas antes y después del ensayo a tracción

Podemos destacar en primer punto que las fallas en el ABS presentan un comportamiento frágil con presencia de corte (cizalladura) en la zona de la rotura. Por su parte, en las probetas de PETg la rotura se presenta con mayor ductilidad y sin rasgos de corte significativo. Ver Fig. 6.

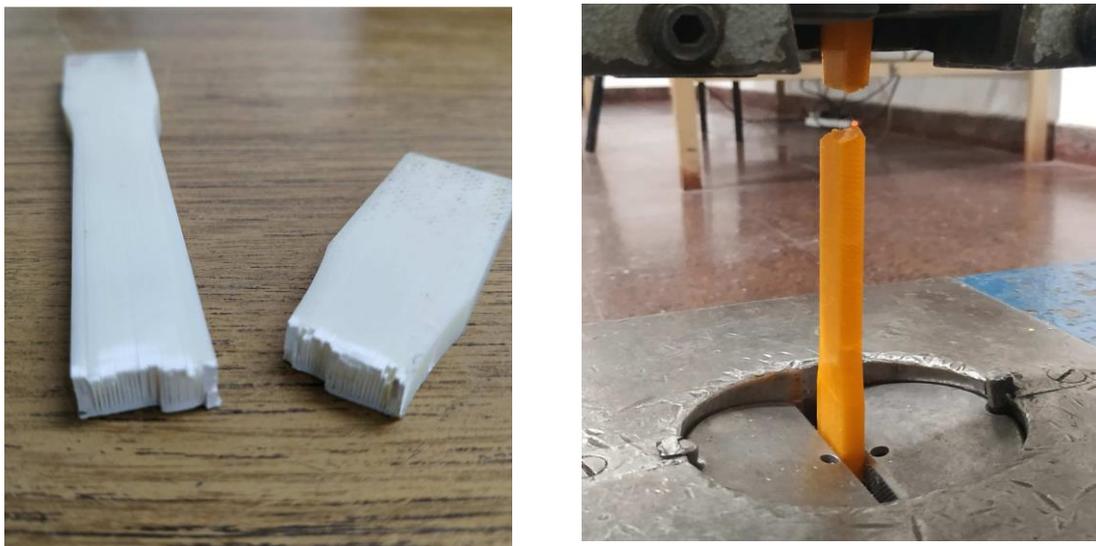


Fig. 6 – Forma de fractura de probetas. Izquierda ABS y derecha PETg

Como detalle adicional, se obtuvo una conclusión muy interesante. Es notable cómo las probetas que han sido impresas en series de 3 en una misma impresión o lote presentan valores de tensión admisibles particularmente bajos comparadas con una probeta impresa de forma única por lote. Se continuará el proyecto analizando probetas impresas de a una para evidenciar su efecto.

Por otro lado, cabe destacar que el tamaño de las muestras, por el momento, es chica para determinar factores de corrección por lo cual se deberá seguir ensayando piezas para obtener resultados aún más significativos. De todas formas, exhibiremos las conclusiones parciales obtenidas para enriquecer el contenido del trabajo.

Observaciones: Se han descartado probetas que han roto por torsión o se han desgarrado de la mordaza de sujeción durante el ensayo.

Tabla 3 – Valores de tensión de ruptura promedio para ABS (adoptar Promedio)

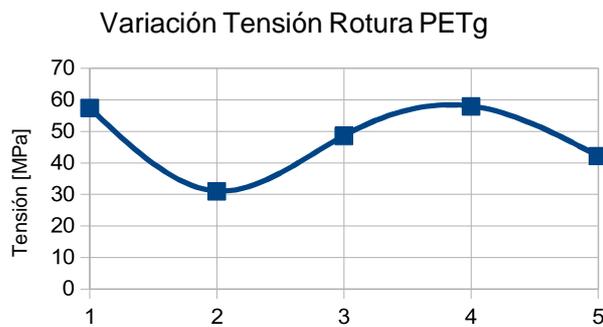
| ABS | |
|-----------------------------|--------------|
| Promedio | 25,16 |
| Desvío STD | 3,69 |
| Tensión Rotura (68%) | 28,85 |
| Tensión Rotura (95%) | 32,53 |



Gráfica 3 – Variación de la tensión de rotura ABS

Tabla 4 – Valores de tensión de ruptura promedio para PETg (adoptar Promedio)

| PETg | |
|-----------------------------|--------------|
| Promedio | 47,41 |
| Desvío STD | 11,28 |
| Tensión Rotura (68%) | 58,69 |
| Tensión Rotura (95%) | 69,98 |



Gráfica 4 – Variación de la tensión de rotura PETg

Obtención del factor de corrección

Abs

$$\sigma_{\text{Rotura Impresión 3D}} = Kp_{ABS} * \sigma_{\text{Rotura según ASTM 638}}$$

$$Kp_{ABS} = \frac{\sigma_{\text{Rotura Impresión 3D}}}{\sigma_{\text{Rotura según ASTM 638}}} = \frac{25,16 [MPa]}{47,56 [MPa]} \approx 0,529$$

PETg

$$\sigma_{\text{Rotura Impresión 3D}} = Kp_{PETg} * \sigma_{\text{Rotura según ASTM 638}}$$

$$Kp_{PETg} = \frac{\sigma_{\text{Rotura Impresión 3D}}}{\sigma_{\text{Rotura según ISO 527-2}}} = \frac{47,41 [MPa]}{53 [MPa]} \approx 0,894$$

Cabe destacar que se han tomado solo los promedios debido al reducido número de muestras disponibles hasta el momento (Ver variaciones en Gráficas 3 y 4 y compararlas con las Tablas 3 y 4). La idea es que normalizar la curva aumentando el número de ensayos con el fin de poder inferir un desvío estándar mas representativo y estimar un índice de confiabilidad mas certero. De todas formas, siempre es conveniente la peor condición (factores más bajos).

VI. Bibliografía / Referencias

- [1] ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. (2015)
- [2] ISO 527-2: Plastics Determination of tensile properties. Part 2: Test conditions for molding and extrusion plastics. (1996)
- [3] Hoja Técnica de Producto Grilon3 NTH.

VII. Anexos

Hoja de datos de proveedor de plástico.

ABS

(Acrilonitrilo Butadieno Estireno)

| Especificaciones del Monofilamento | | |
|------------------------------------|---|----------|
| Diámetro (Ø) | Tolerancia | Ovalidad |
| 1.75 mm | ± 0,02mm con un 99% y ±0.03 con el 1% de Nivel de Confianza | ≥97 % |
| 2.85 mm | ± 0,04mm con un 99% y ±0.05 con el 1% de Nivel de Confianza | ≥97 % |

| Propiedades de la Materia Prima más relevantes | | | | |
|--|---------------|----------|--------------|--------------------|
| Descripción | | Método | Valor Típico | |
| Densidad | | ISO 1183 | 1.02-1.04 | Gr/Cm ³ |
| Indice de Fluidez | (220 °C,10Kg) | ISO 1133 | 38 | Gr/10 min. |

| Physical | Test Method | Value |
|--------------------------------|-------------|------------------------|
| Density | ASTM D792 | 1.04 g/cm ³ |
| Melt Flow Index (220 °C, 10kg) | ASTM D1238 | 38 g/10min |
| Mold Shrinkage | ASTM D955 | 0.5 ~ 0.8 % |
| Water absorption | ASTM D570 | - % |

| Mechanical | Test Method | Value |
|------------------------------------|-------------|--|
| Tensile Strength | ASTM D638 | 485 kgf/cm ² <small>(6,700 (psi))</small> |
| Elongation | ASTM D638 | 15 % |
| Flexural Strength | ASTM D790 | 720 kgf/cm ² <small>(10,080 (psi))</small> |
| Flexural Modulus | ASTM D790 | 24,500 kgf/cm ² <small>(347,600 (psi))</small> |
| Izod Impact Strength (3.2mm, 23°C) | ASTM D256 | 24 kgf·cm/cm |
| Izod Impact Strength (6.4mm, 23°C) | ASTM D256 | 20 kgf·cm/cm <small>(3.7 (ft.lbs/in))</small> |
| Rockwell Hardness (R scale) | ASTM D785 | 109 |

| Thermal | Test Method | Value |
|--|-------------|------------------------------------|
| Heat Deflection Temperature (18.6kgf/cm ²) | ASTM D648 | 85 °C <small>(185) (°F)</small> |
| Vicat Softening Temperature (5kg, 50°C/h) | ASTM D1525 | 95 °C <small>(203) (°F)</small> |

| Flammability | Test Method | Value |
|---------------------------|-------------|-------|
| Flame Rating - UL (1.6mm) | UL 94 | HB |

PETG

(Polietileno tereftalato, glicolizado)

| Especificaciones del Monofilamento | | |
|------------------------------------|---|----------|
| Diámetro (Ø) | Tolerancia | Ovalidad |
| 1.75 mm | ± 0,02mm con un 99% y ±0.03 con el 1% de Nivel de Confianza | ≥97 % |
| 2.85 mm | ± 0,04mm con un 99% y ±0.05 con el 1% de Nivel de Confianza | ≥97 % |

| Propiedades de la Materia Prima más relevantes | | | | |
|--|-------------------|------------|------|--------------------|
| Descripción | | Método | | Valor Típico |
| Densidad | | ASTM D792 | 1.27 | Gr/Cm ³ |
| Indice de Fluidez | (210 °C, 2,16 Kg) | ASTM D1238 | 8 | Gr/10 min. |

| Physical | | Test Method | | |
|------------------------|--|-------------|------------------|--|
| Specific Gravity, g/cc | | ASTM D1505 | 1.27 | |
| MFR, g/10 min | | ASTM D1238 | 8 | |
| Relative Viscosity | | ISO 1628-5 | 0.80 dl/g | |
| Clarity | | - | Transparence 92% | |
| Water Absorption | | ASTM D570 | 0.12 % | |
| Shore Hardness | | ASTM D2240 | 70 | |

| Mechanical | | Test Method | | Value |
|--------------------------------|--|-------------|------|-------|
| Tensile Yield Strength, MPa | | ISO 527-2 | 53 | |
| Tensile Strength at Break, MPa | | ISO 527-2 | 19 | |
| Tensile Modulus, MPa | | ASTM D790 | 2140 | |
| Tensile Elongation, % | | ASTM D638 | 130 | |
| Notched Izod Impact, J/m | | ASTM D256 | 105 | |
| Flexural Strength, MPa | | ASTM D790 | 75 | |
| Flexural Modulus, MPa | | ASTM D790 | 2150 | |

| Thermal | | Test Method | | Value |
|----------------------------------|--|-------------|---------|-------|
| Heat Distortion Temperature, °C | | ASTM D648 | 65 (85) | |
| 1.820 MPa (0.455 MPa) | | | | |
| Glass Transition Temperature, °C | | ASTM D3418 | 88 | |
| UL Flammability Classification | | | | |
| @ 1.0 mm thickness | | | | |
| @ 1.5 mm thickness | | | | UL-94 |
| @ 3 mm thickness | | | | |