

Módulo de elasticidad volumétrico de piezas impresas con polímeros flexibles

Bulk elasticity modulus of 3D printed pieces with flexible polymers

Presentación: xx/10/2024

Manuel Colombo

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca. Departamento Ingeniería Mecánica.

Manuel.Colombo@hotmail.com

Marcelo Tulio Piovan

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca. Grupo de Estudio de Materiales (GEMAT).

Departamento Ingeniería Mecánica

mpiovan@frbb.utn.edu.ar

Andrés Esteban Romero

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca. Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada (CIMTA). Departamento Ingeniería Mecánica

andresrom147@hotmail.com.ar

Resumen

El objeto de este artículo estriba en caracterizar experimentalmente el módulo de elasticidad volumétrico de piezas construidas por impresión 3D de elastómeros flexibles. El módulo de elasticidad volumétrico representa la resistencia de un material al cambio volumétrico cuando es sometido a compresión. Las variantes del filamento Poli-uretano termoplástico (TPU) permiten construir piezas muy flexibles empleadas en elementos de amortiguamiento o también supresión de vibraciones. La determinación de las propiedades elásticas de elastómeros impresos es de interés para su uso en software de modelación de componentes mecánicos. Se recurre a la norma ASTM D395 para concebir el protocolo experimental a ser aplicado en una máquina de ensayo de propósito múltiple construida ad-hoc para ensayos no convencionales y desarrollada originalmente en el CIMTA de la UTN-FRBB. En el estudio se evalúa la influencia de diversos parámetros de configuración del proceso de impresión 3D de las probetas.

Palabras clave: módulo de elasticidad volumétrico, impresión 3D, polímeros TPU

Abstract

The purpose of this article is to experimentally characterize the bulk elastic modulus of parts built by 3D printing using flexible polymers. The bulk elastic modulus represents the resistance of a material to volumetric change when subjected to compression. The variants of the thermoplastic polyurethane (TPU) filament allow for the construction of highly flexible parts employed for damping elements or vibration suppression. The determination of elastic properties 3D printed elastomers is of interest due to its use in software for modeling mechanical components. The ASTM D395 standard is used to conceive the experimental protocol to be applied in a multiple purpose testing machine built ad-hoc for non-conventional tests, originally developed in the lab CIMTA of UTN-FRBB. The study evaluates the influence of various configuration parameters of the 3D printing procedure of the specimens.

Keywords: bulk elasticity modulus, 3D printing, TPU polymers

Introducción

La impresión 3D o construcción aditiva es un procedimiento disruptivo de manufactura cuyo uso ocupa una franja entre aplicaciones domésticas, hasta ser incluida como parte fundamental de un proceso industrial dentro de una fábrica. El proceso por el cual una impresora 3d realiza sus piezas es lento, aunque muy efectivo cuando se trata de hacer prototipos o directamente piezas funcionales. La versatilidad de estas máquinas permite trabajar con distintos tipos de materiales plásticos, que, en algunos casos tienen inclusiones de partículas de madera, aluminio, materiales conductores de electricidad o magnéticos, entre otros.

Dentro de los diversos materiales poliméricos que se utilizan para imprimir piezas, el filamento denominado TPU (Poliuretano Termoplástico) conocido en el argot de la impresión 3D como “Flexible” con sus variantes: Simplyflex, Filaflex, etc., posee características que lo hacen ideal para construir piezas que puedan absorber vibraciones, impactos o bien adaptarse en forma para favorecer montaje entre partes. En particular el TPU es resistente a la abrasión, es resistente a muchos productos químicos, tiene la capacidad de soportar temperaturas de hasta 80°C sin fluir o perder el punto de cristalización. Además este material tiene la cualidad, de resistir bajas temperaturas, lo cual, hace que las piezas construidas con el mismo no se vuelvan frágiles ni quebradizas. Todas estas cualidades favorecen que las piezas finales (como también construcciones conceptuales) sean flexibles y adaptables en un amplio rango.

Las líneas de investigación vinculadas a determinar comportamiento elástico y mecánico de cuerpos impresos, si bien no son nuevas pues datan de hace 25 años (Chacon et al., 2017), en los últimos 10 años cobraron una importancia y crecimiento exponencial por la alta disponibilidad de equipos. La gran mayoría de estudios sobre propiedades de piezas construidas aditivamente con filamento polimérico se basa en ensayos estáticos, con ensayos de tracción y eventualmente de flexión (para determinar límites de fluencia, rotura, etc.) aunque bajo normas de ensayo típicas de materiales compuestos u homogeneizados.

Los polímeros que más frecuentemente se han ensayado son el PLA (o Polímero de ácido láctico), PETG (polyethylene terephthalate glicol) y ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), mismos que son del termoplásticos con los cuales se logran piezas de aceptable resistencia y rigidez (Mainetti et al. 2023). Sin embargo en el caso de los elastómeros termoplásticos empleados en impresión 3D, como el TPU, no se registran estudios específicos en cuanto a la determinación de propiedades elásticas útiles tales como el módulo de elasticidad volumétrico. Propiedades que son fundamentales para las aplicaciones de esta clase de elastómeros. Así pues, en este artículo se ofrece un estudio preliminar de caracterización del módulo de elasticidad volumétrico en piezas construidas con el filamento denominado Simplyflex. En el mismo se pretende evaluar la incidencia de los diversos parámetros de configuración de impresión sobre la respuesta final de la pieza. Se plantea el uso de una variante de la norma de ensayo ASTM propia para elastómeros (ASTM D395, 2003), para poder realizar los ensayos en una máquina desarrollada previamente en el laboratorio.

El artículo está configurado de la siguiente manera. Luego de la introducción se describen aspectos teóricos necesarios para la comprensión del estudio, posteriormente se describe la variante de ensayo inspirada en la norma ASTM D395 y finalmente se analiza la influencia de diversos patrones constructivos y los parámetros asociados al proceso constructivo.

Breve descripción de conceptos y metodología

Conceptos de elasticidad vinculados al ensayo

El Módulo de elasticidad volumétrico (bulk-modulus en inglés) de un material es una constante que define la resistencia del material al cambio de volumen cuando se somete a un esfuerzo de compresión. Formalmente se define como:

$$K = P / \varepsilon_v \quad (1)$$

Siendo P la presión [Pa] aplicada a la probeta y ε_v la deformación volumétrica. Por conveniencia la deformación volumétrica positiva, se define como la disminución del volumen (entendiendo que la estructura se somete a un esfuerzo de compresión). Otras constantes del material como el Módulo de Young “ E ”, el

Módulo de Corte “ G ” y la Relación de Poisson “ ν ” se pueden relacionar mediante las siguientes expresiones (Aritan, 2006):

$$E = 3K(1 - 2\nu) \quad (2)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (3)$$

$$\nu = (3K - 2G)/6K + 2G \quad (4)$$

El módulo de Young se puede determinar con un ensayo de tracción. Las otras constantes del material se pueden determinar a partir de las ecuaciones expuestas anteriormente, conociendo alguna otra.

Una forma de calcular el módulo de elasticidad volumétrico, podría ser, primero determinar la relación de Poisson (ν) midiendo el cambio de sección transversal de una tira del material ensayado bajo tensión y luego mediante las ecuaciones del módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν) determinar el módulo de cizalladura (G) para luego calcular el módulo de elasticidad volumétrico (K) empleando la Ec. (2) y la Ec. (4). Si bien útil esta forma de cálculo de K suele ser bastante tediosa y difícil de implementar y no proporciona una precisión que sea de interés para el ensayo.

Otra forma de calcular el módulo de elasticidad volumétrico de un material, es medir dicho modulo directamente en el experimentos. Uno de los métodos utilizados consiste en colocar una muestra en un sistema hidráulico y luego medir el cambio de volumen en relación con la presión del sistema. Este método es complicado, costoso hay que tener muchas variables en cuenta como la temperatura, las pérdidas del sistema, el cambio del volumen del fluido, etc. Con lo cual, como alternativa rápida es poco viable.

El método más simple, basado en la Norma ASTM D395 (Peng et al, 1994) y el que se aplica en este trabajo, reside en comprimir una muestra confinada en un dispositivo de metal y obtener una curva de carga-deflexión. Esta prueba se puede efectuar en una máquina de ensayos de compresión/ tracción. Las constantes del material a ensayar, son constantes lineales o constantes a deformación infinitesimal. La resistencia del material al cambio volumétrico depende en realidad de la presión o tensión volumétrica, el módulo de elasticidad volumétrico es una función de la deformación volumétrica. Por lo explicado, se puede expresar como:

$$K(\varepsilon_v) = \frac{dP}{d\varepsilon_v} \quad (5)$$

La expresión anterior no siempre está disponible de forma experimental, entonces también es apropiado definir el módulo de elasticidad volumétrico como K_{inc}^i :

$$K_{inc}^i(\varepsilon_v) = \Delta p / \Delta \varepsilon_v = (p^{1+i} - p^i) / (\varepsilon_v^{1+i} - \varepsilon_v^i) \quad (6)$$

Donde i es el número secuencial de los puntos experimentales. Este método incremental es útil para minimizar los errores durante el ensayo (Peng et al., 1994).

Dispositivo experimental y configuración del experimento

Para la realización de los ensayos se ha utilizado una máquina desarrollada con anterioridad en el CIMTA, cuyo aspecto se muestra en la Fig. 1(a). Por razones de espacio, se recomienda a los interesados seguir la descripción geométrica, funcional y operativa de la máquina en el trabajo de Mainetti et al. (2023). La probeta que se emplea es un cilindro de 12.2 mm de diámetro y una altura de 15 mm, como se muestra en la Fig. 1(b), junto con definiciones constructivas de la impresión. En la Fig. 1(c) se muestra el implemento construido para comprimir las probetas, el cual se monta dentro de la torre central de la máquina que se muestra en la Fig 1(a). El implemento consta de alojamiento hueco (1), que se halla atornillado a una base de montaje (2); en el orificio (3) se introduce la probeta con tolerancias prescriptas, la cual será comprimida por el émbolo (4). El vástago (5) se emplea para expulsar la probeta desde un orificio labrado en el inferior de la base de montaje (2). En

específico la máquina reporta en un archivo la información necesaria (fuerza y desplazamiento, instante a instante) para efectuar cálculos de rigidez en los cuerpos que se ensayen.

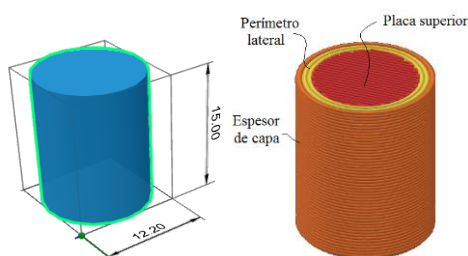
En el ensayo se emplea un elastómero TPU denominado Simpliflex de la marca comercial Grilon. La tolerancia de las probetas impresas respecto del agujero del implemento es aproximadamente de 0.2 mm. Para la diseño del experimento se han seleccionado 3 parámetros de impresión, que suelen tener influencia preponderante en las propiedades de las piezas impresas (Chacon et al, 2017). Los mismos se enlistan a continuación:

- Espesor de capa de impresión
- Densidad de relleno interno
- Espesor de perímetro lateral

Con ellos se ha planteado un diseño Taguchi, con tres factores/parámetros y tres niveles de profundidad, con lo cual se tiene un diseño tipo L9, es decir construcción de 9 tipos distintos de combinaciones de los tres parámetros. En la Tabla 1 se muestran los factores con sus niveles de profundidad, mientras que en la Tabla 2 se especifican los datos de impresión y de la impresora Tipo Prusa MK3. Para cada uno de los casos Taguchi L9 se han construido 3 ejemplares para realización del test en la máquina. En la Fig. 2 se puede apreciar el tipo de relleno interno y la forma denominada Honeycomb (o Panal de Abeja) en la Tabla 2.



(a) Dispositivo de ensayo



(b) Vistas de probeta y definiciones



(c) Implemento de montaje

Figura 1: Elementos para la realización del ensayo

Factores y su significado	Rango/profundidad
(F1) Espesor de capas de impresión [mm]	[0.1, 0.2, 0.3]
(F2) Espesor de perímetro lateral [mm]	[0.4, 0.8, 1.2]
(F3) Densidad de relleno interno [%]	[25, 50, 100]

Tabla 1: Factores bajo análisis y sus niveles de profundidad.

Configuración de Impresión y de la impresora	Valor
Temperatura de extrusión [°C]	230
Temperatura de plataforma de deposición [°C]	30
Velocidad de impresión [mm/s]	60
Tipo de relleno	Honeycomb
Diámetro de boquilla [mm]	0.4
Costura lateral	Aleatoria
Secuencia de impresión de las superficies inferior y superior	Rejilla cross-ply
Espesor de placas superior e inferior	1.2 mm

Tabla 2: Configuración de impresión para el filamento Simpliflex

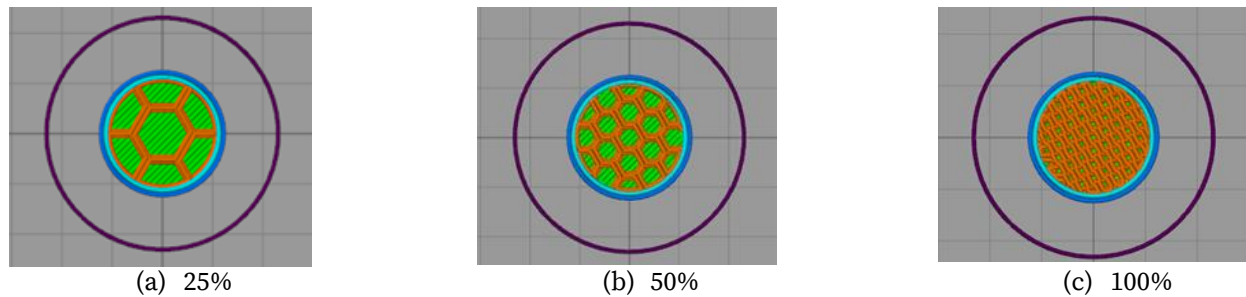


Figura 2: Forma y porcentaje de los rellenos. Corte lateral en el medio de la probeta

Resultados Experimentales y Evaluación

Se han ensayado a compresión un total de 27 probetas que marcan todo el espectro de variación vinculado al diseño L9 explicado en el párrafo precedente. Con la información en crudo (fuerzas y desplazamientos) se procede a realizar la determinación de la presión de compresión y la deformación volumétrica. Con estos datos se construyen las rectas de regresión y ajuste calculando luego los módulos de elasticidad volumétrica por simple determinación de la pendiente de tales rectas de regresión. Posteriormente se determina el módulo volumétrico empleando la Ec. (6) y se realiza un análisis de varianza para determinar la representatividad del experimento propuesto.

En la Fig. 3 se muestra la variación de los promedios del módulo volumétrico respecto de los espesores de capa y para tres condiciones de relleno interno. Las Fig 3(a), 3(b) y 3(c) corresponde a probetas con espesor de pared lateral de $F2 = 0.4$ mm, $F2 = 0.8$ mm y $F2 = 1.2$ mm, respectivamente. Se puede apreciar un comportamiento similar en los tres casos, aunque con valoraciones diferentes. En la Fig. 4 se hace lo propio pero considerando fijo el factor de relleno interno ($F3$). Obsérvese el comportamiento disímil en la medida que disminuye el porcentaje de relleno interno, con solapamientos entre los casos donde varía el espesor de capa, dando la impresión que en los especímenes completamente sólidos (i.e. $F3=100\%$) el módulo K tiende a ser parecido independientemente del espesor de capa.

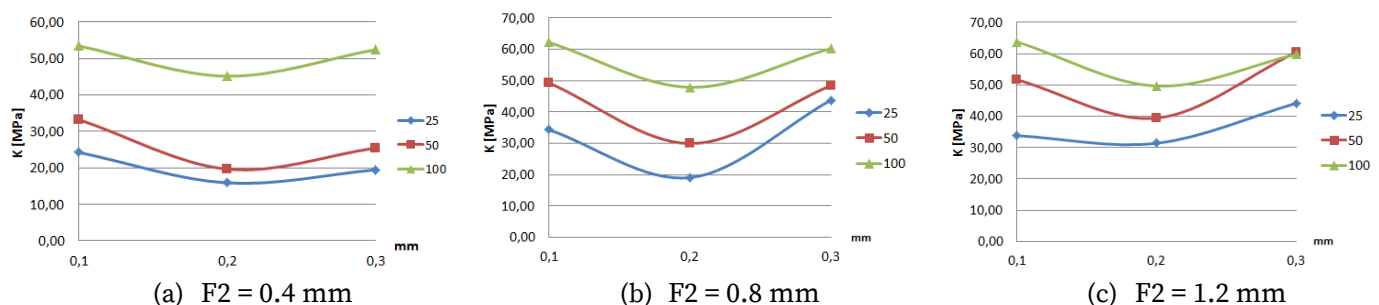


Figura 3: Variación de K para espesores de pared fijos (Factor F2).

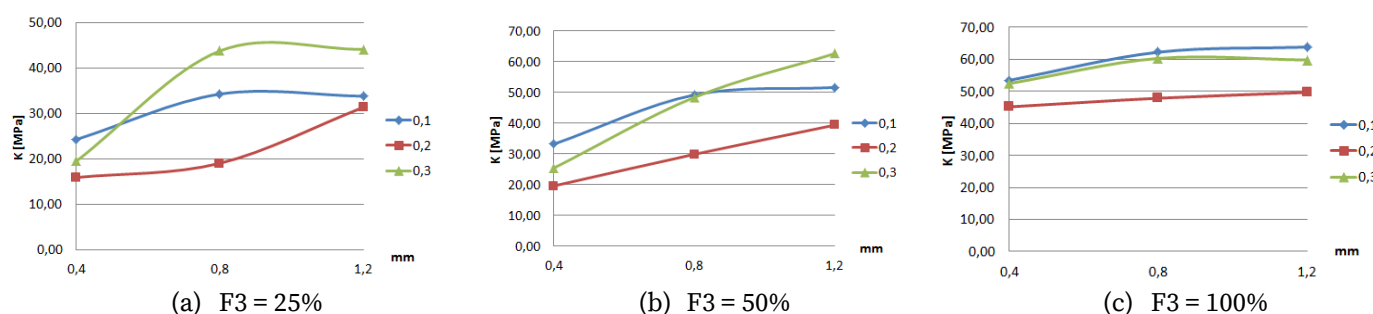


Figura 4: Variación de K para densidad de relleno fija (Factor F3).

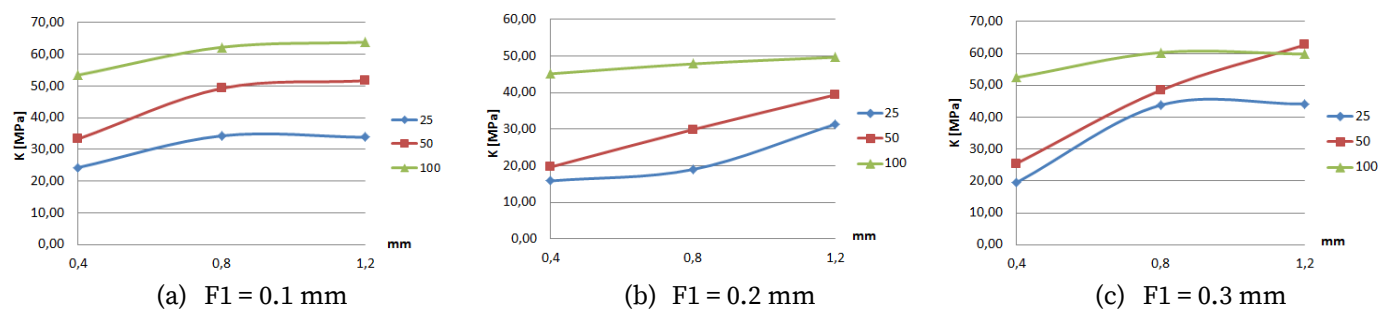


Figura 5: Variación de K para espesor de capa fijo (Factor F1).

En la Fig. 5 se muestra la variación de K con respecto al espesor del perímetro lateral de la probeta para diversos casos del relleno interno y para espesor de capa fijo (Factor F1). Nótese que K aumenta en la medida que se incrementa el perímetro lateral y, como es natural, en la medida que aumenta el porcentaje de relleno. Sin embargo en la Fig. 5(c) se puede observar una ligera irregularidad entre los casos de $F3 = 50\%$ y $F3 = 100\%$. Esto puede deberse a que el espesor de capa $F1 = 0.3$ mm, se encuentra en el límite para una boquilla de 0.4 mm empleada en la Impresora 3D, lo cual suele traer aparejado eventualidades e irregularidades por exceso de deposición de filamento entre otras. Comportamientos similares asociados con el espesor de capa $F1 = 0.3$ mm, también se pueden observar en las Fig. 4(a) y 4(b). En estas circunstancias la posible explicación se puede hallar en la forma de los rellenos internos de 25% y 50% de la Fig. 2, que por cuya forma poco compacta puede generar un pandeo interno eventual y con ello reducir el valor efectivo del módulo de elasticidad volumétrico.

Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado una caracterización del Poliuretano Termoplástico normalmente conocido como TPU bajo la variante comercial Simplyflex de la empresa Grilon. Este tipo de polímero de impresión 3D, suele ser muy útil para construir elementos de amortiguación de impactos, golpes, etc., razón por la cual es importante conocer algunas de sus propiedades elásticas en virtud de su potencial uso. En particular se ha determinado experimentalmente el módulo de elasticidad volumétrico. En ello se ha analizado la influencia de diversos parámetros de configuración del proceso de impresión.

Se ha observado que tanto el porcentaje de relleno de la pieza como la cantidad de perímetros de cáscara lateral con los que se construye la pieza tienen la mayor influencia en el módulo de aplastamiento de la misma. No se ha observado que tenga gran influencia en este ensayo la altura de capa de la pieza. En tanto que el espesor de las cáscaras inferior y superior tampoco ha sido mayormente importante.

Si bien en este ensayo solo se ha estudiado el efecto de un patrón de relleno (o infill), existen otros patrones de relleno que ofrecen los programas de laminación para impresión, cuyas formas podrían generar otro tipo de respuesta. Este y otros efectos forman parte de investigaciones en curso.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad Tecnológica Nacional y del CONICET.

Referencias

Aritan, S. (2006). Bulk Modulus. Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering, Copyright & 2006 John Wiley & Sons. <https://www.researchgate.net/publication/230248067>. doi:10.1002/9780471740360.

ASTM D395-03 (2003). Standard Test Methods for Rubber Property—Compression Set. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

Chacon, J., Caminero, M., García-Plaza, E., et al. (2017) Additive manufacturing of PLA structures using fused depositing modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. Mat. Design 124(15), 143-157.

Mainetti, C.A., Romero, A.E. y Piovan, M.T. (2023). Desarrollo de un banco de ensayo para determinación de propiedades mecánica en piezas poliméricas. VIII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica : III Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria : actas. 1861-1872. AJEA, Universidad Tecnológica Nacional. ISBN 978-950-42-0234-9.

Peng, S.H, Shimbori, T., Naderi, A. (1994). Measurement of elastomer's bulk modulus by means of a confined compression test. Rubber, Chemistry and Technology Vol 67, 871-879.