



Caracterización mediante procesamiento digital de imágenes del comportamiento hiperelástico del poliuretano termoplástico para fabricación aditiva

D. Rico¹, N. Blanco¹, D. Trias¹, A. Fernandez¹

¹ Analysis and Advanced Materials for Structural Design (AMADE), Universitat de Girona, daniela.rico@udg.edu, norbert.blanco@udg.edu, dani.trias@udg.edu, alex.fernandez@udg.edu

En la actualidad, se están desarrollando nuevos estudios para encontrar materiales y geometrías que cumplan con los requisitos de rendimiento que demanda la industria. Los compuestos multimateriales que imitan patrones jerárquicos naturales ofrecen una solución prometedora para mejorar las propiedades mecánicas. En este contexto, las estructuras tipo concha de nácar basadas en una arquitectura ligera de ladrillo y mortero (plaquetas rígidas rodeadas por una matriz blanda), destacan por sus excelentes propiedades fuera del plano y resistencia al impacto. Aunque reproducir este tipo de estructuras es complejo, las tecnologías actuales de fabricación aditiva permiten su fabricación con un costo y esfuerzo razonables. Para replicar este tipo de compuestos bioinspirados se seleccionaron dos materiales: ácido poliláctico (PLA) para las plaquetas y poliuretano termoplástico (TPU) para la matriz. Este último forma parte de la categoría de materiales hiperelásticos, es decir, materiales elásticos no lineales, cuya deformación última es muy elevada, aproximadamente un 500%, y cuyo comportamiento es incompresible o casi incompresible. Para simular estructuras fabricadas con este tipo de material es necesario definir y ajustar un modelo constitutivo y para ello, caracterizar el material de manera experimental. Por este motivo, el presente estudio se centra en el proceso de caracterización del TPU95A de Ultimaker, a través de una serie de ensayos experimentales a tensión, en los que se usaron dos tipos de probetas: probetas tipo “dog-bone” o hueso de perro, para obtener la curva esfuerzo-deformación del material, y probetas rectangulares para calcular el coeficiente de Poisson. Ante la dificultad de usar un extensómetro tradicional debido a la condición hiperelástica del material, la obtención de las deformaciones longitudinales y transversales se realizó mediante posprocesamiento digital de imágenes. El procedimiento anterior fue validado utilizando probetas de Tough PLA. Las deformaciones medidas con extensómetro coincidieron con las obtenidas a través del método óptico y el posprocesamiento de imágenes. Finalmente, se seleccionó el modelo constitutivo Marlow para simular el comportamiento del material en ABAQUS, ya que es un modelo ideal para cuando solo se tienen datos de pruebas uniaxiales.

1. Introducción

Actualmente, a nivel industrial, se requieren componentes estructurales de bajo peso y con una buena combinación de propiedades mecánicas, por lo que se han adoptado con frecuencia estructuras delgadas como los compuestos laminados. Para muchas aplicaciones se requiere adicionalmente una gran resistencia a cargas fuera del plano e impactos.

La naturaleza ofrece soluciones a esta problemática, ya que muchos materiales naturales presentan una excelente combinación de propiedades mecánicas: bajo peso, rigidez, tenacidad y resistencia, las cuales superan a las de los materiales artificiales [1]. Por esta razón, la imitación de configuraciones biológicas para obtener soluciones ingenieriles es una tendencia en auge. Uno de los materiales biológicos más imitados, debido a su comportamiento mecánico excepcional, es el nácar [2], un material producido por algunos moluscos. Su arquitectura es escalonada, tipo ladrillo-mortero, es decir, está formada por plaquetas duras y una matriz biopolimérica blanda [3]. El nácar posee excelentes propiedades fuera del plano [4]; su tenacidad a la fractura es dos o tres órdenes de magnitud mayor que los minerales que lo componen [5] y, además, es ligero. No obstante, su reproducción artificial es difícil debido a la complejidad de su arquitectura, la condición bimaternal y la disposición aleatoria de las plaquetas de una capa a la otra. Afortunadamente, las tecnologías actuales de fabricación aditiva o impresión 3D permiten reproducir estructuras tipo nácar con un costo y esfuerzo razonables [4], [6], [7], [8], [9].

Algunas investigaciones han evaluado el desempeño de geometrías inspiradas en el nácar y fabricadas por medio de impresión 3D con diferentes combinaciones de materiales y bajo diferentes condiciones de carga, buscando además definir un modelo numérico válido para replicar las pruebas experimentales. Ko et al. [9], por ejemplo, diseñaron diferentes estructuras tipo nácar empleando una impresora 3D *Ultimaker* y dos combinaciones de materiales: PLA/TPU y PLA/Nylon para las plaquetas y la matriz, respectivamente, con el objetivo de someterlas a pruebas de impacto. Concluyeron que, si se utilizaba TPU para la matriz en lugar de Nylon, se obtenía una estructura más resistente, ya que la adhesión entre el PLA y el Nylon era deficiente. Además, los resultados mostraron que las estructuras tipo nácar superan en resistencia al impacto a los materiales individuales.

En la misma línea de investigación, Ko et al. [8] diseñaron geometrías tipo nácar manipulando los parámetros de diseño y fabricándolas con una impresora 3D *Ultimaker*. Los materiales seleccionados para las plaquetas y la matriz fueron el PLA y el TPU, respectivamente. Los compuestos bioinspirados fueron sometidos a pruebas de impacto. Adicionalmente, realizaron simulaciones numéricas para comparar los resultados. Finalmente, determinaron que, manipulando las dimensiones de los dos constituyentes, la resistencia al impacto de los compuestos tipo nácar puede optimizarse y resaltaron que la influencia de los diferentes parámetros en la obtención de este tipo de estructuras no ha sido explorada en profundidad.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se busca optimizar las estructuras tipo nácar impresas en 3D, con plaquetas de PLA y matriz de TPU, someterlas a cargas fuera del plano y obtener modelos numéricos válidos que logren reproducir adecuadamente las pruebas experimentales. Dado que las propiedades de este tipo de materiales pueden depender mucho del fabricante, así como del proceso de impresión, es necesaria una campaña de caracterización experimental. El TPU, en particular, es un material hiperelástico [10]. Es decir, posee un comportamiento elástico, pero altamente no lineal [11] y una deformación última que puede alcanzar valores del 500%. Dada esta condición, la medición de las deformaciones no se puede realizar de forma sencilla con un extensómetro tradicional.

El objetivo de este estudio es la caracterización del TPU mediante pruebas experimentales de tensión utilizando dos tipos de probetas: probetas tipo *dog-bone* o hueso de perro y probetas rectangulares. Las primeras se emplearán para obtener la curva esfuerzo-deformación del material, y las segundas, para obtener el coeficiente de Poisson. Para la medición de las deformaciones, se propone un procedimiento basado en el posprocesamiento digital de imágenes. Para validar el método, se aprovechará la caracterización del PLA, que incluye la medición de las deformaciones del material con un extensómetro tradicional, y se compararán dichos valores con los obtenidos mediante el posprocesamiento digital de imágenes. Finalmente, se definirá un modelo constitutivo para el TPU basado en el potencial de energía de deformación (U) [11], que se ajuste correctamente a la curva esfuerzo-deformación del material obtenida experimentalmente, para su posterior implementación en la simulación numérica mediante el programa ABAQUS.

2. Materiales y métodos

Las estructuras tipo nácar que se buscan reproducir y caracterizar son similares a la que se muestra en la Figura 1. Las plaquetas serán fabricadas en *Black Tough PLA* de *Ultimaker*, un ácido poliláctico técnico que permite reproducir geometrías complejas e imprimir prototipos resistentes a la delaminación o a la deformación por contracción [12] y la matriz en *Red TPU95A* de *Ultimaker*, un poliuretano termoplástico con alta flexibilidad [13]. Las propiedades mecánicas básicas de ambos materiales indicadas por el fabricante del material se presentan en la Tabla 1.



(a) Vista superior de la estructura tipo nácar.

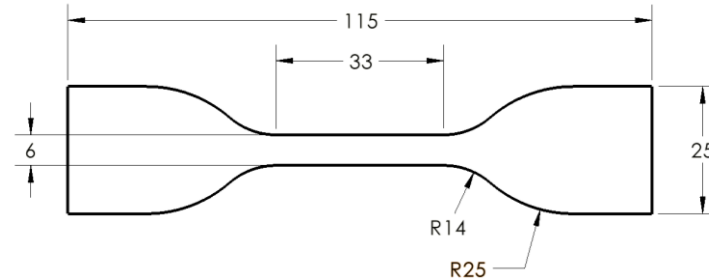
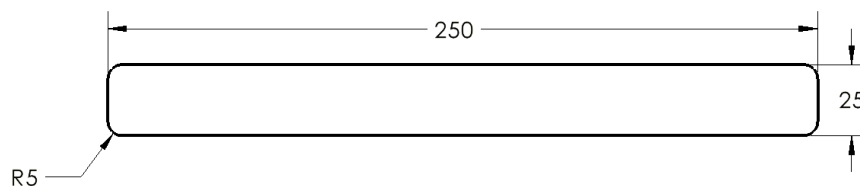


(b) Vista lateral de la estructura tipo nácar.

Figura 1: Estructura tipo nácar fabricada por medio de impresión 3D.**Tabla 1:** Propiedades mecánicas del Tough PLA [12] y el TPU95A [13] de Ultimaker.

Material	Dureza (Durómetro shore D)	Resistencia al impacto (kJ/m ²)	Resistencia a la tracción XY (MPa)	Resistencia a la tracción Z (MPa)
Tough PLA	80	9	45	33
TPU95A	48	24	24	6

Para el proceso de caracterización del *TPU95A* se fabricaron dos tipos de probetas: rectangulares y tipo *dog-bone* o hueso de perro. La impresora utilizada fue la *Ultimaker S5*, que emplea la tecnología de fabricación con filamento fundido (FFF). Ambas probetas se fabricaron de acuerdo con la norma ASTM D412 [14] (Figura 2a) y ASTM D3039 [15] (Figura 2b), respectivamente.

(a) Probeta tipo *dog-bone* de acuerdo con la norma ASTM D412.

(b) Probeta rectangular de acuerdo con la norma ASTM D3039.

Figura 2: Geometría y dimensiones de las probetas según las normas ASTM D412 [14] y ASTM D3039 [15].

El espesor total de cada probeta era de 2 mm, con un total de 16 capas de 0.125 mm de espesor. Las orientaciones de las capas se definieron según la secuencia [45, 0, -45, 90]_{2S}, con el fin de obtener un comportamiento cuasi-isotrópico. Los parámetros de impresión empleados fueron los establecidos por el fabricante, algunos de los cuales se muestran a continuación:

Tabla 2: Parámetros de impresión del Tough PLA y el TPU95A establecidos por el fabricante.

Material	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de cama (°C)	Velocidad de impresión (mm/s)
Tough PLA	152	60	25
TPU95A	216,8	No se calienta	25

2.1. Pruebas experimentales a tensión de las probetas tipo *dog-bone* de TPU

Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de caracterización mecánica del grupo de investigación AMADE de la Universitat de Girona, de acuerdo con la norma ASTM D412 [14] usando una máquina universal de ensayos MTS *Insight* 50kN equipada con una célula de carga de 10 kN. Los ensayos se realizaron con control de desplazamiento a una velocidad de 500 mm/min. Durante los ensayos se usó una cámara CANON modelo 550D para el registro de imágenes del ensayo a razón de 2 imágenes por segundo para su posterior posprocesamiento digital.

Para medir las deformaciones longitudinales y obtener la curva esfuerzo-deformación del material, las probetas fueron marcadas con dos líneas de color negro separadas 25 mm equidistantes al eje medio transversal. Durante el posprocesamiento de las imágenes, se pudo determinar la deformación aplicada a la probeta en cada momento midiendo digitalmente la distancia entre ambos marcadores. El montaje empleado para la prueba puede observarse en la Figura 3. Cabe mencionar que, previamente, se realizaron varias pruebas de iluminación y contraste para asegurar un correcto posprocesamiento de las imágenes. Finalmente, se determinó que la mejor combinación se lograba colocando la probeta sobre un fondo blanco y usando líneas de color negro como marcadores.



(a) Probeta sujeta por las mordazas.



(b) Posición de la cámara para capturar las imágenes.

Figura 3: Montaje de las pruebas de tensión para las probetas de TPU tipo *dog-bone*.

2.2. Pruebas experimentales a tensión de las probetas rectangulares de TPU

Las pruebas de las probetas rectangulares según la norma ASTM D3039 fueron realizadas en el mismo laboratorio, con el mismo equipamiento y siguiendo el mismo procedimiento que para las probetas tipo *dog-bone*. No obstante, para medir las deformaciones longitudinales y transversales, y de esta manera hallar el coeficiente de Poisson del material, las probetas fueron marcadas con dos líneas negras separadas 25 mm equidistantes al eje medio transversal, al igual que las probetas *dog-bone*, y también con dos líneas, de 160 mm de longitud y separadas 15 mm, y equidistantes al eje medio longitudinal (Figura 4a). El montaje empleado para la prueba puede observarse en la Figura 4b y Figura 4c.



(a) Marcas en la probeta.



(b) Probeta sujeta por las mordazas.



(c) Posición de la cámara para capturar las imágenes.

Figura 4: Montaje de las pruebas de tensión para las probetas de TPU rectangulares.

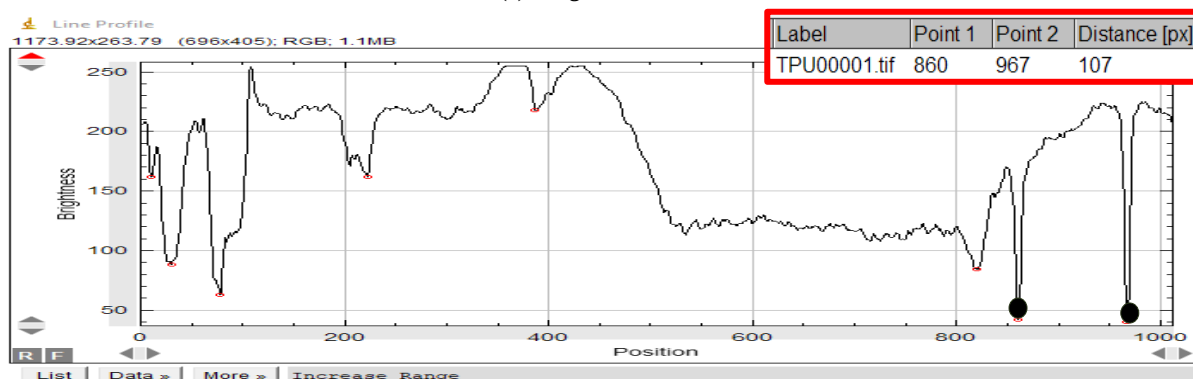
2.3. Posprocesamiento de imágenes para medir las deformaciones

La medición de las deformaciones longitudinales y transversales fue realizada con la ayuda de una macro [16] para el programa ImageJ [17]. Dicha macro determina la distancia en píxeles entre los dos últimos mínimos de intensidad, los cuales corresponden a las marcas negras realizadas sobre las probetas (Figura 5). Antes del posprocesamiento fue necesario recortar todas las imágenes para acotar la zona de interés y facilitar el análisis, tal y como se puede observar en la Figura 5a.

3.38x0.11 inches (1013x33); RGB; 131K



(a) Imagen recortada.



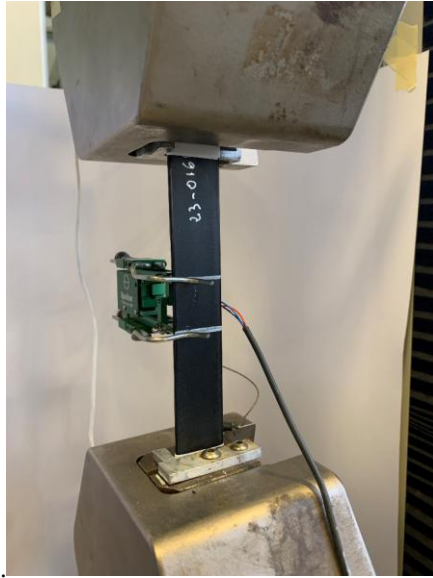
(b) Gráfica de la variación de la intensidad en la imagen.

Figura 5: Posprocesamiento de imágenes y proceso de medición de la distancia entre marcas.

Los dos círculos negros son los últimos mínimos de intensidad que corresponden a las marcas negras de la probeta. El cuadro en rojo señala la distancia en píxeles entre estos mínimos. De esta manera, para cada imagen se registra una distancia en píxeles y, posteriormente, se calcula cada deformación. Conviene comentar que, al querer determinar deformación y no desplazamiento real, no fue necesario escalar las imágenes pudiendo obtener el valor de deformación como la variación relativa en píxeles. Este proceso se siguió para ambos tipos de probetas y en el caso de las probetas rectangulares, para ambas deformaciones: longitudinales y transversales.

2.4. Pruebas experimentales a tensión de las probetas rectangulares de PLA para el proceso de validación

Las pruebas de las probetas rectangulares según la norma ASTM D3039 del PLA fueron realizadas en el mismo laboratorio, con el mismo equipamiento y siguiendo el mismo procedimiento que para las probetas de TPU, aunque en este caso se usó una célula de carga de 50 kN y la velocidad de la prueba fue de 2 mm/min. Además, sobre cada probeta se posicionó un extensómetro mecánico con el objetivo de medir las deformaciones longitudinales (Figura 6a). Adicionalmente, se añadieron en el centro dos marcas blancas separadas 25 mm para medir dichas deformaciones a través del posprocesamiento digital de imágenes (las imágenes fueron registradas con la cámara) y compararlas con los resultados obtenidos con el extensómetro. El montaje empleado para la prueba puede observarse en la Figura 6.



(a) Probeta sujeta por las mordazas y con el extensómetro posicionado.



(b) Posición de la cámara para capturar las imágenes.

Figura 6: Montaje de las pruebas de tensión para las probetas de PLA.

3. Resultados

3.1. Validación del método de posprocesamiento digital de imágenes y medición de propiedades con las probetas de Tough PLA

La Figura 7 muestra las curvas de deformación longitudinal vs tiempo obtenidas durante el ensayo de una de las probetas de Tough PLA, utilizando ambos métodos de medición de las deformaciones: Posprocesamiento digital de imágenes y extensometría. Para facilitar la comparación entre ambas curvas, se añadió una línea de tendencia a la curva obtenida mediante posprocesamiento digital de imágenes. Esta línea de tendencia presenta un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,9869$.

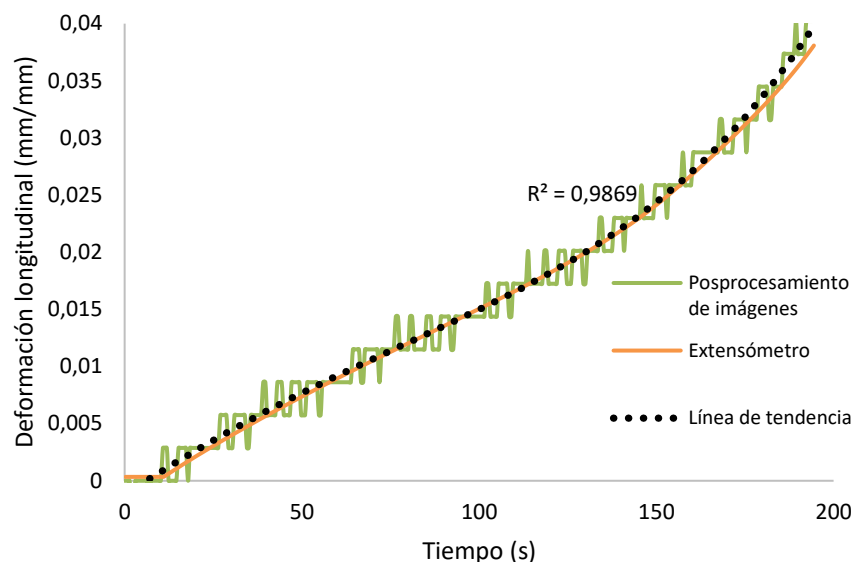


Figura 7: Deformación longitudinal vs tiempo para la primera probeta rectangular de TPU usando el extensómetro y el posprocesamiento digital de imágenes.

La curva obtenida a través del método de posprocesamiento de imágenes presenta escalones, esto se debe principalmente a dos razones: la incertidumbre de la medida es de ± 1 píxel por lo que la distancia entre las marcas puede ser la misma para cierta cantidad de imágenes consecutivas; y que al marcar los mínimos de intensidad (cruces amarillas Figura 5a), no siempre lo hace en los mismos puntos dentro de las marcas de color negro, por lo que para una imagen determinada la macro puede dar un valor de distancia menor con respecto a la imagen anterior. A pesar de esto, la tendencia es clara y el método puede considerarse válido.

Las curvas esfuerzo vs deformación obtenidas durante las pruebas experimentales de tensión se presentan en la Figura 8. Como se muestra, tienen una gran correspondencia entre ellas. Estas curvas permitieron obtener el módulo de Young (E), el coeficiente de Poisson (ν) y la resistencia última del material (Tabla 3), los cuáles serán usados como entrada en el análisis numérico. El coeficiente de variación se presenta junto a cada valor.

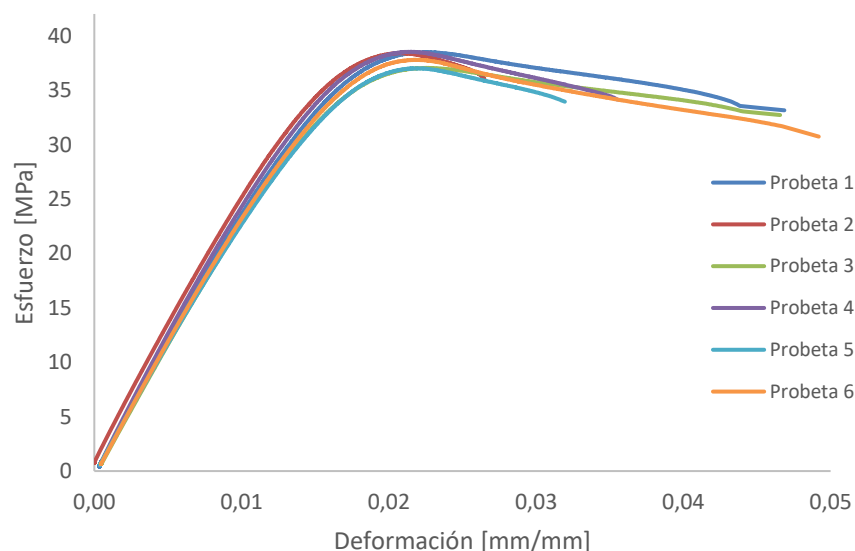


Figura 8: Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas con las probetas de Tough PLA.

Tabla 3: Propiedades mecánicas del Tough PLA obtenidas con las pruebas de tensión.

Material	E (MPa)	ν	Resistencia última (MPa)
Tough PLA	2509 (3,04%)	0,26 (5,55%)	37,9 (1,87%)

3.2. Probetas tipo dog-bone de TPU

A partir de las pruebas experimentales de tensión, se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación. Dichas curvas muestran alta repetibilidad (Figura 9) y reflejan el comportamiento hiperelástico material.

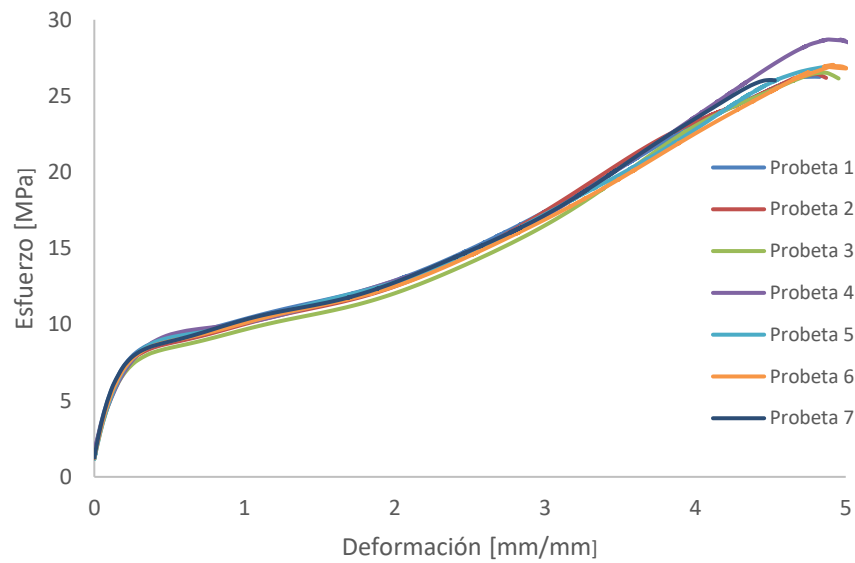


Figura 9: Curvas esfuerzo-deformación obtenidas con las probetas tipo *dog-bone*.

3.3. Probetas rectangulares de TPU

Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas durante las pruebas se muestran en la Figura 10. Al igual que las anteriores, presentan una alta repetibilidad.

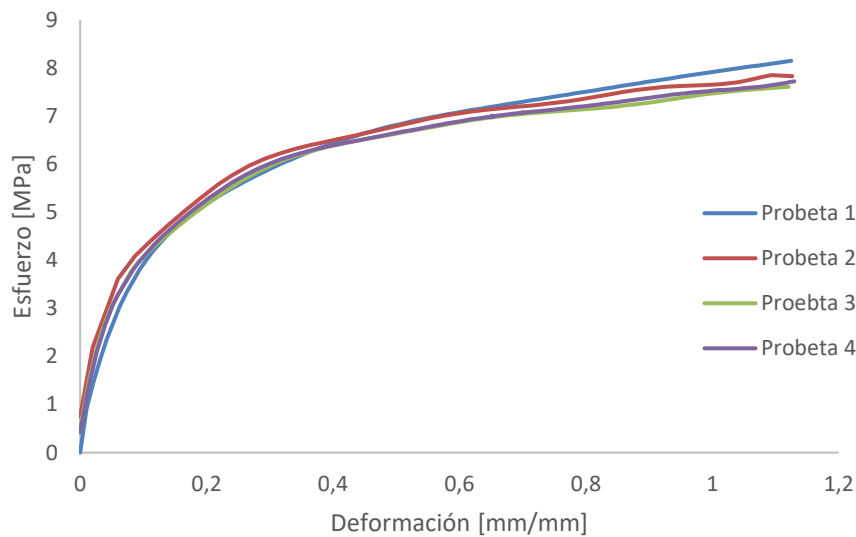


Figura 10: Curvas esfuerzo-deformación obtenidas con las probetas rectangulares.

Adicionalmente, la parte inicial de las curvas de deformaciones transversales vs deformaciones longitudinales se muestran en la Figura 11. En cada curva se agregó una línea de tendencia y su pendiente correspondiente. El valor de dicha pendiente equivale al coeficiente de Poisson.

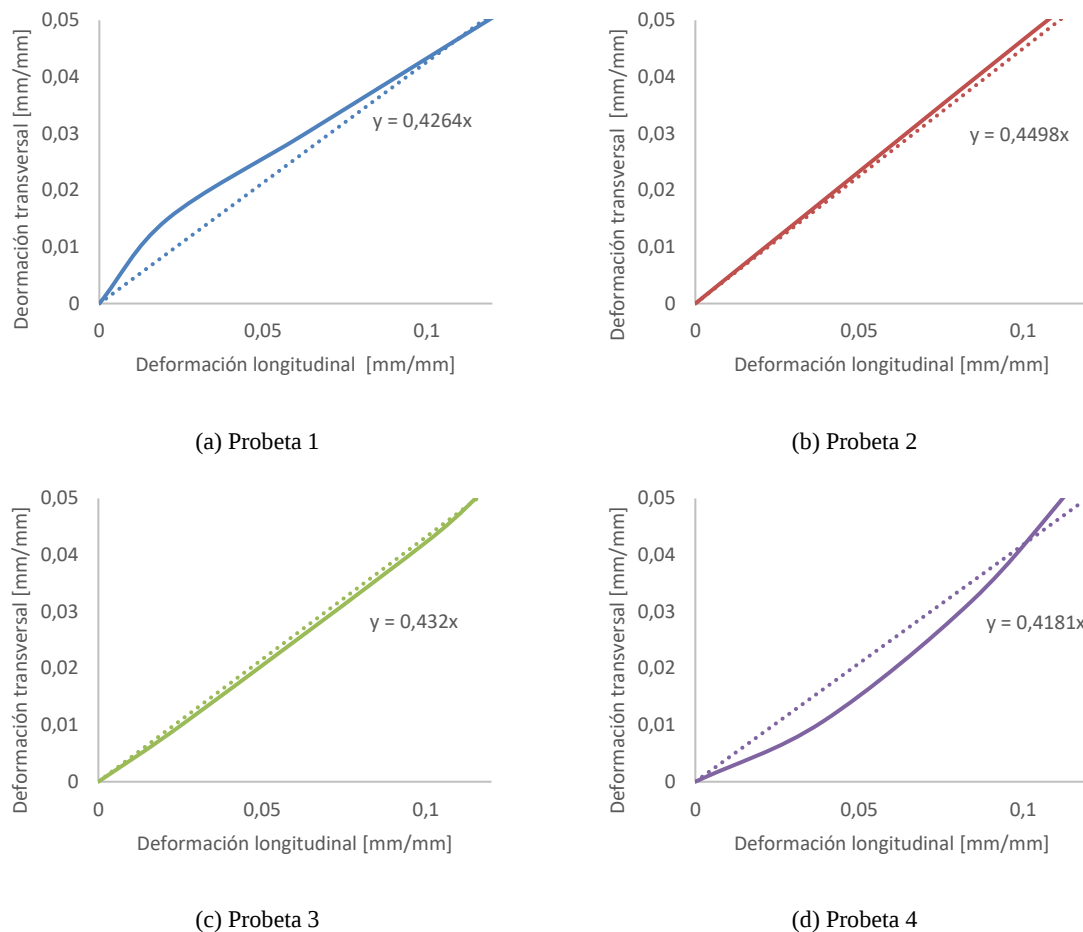


Figura 11: Curvas deformación transversal vs deformación longitudinal obtenidas con las probetas rectangulares.

De acuerdo con el coeficiente de Poisson obtenido para cada probeta y realizando un promedio de todos los valores, se puede considerar que el valor del coeficiente de Poisson para el TPU95A es de 0.43 (CoV 3,11%). Este debería ser el valor utilizado como propiedad del material en posteriores simulaciones numéricas.

4. Discusión

El software de elementos finitos ABAQUS permite la definición de un material hiperelástico a partir de datos experimentales obtenidos en pruebas uniaxiales, biaxiales, planas y/o volumétricas. En este caso, la curva promedio de las que se observan en la Figura 9 fue seleccionada como entrada para la simulación numérica. Además, es necesario elegir el potencial de energía de deformación que mejor se ajuste a dicha curva. Para ello, ABAQUS ofrece la opción de evaluar diferentes modelos constitutivos. Al realizar esta evaluación, únicamente se consideraron los modelos ideales para casos donde solo se tienen datos experimentales en un modo de carga: *Neo-Hooke*, *Yeoh*, *Arruda-Boyce*, *Marlow*. De estos, el modelo que mejor se adapta a la curva experimental es el modelo de *Marlow*, ya que, como se observa en la **Error! Reference source not found.**, reproduce exactamente los datos experimentales [11].

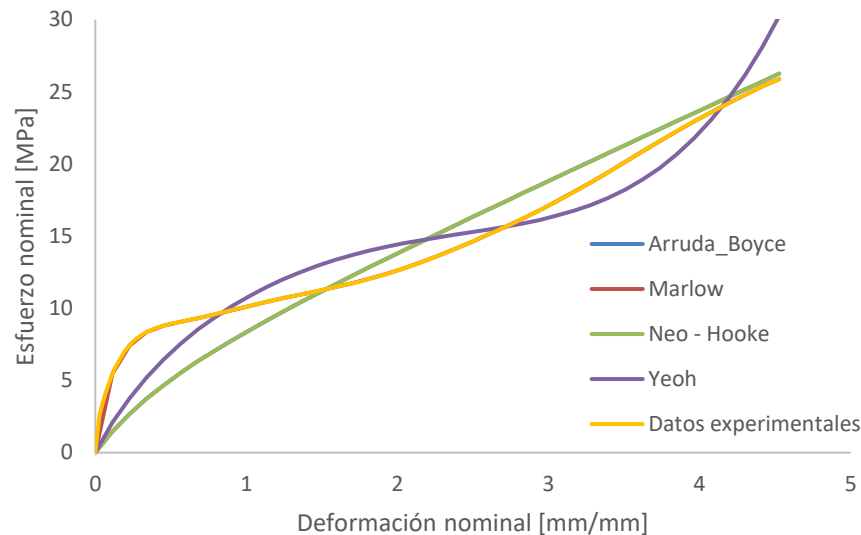


Figura 12: Curva esfuerzo nominal vs deformación nominal del TPU obtenida de manera experimental, junto con las curvas de los modelos hipereelásticos.

El coeficiente de Poisson también debe ser ingresado en la simulación, ya que no se dispone de datos adicionales de prueba. Como se mencionó anteriormente, este valor corresponde al promedio de las pendientes de las cuatro curvas de la Figura 11, completando así la caracterización del TPU.

En la Figura 11 se observa que dos de las curvas tienen un comportamiento claramente lineal (Figura 11b y Figura 11c) mientras que en las otras dos (Figura 11a y Figura 11d) se aprecian variaciones. Esto se debe al método de medición empleado basado en el posprocesamiento digital de imágenes. La macro utilizada no puede capturar pequeños cambios en la distancia entre las marcas en imágenes consecutivas debido a la incertidumbre de la medida en píxeles, que es de ± 1 píxel. Además, la macro identifica dos puntos dentro de las marcas para medir la distancia, pero esta selección puede no ser exactamente la misma en todas las imágenes (Figura 5a).

Para la simulación del PLA en ABAQUS, se empleará un modelo elasto-plástico. Para ello, se requiere el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y el promedio de las curvas de la Figura 8 para ingresar los puntos que corresponden a la parte plástica. Este material también se empleó para validar el método de medición de deformaciones por medio del posprocesamiento digital de imágenes. En la Figura 7 se observa una alta correspondencia entre ambas curvas, lo que confirma la exactitud del posprocesamiento digital de imágenes para medir las deformaciones del TPU.

5. Conclusiones

Este estudio forma parte de una investigación más amplia titulada: “Optimización de compuestos bio-inspirados impresos en 3D sometidos a cargas fuera del plano”. Tal como se mencionó anteriormente, el objetivo es reproducir y ensayar estructuras tipo nácar similares a las de la Figura 1 y desarrollar un modelo numérico que permita replicar con éxito las pruebas experimentales y buscar la optimización de este tipo de estructuras. Para ello, es fundamental caracterizar los dos materiales que conforman el compuesto: *el TPU95A* y *el Tough PLA*.

En este estudio se detalló el proceso de caracterización de ambos materiales, con especial énfasis en el TPU, debido a su comportamiento hipereelástico y la dificultad de medir sus deformaciones con un extensómetro mecánico.

La caracterización del TPU permitió obtener las curvas de esfuerzo vs deformación del material y el coeficiente de Poisson mediante ensayos en dos tipos de probetas: *dog-bone* y rectangulares. Las deformaciones longitudinales y transversales fueron determinadas a través del posprocesamiento digital de imágenes, utilizando el software ImageJ [17]. Para su implementación en ABAQUS, se seleccionó el modelo constitutivo *Marlow*, ideal para casos en los que solo se tienen datos de prueba uniaxiales.

Por otro lado, la caracterización del PLA permitió obtener sus propiedades mecánicas y los datos experimentales necesarios para emplear un modelo elasto-plástico en ABAQUS. Adicionalmente, las mediciones de deformaciones longitudinales realizadas con extensómetro fueron comparadas con las obtenidas mediante posprocesamiento digital de imágenes, lo que permitió validar con éxito el método de medición.

6. Agradecimientos

Agradecemos la financiación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIU) a través de la ayuda FPU19/06775 y al proyecto PID2022-140343NB-I00 (BISTAPAM, *Desarrollo de productos a medida basados en estructuras multimaterial bioinspiradas a partir de fabricación aditiva*), del que hace parte esta investigación.

7. Referencias

- [1] Tran P., Ngo T. D., Mendis P., “Bio-inspired composite structures subjected to underwater impulsive loading”, *Computational Materials Science* **82**, 134-139 (2014)
- [2] Sivasankaran P. N., Ward T. A., Viyapuri R., Johan M. R., “Static strength analysis of dragonfly inspired wings for biomimetic micro aerial vehicles”, *Chinese Journal of Aeronautics* **29(2)**, 411-423 (2016)
- [3] Ampaw E. et al., “Compressive deformation and failure of trabecular structures in a turtle shell”, *Acta Biomaterialia* **97**, 535-543 (2019)
- [4] Tran P., Ngo T. D., Ghazlan A., Hui D., “Bimaterial 3D printing and numerical analysis of bio-inspired composite structures under in-plane and transverse loadings”, *Composites Part B* **108**, 210-223 (2017)
- [5] Rudykh S., Ortiz C., Boyce M. C., “Flexibility and protection by design: Imbricated hybrid microstructures of bio-inspired armor”, *Soft Matter* **11**, 2547-2554 (2015)
- [6] Gu G. X., Takaffoli M., Hsieh A. J., Buehler M. J., “Biomimetic additive manufactured polymer composites for improved impact resistance”, *Extreme Mechanics Letters* **9**, 317-323 (2016)
- [7] Ko K., Jin S., Lee S. E., Lee I., Hong J., “Bio-inspired bimaterial composites patterned using three-dimensional printing”, *Composites Part B* **165**, 594-603 (2019)
- [8] Ko K., Lee S., Hwang Y. K., Jin S., Hong J., “Investigation on the impact resistance of 3D printed nacre-like composites”, *Thin-Walled Structures* **177**, 109392 (2022)
- [9] Ko K., Jin S., Lee S. E., Hong J., “Impact resistance of nacre-like composites diversely patterned by 3D printing”, *Composite Structures* **238**, 111951 (2020)
- [10] Wang Y. et al., “Simplification of Hyperelastic Constitutive Model and Finite Element Analysis of Thermoplastic Polyurethane Elastomers”, *Macromolecular Theory and Simulation* **29**, 202000009 (2020)
- [11] SIMULIA, “SIMULIA User Assistance 2022.” [En línea]. Disponible en: <http://130.149.89.49:2080/v2016/books/usb/default.htm>. [Consultado: mayo de 2023]
- [12] ASTM Standard D412-06a, “Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension”, ASTM International, United States, 2009
- [13] ASTM Standard D 3039/D 3039M – 00 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”, ASTM International, United States, 2000
- [14] UltiMaker, “Tough PLA.” [En línea]. Disponible en: <https://ultimaker.com/materials/s-series-tough-pla/>. [Consultado: junio de 2022]
- [15] UltiMaker, “TPU95A.” [En línea]. Disponible en: <https://ultimaker.com/materials/s-series-tpu-95a/>. [Consultado: junio de 2022]
- [16] Burri O., “How to measure distances between two marks in various images in ImageJ?”. [En línea]. Disponible en: <https://forum.image.sc>. [Consultado: abril de 2023].
- [17] Schneider C., Rasband W., Eliceiri K., “NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis”. *Nat Methods* **9**, 671–675 (2012)