

Characterization of Mechanical Properties of Resins Used in SLA

Geraldo Cesar Rosario de Oliveira, PhD¹, Carlos Alexis Alvarado Silva, Msc², Vania Aparecida Rosario de Oliveira, Msc¹, Antonio dos Reis Faria Neto, PhD¹, Victor Orlando Gamarra Rosado, PhD¹, Fernando de Azevedo Silva, PhD¹ and Erick Siqueira Guidi, PhD¹

¹Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil, geraldo.cesar@unesp.br, oliveira.vania@gmail.com, antonio.faria@unesp.br, victor.rosado@unesp.br, fernando.azevedo@unesp.br, erick.s.guidi@unesp.br

²Universidad César Vallejo, Fabricación Digital e Innovación Educativa, Perú, calvarados@ucv.edu.pe

Abstract - *This article addresses the characterization of the mechanical properties of a photosensitive resin commonly used in the additive manufacturing process of plastic parts by stereolithography (SLA) used in engineering education experiments. The study aimed to compare didactically engineering education the results of material characterization experimentally through tensile and flexural tests with the simulated results through the finite element method.*

Keywords - *Additive Manufacturing, Finite Elements, SLA, Mechanical Tests.*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Caracterización de Resinas Utilizadas en el Proceso de Fabricación Aditiva SLA

Geraldo Cesar Rosario de Oliveira, PhD¹, Carlos Alexis Alvarado Silva, Msc², Vania Aparecida Rosario de Oliveira, Msc¹, Antonio dos Reis Faria Neto, PhD¹, Victor Orlando Gamarra Rosado, PhD¹, Fernando de Azevedo Silva, PhD¹ and Erick Siqueira Guidi, PhD¹

¹Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil, geraldo.cesar@unesp.br, oliveira.vania@gmail.com, antonio.faria@unesp.br, victor.rosado@unesp.br, fernando.azevedo@unesp.br, erick.s.guidi@unesp.br

²Universidad César Vallejo, Fabricación Digital e Innovación Educativa, Perú, calvarados@ucv.edu.pe

Resumen - Este artículo aborda la caracterización de las propiedades mecánicas de una resina fotosensible frecuentemente empleada en el proceso de fabricación aditiva de piezas plásticas mediante estereolitografía (SLA), utilizada en experimentos para la enseñanza de ingeniería. El objetivo del estudio fue comparar de manera didáctica para la enseñanza de ingeniería los resultados de la caracterización del material experimentalmente, a través de ensayos de tracción y flexión, con los resultados simulados mediante el método de los elementos finitos.

Palabras Clave - Manufactura Aditiva, Elementos Finitos, SLA, Ensayos Mecánicos.

I. INTRODUCCIÓN

Fabricación aditiva mediante estereolitografía (SLA) se destaca por su alta resolución y versatilidad en la producción de piezas. Este proceso se basa en la exposición controlada de resinas fotosensibles a la luz ultravioleta (UV), lo que permite la solidificación progresiva de las capas sobre una plataforma de construcción [1-3].

El uso de la impresión 3D en la enseñanza de ingeniería representa un avance significativo, al ofrecer una metodología práctica e innovadora para el desarrollo de habilidades técnicas.

La capacidad de crear modelos tridimensionales tangibles y funcionales facilita la visualización de conceptos complejos, como la geometría espacial y el diseño de componentes mecánicos, proporcionando una comprensión más concreta. Esto no solo mejora la asimilación teórica, sino que también fomenta un aprendizaje más dinámico, permitiendo a los estudiantes explorar, probar y perfeccionar sus ideas de manera experimental, estimulando el pensamiento crítico y la resolución de problemas [4-6].

Además de reforzar la conexión entre teoría y práctica, esta experiencia promueve la innovación y la creatividad, preparando a los futuros ingenieros para enfrentar los desafíos del diseño y la producción en su carrera profesional [4-6].

La impresión 3D no solo optimiza los métodos pedagógicos, sino que también resalta la resistencia y versatilidad de los materiales empleados en el proceso, lo que amplía aún más su impacto en la enseñanza de ingeniería.

Materiales como plásticos de ingeniería, polímeros

reforzados y metales son comúnmente utilizados en la fabricación aditiva, ofreciendo propiedades mecánicas robustas y adaptables a diversas aplicaciones [7-9].

La integración de simulaciones computacionales y análisis por elementos finitos expande las posibilidades de la impresión de estructuras complejas y piezas personalizadas con distintos niveles de resistencia mecánica.

Al incorporar estas herramientas, los estudiantes pueden profundizar su comprensión sobre la interacción entre el diseño y el desempeño estructural, explorando virtualmente las propiedades del material y su comportamiento antes de la fabricación física.

Esta metodología proporciona una experiencia enriquecedora sobre la diversidad de materiales disponibles en impresión 3D, capacitando a los futuros ingenieros para tomar decisiones fundamentadas en la selección de materiales para proyectos reales.

Al considerar la resistencia estructural a través de simulaciones por elementos finitos, los estudiantes fortalecen su formación técnica y mejoran su capacidad de innovación, contribuyendo a un desarrollo más eficiente y sostenible en el campo de la ingeniería [10-14]. En este contexto, el presente estudio se centra en el análisis de las propiedades mecánicas de una resina fotopolimerizable determinada, con énfasis en ensayos de tracción y flexión para evaluar su idoneidad en aplicaciones prácticas.

II. METODOLOGÍA

La resina fotopolimerizable seleccionada fue sometida a ensayos de tracción y flexión de acuerdo con las normativas para plásticos ASTM D638-14 (2014) Tipo 1 y ASTM D790-6 (2016). Las pruebas se llevaron a cabo en una máquina universal de ensayos Shimadzu, como se muestra en la Fig. 1.

En este estudio, se fabricaron el cuerpo de prueba para ensayos de tracción y flexión, modelados con el software Chitubox y impresos con la impresora Saturn 2 Elegoo, como se muestra en las Fig. 2 y 3.

Los parámetros utilizados en la impresión fueron:

- Tiempo de exposición: 2.2 s.
- Tiempo de exposición base: 20 s, con 5 capas base.
- Altura de capa: 0.05 mm.
- Tiempo de postcurado: 15 minutos.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

La resina utilizada fue *Anycubic Water-Wash Resin+ Black*, cuyas características proporcionadas por el fabricante se listan en la Tabla I.



Fig. 1 Máquina universal con equipos para el ensayo de tracción y flexión (en detalle).

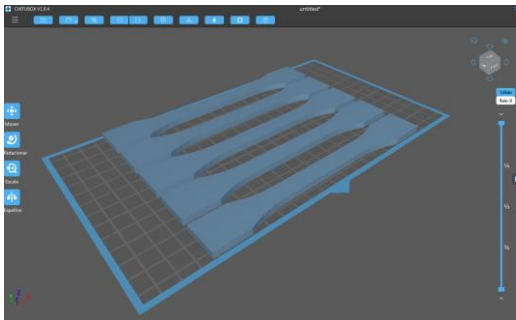


Fig. 2 Modelos de los cuerpos de prueba en el software divisor Chitubox.



Fig. 3 Impresora Saturn 2 Elegoo.

TABLA I
Propiedades de la resina utilizada

Longitud de onda UV	365-405 nm
Densidad	1.15 – 1.20 g/cm ³
Dureza	80 Shore D
Resistencia a la tracción	30-45 MPa
Deformación en la rotura	8%-15%
Módulo de elasticidad	1600-1800 MPa
Resistencia a la flexión	50-60 MPa
Módulo de flexión	1500-1600 MPa
Resistencia al impacto Izod	50-60 J/m

Durante los ensayos, los cuerpos de prueba fueron instrumentados con extensómetros cuyas características se presentan en la Tabla II.

TABLA II
Propiedades de los extensómetros utilizados

Modelo	BF350-4BB(11)
Resistencia	349.9 ± 0.2 Ω
Gage Factor	2.11 ± 1%
Dimensiones	4.0 x 4.1 mm

Los cuerpos de prueba instrumentados fueron utilizados en los ensayos de tracción para determinar el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

Los extensómetros empleados corresponden a un modelo doble, en el que las rejillas se posicionan en direcciones longitudinal y transversal sobre una base aislante flexible, como se ilustra en la Fig. 4.

Para garantizar el aislamiento eléctrico y la protección mecánica del sensor, así como la región de soldadura y cableado, se aplicó una fina capa de resina epoxi, como se muestra en la Fig. 5. El sistema de adquisición de datos utilizado fue el HBM Quantum junto con el software Catman Easy, configurado según la Fig. 6.

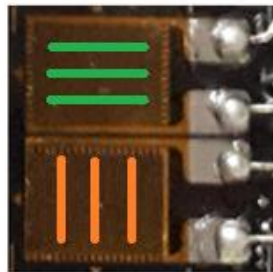


Fig. 4 Dirección de la cuadrícula de los extensómetros.



Fig. 5 Protección de los extensómetros con epoxi.

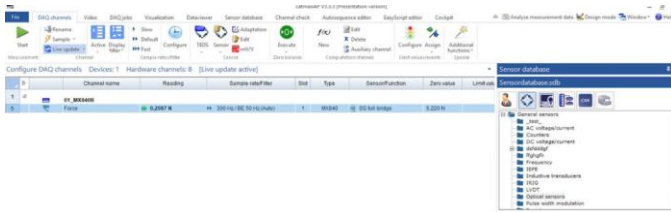


Fig. 6 Configuración del software de adquisición de datos.

Los modelos tridimensionales de los cuerpos de prueba fueron desarrollados y sometidos a simulaciones en el módulo Static Structural del software Ansys Workbench.

Se creó un nuevo material en la biblioteca del software denominado Water-Wash Resin, con las propiedades obtenidas en los ensayos mecánicos de tracción de los cuerpos de prueba, conforme a la Tabla III y la Fig. 7.

TABLA III
Propiedades mecánicas de la resina utilizada

Módulo de Young	1521 MPa
Coefficiente de Poisson	0.34
Módulo de Cizallamiento	56.754 MPa
Resistencia última a la tracción	17 MPa

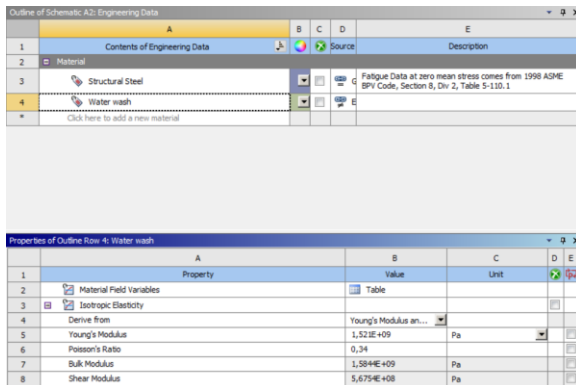


Fig. 7 Nuevo material agregado a la biblioteca del software.

La construcción del modelo de los cuerpos de prueba de tracción se realizó utilizando ANSYS Workbench, modelado como una pieza homogénea dividida en tres partes.

Esta división permitió representar las regiones sujetas por los mordientes de la máquina de ensayos y la zona que experimentó la deformación medida. Las condiciones de contorno (aplicación de restricciones y fuerzas) se presentan en la Fig. 8.

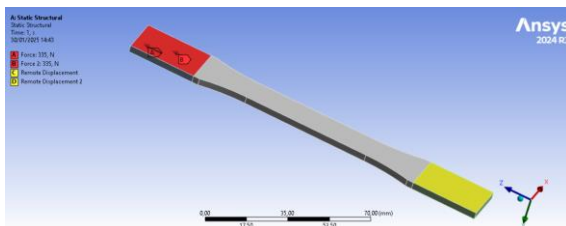


Fig. 8 Restricciones aplicadas al modelo del cuerpo de prueba de tracción.

De manera análoga, para la construcción del modelo de los cuerpos de prueba de flexión también se utilizó ANSYS Workbench.

En este modelo, se aplicaron dos restricciones de movimiento que representan los soportes (Displacement A y Displacement B, mostrados en la Fig. 9) y un punzón para aplicar una carga de 51 N, como se ilustra en la misma figura.

El Displacement D corresponde a la restricción de movimiento del punzón, permitiendo desplazamiento únicamente en el eje vertical (Y).

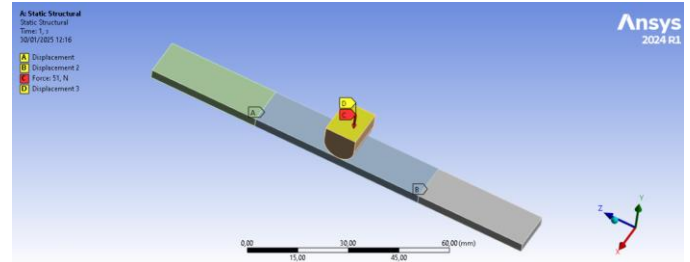


Fig. 9 Restricciones aplicadas al modelo del cuerpo de prueba de ensayo de flexión.

La generación de la malla de elementos finitos se realizó utilizando los elementos SOLID186, CONTA174, TARGE170 y SURF154 en ambos casos (tracción y flexión).

El contacto entre las secciones del cuerpo de prueba en ambos ensayos fue del tipo bonded mientras que en el modelo de flexión el contacto entre el punzón y el cuerpo de prueba fue del tipo frictionless.

El número total de nodos y elementos generados en el modelo de tracción fue de 99,735 y 20,160, respectivamente, mientras que en el modelo de flexión fueron 66,213 y 13,488, respectivamente.

La malla obtenida se presenta en la Fig. 10 (tracción) y la Fig. 11 (flexión).

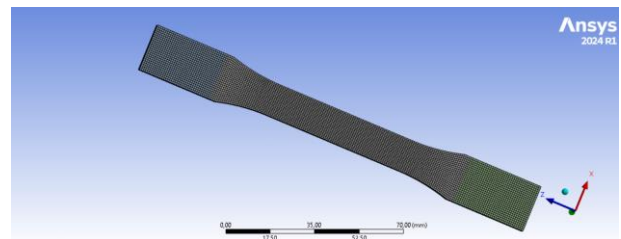


Fig. 10 Malla de elementos finitos para el modelo de tracción.

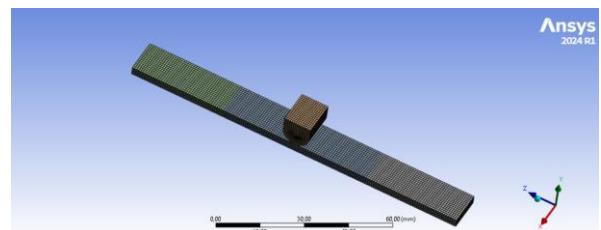


Fig. 11 Malla de elementos finitos para el modelo de flexión.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción y flexión proporcionaron información valiosa sobre el comportamiento mecánico de la resina.

Se analizaron parámetros como el módulo de elasticidad, la deformación específica, la resistencia a la tracción, la deformación máxima y la resistencia a la flexión.

A. Simulación

En la Fig. 12 se presenta la tensión normal (eje z) actuante en el cuerpo de prueba de tracción tras la aplicación de la carga, alcanzando un valor máximo de 16,88 MPa.

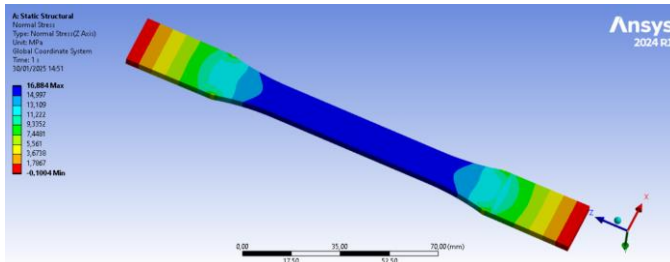


Fig. 12 Tensión normal en el cuerpo de prueba de tracción.

En la Fig. 13 se muestra el resultado de la deformación específica (ϵ) en la dirección longitudinal (eje z) en el cuerpo de prueba de tracción tras la aplicación de la carga, registrando una deformación máxima de 0,01109.

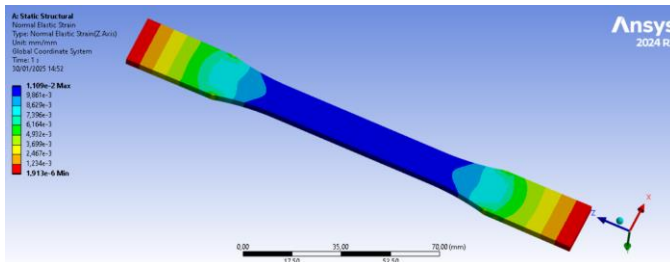


Fig. 13 Deformación específica en la dirección longitudinal (z).

En la Fig. 14 se muestra la deformación específica (ϵ) en la dirección transversal (eje x) del cuerpo de prueba de tracción tras la aplicación de la carga, con un valor máximo de -0,0037708.

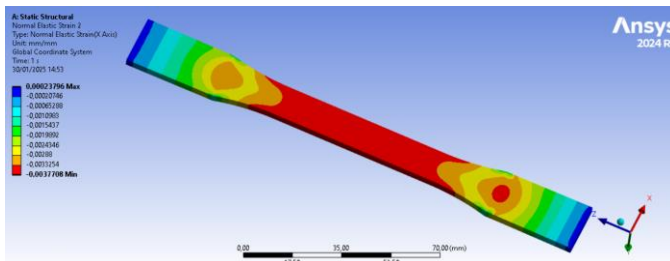


Fig. 14 Deformación específica en la dirección transversal (x).

En la Fig. 15 se presenta la tensión normal (eje z) en el cuerpo de prueba de flexión tras la aplicación de la carga. La diferencia observada entre los valores de tracción y compresión se debe a la compresión adicional puntual ejercida por el punzón durante la aplicación de la carga.

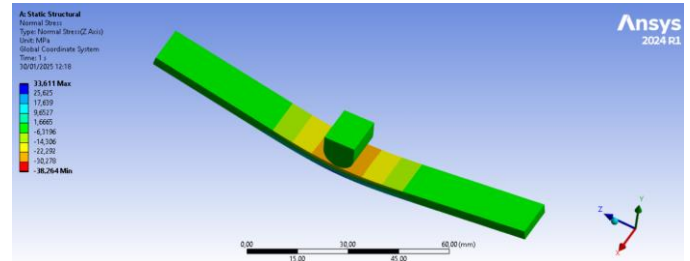


Fig. 15 Tensión normal en el cuerpo de prueba de flexión.

En la Fig. 16 se presenta el desplazamiento del punzón (eje y) durante la aplicación de la carga en el ensayo de flexión, registrando un valor máximo de 3,6325 mm.

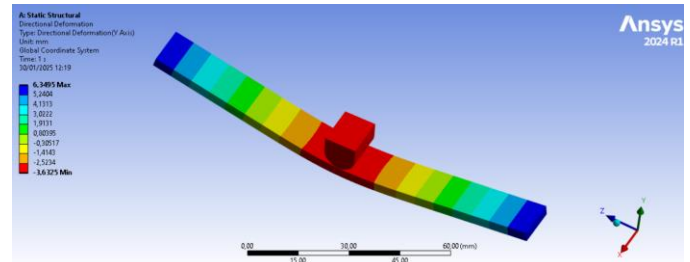


Fig. 16 Desplazamiento del punzón durante el ensayo de flexión.

B. Ensayo de Tracción

Los cuerpos de prueba presentaron una fractura de tipo frágil. La región de ruptura se produjo por encima de los extensómetros, como se muestra en la Fig. 17.

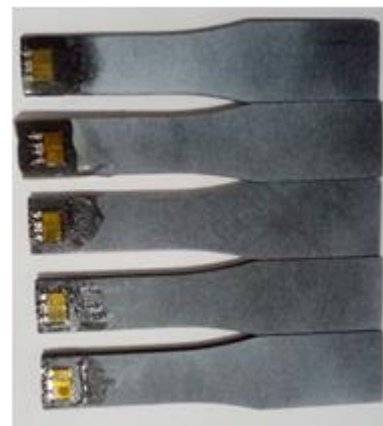


Fig. 17 Etiqueta de la resina utilizada.

La aparición de manchas en los cuerpos de prueba se debe a la aplicación de una fina capa de epoxi. En la Fig. 18, se

ilustra el cuerpo de prueba en tres etapas: (a) antes del ensayo, (b) después de la fractura y (c) con la capa protectora removida.

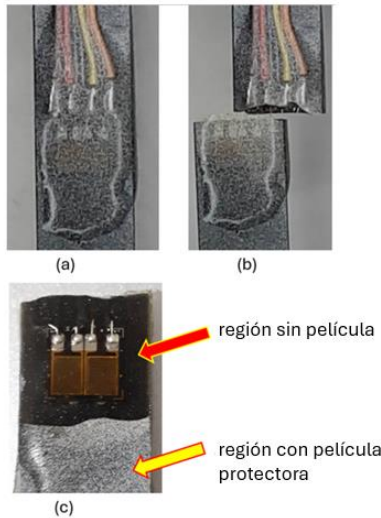


Fig. 18 Apariencia del CDP.

Como se observa en la Fig. 19, la resina presentó una resistencia a la tracción que varía entre 15,2 y 18,42 MPa, mientras que la deformación específica longitudinal oscila entre 0,0101 y 0,0128.

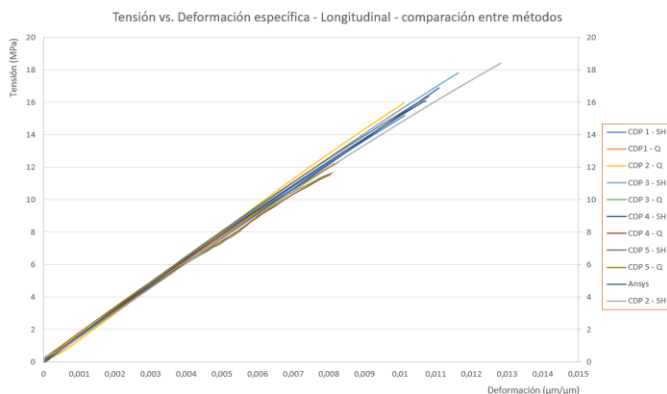


Fig. 19 Diagrama de Tensión vs. Deformación específica - Longitudinal - comparación entre métodos para tracción.

Los valores obtenidos a partir de la extensimetría son inferiores debido al desprendimiento prematuro de los extensómetros antes de la finalización del ensayo. No obstante, la tendencia de las curvas muestra un comportamiento similar a los demás métodos empleados.

En la Fig. 20 se presentan los valores promedio de las curvas de tendencia del diagrama de tensión vs. deformación longitudinal obtenidos con los distintos métodos utilizados.

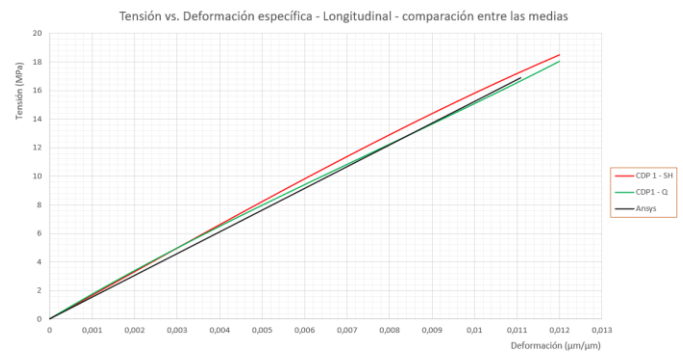


Fig. 20 Media de las curvas de tendencia del diagrama de tensión vs. deformación longitudinal relacionadas con el ensayo de tracción.

Como se observa en la Fig. 21, la resina presentó una deformación específica transversal que varió entre -0,003323 y -0,003947.

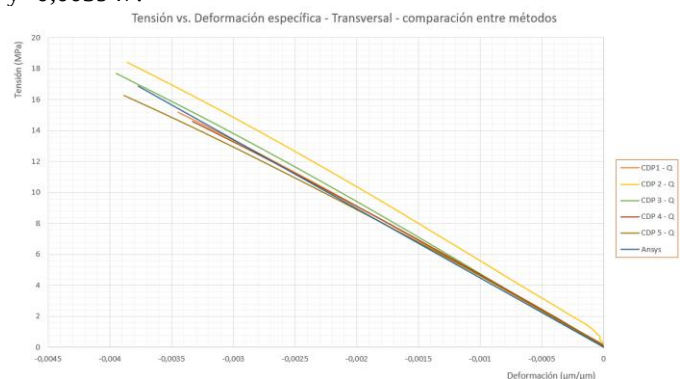


Fig. 21 Diagrama de tensión vs. deformación transversal obtenido en el ensayo de tracción.

En la Fig. 22 se muestran los valores promedio de las curvas de tendencia del diagrama de tensión vs. deformación transversal obtenidos mediante los distintos métodos utilizados.

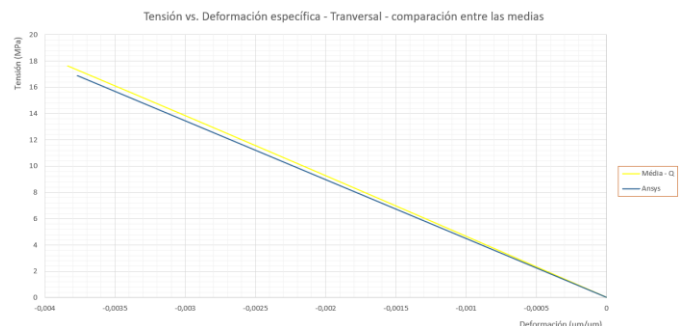


Fig. 22 Media de las curvas de tendencia del diagrama de tensión vs. deformación transversal en el ensayo de tracción.

C. Resistencia a la Flexión

La curva del ensayo de flexión se utilizó hasta la región elástica del material, deteniéndose la prueba en el punto en que se inició la falla del cuerpo de prueba, evidenciada por el cambio en la pendiente de la curva. En la Fig. 23 se ilustra la

aparición de los cuerpos de prueba antes y después del ensayo.



Fig. 23 Los cuerpos de prueba de flexión antes y después del ensayo.

En la Fig. 24 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de flexión en tres puntos, comparados con la curva obtenida mediante Ansys Workbench.

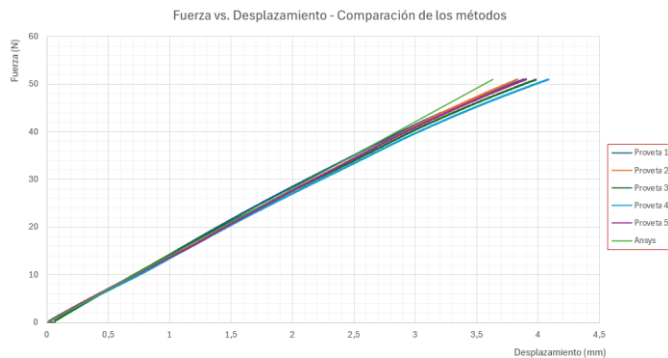


Fig. 24 Diagrama de fuerza vs. desplazamiento obtenido para los cuerpos de prueba de flexión mediante los métodos utilizados.

En la Fig. 25, se muestran los valores promedio de las curvas de tendencia del diagrama de fuerza vs. desplazamiento obtenidas a través de los distintos métodos empleados.

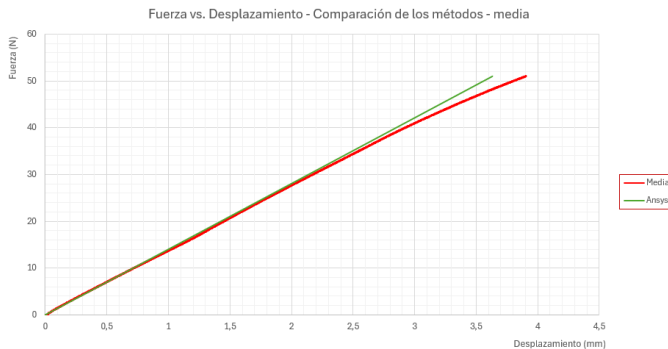


Fig. 25 Media de las curvas de tendencia del diagrama de fuerza vs. desplazamiento en el ensayo de flexión.

IV. CONCLUSIÓN

Este estudio proporciona un análisis integral de las propiedades mecánicas de la resina fotopolimerizable utilizada en la impresión 3D mediante SLA. Los resultados de los ensayos de tracción y flexión resaltan la resistencia del material bajo diferentes condiciones.

Comprender estas propiedades es fundamental para optimizar el proceso de impresión 3D y garantizar la aplicación efectiva de estos materiales en diversas áreas. Investigaciones futuras deberían profundizar en la influencia de los parámetros de impresión sobre la respuesta mecánica del material.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la máquina de ensayos y los valores simulados mediante Ansys Workbench, las propiedades mecánicas de la resina se encuentran dentro del rango especificado por el fabricante, con la excepción de la resistencia a la tracción, cuyos valores resultaron inferiores.

Las diferencias observadas entre los resultados experimentales y las simulaciones, así como las limitaciones de los ensayos con galgas extensométricas, tienen importantes implicaciones prácticas para la ingeniería de materiales. La menor resistencia a la tracción observada experimentalmente sugiere que la resina podría no haber alcanzado la polimerización completa, lo que resulta en una microestructura menos consolidada y, por lo tanto, una menor resistencia mecánica.

Además, las simulaciones de Ansys asumen parámetros de material homogéneos, mientras que los ensayos reales están sujetos a variables como la porosidad, la adhesión entre capas y la heterogeneidad del material.

Finalmente, las simulaciones no necesariamente consideran pasos como el lavado o el curado UV adicional, que pueden afectar las propiedades mecánicas en la práctica.

Las curvas de tendencia obtenidas mediante extensometría mostraron un comportamiento similar a las generadas por otros métodos, aunque se observó una interrupción prematura en la adquisición de datos. Este inconveniente puede atribuirse al desprendimiento anticipado de los extensómetros antes de la finalización del ensayo. Dicho imprevisto representa una oportunidad de aprendizaje, ya que permite la observación y análisis de posibles dificultades experimentales en la obtención de datos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Coordinación de Perfeccionamiento del Personal de Nivel Superior de Brasil (CAPES) - código de financiamiento 001.

REFERENCIAS

- [1] Ligon, S. C., Liska, R., Stampfl, J., Gurr, M., & Mülhaupt, R. (2017). Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chemical reviews*, 117(15), 10212-10290. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
- [2] Agrawal, H., & Thompson, J. E. (2021). Additive manufacturing (3D printing) for analytical chemistry. *Talanta Open*, 3, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2021.100036>
- [3] Laguna, O. H., Lietor, P. F., Godino, F. I., & Corpas-Iglesias, F. A. (2021). A review on additive manufacturing and materials for catalytic applications: Milestones, key concepts, advances and perspectives. *Materials & Design*, 208, 109927. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109927>
- [4] Hernandez-de-Menendez, M., Morales-Menendez, R. Technological innovations and practices in engineering education: a review. *Int J Interact*

- Des Manuf 13, 713–728 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00550-1>
- [5] Pikkarainen, A., & Piili, H. (2020). Implementing 3D Printing Education Through Technical Pedagogy and Curriculum Development. *Int. J. Eng. Pedagog.*, 10(6), 95–119. <https://doi.org/10.3991/ijep.v10i6.14859>
- [6] Chong, S., Pan, G. T., Chin, J., Show, P. L., Yang, T. C. K., & Huang, C. M. (2018). Integration of 3D printing and Industry 4.0 into engineering teaching. *Sustainability*, 10(11), 3960. <https://doi.org/10.3390/su10113960>
- [7] Liu, G., Zhang, X., Chen, X., He, Y., Cheng, L., Huo, M., ... & Lu, J. (2021). Additive manufacturing of structural materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 145, 100596. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596>
- [8] Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., & Dutta, N. K. (2021). Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges. *Polymers*, 13(5), 753. <https://doi.org/10.3390/polym13050753>
- [9] Kumar, M. B., & Sathiya, P. (2021). Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. *Thin-Walled Structures*, 159, 107228. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107228>
- [10] Bonhin, E. P., Müzel, S. D., de Oliveira, G. C. R., Medeiros Tupinambá, W. L., Guidi, E. S., Alvarado Silva, C. A., & de Azevedo Silva, F. (2024). Evaluation and Feasibility of Different Models and Methods for Composite Simulation Using Ansys. *IAENG International Journal of Computer Science*, 51(7).
- [11] Oliveira, G. C. R. d., Rosario de Oliveira, V. A., Alvarado Silva, C. A., Guidi, E. S., & Silva, F. d. A. (2025). Modeling the Stress Field in MSLA-Fabricated Photosensitive Resin Components: A Combined Experimental and Numerical Approach. *Modelling*, 6(1), 3. <https://doi.org/10.3390/modelling6010003>
- [12] Experimental Analysis of the Failure of the Bearing Support of a Cardan Shaft | Análise Experimental da Falha do Suporte de Mocal de um Eixo Cardan Alvarado Silva, C.A., De Souza, A.C., de Oliveira, G.C.R., de Azevedo Silva, F., Rubio, B.U. Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2022, 2022-July. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.784>
- [13] C. S. S. Rigo, A. D. R. D. F. Neto, F. J. Grandinetti, T. S. Castro, E. X. Dias, and M. S. Martins, “Development of the Steering System for a Formula SAE Prototype,” SAE Technical Paper, no 2024-36-0099, 2024.
- [14] Gomes, L. O., Grandinetti, F. J., Martins, M. S., Soares, A. M. S., de Faria Neto, A. R., Castro, T. S., & Almeida, L. F. (2024). Brake Pedal Sizing and Preliminary Design of Balance Bar in the Brake of a SAE Formula Type Vehicle (No. 2024-36-0054). SAE Technical Paper.