

## Ensayo de torsión aplicado a pernos impresos en 3D mediante tecnología SLA y DLP

**Diego Humberto Casa Pinos<sup>1</sup>**

[dhcasa@espe.edu.ec](mailto:dhcasa@espe.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0006-7661-4385>

Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”  
Quito – Ecuador

**Anghelo Andrés Mendoza Défaz**

[aamendoza3@espe.edu.ec](mailto:aamendoza3@espe.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0000-1737-9115>

Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”  
Quito – Ecuador

**Tayron Ivan Mora Aguilar**

[timora@espe.edu.ec](mailto:timora@espe.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0006-6919-5821>

Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”  
Quito – Ecuador

**Francisco José Rojas Montaña**

[fjrojas2@espe.edu.ec](mailto:fjrojas2@espe.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0004-8549-5387>

Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”  
Quito-Ecuador

**David Alexander Bautista Martínez**

[dabautista@espe.edu.ec](mailto:dabautista@espe.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-8516-3241>

Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”  
Quito – Ecuador

### RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó ensayos de resistencia a la torsión en pernos impresos en 3D, utilizando las tecnologías de estereolitografía y procesamiento digital de luz en tres diferentes resinas, con el fin de evaluar el comportamiento mecánico de los pernos impresos siguiendo la normativa ISO 898-7 y ASTM E143-02, y determinar si sus características presentan una ventaja competitiva frente a pernos que se pueden encontrar comercialmente o fabricados a partir de otras técnicas de manufactura. De igual manera se realizó un análisis por medio de un ANOVA multifactorial para comprobar diferencias significativas entre los tipos de resina utilizadas.

**Palabras clave:** torsión; resinas; pernos; manufactura; ANOVA.

---

<sup>1</sup> Autor principal

## **Torsion test applied to 3D printed bolts using SLA and DLP technology**

### **ABSTRACT**

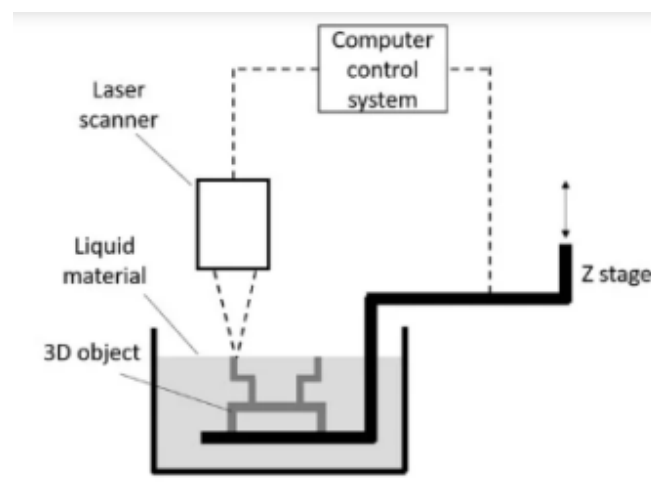
In the present research work, torsional strength tests were performed on 3D printed bolts using stereolithography and digital light processing technologies with three different resins, in order to evaluate the mechanical behavior of the printed bolts following ISO 898-7 and ASTM E143-02 standards, and determine if their characteristics present a competitive advantage compared to bolts that can be found commercially or manufactured using other manufacturing techniques. Likewise, a multifactor ANOVA analysis was performed to verify significant differences between the types of resins used.

*Keywords: torsion; resins; bolts; manufacturing; ANOVA.*

## INTRODUCCIÓN

La estereolitografía (SLA) es un tipo de tecnología para imprimir piezas 3D con alta precisión. El proceso funciona solidificando resina líquida a través de una reacción de fotopolimerización. La fotopolimerización es una polimerización basada en radicales libres y comprende cuatro pasos principales: generación, iniciación, propagación y terminación de radicales. Los monómeros/oligómeros de metacrilato son las resinas poliméricas más utilizadas para procesos de impresión 3D basados en fotopolimerización (Huang, 2020).

**Figura 1.-** Método de estereolitografía (Huang, 2020).



Debido a su versatilidad, la tecnología SLA ha sido ampliamente estudiada para su uso en ingeniería de tejidos o en odontología. En el campo del farmacológico, el SLA ofrece un gran potencial para fabricar sistemas complejos de administración de fármacos, así como abordar la necesidad de fabricar medicamentos personalizados (Martínez, 2017).

La impresión 3D basada en el procesamiento de luz digital (DLP) es un área bien reconocida con enormes avances técnicos y potencialmente comerciales (Zhao et al., 2020). Además, la fabricación aditiva (AM) sigue siendo subutilizado como proceso industrial, pero está ganando rápidamente impulso con el desarrollo de técnicas innovadoras y materiales para varias aplicaciones (Manapat, 2017).

Los pernos hechos de polímeros son sujetadores para sistemas mecánicos, donde la alta resistencia a la corrosión es requerida, de igual manera la compatibilidad electromagnética, debido a que está hecho de plástico, que es un material aislante, por lo que no conduce electricidad (Seo, 2018).

La impresión 3D ha evolucionado a lo largo de los años y existen varios tipos de tecnologías como estereolitografía, procesamiento de luz digital en términos de resina, FDM en términos de deposición de material fundido, entre otros. En el desarrollo de este proyecto, dos tipos de resina se utilizaron en diferentes impresoras: la impresora de Formlabs que imprime en resina por medio de estereolitografía (SLA), que consiste en imprimir el modelo por medio de un escaneo láser en el tanque de resina, y el Impresora Photon Anyubic que imprime mediante luz digital (DLP), que se basa en la impresión con un proyector como fuente de luz para solidificar una capa del modelo en todo el tanque.

En la realización de este proyecto se utilizan 3 resinas diferentes para la impresión de probetas, tornillos y tuercas con las tecnologías mencionadas anteriormente, utilizando diferentes parámetros de impresión como orientación y espesor de capa para determinar la caracterización de los materiales, propiedades mecánicas y tolerancia dimensional. Tras la impresión y posterior curado, se aplican las correspondientes normas y ensayos para cada caso de estudio.

En este trabajo se pretende evaluar exclusivamente la resistencia a la torsión, por lo que este será el único criterio para realizar los debidos análisis. En primer lugar, se pretende evaluar las características de los pernos impresos respecto a pernos comerciales, con el fin de establecer la factibilidad de la implementación de estos pernos en distintos tipos de aplicaciones, y en segundo se pretende comparar el desempeño de los pernos entre los distintos tipos de resinas utilizadas, para determinar cual resina presenta el mejor comportamiento ante efectos de torsión.

## **METODOLOGÍA**

El enfoque de esta investigación es de carácter tanto cualitativo como cuantitativo, de tipo exploratorio, relacional y aplicativo. El diseño utilizado fue experimental siguiendo la normativa especificada en la ISO 898-7 y ASTM E143-02.

### **1. Población de estudio**

En la realización de este experimento, fueron usadas tres diferentes resinas para imprimir los especímenes de prueba, las cuales se indican a continuación:

- Resina High Strenght
- Resina Gray (FormLabs)

- Resina Clear (FormLabs)

Una importante parte para el análisis experimental de cualquier tipo de pruebas de resistencia mecánica, es saber las características del material a ser utilizado, por lo que se presentan en las tablas 1 y 2 las características relevantes para el estudio.

**Tabla 1.-** Resina High Strenght

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Resistencia a la temperatura	150 °C
Temperatura de almacenamiento	5° a 30°C
Temperatura ideal de impresión	25° a 28°C
Longitud de onda de curado	405 nm
Última resistencia a la tensión	60 – 75 MPa

**Tabla 2.-** Resina Gray y Resina Clear de Form Labs

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Módulo de flexión	150 °C
Elongación a la ruptura	6%
Última resistencia a la tensión	65 MPa

Estos datos permiten determinar cómo las probetas impresas se comportan dentro de los diferentes ensayos según el tipo de resina. Gray es una resina de ingeniería diseñada para ofrecer una alta precisión, elongación moderada y baja fluencia. Estas propiedades mecánicas hacen de este tipo de resina un material versátil para una amplia variedad de aplicaciones de ingeniería, incluyendo modelado de conceptos y prototipos funcionales. Clear es una resina transparente, excelente para componentes de paso de fluidos, fabricación de moldes, aplicaciones ópticas, sistemas de iluminación y cualquier parte que necesite ser translúcido o mostrar detalles internos.

Si bien se conoce los parámetros técnicos de cada resina proporcionados por el fabricante, se requiere realizar una caracterización de la luz de polimerización para el post curado, debido a que no se dispone del mismo equipo que el fabricante indica, por lo que realizando este ensayo se puede determinar los mejores parámetros para el post curado adecuándolos a los equipos que se tienen a disposición.

## 2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema a abordar en este estudio, es determinar si los pernos impresos en 3D mediante tecnologías SLA y DLP, y utilizando tres tipos diferentes de resinas, presentan características de resistencia a la torsión que les otorgan una ventaja competitiva frente a los pernos existentes en el mercado, ya sea que estén fabricados con otras técnicas de manufactura o se encuentren disponibles comercialmente. Para ello, es necesario realizar una comparación exhaustiva de los resultados de los ensayos de resistencia a la torsión realizados en los pernos impresos en 3D, y también comparar los resultados entre los diferentes pernos impresos en 3D fabricados con las distintas resinas. De esta manera, se podrá determinar si la tecnología de impresión 3D puede ser una alternativa viable y efectiva para la fabricación de pernos con características de resistencia mecánica superiores a las de otros métodos de manufactura existentes en la actualidad.

## 3. EQUIPOS

Para la fabricación de las probetas (pernos) se utilizaron dos impresoras 3D de resina, la impresora Formlabs y la impresora AnyCubic,

### 3.1 Impresora Form Labs 3b/3b+

La impresora Form Labs, ofrece un volumen de impresión de 145 x 145 x 185 mm. Con una precisión de hasta 25 micras, la máquina se basa en tecnología de estereolitografía de baja fuerza (LFS). De acuerdo al fabricante, la tecnología LFS permite aumentar la velocidad de impresión de piezas 3D sin descuidar su aspecto final. La impresora FormLabs es una impresora de fotopolímero que utiliza la tecnología de Fotopolimerización (SLA), tiene dimensiones de 405x375x530 mm y un peso de 17,5kg. El grosor mínimo de impresión es de 25 um. (Formlabs, 2023)

**Figura 2.-** Impresora Form Labs 3b/3b+



### 3.2 Impresora AnyCubic

Anycubic Photon es una impresora 3D de alta resolución con tecnología DLP (utilización de luz UV para endurecer la resina durante la impresión 3D). La potencia de luz UV-LED que Anycubic Photon proporciona es de 25W y además cuenta con un disipador de calor de 80 x 80 mm. En otras palabras, este modelo de Anycubic es Perfecto para trabajar de manera uniforme y estable. Entre algunas de las características más importantes de la impresora 3D AnyCubic es su tamaño, 220x220x400mm, su pantalla táctil LCD de 2.8in 2k, volumen de impresión de 115x65x155 mm y además funciona con resina fotosensible de 405 nm.

**Figura 3.-** *Anycubic Photon*



### 3.3 AFTI: *Advanced Force & Torque Indicator (indicador avanzado de fuerza y torsión)*

El AFTI está diseñado para usuarios que requieren un sensor externo de fuerza y/o par de torsión, convierte automáticamente a unidades de torque. Además, los indicadores en sentido horario y antihorario, muestran la dirección en que se aplica la carga.

**Figura 4.-** Quantrol Smart Torque Sensor de Dillon



### 3.4 Sensor de par estático

Diseñado para ser montado en un banco o accesorio de prueba para medir fuerzas de torsión. Mide el par estático en ambas direcciones. Cuenta con un acople macho estándar de 3/8" para facilitar la instalación de adaptadores

**Figura 5.-** Sensor de par estático



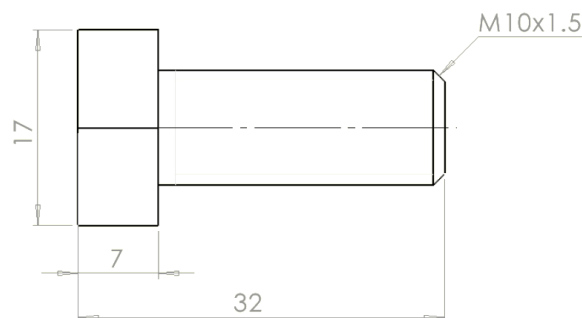
### 4. Geometría de los pernos

Para realizar las impresiones de los pernos, se utilizaron las siguientes consideraciones:

- Tres tipos de resinas: Gray, Clear, y High Strength
- Grosor de capa: 50 um.
- Plano de impresión: B45XY

La designación de los pernos a ser impresos en resina es M10x1.5 con una longitud total de 32 [mm].

**Figura 6.-** Dimensiones del perno hexagonal.





## **5. OBTENCIÓN DE DATOS**

### **5.1 Normas utilizadas**

#### **5.1.1 Estándares de Prueba de Torsión**

El ensayo de torsión es un tipo de ensayo mecánico que evalúa las propiedades de materiales o dispositivos sujetos a tensión de desplazamiento angular. Los valores que se pueden medir son:

- Módulo de elasticidad torsional
- Límite elástico torsional
- Resistencia a la torsión
- Vida a la fatiga por torsión
- Ductilidad
- Momento de ruptura.

El par de frenado se determina en el ensayo de torsión. Los requisitos y el método de prueba se especifican en la ISO 898-7 (Ensayo de torsión y pares mínimos de rotura para pernos y tornillos).

#### **5.1.2 Norma ISO 898-7**

La norma ISO 898 consta de las siguientes partes, bajo el título general propiedades mecánicas de los sujetadores:

Parte 1: Pernos, tornillos y espárragos.

Parte 2: Tuercas con sujetadores roscados de prueba especificados no bajo tensiones de tracción.

Parte 5: Tornillos de fijación y sujetadores roscados similares no bajo tensiones de tracción.

Parte 6: Tuercas con valores de carga de prueba especificados - Rosca de paso fino.

Parte 7: Ensayo de torsión y par mínimo para pernos y tornillos con diámetros nominales de 1 mm a 10 mm.

La Norma ISO 898-7 establece los requisitos mecánicos y físicos para pernos y tornillos de alta resistencia fabricados con acero de aleación templado y revenido, de diámetros entre 12 y 36 mm, con propiedades mecánicas específicas. Define los requisitos de calidad del acero, las propiedades mecánicas de los pernos y tornillos, y los requisitos de marcado y documentación. Esta norma es relevante en la industria de la construcción y la fabricación para garantizar la calidad y fiabilidad de los

productos en aplicaciones críticas que requieren una alta resistencia mecánica.

### 5.1.3 Norma ASTM E143-02

Es un método de ensayo para determinar el módulo de corte de un material. Esta es una prueba de torsión básica que se usa comúnmente para determinar propiedades básicas de los materiales. Esta prueba examina la región elástica de tensión torsional. La prueba de torsión con este estándar busca determinar: El torque aplicado y el ángulo de torsión para determinar el módulo de corte.

### 5.2 Procedimiento para medir el esfuerzo máximo de torsión

Siguiendo las normas, la aleatorización de los ensayos fue realizado con el software Minitab. Luego, cada perno de un cierto tipo de resina se sujetaba con su respectiva tuerca, adicionalmente para evitar que la tuerca avance axialmente, un tope tipo cilindro se colocó entre la cabeza del tornillo y la tuerca, el indicador de par digital se puso a cero y el perno se apretó con una llave hasta que se rompió. En ese momento, se midió el par máximo que podía resistir la probeta. El mismo procedimiento se realizó para el resto de los tornillos con el otro tipo de resina.

**Tabla 3.-** Ensayo de resistencia a la torsión

#### Medición del Torque a la Ruptura [Nm]

Réplica	Clear	Gray	High ST	PLA
1	6.8	2.8	4.2	2.2
2	6.8	2.4	3.6	2
3	6.6	3.2	3.6	2.3
4	6.4	2	3.9	-
5	6.2	2.8	3.7	-

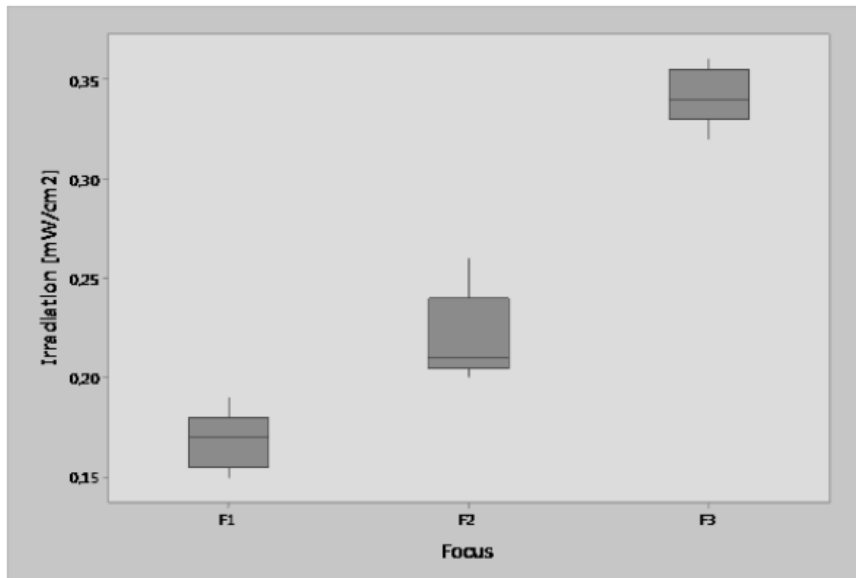
El experimento incluyó el mismo tipo de ensayos para pernos impresos con PLA en 3D (3 réplicas).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se comienza por detallar los resultados obtenidos para la caracterización de la luz de polimerización, debido a que es el paso previo a realizar el ensayo de torsión.

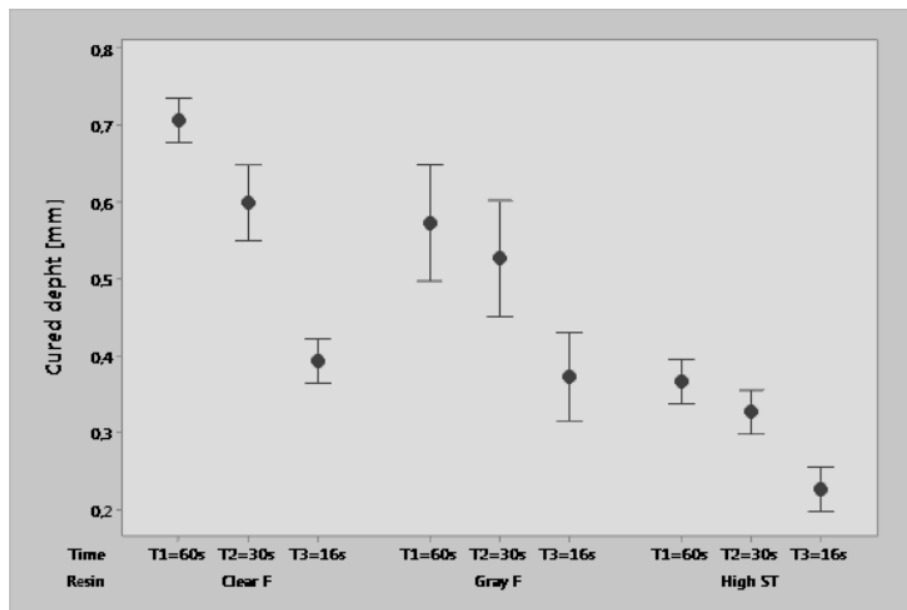
Para esto se realizó un experimento para medir y analizar la irradiación de curado con 5 repeticiones de cada foco, obteniendo los resultados de la figura 7.

**Figura 7.-** Irradiación de curado



También fue necesario medir y analizar experimentalmente el ancho de curado (Cd) en diferentes tiempos para cada tipo de resina con 3 repeticiones cada una (ver figura 8).

**Figura 8.-** Profundidad de curado 95% IC para la media

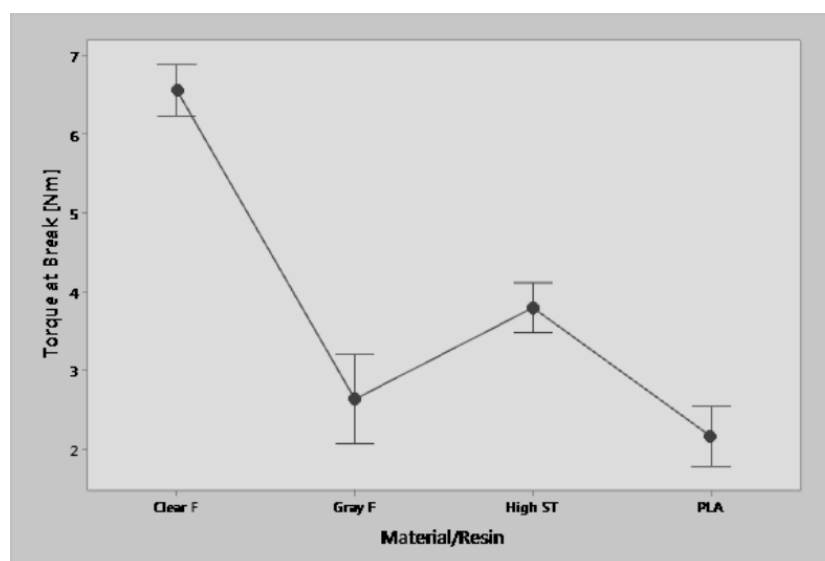


A partir de estos resultados se evaluó el tiempo de curado adecuado para cada resina, y posteriormente pasar a realizar los ensayos de torsión.

Inicialmente se tiene la tabla 4 con los datos respectivos obtenidos a partir de las mediciones para cada resina.

**Tabla 4.-** Estadísticas descriptivas

Variable	Resina	Media	Desv. Est.	Mínimo	Máximo
Par de rotura [Nm]	Clear	6.560	0.261	6.200	6.800
	Gray	2.640	0.456	2.000	3.200
	High ST	3.800	0.255	3.600	4.200
	PLA	2.167	0.153	2.000	2.300

**Figura 9.-** Par de rotura 95% IC para la media**Tabla 5.-** Análisis de varianza

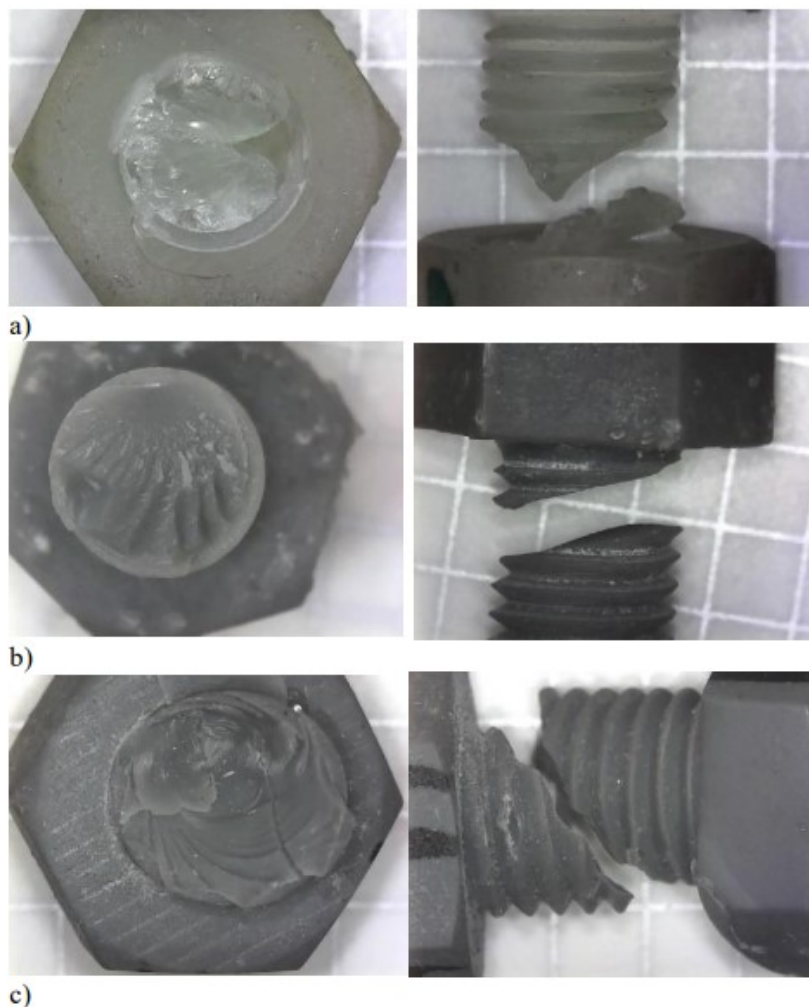
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Resina	3	52.285	17.4285	172.97	0.000
Error	14	1.411	0.1008		
Total	17	53.696			

Observando en detalle el gráfico de intervalos que se muestra en la figura 9, se afirma que los valores de par a la rotura del elemento por torsión presentan una diferencia estadística de las medias para cada tipo de resina con la que el perno fue impreso. El análisis de varianza presentado en la tabla 5, corrobora lo anterior, ya que el valor p es prácticamente nulo.

Los pernos impresos con resina Clear de FormLabs demuestran una resistencia a la rotura por torsión significativamente mayor que los pernos fabricados con otros tipos de resina. Esto es comprensible, ya que la resina Clear, al ser transparente, permite una mayor profundidad de curado, lo que provoca que más capas superiores se sobrecuren en cada intervalo de proyección de luz ultravioleta, lo que le da al material una mayor dureza.

Durante el experimento, los pernos que fueron impresos con tecnología FDM en material PLA, sufrieron un colapso de la rosca, en lugar de romperse por completo, esto sucedió en todos los casos de prueba.

**Figura 10.-** Vista de la ruptura torsional de los pernos impresos con resina. a) Gray, b) Clear y c) High ST



La forma y el lugar donde colapsaron los pernos también indica el tipo de dureza que logró la resina a medida que se solidifica durante la impresión, como se muestra en la figura 10.

## CONCLUSIONES

Los resultados del experimento muestran que la resina Clear de FormLabs es la opción más resistente a la rotura por torsión para la fabricación de pernos mediante tecnología de estereolitografía. Esto se debe a la mayor profundidad de curado que proporciona la resina Clear, lo que aumenta la tenacidad del material. Además, los pernos construidos con esta tecnología presentan una menor dispersión, lo que indica una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.

Sin embargo, la fabricación de pernos por medio de impresión 3D con tecnología SLA y DLP resulta poco factible debido a los altos costos que representa el material y la fabricación para obtener los resultados esperados. Por lo tanto, se sugiere que esta tecnología se utilice en casos puntuales donde no se puedan obtener pernos comerciales o donde se requieran propiedades del material que no se encuentren en otros productos del mercado.

En conclusión, los resultados del experimento brindan una comprensión más clara sobre los pros y contras de la tecnología de impresión 3D para la fabricación de pernos y cómo la elección del material de resina influye en la tenacidad y la confiabilidad de los resultados. Esto puede ayudar a los ingenieros y fabricantes a tomar decisiones más precisas sobre qué materiales y tecnologías de fabricación deben utilizar en la producción de pernos y otros componentes.

## LISTA DE REFERENCIAS

- ASTM. (2014). *E143-02. Standard Test Method for Shear Modulus at Room Temperature*. ASTM.  
Recuperado de <https://tienda.aenor.com/norma-astm-e143-02-2008-065835>
- Bairagi, V., & Munot, M., V. (2019). *Research Methodology: A Practical and Scientific Approach*. CRC Press.
- Dym, C. L. (2013). *Engineering Design: A Project-Based Introduction*. Wiley.
- FormLabs. (s. f.). Form 3B+: An Advanced Desktop 3D Printer Designed for the Healthcare Industry.  
Recuperado de <https://formlabs.com/3d-printers/form-3b/>
- Fuente Fernandez, S. (s. f.). *Modelos de Análisis de varianza* (1.<sup>a</sup> ed.). Facultad Ciencias Económicas y Empresariales. <https://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/ANALISIS-VARIANZA/analisis-varianza.pdf>

- Ge, Q., Li, Z., Wang, Z., Kowsari, K., Zhang, W., He, X., . . . Fang, N. X. (2020). Projection micro stereolithography based 3D printing and its applications. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2(2), 022004. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab8d9a>
- Hegde, M., Meenakshisundaram, V., Chartrain, N., Sekhar, S., Tafti, D., Williams, C. B., & Long, T. E. (2017). 3D Printing All-Aromatic Polyimides using Mask-Projection Stereolithography: Processing the Nonprocessable. *Advanced Materials*, 29(31), 1701240. <https://doi.org/10.1002/adma.201701240>
- Huang, J., Qin, Q., & Wang, J. (2020). A Review of Stereolithography: Processes and Systems. *Processes*, 8(9), 1138. <https://doi.org/10.3390/pr8091138>
- ISO. (1995). 898-7. *Torsional test and minimum torque for bolts and screws with nominal diameters 1 mm to 10 mm*. ISO. Recuperado de <http://www.driso.ir/standards/iso/ISO%20898-7-1992%20,%20Mechanical%20Properties%20of%20Fasteners-1st%20Ed.pdf>
- Manapat, J. Z., Chen, Q., Ye, P., & Advincula, R. C. (2017). 3D Printing of Polymer Nanocomposites via Stereolithography. *Macromolecular Materials and Engineering*, 302(9), 1600553. <https://doi.org/10.1002/mame.201600553>
- Mejía Díaz, H. A., Bautista Martínez, D. A., Ledesma Reinoso, J. L., & Barahona Mondragón, E. D. (2023). Metrología de pernos mediante impresión 3D con tecnologías SLA y DLP. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9137-9150. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i1.5041](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5041)
- Quantrol. (s. f.). Force Gauges. Recuperado de [https://dqplus.com/pdf/forcegauges\\_L.pdf](https://dqplus.com/pdf/forcegauges_L.pdf)
- Robles Martinez, P., Basit, A. W., & Gaisford, S. (2018). The History, Developments and Opportunities of Stereolithography. *3D Printing of Pharmaceuticals*, 55-79. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-90755-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-90755-0_4)
- Seo, S. (2018, 2 noviembre). What Are the Advantages of Plastic Fasteners? | US Micro Screw. Recuperado de <https://www.usmicroscrew.com/2018/11/02/4-advantages-of-plastic-fasteners/>
- Zhao, Z., Tian, X., & Song, X. (2020). Engineering materials with light: recent progress in digital light processing based 3D printing. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(40), 13896-13917. <https://doi.org/10.1039/d0tc03548c>

Zhu, G., Hou, Y., Xu, J., & Zhao, N. (2020). Reprintable Polymers for Digital Light Processing 3D Printing. *Advanced Functional Materials*, 31(9), 2007173.  
<https://doi.org/10.1002/adfm.202007173>

Zolfagharian, A., Kouzani, A. Z., Khoo, S. Y., Moghadam, A. A. A., Gibson, I., & Kaynak, A. (2016). Evolution of 3D printed soft actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 250, 258-272.  
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.09.028>