

Uso de SolidWorks e impresión 3D para analizar un puente tipo Baltimore a escala

Cesar Javier Cervantes Sandoval¹, Aaron Kalid Cortez Barajas², Jorge Alberto Cárdenas Magaña³, Francisco Miguel Hernández López^{4*}

^{1,2,3,4*}Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula

Resumen - El presente trabajo evalúa el comportamiento estructural de un puente tipo Baltimore Truss modelado en SolidWorks y fabricado a escala mediante impresión 3D en ABS, con el propósito de analizar su desempeño mecánico y comparar su respuesta frente al mismo diseño construido conceptualmente en acero ASTM A36.

Se realizó un análisis estático mediante el método de Elementos Finitos (FEM) aplicando cargas de 200 N a ambos modelos y un segundo estudio experimental con carga reducida (20 N) para el prototipo en ABS, con el fin de identificar su límite operativo seguro.

Los resultados indican que el modelo en acero mantiene tensiones máximas de 7.33×10^7 N/m², desplazamiento de 0.15 mm y deformación unitaria de 2.09×10^{-4} , valores muy por debajo del límite elástico, confirmando su alta rigidez. En contraste, el ABS bajo la misma carga presentó un desplazamiento de 11.13 mm y una deformación unitaria aproximada de 2.35×10^{-3} , evidenciando menor rigidez y respuesta más flexible.

La reducción de carga a 20 N permitió un comportamiento estable con tensiones de 7.45×10^6 N/m² y desplazamiento

máximo de 1.49 mm, lo cual valida su uso para ensayos demostrativos y aplicaciones didácticas. Se concluye que el puente es estructuralmente eficiente en acero, mientras que el uso de ABS requiere operar bajo cargas controladas debido a su menor módulo elástico. Este estudio resulta útil

en entornos educativos para vincular modelado CAD, simulación FEM y fabricación aditiva como herramientas integradoras para formación en ingeniería.

Índice de Términos - SolidWorks, FEM, puente Baltimore, ABS, impresión 3D, análisis estructural.

Abstract - This study evaluates the structural behavior of a Baltimore Truss bridge modeled in SolidWorks and fabricated at scale using 3D-printed ABS, with the aim of analyzing its mechanical performance and comparing its response with the same conceptual design constructed in ASTM A36 steel.

A static analysis was performed using the Finite Element Method (FEM) by applying a load of 200 N to both models. Additionally, a second experimental study was conducted on the ABS prototype under a reduced load of 20 N to determine its safe operating limit.

The results indicate that the steel model exhibited a maximum stress of 7.33×10^7 N/m², a maximum displacement of 0.15 mm, and a maximum strain of 2.09×10^{-4} , all well below the material's yield strength, confirming its high structural stiffness. In contrast, the ABS model subjected to the same load showed a maximum displacement of 11.13 mm and an approximate strain of 2.35×10^{-3} , demonstrating lower stiffness and a more flexible mechanical response.

Reducing the applied load to 20 N resulted in stable behavior for the ABS prototype, with a maximum stress of 7.45×10^6 N/m² and a maximum displacement of 1.49 mm, validating its

¹Cesar Javier Cervantes Sandoval, Estudiante de la Ingeniería Electromecánica del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula (México). tm220112358@tamazula.tecmm.edu.mx

²Aaron Kalid Cortez Barajas Estudiante de la Ingeniería Electromecánica del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula (México). tm220112358@tamazula.tecmm.edu.mx

³Jorge Alberto Cárdenas Magaña, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez

Unidad Académica Tamazula (México).
jorge.cardenas@tamazula.tecmm.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9114-8550>

^{4*} Francisco Miguel Hernández López, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula (México).
francisco.hernandez@tamazula.tecmm.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9546-0445>
AUTOR DE CORRESPONDECIA *

suitability for demonstration tests and educational applications. It is concluded that the bridge is structurally efficient when manufactured in steel, whereas the use of ABS requires operation under controlled loading conditions due to its lower elastic modulus. This study highlights the value of integrating CAD modeling, FEM simulation, and additive manufacturing as complementary tools for engineering education.

Key words: SolidWorks, FEM, Baltimore Truss bridge, ABS, 3D printing, structural analysis.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis estructural de puentes tipo truss constituye un elemento esencial en la formación de ingenieros, debido a su relevancia en el diseño de sistemas resistentes, eficientes y económicamente viables. Entre las diferentes tipologías de puentes reticulares, el puente Baltimore ha sido ampliamente utilizado por su capacidad para distribuir las cargas de manera eficiente y mantener una elevada rigidez frente a esfuerzos combinados. Estas características explican su presencia tanto en proyectos estructurales como en actividades de formación y validación experimental.

La incorporación de herramientas de diseño y simulación asistidas por computadora, junto con el desarrollo de la manufactura aditiva, ha modificado la forma en que este tipo de estructuras puede estudiarse. Hoy es posible combinar el análisis numérico con la fabricación de prototipos físicos, lo que facilita contrastar las predicciones obtenidas mediante simulación con el comportamiento observado durante los ensayos.

Para este trabajo se empleó SolidWorks como entorno de modelado y simulación estructural. A partir del modelo digital se evaluó la distribución de esfuerzos y desplazamientos bajo diferentes condiciones de carga, mientras que la impresión 3D mediante tecnología FDM permitió fabricar un prototipo funcional destinado a validar de manera cualitativa los resultados obtenidos en el análisis computacional.

La fabricación del puente en ABS también hizo posible comparar la respuesta mecánica de un polímero de uso común en manufactura aditiva con la de un material estructural ampliamente utilizado, como el acero ASTM A36. Esta comparación permitió identificar las diferencias asociadas al módulo de elasticidad de ambos materiales y su influencia sobre la rigidez global de la estructura.

El estudio comprendió el diseño completo del puente, el modelado de cada uno de sus componentes, el ensamblaje digital y la definición de las condiciones de frontera empleadas en el análisis por elementos finitos. Una vez concluida esta etapa, el modelo se fabricó en una impresora Bambu Lab A1 Combo utilizando filamento ABS, con el propósito de disponer de un prototipo que facilitara tanto la evaluación mecánica como su aplicación en prácticas de laboratorio.

La metodología empleada integró herramientas de diseño asistido por computadora, simulación mediante el método de

elementos finitos y manufactura aditiva, favoreciendo un entorno de trabajo donde fue posible analizar la influencia de la geometría, el material y las condiciones de carga sobre la respuesta estructural del puente.

De esta manera, el estudio busca contribuir a una mejor comprensión de los principios mecánicos que gobiernan el comportamiento de los puentes tipo truss y evidenciar el valor que tienen las tecnologías digitales como apoyo para la formación en ingeniería electromecánica.

II. FUNDAMENTOS ESTRUCTURALES DEL PUENTE TIPO BALTIMORE

Los puentes tipo truss se fundamentan en principios de mecánica estructural que favorecen la transmisión de las cargas mediante elementos sometidos principalmente a esfuerzos de tensión y compresión. Esta configuración reduce de manera significativa los momentos flectores y permite un aprovechamiento más eficiente del material empleado [1]. Entre las diferentes variantes, el puente Baltimore incorpora subdiaagonales que aumentan la rigidez en la zona central del claro y mejoran su respuesta frente a cargas móviles, razón por la cual ha sido ampliamente utilizado en estructuras ferroviarias y vehiculares [2].

En el puente Baltimore, los cordones superiores resisten principalmente esfuerzos de compresión, mientras que los inferiores trabajan a tracción. Las diagonales y los montantes estabilizan la estructura y conducen las cargas hacia los apoyos, logrando una distribución eficiente de los esfuerzos internos. Estas características han favorecido su utilización como modelo de estudio en actividades de simulación, modelado y validación experimental en ingeniería.

III. MODELADO CAD DEL PUENTE

El modelado del puente Baltimore se llevó a cabo en SolidWorks mediante el diseño individual de sus elementos estructurales y su posterior ensamblaje. El empleo de un modelo paramétrico permitió introducir modificaciones durante el desarrollo sin afectar la geometría general, lo que facilitó la preparación del puente para el análisis por elementos finitos y la fabricación del prototipo mediante impresión 3D [3], [4].

Con las piezas terminadas, se generó el ensamblaje completo del puente y se verificó la compatibilidad entre todos los componentes antes de iniciar la simulación. También se revisaron posibles interferencias y se definieron las restricciones geométricas requeridas para el análisis mediante elementos finitos. Esta secuencia de trabajo permitió disponer de un modelo consistente tanto para la simulación estructural como para la fabricación posterior del prototipo mediante impresión 3D.

IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR ELEMENTOS FINITOS

El comportamiento estructural del puente se evaluó mediante un análisis estático lineal en SolidWorks Simulation, utilizando el método de elementos finitos (FEM). Esta técnica permite

discretizar la geometría en una malla de elementos, calcular la distribución de tensiones y estimar las deformaciones producidas por la aplicación de cargas, por lo que constituye una de las herramientas más utilizadas en el análisis estructural de geometrías complejas [5], [6].

Para este estudio, el modelo se discretizó mediante elementos tetraédricos, se asignaron las propiedades mecánicas correspondientes a cada material y se aplicó una carga distribuida equivalente a 200 N sobre el tablero del puente.

Las condiciones de frontera fijaron los apoyos en los extremos del modelo, simulando el comportamiento de un puente simplemente apoyado. Con estas restricciones se calcularon tensiones de von Mises, desplazamientos máximos y el factor de seguridad. Este tipo de análisis permitió identificar:

- Miembros sometidos a compresión crítica (cordón superior).
- Elementos predominantemente en tracción (cordón inferior),
- Zonas de mayor deformación (generalmente en el claro central),
- El comportamiento global de la estructura bajo cargas verticales.

El uso de FEA en modelos didácticos impresos en 3D permite visualizar de forma tangible los efectos de la carga, fortaleciendo la comprensión conceptual del análisis estructural.

V. MANUFACTURA ADITIVA FDM Y PROPIEDADES DEL ABS

El prototipo se fabricó en ABS mediante impresión 3D por tecnología FDM, un proceso en el que las propiedades mecánicas de la pieza están influenciadas por factores como la orientación de las capas, la adhesión interlaminar y los parámetros de fabricación. Como consecuencia, el material presenta un comportamiento anisotrópico que puede modificar su respuesta mecánica respecto a la de materiales convencionales. Diversos estudios reportan reducciones de entre 30 y 60 % en la resistencia mecánica según la orientación de impresión, además de una variabilidad asociada a las condiciones de fabricación [7], [8].

En este trabajo, estas características se consideraron al comparar el comportamiento del prototipo impreso con el modelo equivalente en acero ASTM A36. Aunque el ABS no reproduce las condiciones mecánicas de una estructura metálica, sí permite identificar tendencias en la distribución de esfuerzos, analizar deformaciones y validar de manera cualitativa la respuesta estructural obtenida mediante simulación. Esta comparación aporta un contexto útil para comprender la influencia que tiene la selección del material sobre el desempeño global del puente.

VI. INTEGRACIÓN CAD–CAE–FDM PARA LA VALIDACIÓN DEL PUENTE

La combinación de herramientas CAD, CAE y manufactura aditiva ha transformado la forma de diseñar, analizar y validar prototipos funcionales. Este flujo de trabajo forma parte de los principios del Diseño para Manufactura Aditiva (DfAM), ya que permite evaluar alternativas de diseño e introducir mejoras antes de la fabricación física [9]. En el ámbito educativo, su aplicación favorece el aprendizaje mediante la experimentación, facilita la interpretación del comportamiento estructural y fortalece el desarrollo de competencias en diseño y análisis de sistemas mecánicos [10].

En este contexto, la integración de estas tecnologías aporta beneficios como:

- Permite comprender la relación entre geometría, materiales y desempeño estructural.
- Mejora la interpretación de resultados de simulación.
- Facilita la comunicación técnica a través de modelos físicos.
- Incentiva el aprendizaje activo mediante experimentación.

De esta manera, el proyecto constituye una experiencia formativa integral que combina herramientas modernas de diseño, manufactura y análisis para fortalecer la comprensión del comportamiento estructural de sistemas reticulares complejos.

VII. METODOLOGÍA

El desarrollo del estudio combinó herramientas de CAD, simulación mediante el método de elementos finitos y manufactura aditiva. La secuencia de trabajo se estableció a partir de metodologías reportadas para el análisis de puentes y estructuras impresas en 3D, facilitando la comparación entre los resultados obtenidos en el entorno de simulación y el comportamiento observado en el prototipo físico [3], [6], [11], [12].

A. Proceso metodológico general.

El flujo metodológico se estructuró en cinco etapas:

- Modelado CAD del puente.
- Ensamblaje digital.
- Análisis FEM.
- Fabricación aditiva FDM.
- Ensamblaje físico y validación cualitativa.

Este esquema es coherente con metodologías contemporáneas de diseño y fabricación digital aplicadas a mecanismos no ensamblados y estructuras complejas [3], [5], [7].

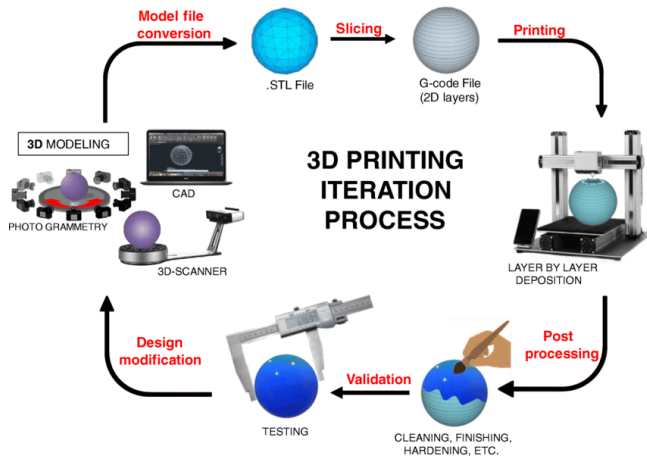


Fig. 1. Proceso metodológico.

B. Modelado CAD del puente.

El modelado del puente Baltimore se realizó en SolidWorks a partir del diseño individual de sus elementos reticulares y su posterior ensamblaje. Este procedimiento permitió mantener el control de la geometría durante el desarrollo del modelo y coincide con estrategias de diseño asistido por computadora utilizadas previamente en el análisis de puentes y mecanismos complejos [1], [3], [8], [13].

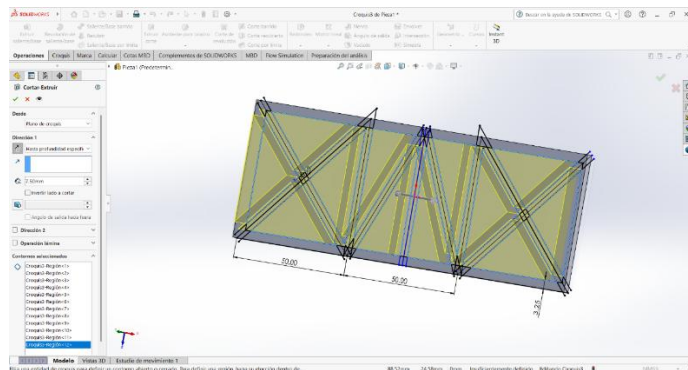


Fig. 2. Modelado CAD de la sección reticular (SolidWorks).

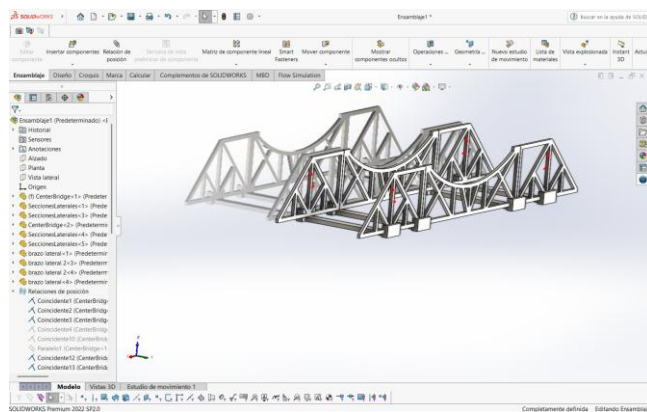


Fig. 3. Ensamble completo del puente en SolidWorks.

Acciones realizadas:

- Diseño paramétrico de cada miembro estructural.

- Definición de restricciones geométricas.
- Ensamble completo del puente.
- Verificación dimensional y topológica.

El enfoque utilizado es comparable a los procesos de modelado empleados en mecanismos no ensamblados de impresión 3D (non-assembly mechanisms) documentados en TU Delft y ACM [3], [4], [5].

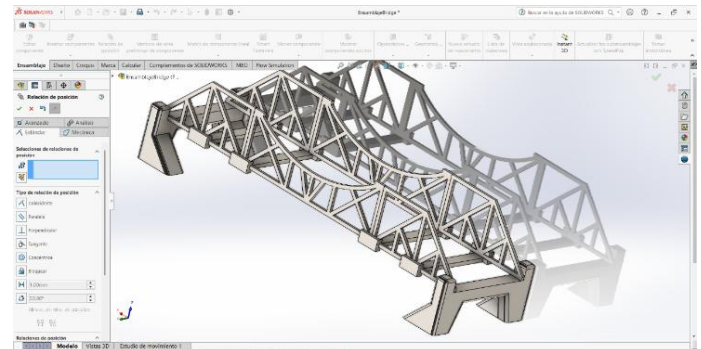


Fig. 4. Verificación geométrica y relaciones de posición.

C. Análisis estructural mediante elementos finitos.

El análisis estático lineal se desarrolló en SolidWorks Simulation empleando elementos tetraédricos sólidos. Se aplicó una carga distribuida equivalente a 200 N sobre el tablero, mientras que los apoyos se fijaron en los extremos del puente, de acuerdo con procedimientos estructurales descritos en análisis previos de puentes reales y a escala [1], [2], [15].

Se evaluaron:

- Tensiones de von Mises,
- Deformaciones máximas,
- Distribución de esfuerzos internos,
- Factor de seguridad para ABS y A36.

La literatura respalda el uso del método de elementos finitos para estudios estructurales CAD/CAE en el ámbito académico y profesional [14]–[16]. Además, estudios recientes en simulación de procesos FDM aportan contexto sobre el comportamiento mecánico del ABS bajo condiciones de impresión [6], [9].

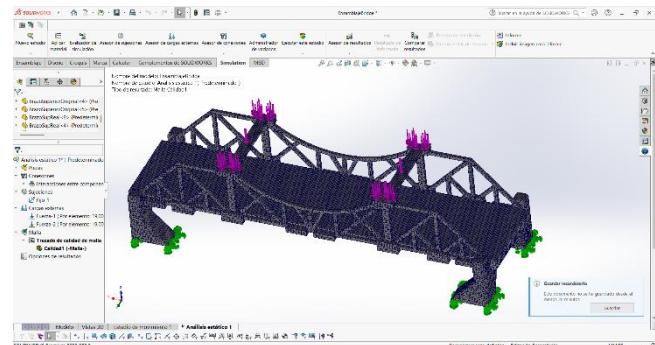


Fig. 5. Mallado FEM y preparación de condiciones de frontera.

D. Fabricación aditiva mediante impresión 3D FDM

El prototipo se fabricó con una impresora Bambu Lab A1 Combo, utilizando filamento ABS de 1.75 mm. Se seleccionó ABS debido a su mayor resistencia térmica y su mejor respuesta al impacto respecto al PLA, lo cual coincide con estudios sobre fabricación de mecanismos impresos en una sola pieza y actuadores 3D [4], [10], [11].

Parámetros principales:

- Altura de capa: 0.20 mm.
- Temperatura de boquilla: 245 °C.
- Temperatura de cama: 100 °C.
- Relleno: 25%.
- Orientación horizontal del puente.
- Velocidad de impresión: 200 mm/s.

Investigaciones recientes sobre impresión auto-soportante (self-supporting FDM) justifican la orientación del modelo para minimizar soportes y reducir deformaciones [6]. Estudios numéricos en manufactura aditiva a gran escala sustentan la importancia de la anisotropía y la adhesión interlaminar en ABS [9].

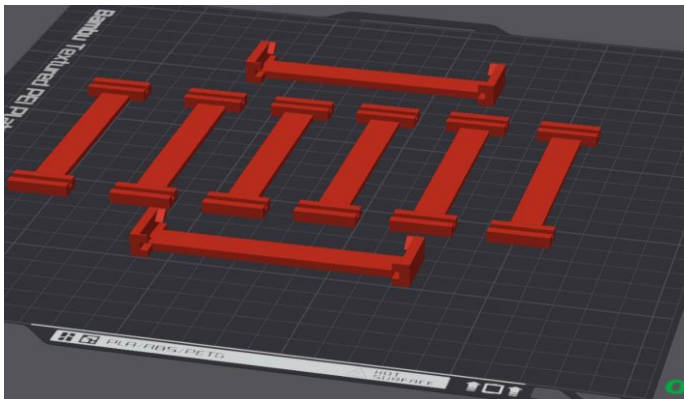


Fig. 6. Preparación de piezas estructurales (vista 1).

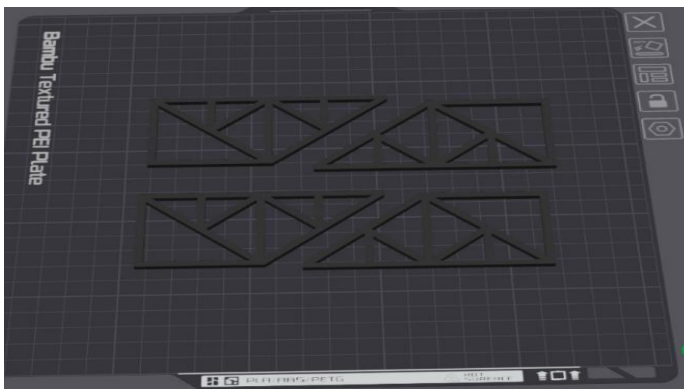


Fig. 7. Preparación de elementos reticulares (vista 2).

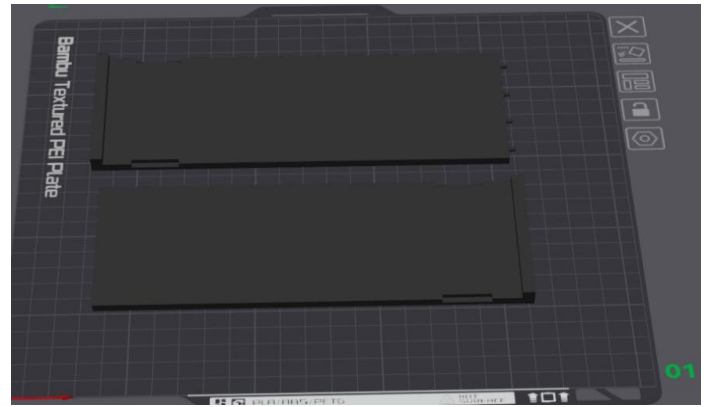


Fig. 8. Fabricación de secciones de tablero.

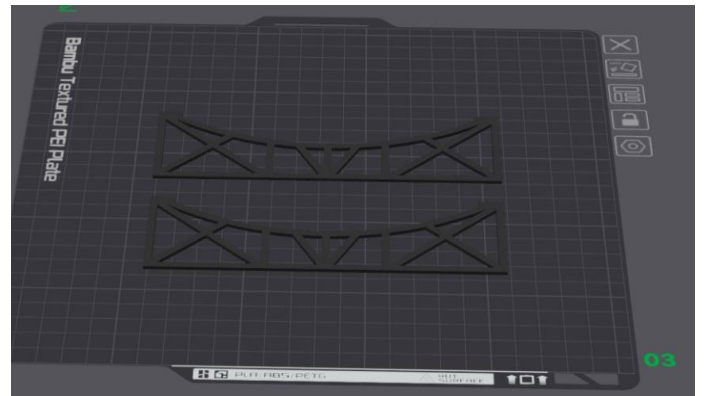


Fig. 9. Fabricación de secciones curvas del puente.

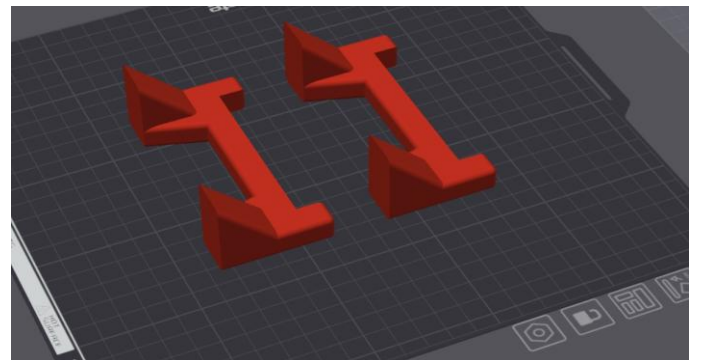


Fig. 10. Impresión de apoyos estructurales.

E. Ensamble y validación cualitativa del prototipo

Durante la fase final del proyecto se realizó el ensamblaje físico del puente impreso en ABS, verificando la integridad geométrica, así como la continuidad de las uniones y el comportamiento estructural cualitativo bajo cargas moderadas. Tal como se muestra en la Figura 11.

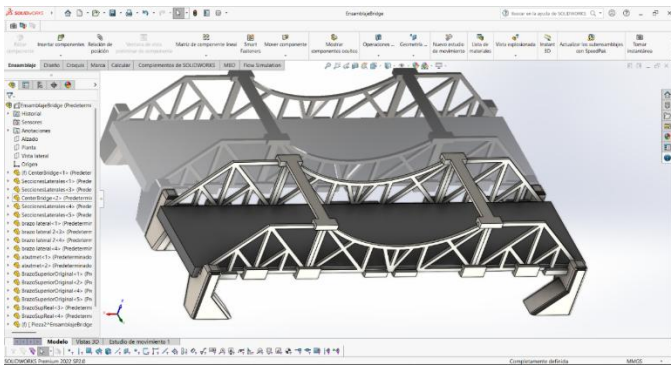


Fig. 11. Ensamblaje final.

La Figura 11 muestra el prototipo completo junto con los estudiantes responsables del modelado CAD, la simulación estructural y la fabricación aditiva. Esta evidencia confirma la coherencia entre el modelo digital y el artefacto físico, además de reforzar el carácter didáctico del proyecto al integrar herramientas CAD/CAE con manufactura aditiva, tal como sugieren trabajos recientes en educación en ingeniería [12], [17]. El prototipo permitió validar visualmente el patrón de deformación esperado y corroborar las zonas críticas identificadas en los análisis por elementos finitos.



Fig. 12. Prototipo físico del puente tipo Baltimore fabricado en ABS, junto con los estudiantes responsables del diseño, simulación y ensamblaje.



Fig. 13. Prototipo ensamblado del puente Baltimore fabricado en ABS (vista detallada).

VIII. RESULTADOS

A. Evaluación estructural del modelo en acero ASTM A36 (200 N)

La simulación estática del puente tipo Baltimore considerando las propiedades mecánicas del acero ASTM A36 bajo una carga distribuida de 200 N mostró un comportamiento estructural estable y con márgenes amplios de seguridad. En el mapa de tensiones de von Mises (Fig. 14) se obtuvieron valores:

- $\sigma_{\min} = 7.27 \times 10^3 \text{ N/m}^2$
- $\sigma_{\max} = 7.33 \times 10^7 \text{ N/m}^2 (\approx 73.3 \text{ MPa})$

Lo anterior se mantiene muy por debajo del límite elástico de A36 ($\approx 250 \text{ MPa}$), confirmando que la estructura opera sin riesgo de fluencia, lo que concuerda con configuraciones reticulares en puentes metálicos reportadas en la literatura [1], [13], [14].

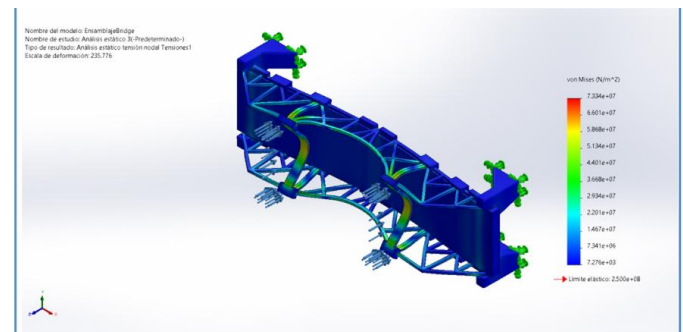


Fig. 14. Tensiones von Mises en acero A36.

Los desplazamientos máximos como se muestran en la Figura 15 fueron mínimos: $u_{\max} = 0.1507 \text{ mm}$. Confirmando gran rigidez estructural.

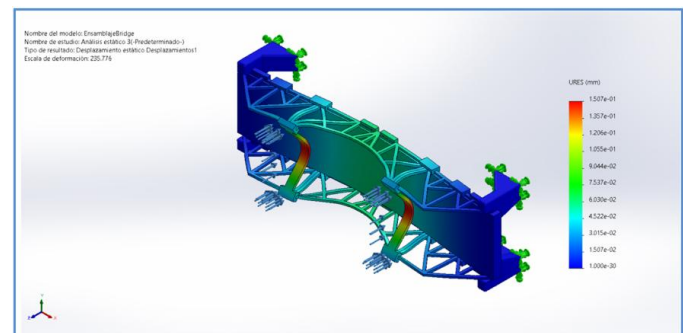


Fig. 15. Desplazamientos en acero A36.

Mientras que las deformaciones unitarias alcanzan $\epsilon_{\max} \approx 2.095 \times 10^{-4}$. Valores característicos de un truss eficiente, donde predominan esfuerzos axiales de tensión/compresión y la deformación global es baja.

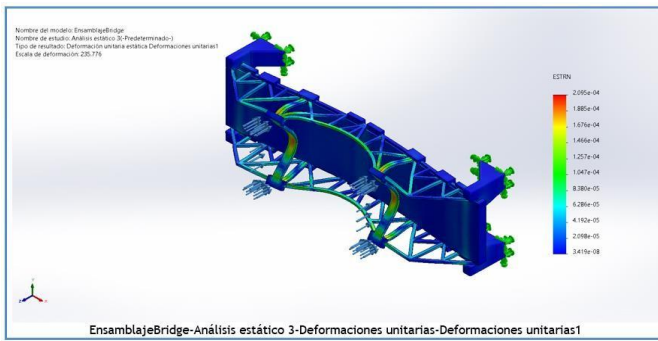


Fig. 16. Deformación unitaria en acero A36.

Estos valores son consistentes con el comportamiento esperado de una estructura reticular rígida, donde la distribución de cargas se realiza principalmente mediante esfuerzos axiales de tensión y compresión, en concordancia con lo reportado para puentes metálicos similares [2], [13].

B. Evaluación estructural del modelo en ABS aplicando la misma carga (200 N)

Con el fin de comparar materiales manteniendo la geometría constante, se realizó un segundo análisis aplicando 200 N al modelo en ABS.

- $\sigma_{\min} = 1.67 \times 10^4 \text{ N/m}^2$
- $\sigma_{\max} = 7.56 \times 10^7 \text{ N/m}^2 (\approx 75.6 \text{ MPa})$

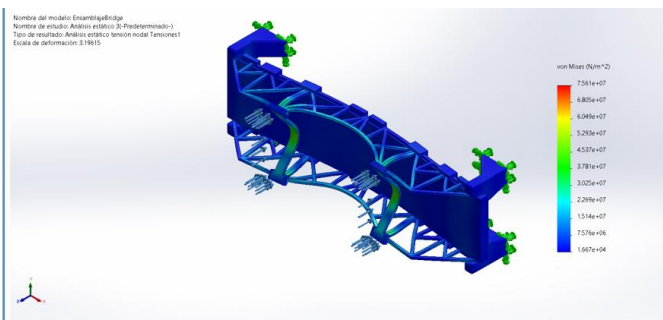


Fig. 17. Tensiones von Mises en ABS, 200N.

En los desplazamientos que se muestran en la figura 17 se observa $u_{\max} = 11.13 \text{ mm}$. Confirmando una menor rigidez estructural que el material anterior.

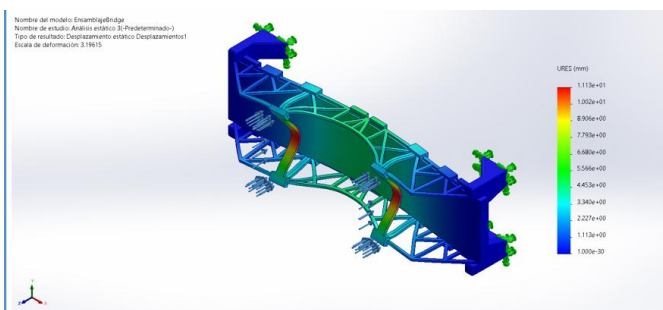


Fig. 18. Desplazamientos en ABS, 200N.

Las deformaciones unitarias en ABS alcanzan valores de: $\epsilon_{\max} \approx 1.647 \times 10^{-2}$ que equivale a 1.65%

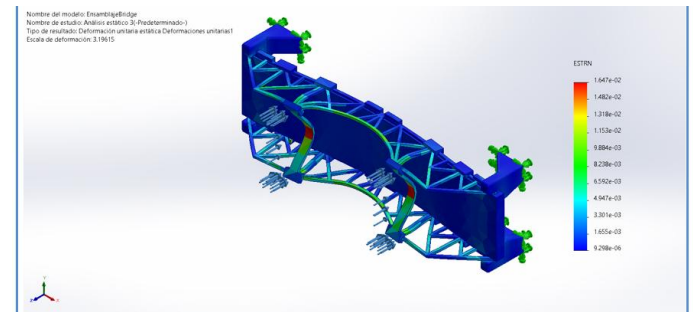


Fig. 19. Deformación unitaria en ABS, 200N.

La magnitud de tensiones es del mismo orden que en el acero debido a la similitud geométrica, sin embargo, las deformaciones y desplazamientos aumentan ~ 75 veces, evidenciando:

- Menor módulo elástico.
- Mayor flexibilidad.
- Posible riesgo de inestabilidad por fatiga o fluencia.

Este comportamiento coincide con propiedades de ABS impreso por FDM reportadas en estudios de caracterización mecánica [7], [8], [9].

C. Ensayo comparativo con carga reducida en ABS (20 N)

Para evitar daño prematuro y estimar el rango funcional seguro del prototipo real, se simuló una carga menor de 20 N. En este escenario, las tensiones de von Mises se ubicaron en el intervalo:

- $\sigma_{\min} \approx 5.04 \times 10^2 \text{ N/m}^2$.
- $\sigma_{\max} \approx 7.448 \times 10^6 \text{ N/m}^2 (\approx 7.45 \text{ MPa})$ – diez veces menor que con 200 N (Fig. 19).

Se muestra que es un valor consistente con propiedades típicas del ABS fabricado por FDM, afectado por anisotropía y adhesión interlaminar [6], [9]. Observe la figura 19.

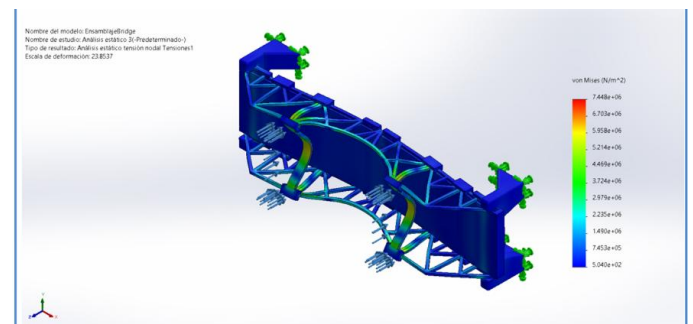


Fig. 20. Tensiones Von Mises en ABS.

Mientras que el desplazamiento máximo alcanzó: $u_{\max} = 1.49 \text{ mm}$, como se aprecia en la figura 20.

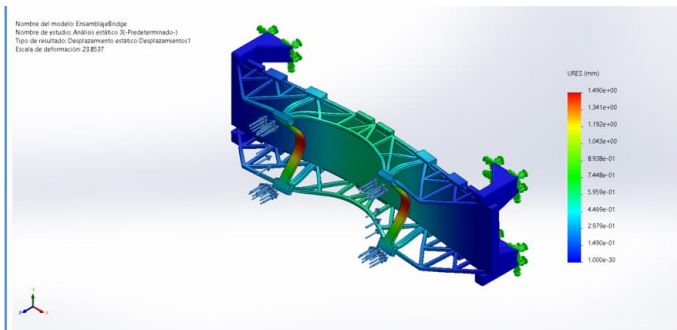


Fig. 21. Desplazamientos en ABS.

Y la deformación unitaria máxima: $\epsilon_{\max} \approx 2.354 \times 10^{-3}$. Observe la figura 21.

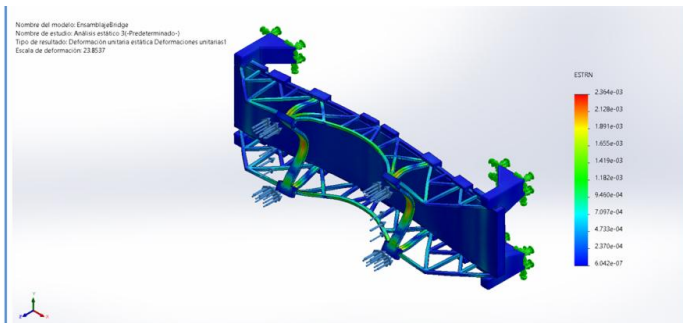


Fig. 22. Deformación unitaria en ABS.

Desde la perspectiva del prototipado didáctico, este estudio con carga reducida permite identificar un rango de actuación mecánica donde el modelo puede ser sometido a carga sin daño inmediato, lo cual es útil para demostraciones en laboratorio y ensayos cualitativos, coherente con la literatura sobre ABS impreso [7], [10], [11].

D. Comparación integrada A36 vs ABS

La Tabla 1 resume los resultados más representativos para el acero A36 (200 N) y el ABS (200 N), mostrando la diferencia de comportamiento entre ambos materiales aún bajo cargas no equivalentes:

TABLA I. Comparación estructural A36 200N vs ABS 200N

Propiedad	A36 (200 N)	ABS (200 N)
$\sigma_{\max}$ (tensión)	7.33×10^7 N/m ²	7.56×10^7 N/m ²
$u_{\max}$ (desplazamiento)	0.1507 mm	11.13 mm
$\epsilon_{\max}$ (strain)	2.095×10^{-4}	2.354×10^{-3}

El ABS presenta ≈ 75 veces más desplazamiento y ≈ 10 veces mayor deformación unitaria, confirmando drástica reducción en rigidez estructural pese a tensiones similares.

Tabla 2. Comparación estructural A36 200N vs ABS 20N

TABLA 2. Comparación estructural A36 200N vs ABS 20N

Propiedad	A36 (200 N)	ABS (20 N)
$\sigma_{\max}$ (tensión)	7.33×10^7 N/m ²	7.45×10^6 N/m ²
$u_{\max}$ (desplazamiento)	0.1507 mm	1.49 mm
$\epsilon_{\max}$ (strain)	2.095×10^{-4}	2.354×10^{-3}

Este escenario permite validar el prototipo impreso sin daño, útil para prácticas académicas.

E. Validación cualitativa con el prototipo impreso

La impresión del puente en ABS permitió corroborar visualmente zonas donde las simulaciones predijeron mayores tensiones. Las fotografías documentadas confirman correspondencia entre:

- Geometría CAD vs pieza física.
- Mapa de tensiones vs observación real.
- Deformación simulada vs flexibilidad percibida.

Este cierre experimental fortalece la validez del análisis mediante elementos finitos.

IX. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que la respuesta estructural del puente Baltimore depende en gran medida del material empleado, aun cuando la geometría y las condiciones de carga permanecen constantes. En el caso del acero ASTM A36, la tensión máxima registrada (73.3 MPa) se mantuvo muy por debajo del límite elástico del material, mientras que el desplazamiento (0.1507 mm) y la deformación unitaria (2.09×10^{-4}) fueron reducidos. Este comportamiento confirma la capacidad de la configuración Baltimore para transmitir las cargas principalmente mediante esfuerzos axiales, minimizando la deformación global de la estructura, como también se ha documentado para puentes reticulares metálicos [1], [2], [13], [14].

El análisis del modelo fabricado en ABS mostró una respuesta diferente. Aunque las tensiones alcanzaron valores del mismo orden de magnitud que en el acero, el desplazamiento aumentó hasta 11.13 mm y la deformación unitaria fue aproximadamente un orden de magnitud mayor (2.354×10^{-3}). Esta diferencia pone de manifiesto que la geometría, por sí sola, no garantiza un comportamiento estructural equivalente cuando cambian las propiedades mecánicas del material. En este caso, la menor rigidez del ABS y la anisotropía inherente al proceso FDM explican el incremento de la deformación observado, en concordancia con lo reportado por otros autores [6], [7], [9].

Las deformaciones obtenidas con una carga de 200 N hicieron evidente que esa condición no era adecuada para la evaluación experimental del prototipo. Por ello, se consideró un segundo escenario con 20 N, suficiente para conservar la integridad de la pieza y analizar su respuesta sin riesgo inmediato de falla. Bajo esta condición, el desplazamiento máximo disminuyó a 1.49 mm y la tensión se redujo a aproximadamente 7.45 MPa,

valores compatibles con el uso del prototipo en actividades de laboratorio y demostraciones académicas.

La comparación entre los modelos A36-200 N y ABS-200 N permite apreciar con claridad la influencia del material sobre la rigidez de la estructura. A pesar de que las tensiones permanecieron en un rango similar, el puente fabricado en ABS presentó un desplazamiento cercano a 75 veces el obtenido para el acero. Esta diferencia confirma que la respuesta estructural está determinada tanto por la configuración geométrica como por las propiedades mecánicas del material, aspecto que debe considerarse al utilizar polímeros impresos en aplicaciones experimentales o didácticas.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que el puente Baltimore conserva su eficiencia geométrica independientemente del material empleado; sin embargo, la capacidad para limitar las deformaciones depende directamente de la rigidez del material utilizado. Desde una perspectiva educativa, la combinación del análisis numérico con el prototipo físico facilita la interpretación del comportamiento estructural y ofrece una alternativa accesible para apoyar la enseñanza del diseño asistido por computadora, el análisis por elementos finitos y la manufactura aditiva. Asimismo, el estudio abre la posibilidad de incorporar en trabajos posteriores variables como la orientación de impresión, el porcentaje de relleno, la optimización topológica o la evaluación de materiales compuestos.

X. CONCLUSIONES

La comparación entre los modelos desarrollados en acero ASTM A36 y ABS mostró que la geometría del puente, por sí sola, no determina su desempeño estructural. Con una carga de 200 N, el modelo en acero mantuvo desplazamientos reducidos y tensiones muy por debajo de su límite elástico, mientras que el prototipo en ABS experimentó deformaciones significativamente mayores debido a la menor rigidez del material. Estos resultados evidencian que la selección del material resulta determinante cuando se busca limitar la deformación de este tipo de estructuras.

Los ensayos realizados con una carga de 20 N mostraron que el prototipo podía manipularse y evaluarse sin presentar deformaciones que comprometieran su funcionamiento. Bajo estas condiciones, el modelo impreso reprodujo de manera consistente las tendencias observadas en la simulación, confirmando su utilidad como apoyo para actividades de laboratorio y para la interpretación del comportamiento estructural.

La comparación entre los resultados de la simulación y el comportamiento del prototipo permitió integrar, en un mismo ejercicio, las etapas de diseño, análisis y fabricación del puente. Más allá de validar el modelo estructural, esta metodología ofreció a los estudiantes una experiencia cercana al flujo de

trabajo utilizado habitualmente en el desarrollo de proyectos de ingeniería.

A partir de los resultados obtenidos se concluye que:

1. La configuración Baltimore mantiene una distribución eficiente de cargas y un comportamiento estructural adecuado cuando se fabrica en acero ASTM A36.
2. El ABS permite fabricar prototipos funcionales para fines académicos, aunque su menor rigidez limita su uso bajo cargas equivalentes a las consideradas para el acero.
3. La carga de 20 N representa una condición adecuada para la evaluación experimental del prototipo impreso.
4. La metodología propuesta integra de manera efectiva diseño asistido por computadora, simulación estructural y manufactura aditiva en un mismo proceso formativo.
5. Como trabajo futuro, resulta de interés analizar la influencia de la orientación de impresión, el porcentaje de relleno, la optimización topológica y el empleo de materiales compuestos sobre la respuesta estructural del puente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Tamazula, por el apoyo institucional brindado para la realización de este proyecto. Se reconoce también la orientación académica del personal docente que acompañó el desarrollo del modelado, la simulación estructural y la fabricación del prototipo. Finalmente, se agradece a los estudiantes participantes por su compromiso, colaboración y dedicación durante las distintas etapas del trabajo.

REFERENCIAS

- [1] J. M. Gere and B. Goodno, *Mechanics of Materials*, 9th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2018.
- [2] R. Barker and J. Puckett, *Design of Highway Bridges: An LRFD Approach*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.
- [3] A. Saeed and M. S. Islam, "CAD-based structural analysis and optimization of truss configurations using SolidWorks," *Engineering Science and Technology*, vol. 24, no. 6, pp. 1234–1242, 2021.
- [4] S. M. Khan and Y. Kim, "Parametric CAD modeling for structural components: A review and applications," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 742–760, 2021.
- [5] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 7th ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [6] J. Fish and T. Belytschko, *A First Course in Finite Elements*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2007.
- [7] S. Ahn, J. Montero, D. Odell, S. Roundy, and J. G. Gershenfeld, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 248–257, 2002.
- [8] M. Domingo, A. Pérez, and F. García, "Mechanical characterization of 3D-printed ABS materials using fused deposition modeling," *Materials*, vol. 14, no. 5, pp. 1–15, 2021.
- [9] M. K. Thompson et al., "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities and challenges," *Additive Manufacturing*, vol. 16, pp. 152–168, 2017.
- [10] M. L. Berndt and M. Reyes, "Project-based learning integrating CAD, simulation, and additive manufacturing in engineering education," *International Journal of Engineering Education*, vol. 36, no. 2, pp. 623–635, 2020.

- [11] A. Van Oudheusden, J. Faludi, and R. Balkenende, "Facilitating the production of 3D-printed spare parts in the design of plastic parts: A design requirement review," *Sustainability*, vol. 16, 2024.
- [12] V. Damic et al., "Three-Dimensional Visualization of Articulated Mechanisms," *Applied Sciences*, vol. 15, 2025.
- [13] J. A. Gómez-Rodríguez, *Diseño de un puente peatonal metálico para la Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, Tesis, Universidad Distrital, 2019.
- [14] J. E. Paz-Jáuregui, *Diseño de un sistema de encofrados metálicos mediante CAD/CAE*, Universidad de Piura, Tesis, 2014.
- [15] M. Pérez-Soto, *Estudio mediante elementos finitos de tensiones en puentes dentales fijos*, Trabajo de grado, Universitat Politècnica de València, 2017.
- [16] X. Ao et al., "Modeling and self-supporting printing simulation of fused filament fabrication," *Scientific Reports*, vol. 14, 2024.
- [17] F. Harden et al., "Fabrication of precise non-assembly mechanisms by multi-material approaches," Wiley, 2024.
- [18] TU Delft Research Group, "Review — Design of non-assembly mechanisms: a state-of-the-art," 2021.
- [19] ACM, "Designing and 3D Printing Dynamic Objects Using One-Step FDM 3D-Printed Kinematic Mechanisms," 2023.
- [20] H. Qing et al., "Fully 3D-Printed Miniature Soft Hydraulic Actuators," *Advanced Materials*, 2024.