

APLICACIÓN DE SISTEMA DE PUENTE AUTOPORTANTE PARA LA CREACIÓN DE HABILIDADES EN LA DISCIPLINA DE ESTRUCTURAS DE LOS ESTUDIANTES DE INGENIERÍA CIVIL

APPLICATION OF SELF-SUPPORTING BRIDGE SYSTEM FOR THE CREATION OF SKILLS IN THE DISCIPLINE OF STRUCTURES OF CIVIL ENGINEERING STUDENTS

Est. Lianny Moreno Alonso
Estudiante de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencia Técnicas
Universidad de Matanzas.

Email: lianny.moreno@est.umcc.cu <https://orcid.org/0000-0002-4363-5925>

Est. Carlos Daniel Pérez Hernández
Estudiante de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencia Técnicas
Universidad de Matanzas.

carlosd.perez@est.umcc.cu <https://orcid.org/0000-0002-5823-4614>

Ing Annarelys Salas Navarro.
Facultad de Ciencias Técnicas
Universidad de Matanzas.

Email: annarelys.salas@umcc.cu <https://orcid.org/0000-0003-1429-6239>

Resumen

Leonardo da Vinci como genio multifacético se destacó por sus ideas revolucionarias que perduran hasta la actualidad. Aprendió y aplicó la ingeniería a través de experimentos ideados por él y contribuyó con grandes aportes a sentar las bases de los principios la construcción actual. Entre sus diseños destaca el modelo de puente autoportante de madera, estructura ligera y funcional que se caracteriza por sostenerse por sí mismo sin la utilización de elementos de sujeción. Esta investigación tiene el objetivo de demostrar la aplicación de esta estructura en la forma de docencia actual de la carrera ingeniería civil en pregrado, para una mejor comprensión de las asignaturas vinculadas al análisis de las estructuras. Se construyó una maqueta a escala del puente y un modelo 2D en el software SAP-2000.23 para demostrar la aplicación de los conocimientos básicos de las asignaturas Modelación Mecánica de las Estructuras y Análisis de Estructuras I y II. Tiene gran importancia para la formación de futuros profesionales a través de la experimentación y la creatividad de maneras rápidas y sencillas.

Palabras Clave: Autoportante, Estructuras, Leonardo da Vinci, Madera, Puente.

Abstract

Leonardo da Vinci being a multifaceted genius, was known for his revolutionary ideas that remain until today. He learned and applied engineering through self-designed experiments, and contributed with great approaches to settle the foundations of current construction practices. Among his most renowned designs, the model of the self-supporting wooden bridge is found, a light and functional structure characterized by supporting itself without any subjecting elements. The objective of this research is to show

the application of this structure in the current teaching method of the Civil Engineering Major, for a better understanding of the subject dealing with the analysis of structures. A model was built on the scale of the bridge, and also a 2D sample using the SAP-2000.23 software, to demonstrate the application of the basic knowledge on the subjects Mechanic Modelling of Structures, and Analysis of Structures I and II. A very important matter in the training of future professionals through experimentation and creativity in simple and quick ways.

Keywords: Self-supporting, Structures, Leonardo da Vinci, Wood, Bridge.

INTRODUCCIÓN

Leonardo di Ser Piero da Vinci, nacido en 1452 y fallecido en 1519, pasó a la historia como uno de los grandes artistas y pintores que ha tenido la humanidad. Sin embargo, su genialidad traspasó más allá de las artes y llegó a ser un genio multidisciplinario gracias a su afán de aprender, que le permitió alcanzar amplios conocimientos de: la ingeniería, la arquitectura, la zoología, la medicina, la botánica, y otras muy diversas áreas. (Cerveró Meliá et al., 2016). Todo su saber lo dejaba plasmado en sus diarios, con bocetos o dibujos de sus ideas, diferentes prototipos de sus experimentos y notas que iba escribiendo según sus resultados y pasaron a la historia como “Los Códices de da Vinci” (García Tapia, 1997).

Gracias a la conservación en la Biblioteca Nacional de España de los Códices de da Vinci que se lograron rescatar, se han podido llevar a cabo numerosas investigaciones de estructuras modulares con pequeñas piezas y recientemente utilizando los conceptos de reciprocidad o cabalgamiento abordados en sus textos, aunque no se haya logrado gran aplicación práctica de sus ideas (Sánchez Sánchez et al., 2010). Cabe destacar también las formulaciones matemáticas de Leonardo sobre la flexión basándose en la solidez de las vigas que le sirvieron para definir leyes algo imperfectas sobre la línea elástica en secciones diferentes de acuerdo a la resistencia respecto a la longitud, y que son conocimientos bases de la actual modelación mecánica de las estructuras (Cerveró Meliá et al., 2016).

Leonardo se adelantó a las estrategias actuales de diseño partiendo de considerar los objetos como sistema global o independiente, pero además se preocupaba por la influenciarse la naturaleza, el clima y los seres vivos como principios del diseño ecológico, inspirándose en todo momento en las enseñanzas que la naturaleza le brindaba (Cerveró Meliá et al., 2016). Fue uno de los primeros en incursionar en ideas de mecanismos de estructuras plegables que han sido la base de diversos inventos a lo largo de la historia tanto en la vida cotidiana como en aplicaciones a la arquitectura, logrado a través de un invento sencillo de con elementos que acortan las luces de barras dispuestas de cierta manera (Pérez-Valcárcel et al., 2019). Todo ello y otros conocimientos ingenieriles y mecánicos están plasmados en Los Códices de Madrid I y II se titulan respectivamente “Tratado de estática y mecánica” y “Tratado de fortificación, estática y geometría”; los Manuscritos del Instituto Francés de París, en concreto el Manuscrito “E”, es un tratado de física y mecánica, y el “M”, uno de geometría. Mientras que en el Códice Forster de Londres existen temas de geometría, hidráulica y física; el Códice Atlántico (Biblioteca

Ambrosiana de Milán), también posee temas de mecánica, física y matemáticas (Cerveró Meliá et al., 2016).

Muchos autores coinciden en que los diseños y proyectos de da Vinci no se deben considerar como defectuosos o con carencias que impidieron su construcción, en cambio aseguran que era un adelantado a su época, las tecnologías de ese momento, así como la mentalidad de las personas no eran capaces de seguir sus ideas futuristas en pleno Renacimiento. Sus investigaciones, leyes, hipótesis así como sus diseños son de gran importancia para la ingeniería actual siendo aplicable su creatividad, su manera de trabajar un proyecto y su concepción de crear herramientas nuevas para poder llevar a cabo nuevos proyectos (Cerveró Meliá et al., 2016).

Dentro de los aportes a la ingeniería civil de los manuscritos de Leonardo, destacan aquellos cuyo principio se basa en las estructuras de apoyo recíproco (Marinoni & Pedretti, 2000). Tienen como elemento fundamental de concepción el uso de vigas autoportantes y tienen la finalidad de brindar una solución a poder construir, con piezas cortas y manejables colocadas en forma de malla, abarcando luces mayores (Sánchez Sánchez et al., 2010). Sin embargo hay autores que aseguran que aunque las ideas de Leonardo de este tipo de estructuras se han desarrollado mucho, sobre todo en puentes, no se considera que exista una detallada bibliografía científica que haya investigado y explicado el diseño de puente autoportante realizado por él (Scantamburlo et al., 2017).

Un ejemplo de este tipo de diseño es el puente de piedra al sultán Bayezid II, jefe del Imperio Otomano, que buscaba poder conectar Estambul y Gálata. No se logró ejecutar este diseño que iba a ser el más largo de su época, pero siglos más tarde los ingenieros del Instituto de Tecnología de Massachusetts usaron toda la documentación registrada y los conocimientos de los materiales y métodos de la época, y mediante la recreación de lo que hubiera sido el puente de 280 metros de largo, se constató que efectivamente habría sido capaz de mantenerse en pie y permanecer estable hasta la actualidad, comprobando así la visión magistral de Leonardo (S.A., 2019b).

Sin embargo para esta investigación resulta más relevante otro de los puentes autoportantes que diseñó y que responde al período histórico donde vivió da Vinci, marcado por arquitectos Renacentistas y la aplicación de la madera como principal material de construcción de puentes (Abad, 2021). Así fue el caso del puente autoportante de Leonardo da Vinci diseñado en 1482 (Ver anexo 1), construido con fines militares, reflejado en las páginas 69ar y 71v del Códice Atlántico que se caracteriza por ser liviano, pero a la vez fuerte, fácil de montar y desmontar, ya que no necesita métodos de sujeción (clavos, tornillos, cuerdas u otro medio) y en su lugar se sostiene únicamente gracias a su peso propio. Su forma arqueada garantiza una distribución de las cargas al tener vigas longitudinales entrelazadas a las vigas horizontales (Gancedo et al., 2011). Se conoce también como un puente de “quita y pon” ya que sus elementos encajan como piezas de un rompecabezas, lo cual permite una construcción más rápida y fácil para cruzar distancias cortas. Un ejemplo claro de la aplicación práctica de este modelo es un puente peatonal de pequeño tamaño que se encuentra en Morsø, Dinamarca (Ver anexo 2) que es uno de los más similares a la idea original de Leonardo (Ortiz Delgado, 2017).

Aunque ya desde la antigüedad romana se veían estructuras de apoyo recíproco hechas de madera en el Rin y el Danubio (Tampone, 2005); y en las provincias de Zhejiang y de Fujian en China se han encontrado alrededor de 11 puentes de madera de similar comportamiento, pertenecientes al mismo período (Yang et al., 2012). Sin embargo la importancia de los puentes de madera de Leonardo radica en que trascienden siglos

después su muerte y han servido de guía para elaborar teoremas de la no deformabilidad de las mallas triangulares, aunque lo haya demostrado solo de manera teórica que era la disponibilidad de la época (Cerveró Meliá et al., 2016; Tampone, 2005).

A pesar de no existir muchas fuentes de información detallada de estudios de eficiencia de las estructuras de apoyo recíproco de madera de da Vinci, algunos ingenieros han buscado la manera de estudiar su funcionamiento a través de software que permiten identificar las tensiones de los elementos y la medición de la resistencia de estos para poder ampliar los datos existentes en los Códices y ampliar sus posibles aplicaciones en la práctica (Abad, 2021; Dolores Díaz, 2021; Muñoz Paredes, 2018; S.A., 2019a). Otros autores sin embargo han querido simplificar este diseño y acercarlo a las personas con juegos sencillos de piezas pequeñas para que no se olvide con el tiempo este increíble trabajo realizado por Leonardo hace tantos siglos atrás (Meador, 2020).

No solo son relevante las características de esta estructura en su aplicación práctica, este trabajo pretende demostrar la utilidad de este diseño para facilitar el aprendizaje de las materias de Modelación Mecánica de las Estructuras y demás asignaturas de la rama de Estructuras.

DESARROLLO

Materiales y métodos

Este trabajo consta de dos direcciones principales que pretenden desarrollar dos visiones distintas de este mismo diseño de puente autoportante.

- A- Confección de una maqueta del puente autoportante a escala que permita ilustrar las ideas del diseño de da Vinci respecto a las uniones entre los distintos elementos y el proceso de montaje de la estructura
- B- Modelado del esquema de análisis de la estructura del puente autoportante para definir el comportamiento de sus elementos y uniones.

A.1 Para confeccionar la maqueta a escala se siguieron los siguientes pasos:

1. Primeramente, se seleccionó el material para elaborar los elementos de la estructura y se determinó que se emplearía cedro por las características de resistencia que posee por una resistencia a compresión de 415 kg/cm², una resistencia a flexión estática de 753 kg/cm² y un módulo de elasticidad de 90 000 kg/cm², y la disponibilidad que se poseía en ese momento.
2. Se cortaron utilizando la sierra eléctrica listones de sección cuadrada 20 x 20 mm, los cuales se cortaron nuevamente en sentido contrario para obtener 10 listones de 30 cm y 5 listones de 19 cm, todos con la sección mencionada
3. Con una lijadora se trabajaron todos los listones para que quedaran cilindros de 20mm de diámetro.
4. Se realizó un primer montaje de los elementos de manera que las barras longitudinales superiores descansa sobre las barras transversales, que a su vez descansan en el punto medio de la luz de la siguiente barra longitudinal, formando un entramado que genera una figura similar a un arco. Este primer montaje permitió señalar los puntos de unión donde se obtiene la estructura equilibrada.
5. En los puntos señalados se realizaron ranuras de 3 cm y utilizando escofina se le dio un acabado a las muescas por donde estarán las uniones articuladas de esta estructura.
6. Se procedió finalmente a ensamblar la estructura siguiendo las muescas realizadas para que se formaran uniones articuladas, pero correctamente sujetas y se

completó la estructura quedando un puente autoportante con una figura muy similar a un arco.

A.2 Se utiliza la maqueta para realizar el montaje y desmontaje del puente para explicar su forma de construcción y específicamente la manera en la que se unen a través de las muescas creando la articulación (Ver anexo 3).

B.1 Para el modelo del esquema de análisis de la estructura del puente autoportante de Leonardo da Vinci se empleó el programa (Structural Analysis Program) SAP 2000-23, software comercial que aplica el Método de Elementos Finitos para el cálculo estructural para ingenieros.

1. Se asume la estructura como simplemente apoyada de manera que pueda ser ensamblada con facilidad.
2. Se definió como material madera de cedro con una resistencia a compresión de 415 kg/cm², una resistencia a flexión estática de 753 kg/cm² y un módulo de elasticidad de 90 000 kg/cm² para todas las secciones y se establecieron secciones circulares solidas de a escala real, de 20 cm de diámetro para todas las secciones. Las barras longitudinalmente serán también a escala real con la misma proporción que en la empleada para la confección de la maqueta, por lo que resultarán de 3 m las vigas longitudinales y de 1,9 m las vigas transversales.
3. Se realizará el dibujo en un modelo en 2D con uniones entre barras articuladas realizadas con uniones tipo link para poder situar la unión en el mismo punto que se determinó anteriormente, pero permitiendo que sea de fácil entendimiento en el esquema de análisis. De manera que queda dispuesto: para las uniones más externas la viga longitudinal superior se apoya sobre la viga transversal y esta a su vez descansa sobre la mitad de la luz de la viga longitudinal inferior; en las uniones internas dos vigas longitudinales superiores se apoyan sobre la viga transversal de manera cruzada en distintos puntos, y la viga transversal descansa sobre la mitad de la luz de la viga inferior. Se genera una estructura similar a un arco formado por secciones pequeñas unidas entre sí de manera articulada.
4. Se consideró un ambiente favorable de manera que se despreciaron las acciones de cargas de viento y de sismos.

B.2 Una vez realizado el modelo se procede a la determinación de los gráficos de deformaciones y de solicitaciones, para lo cual el software emplea el método de elementos finitos. (ver anexo 4 y 5 modelo y gráficos de SAP 2000)

• **Discusión de resultados**

La realización de este trabajo ha permitido comprender la importancia de la aplicación práctica de este diseño de puente autoportante de madera, realizado por Leonardo da Vinci, en la manera moderna de impartir asignaturas de la rama de Estructuras para estudiantes de ingeniería civil, sobre todo en Modelación Mecánica de las Estructuras y Análisis de Estructuras I y II. Se ve como la visión futurista de Leonardo le permitió crear en pleno renacimiento una estructura que responde a los conceptos básicos de la ingeniería, tan importante para los estudiantes de pregrado en su formación como ingenieros.

La construcción, montaje y desmontaje de la maqueta a escala brindó la posibilidad de acercar el conocimiento de la construcción de un puente de manera sencilla y dinámica, permitiendo que se pueda visualizar el esquema de análisis que se utiliza en la asignatura Modelación Mecánica de las Estructuras para realizar el cálculo de solicitaciones, que es

uno de los objetivos de la asignatura. Permitió además una simple interpretación de cómo poder construir uniones articuladas en una estructura sin necesidad de usar elementos de anclaje como comúnmente se aprecia en los puentes de metal, y comprender, así como la unión se forma por la manera en que las barras se apoyan entre sí y las fuerzas que generan (Ver anexo 3).

Otra enseñanza de este puente, aunque no sea de la rama estructural, es que predijo 540 años atrás, la necesidad de buscar estructuras diseñadas de manera tal q tanto su fabricación como su montaje pudieran llegar a ser lo más sencillo posibles, estructuras compuestas de elementos simples y que pudieran ser fabricados previamente para posteriormente unirlos. Es sin dudas de los primeros impulsores de la industrialización de la construcción, que es hoy sin duda alguna la misión fundamental de la ingeniería civil.

La realización del modelado en el software SAP 2000-23 permitió un acercamiento a la utilización de programas modernos e internacionales, con el objetivo de impulsar el interés por su utilización, presentándolo de una manera cercana y al comparar con la maqueta, facilitar la comprensión del modelo realizado. La utilización de este tipo de programa es cada día más necesario para alcanzar mejores resultados en la construcción, y poder presentarlo de manera sencilla y visual permitió una fácil comprensión del complejo diseño inventado por Leonardo da Vinci. Ver anexo 4

El resultado de los gráficos de deformación y solicitaciones permitieron una mejor comprensión de los esfuerzos realizados por los elementos que componen la estructura y también los que se generan en sus uniones. Los mayores esfuerzos se ven concentrados en las uniones entre los elementos y en las barras centrales. En las barras centrales ocurre flexión y en el resto de las uniones efecto de cizalladuras, aunque las uniones son capaces de asimilarlas. Estos resultados del modelo permitieron ver aplicados los conocimientos bases de las asignaturas de Modelación Mecánica de las Estructuras y Análisis de Estructuras I y II en el cálculo de estructuras isostáticas e hiperestáticas para la obtención de los gráficos de solicitaciones. Ver anexo 5

Impulsar investigaciones como esta, brinda una mayor motivación en los estudiantes al acercarse al diseño de estructuras reales y poder comprenderlas vinculándose a software de avanzada y acercándose a la vida práctica de la aplicación de los conocimientos adquiridos en las asignaturas de pregrado. Impulsa su interés por la carrera y por rescatar genialidades de la ingeniería olvidadas por muchos en la actualidad.

CONCLUSIONES

Como ha quedado demostrado con este trabajo el puente de da Vinci es una estructura ligera con un diseño que permite un montaje y desmontaje sencillo y muy útil con un diseño basado en usar piezas cortas y entrelazadas de manera que generan uniones articuladas, como se puede ver en el esquema de análisis.

Tanto la maqueta a escala como el modelo en el software SAP 2000-23 permitieron llevar a cabo una demostración de cómo funciona el puente diseñado por Leonardo, y se llega a la conclusión de que es posible utilizar este tipo de medios para representar estructuras reales y simplificarlas para acercar estos conocimientos de maneras más sencillas a los estudiantes de pregrado, que estos puedan ver materializadas las ideas y conceptos que se estudian en la carrera para poder garantizar un aprendizaje más eficaz y fomentar la creatividad de los futuros ingenieros.

REFERENCIAS

- Abad, C. T. (2021). Eficiencia del puente autoportante de Leonardo. *Técnica Industrial*, 328, 30-37.
- Cerveró Meliá, E., Ferrer Gisbert, P. S., & Capuz-Rizo, S. F. (2016). TEORÍAS, MÉTODOS Y TÉCNICAS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS TÉCNICOS EN LA OBRA DE LEONARDO DA VINCI.
- Dolores Díaz, J. A. (2021). *Evaluación Primer Parcial Física 1 Puente da Vinci*. es.scribd.com.
- Gancedo, C., Martínez, M. S. Á., & de Aldecoa, E. I. (2011). *Once máquinas e ingenios de Leonardo da Vinci interpretados y realizados por Carlos Gancedo*. Fundación Museo Evaristo Valle.
- García Tapia, N. (1997). Los codices de Leonardo en España. *Boletín del Seminario de Estudios de Arte y Arqueología: BSAA(63)*, 371-395.
- Marinoni, A., & Pedretti, C. (2000). *Il codice atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano* (Vol. 2). Giunti.
- Meador, D. (2020). *Guía Del Creador de STEM. Creando Puentes da Vinci* (I. E. J. Pitsco, Pittsburg, KS 66762, Ed.)
- Muñoz Paredes, D. A. (2018). *Análisis estructural de un modelo de puente de madera peatonal autoportante ensamblado con uniones carpinteras (sin herrajes)* Universidad Técnica Federico Santa María]. Chile.
- Ortiz Delgado, J. (2017). El puente autoportante de la ETSAC, réplica del diseñado por Leonardo da Vinci. *Cosas de Arquitectos*. <https://www.cosasdearquitectos.com/2017/07/puente-autoportante-etsac-replica-leonardo-da-vinci>
- Pérez-Valcárcel, J., Freire-Tellado, M. J., & Muñoz-Vidal, M. (2019). Estructuras desplegadas para actividades lúdicas. *Bac Boletín Académico. Revista de investigación y arquitectura contemporánea*, 9, 129-146.
- S.A. (2019a). El 'Ponte Arcuato' de Leonardo da Vinci y la madera constructiva actual. *Canales sectoriales*. <https://www.interempresas.net/Madera/Articulos/240784-El-Ponte-Arcuato-de-Leonardo-da-Vinci-y-la-madera-constructiva-actual.html>
- S.A. (2019b). El revolucionario puente de Leonardo da Vinci que hoy estaría en pie. *TITANIA COMPAÑÍA EDITORIAL*. <https://www.elconfidencial.com/tecnología/ciencia/2019-10-14/puente-leonardo-da-vinci-anos-estable-mit-500-2281632/>
- Sánchez Sánchez, J., Rodríguez-León, M. T., & Escrig Pallarés, J. F. (2010). Una aproximación analítica a las mallas recíprocas diseñadas por Leonardo. *Informes de la construcción*, 62 (518), 5-14.
- Scantamburlo, A. C., Moraes, E. L., Rocha, G., Esteves, S. S. L., Reis, T. S. R., & de Campos, L. C. (2017). Building the Da Vinci's Self Supporting Bridge. *Alive Engineering Education: Transforming and Innovating Engineering Education*, 29-35.
- Tampone, G. (2005). I ponti di legno. Tradizione e innovazione nel Rinascimento. *Ponti: Sorveglianza, manutenzione e interventi, Seminario Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale, Florencia [internet]*. Disponible en: <http://www.cias-italia.it/PDF/133.pdf>.
- Yang, Y., Nakamura, S., Chen, B., & Nishikawa, T. (2012). Traditional construction technology of China timber arch bridges. *構造工学論文集 A*, 58, 777-784.