

Una actividad tangible para enseñar análisis de estructuras

A tangible activity for teaching structural analysis

Ana Bertol-Gros ^{1a}

^a Doctora en educación de ingeniería. Profesora Titular, Universidad San Jorge, abertol@usj.es
<https://orcid.org/0000-0003-2444-0724>

RESUMEN

Este artículo presenta una actividad educativa para mejorar la comprensión práctica del análisis estructural en estudiantes de arquitectura. La propuesta integra cálculo manual y diseño de estructuras reales, fomentando la conexión entre teoría y práctica. A través de un enfoque tangible, los estudiantes experimentan todo el proceso, desde la determinación de la resistencia de los materiales hasta la comprobación final de las estructuras. Implementada anualmente desde 2021, esta actividad permite que los alumnos interioricen los procesos y el razonamiento del análisis estructural.

ABSTRACT

This article presents an educational activity to improve the practical understanding of structural analysis in engineering students. The proposal integrates manual calculation and real structure design, fostering the connection between theory and practice. Through a tangible approach, students experience the entire process, from determining material strength to final testing of the structures. Implemented annually since 2021, the activity allows for a deep understanding of the physical behavior of structures, promoting an applied educational experience.

PALABRAS CLAVE: educación en ingeniería estructural, tangibilidad, resistencia de materiales.

KEYWORDS: Structural engineering education, tangibility, strength of materials.

1. Introducción

El análisis estructural es el proceso de evaluar cómo se comportan las estructuras bajo diversas cargas, tensiones y condiciones ambientales para garantizar su seguridad, estabilidad y rendimiento. Este análisis es esencial para diseñar estructuras que cumplan con los estándares de seguridad y los requisitos funcionales en arquitectura, ingeniería civil y sistemas mecánicos. La educación en mecánica de materiales y análisis estructural ha estado históricamente asociada con métodos tradicionales y cálculos manuales [1], con el riesgo de tornarse excesivamente abstracta y distante de las aplicaciones reales [2]. Para los

alumnos de primeros cursos, una asignatura centrada exclusivamente en matrices, vectores y cálculos algebraicos resulta confusa al no integrar aplicaciones prácticas ni explorar el comportamiento físico de las estructuras. Por ello, es fundamental equilibrar teoría y práctica en el currículo, no solo para asegurar que las estructuras sean correctamente calculadas, sino también para desarrollar en los estudiantes una comprensión profunda del comportamiento físico de las estructuras, fortaleciendo así su preparación para el ejercicio profesional.

Cuando se habla de preparación para la carrera laboral, es común asociarlo al uso de

software de cálculo, puesto que agiliza el proceso. Estos profesionales tienen experiencia y conocimientos previos que les permite saber juzgar los resultados que ofrecen estos programas. En el entorno educativo, existen numerosos ejemplos de actividades que integran programas de cálculo como una herramienta práctica adicional. Aunque el uso de *software* es muy valioso en la formación en estructuras, en los cursos iniciales resulta esencial priorizar el desarrollo de la intuición mecánica y el cálculo manual, ya que estos métodos ayudan a los estudiantes a comprender de forma tangible los conceptos y el comportamiento físico de las estructuras. La "tangibilidad" en ingeniería se define como el grado en que una representación conceptual se conecta y se hace comprensible en un contexto socio-material específico [3]. Por ejemplo, un ingeniero estructural puede expresar un valor de fuerza como un vector en un diagrama de cuerpo libre para analizar los tipos de tensiones que esa fuerza genera en una conexión atornillada. Aquí, el concepto de fuerza se representa como un vector que resulta tangible tanto en el contexto material de la estructura física como en el contexto social que requiere la creación de dicho diagrama. Esta tangibilidad permite que las representaciones conceptuales sean más accesibles y relevantes, acercándolas a la práctica real de la ingeniería y facilitando una comprensión que trasciende la teoría abstracta.

La literatura científica presenta varias contribuciones a la innovación educativa que integran teoría y práctica en el aprendizaje tangible de las estructuras. En la Universidad de Princeton, por ejemplo, el curso "Creative Art of Structural and Civil Engineering" emplea actividades prácticas como la construcción de un voladizo de papel para facilitar la comprensión estructural en estudiantes de STEM y subrayar la relevancia social de la ingeniería civil [4]. Otro enfoque innovador se imparte en la Universidad ETH de Zúrich, donde los estudiantes deben diseñar composiciones espaciales equilibradas

usando objetos domésticos y sin adhesivos, explorando conceptos de carga y rigidez de forma intuitiva y desarrollando sus habilidades de análisis estructural [5]. En la Universidad Jaume I de Castellón, se ha implementado un método de aprendizaje que combina la experimentación directa con estructuras reales y simulaciones por *software*, utilizando herramientas como el juguete K'NEX, el software SAP2000 y maquetas de madera de balsa para fomentar una conexión profunda entre teoría y práctica en la educación estructural [2].

En línea con el objetivo de promover la tangibilidad de las sesiones iniciales de cursos de estructuras, en este artículo se presenta una actividad concebida para comprender la aplicación de la resistencia de materiales en el diseño de estructuras reales. Lo distintivo de esta propuesta es que los estudiantes participan en todo el proceso: desde la determinación manual de la resistencia de los materiales hasta el diseño y comprobación final de las estructuras presentadas. Esta experiencia permite a los alumnos interiorizar el propósito de cada etapa, promoviendo una comprensión profunda y aplicada de los conceptos estructurales. Esta actividad se ha realizado anualmente desde el curso 2021-2022, incorporando un material diferente cada año y aplicando los resultados a un proyecto de diseño específico. Durante los dos primeros años, formó parte de un proyecto de innovación docente financiado, en el cual se diseñaba una estructura efímera desde diferentes asignaturas [6], [7].

2. Contexto educativo y objetivos

El proyecto presentado en esta comunicación se desarrolla en el Grado en Arquitectura de la Universidad San Jorge (Zaragoza), una institución privada en la que el reducido tamaño del grupo de estudiantes ha permitido implementar innovaciones docentes de manera ágil y efectiva. Aunque el número de

estudiantes ha crecido desde los 7 en el curso 2018-19 hasta los 30 actuales, este grupo reducido sigue facilitando un enfoque personalizado y flexible en la enseñanza. No obstante, esta particularidad también implica que el análisis de las calificaciones puede verse notablemente afectado si algún estudiante decide no continuar con la asignatura.

La actividad central de este estudio se realiza en la asignatura obligatoria Estructuras I, una materia de 3 ECTS que se imparte en el primer cuatrimestre del segundo curso, con una duración de 20 semanas. La asignatura incluye dos horas semanales de clase presencial, complementadas con un promedio de tres horas de trabajo autónomo. Estructuras I representa la primera inmersión de los estudiantes en el análisis estructural, estableciendo una base crítica para su transición de conceptos arquitectónicos a estructurales. A través de esta asignatura, los estudiantes adquieren competencias técnicas sobre equilibrio, rigidez y resistencia.

El sistema de evaluación continua de la asignatura se estructura mediante dos exámenes parciales prácticos, un examen teórico final y un proyecto grupal de análisis y diseño estructural, que es el núcleo de esta propuesta. El objetivo principal de esta actividad es que los estudiantes interioricen el proceso de cálculo mediante enfoques de aprendizaje activo, como el aprender haciendo [8] y trabajar con las manos [9], promoviendo así una comprensión profunda y práctica. Lograr este objetivo no solo busca optimizar el aprendizaje y el rendimiento académico de los estudiantes, sino también incrementar su motivación e interés en el área de estructuras.

3. Proyecto de resistencia de materiales

El proyecto se realiza a lo largo de todo el cuatrimestre, combinando lecciones magistrales con resolución de problemas y el desarrollo del proyecto, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Desarrollo temporal del cuatrimestre.

Semana y actividad	Descripción
S-01. Presentación de la asignatura.	Explicación de la guía docente y las metodologías de evaluación.
S-06. Examen parcial de conceptos básicos (20% del curso).	-
S-08. Experimento del Módulo de Young.	Realización del ensayo a tracción para conocer la resistencia del material a estudiar (Figura 1).
S-10. Entrega del informe del experimento (10% del curso).	Preparación del informe con descripción del experimento, teoría, cálculos, hoja de medidas y fotos del proceso.
S-15. Examen parcial práctico de la asignatura (20% del curso).	-
S-18. Entrega del proyecto final (30% del curso).	Diseño estructural según las condiciones dadas. Entregar maqueta con el material indicado y cálculos del diseño.
S-20: Examen final teórico de la asignatura (20% del curso).	-

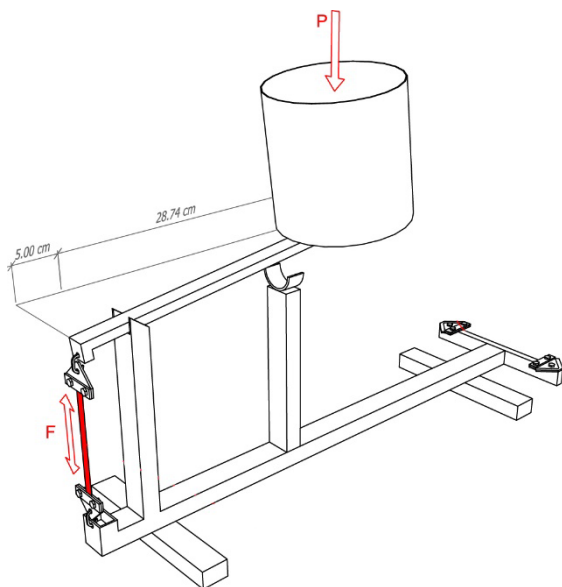


Figura 1. Esquema del dispositivo utilizado para la rotura de probetas.

La primera fase, denominada “Experimento del Módulo de Young” consiste en determinar esa propiedad el material con que cada año se trabaja, realizando un ensayo a tracción. Sin embargo, el experimento no se realiza con una máquina convencional, ni se realiza con materiales estructurales conocidos. Con el objetivo de que sean los propios alumnos los que puedan manipular la máquina y los materiales, se utiliza el dispositivo mostrado en la Figura 1. Esta máquina, de fabricación propia, consigue romper probetas a tracción al colocar unos pesos (habitualmente piedras) en el recipiente del extremo opuesto. Los materiales con los que se ha trabajado a lo largo de los años son: cartón, Forex, madera de balsa y palitos del café. En la Figura 2 se pueden ver fotos reales del experimento.

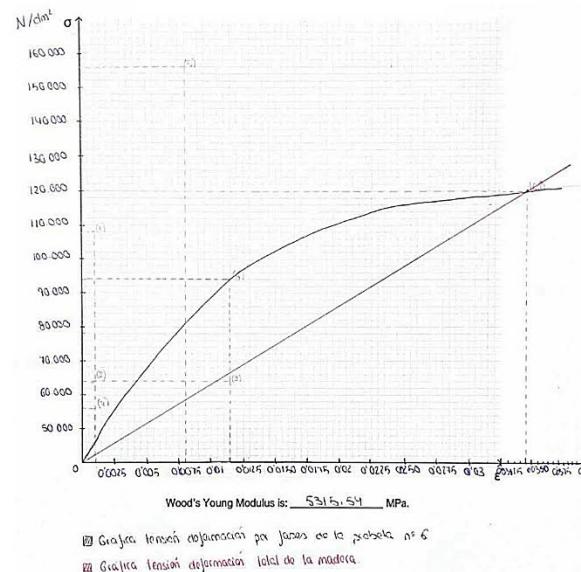
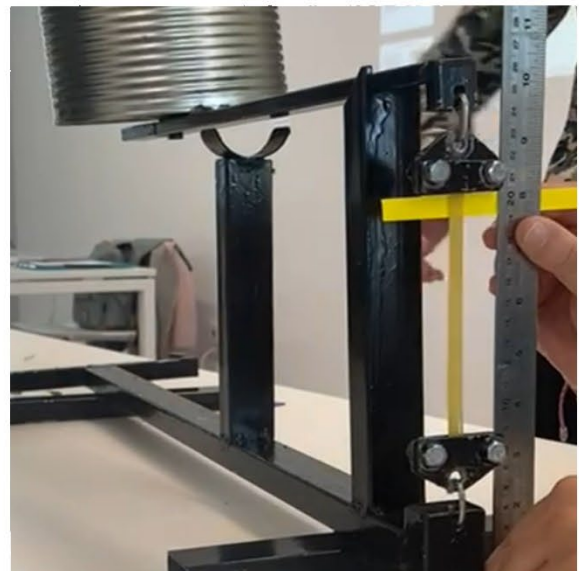


Figura 2. Fotografías del experimento y un diagrama tensión-deformación elaborado por los estudiantes.

Cada año, la segunda fase del proyecto se ha adaptado para cumplir objetivos formativos específicos. En las dos primeras ediciones del proyecto los estudiantes diseñaron estructuras efímeras, junto con alumnos de otras asignaturas, y los resultados fueron presentados en las Jornadas de Innovación Docente en Arquitectura [6], [7]. En el curso 2023-24, la clase construyó cuatro maquetas de vigas con disposiciones diferentes (biapoyadas, biempotradas, en celosía y en arco) y después tuvieron que calcular la carga "P" que rompería cada una. En el presente curso (2024-25), los estudiantes tienen que diseñar y calcular una estructura con una luz de un metro que pueda soportar una carga puntual en el centro, inspirado en los famosos concursos de puentes.

4. Resultados

Los resultados de este proyecto han mostrado una evolución positiva, evidenciada tanto en las calificaciones (Figura 3) como en el nivel de satisfacción de estudiantes y profesores desde su implementación. Uno de los logros más significativos ha sido la mejora en la comprensión de los conceptos fundamentales del diseño estructural. El día de la entrega del proyecto, los estudiantes responden preguntas no evaluables relacionadas con estos conceptos, y sus respuestas reflejan que la mayoría entiende los conceptos. Además, en el examen final de la asignatura, que se realiza una o dos semanas después, la mayoría de las respuestas vinculadas a los conceptos trabajados en el proyecto son correctas.

Resulta especialmente valioso observar el proceso de aprendizaje de los estudiantes y sus reflexiones sobre el proyecto. La resistencia de materiales es un tema particularmente difícil de entender para el estudiantado. Al ser ellos mismos quienes calculan las resistencias, se ha observado un incremento en la comprensión de cómo los materiales se comportan y cómo sus propiedades afectan el diseño estructural. La

Figura 2 muestra imágenes de la sesión experimental y los trabajos entregados.

La segunda fase del proyecto se realiza de manera autónoma por cada grupo, con la opción de solicitar tutorías para guiar el proceso. Resulta enriquecedor analizar los comentarios positivos de los estudiantes en las encuestas de final de curso, donde muchos destacan cómo estas actividades les ayudan a entender mejor la relación entre teoría y práctica. La Figura 4 muestra varias entregas finales de estos proyectos.

Finalmente, en la Figura 3, se muestra un gráfico que representa la dispersión de las medianas de las calificaciones finales a lo largo de cada curso y se compara con las medias obtenidas en el proyecto de resistencia de materiales. Se han excluido aquellas inferiores a 1, correspondientes a estudiantes que abandonaron la asignatura y no se presentaron al examen final. Podemos observar que las calificaciones del proyecto de resistencia de materiales son mejores que la media del curso.

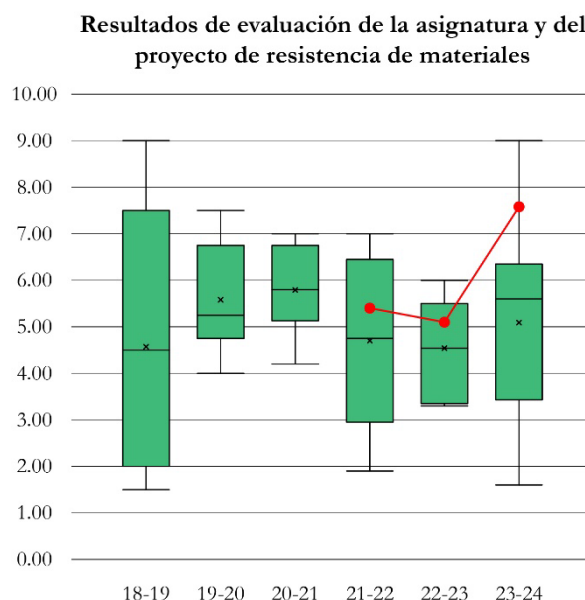


Figura 3. Distribución de las calificaciones representada mediante un diagrama de caja y bigotes, acompañada de una gráfica lineal que muestra las medias del proyecto.



Figura 4. Fotografías de entregas finales de los proyectos estructurales.

5. Conclusiones

El presente artículo recoge el desarrollo y resultados de una actividad tangible que busca mejorar la comprensión de conceptos estructurales en un Grado de Arquitectura. Los resultados del proyecto demuestran que la metodología aplicada en Estructuras I contribuye tanto al aprendizaje de los estudiantes como a su motivación hacia el análisis estructural. La implementación de una metodología de 'aprender haciendo' y de trabajo manual ha permitido una comprensión profunda de conceptos esenciales como el equilibrio, la rigidez y la resistencia en el diseño de estructuras.

Este enfoque ha facilitado la asimilación de conocimientos de forma tangible, proporcionando una base sólida para el desarrollo de competencias clave en la práctica profesional. Para los estudiantes sin experiencia previa, es crucial iniciar el aprendizaje a partir de los principios básicos antes de introducir el uso de *software* avanzado. Este proceso gradual fomenta una lógica estructural intuitiva y una comprensión mecánica que son esenciales en la formación de arquitectos e ingenieros. La metodología, alineada con las recomendaciones de maestros como Ricardo Aroca, Carlos Fernández Casado y Eduardo Torroja, asegura que los estudiantes consoliden una base robusta en los fundamentos de la disciplina. Esto es vital para el uso eficaz de cálculos complejos y herramientas de programación orientadas a la optimización de materiales y la resolución de problemas estructurales. Sin esta base lógica y práctica, existe el riesgo de que la ingeniería estructural se convierta en un campo excesivamente dependiente del *software*, en detrimento de la comprensión humana y de sus principios esenciales.

En conclusión, la implementación de metodologías activas ha sido clave para mejorar la comprensión y el compromiso de los estudiantes en esta asignatura. Esta experiencia sugiere que el empleo de enfoques similares en

otras asignaturas de análisis estructural podría promover una transición efectiva hacia un aprendizaje integral y práctico, fortaleciendo así la preparación de los estudiantes para los desafíos profesionales. Aunque estas metodologías tienen una mayor tradición en los grados de arquitectura, debido a su familiaridad con el trabajo en maquetas, sería interesante trasladar esta práctica a los grados de ingeniería, donde se enfrentan a desafíos similares en los primeros cursos. Grandes ingenieros de la historia han utilizado maquetas para comprender y explicar sus diseños estructurales, lo que demuestra su valor en el desarrollo de habilidades esenciales en la ingeniería.

Referencias

- [1] Cuadra, C. (2010). Challenges in building structure engineering education. *Conf. on Education and Educational Technology, World Scientific and Engineering Academy and Society*, 123–125.
- [2] Romero, M. L., & Museros, P. (2002). Structural analysis education through model experiments and computer simulation. In *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*. 128 (4), 170-175.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1052-3928\(2002\)128:4\(170\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1052-3928(2002)128:4(170))
- [3] Barner, M. S., Adam Brown, S., Bornasal, F., & Linton, D. (2022). Tangibility of representations in engineering courses and the workplace. *Journal of Engineering Education*, 111(1), 162-184.
<https://doi.org/10.1002/jee.20439>
- [4] Bhatia, A., Garlock, M. E., & Laffey, E. H. (2016). Engaging students with the creative art of civil engineering. *ASCE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings, 2016-June*.
<https://doi.org/10.18260/p.26977>
- [5] Vrontissi, M., Castellón González, J. J., D'Acunto, P., Monzó, L. E., & Schwartz, J. (2018). “Constructing Equilibrium”: A methodological approach to teach structural design in architecture. In *Proceedings of the IV International Conference on Structural Engineering Education Without Borders, Madrid, Spain, June 20–22, 2018*.
<https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/281635>
- [6] Bertol-Gros, A., & Álvarez Atarés, F. J. (2023). Metodología A(T)BP aplicada en Arquitectura. In García-Escudero, D., & Bardí Milà, B. (Eds.), *JIDA: textos de arquitectura docencia e innovación* 10. 60-75. Recolectores Urbanos.
<http://dx.doi.org/10.5821/ebook-9788410008045>
- [7] Bertol-Gros, A., Álvarez Atarés, Fco. J., & Gómez Navarro, B. (2023). Adecuación de un A (t) BP al ejercicio profesional de la arquitectura. In *XI Jornadas sobre Innovación Docente en Arquitectura (JIDA'23), Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Granada, 16 y 17 de noviembre de 2023: libro de actas*. 11, 77-87. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
<https://doi.org/https://dx.doi.org/10.5821/jida.2023.12144>
- [8] Thompson, P. (2010). Learning by doing. In *Handbook of the Economics of Innovation*, 1, 429-476.
[https://doi.org/10.1016/S0169-7218\(10\)01010-5](https://doi.org/10.1016/S0169-7218(10)01010-5)
- [9] Brown, T. (2009). Building to Think, or The Power of Prototyping. In T. Brown & B. Katz (Eds.), *Change by Design: How Design Thinking Transforms Organizations and Inspires Innovation*. Harper Bussiness.