

## Enseñanza de Teoría de Estructuras mediante el diseño, cálculo, construcción y ensayo de modelos

P. Galvín, M. Solís, A. Romero

*Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla*  
{pedrogalvin,msolis,aro}@us.es

---

### Resumen

*Este trabajo presenta los resultados de una experiencia de innovación docente dentro de la docencia en el ámbito de las estructuras en la titulación de Ingeniería Industrial en la Universidad de Sevilla. La metodología docente aplicada pretende motivar al alumno al aprendizaje promoviendo el diseño, cálculo, construcción y ensayo de estructuras. De esta forma, el alumnado se forma no sólo como calculista, sino también desarrolla habilidades que le permiten comprender el funcionamiento de las estructuras. El proyecto abarca asignaturas impartidas en tercer y quinto curso de la titulación. En tercer curso, los estudiantes inician su formación estructural con la asignatura Teoría de Estructuras en la cual se les transmiten los fundamentos básicos mediante el diseño, fabricación y ensayo de estructuras de madera de balsa. Los alumnos disponen de programas informáticos para optimizar el diseño de sus modelos previamente a su construcción y posterior ensayo en el laboratorio. Tras esta primera aproximación a la Teoría de Estructuras, el alumno se forma en conceptos más avanzados, como el comportamiento dinámico de las estructuras y las inestabilidades, en tipos estructurales particulares como son los casos de las placas y las estructuras laminares, y en materiales estructurales como el acero y el hormigón. Antes de finalizar sus estudios, el alumno se vuelve a encontrar con una metodología docente basada en el aprendizaje a través de proyectos en la asignatura Análisis Experimental de Estructuras. En este caso los proyectos que resuelve el alumno recorren parte de la casuística que se encontrará profesionalmente una vez egresado. Este trabajo presenta las ventajas de esta metodología desde el punto de vista de la enseñanza en ingeniería.*

---

### INTRODUCCIÓN

En la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla los conocimientos de Teoría de Estructuras se transmiten a los alumnos desde el tercer al quinto curso de la titulación de Ingeniero Industrial. En tercer curso, todos los alumnos de la titulación estudian las bases de la materia y, en cuarto y quinto curso, aquellos alumnos que intensifican sus nociones en Mecánica o Construcción continúan adquiriendo ideas más avanzadas acerca del comportamiento de las estructuras. Desde hace cinco años, se ha puesto en marcha una experiencia de innovación docente que pretende motivar al alumno al aprendizaje promoviendo el diseño, cálculo, construcción y ensayo de estructuras. De esta forma, el alumnado se forma no sólo como calculista, sino también desarrolla habilidades que le permiten comprender el funcionamiento de las estructuras.

En tercer curso, los estudiantes inician su formación estructural con la asignatura Teoría de Estructuras en la cual se les transmiten los fundamentos básicos mediante el diseño, fabricación y ensayo de estructuras de madera de balsa. Los alumnos disponen de programas informáticos para optimizar el diseño de sus modelos previamente a su construcción y posterior ensayo en el laboratorio. Tras esta primera aproximación a la Teoría de Estructuras, el alumno se forma en conceptos más avanzados, como el comportamiento dinámico de las estructuras y las inestabilidades, en tipos estructurales particulares como son los casos de las placas y las estructuras laminares, y en materiales estructurales como el acero y el hormigón. Antes de finalizar sus estudios, el alumno se vuelve a encontrar con una metodología docente basada en el aprendizaje a través de proyectos en la asignatura Análisis Experimental de Estructuras. En este caso los proyectos que resuelve el alumno recorren parte de la casuística que se encontrará profesionalmente una vez egresado: medida de tensiones, desplazamientos y curvaturas, refuerzo de vigas, obtención de los parámetros modales, medida de vibraciones y técnicas de detección de daño.

En cuanto a la utilización de nuevas Tecnologías de Información y Comunicación, se han incluido ambas asignaturas dentro de la plataforma de enseñanza virtual de la Universidad de Sevilla. En esta plataforma, se encuentran a disposición de los alumnos todos los documentos usados en el desarrollo de las clases. También tienen allí a su disposición una descripción de las prácticas, recursos audiovisuales, preguntas para su autoevaluación del conocimiento de las asignaturas, y otros documentos de interés.

## TEORÍA DE ESTRUCTURAS

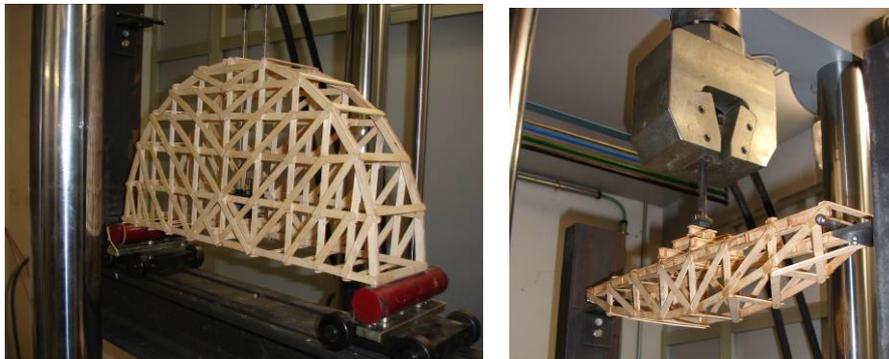
En tercer curso de la titulación Ingeniero Industrial, los alumnos estudian los conceptos básicos de la Teoría de Estructuras entre los cuales se encuentran el método de flexibilidad y el método de rigidez y cómo obtener a partir de ellos los desplazamientos y esfuerzos que sufren las estructuras cuando están sometidas a sus cargas de diseño. Con la superación de esta asignatura, los alumnos estaban listos para empezar a estudiar otros aspectos más avanzados, como las inestabilidades, la dinámica y también, para entender la formulación del método de los elementos finitos. Sin embargo, parecía que los estudiantes no tenían la impresión que los conocimientos que acababan de adquirir les sirvieran para diseñar, calcular y construir una estructura real. Para resolver esta sensación se introdujeron dos prácticas, una informática y otra de laboratorio. En la práctica informática los alumnos calculan mediante un programa que implementa el método de rigidez un pórtico de una nave industrial metálica. En la práctica de laboratorio, los alumnos ensayan y miden los desplazamientos y tensiones que se provocan en un pórtico metálico cuando está sometido a una fuerza conocida. Además, los alumnos comparan los datos medidos en el pórtico con el que predice la Teoría de Estructuras. De esta forma, los estudiantes ven que el comportamiento real de la estructura se corresponde con los fundamentos teóricos que han estudiado previamente.

No obstante, para completar más la docencia se ha introducido una tercera práctica en la que los alumnos deben diseñar, calcular, construir y ensayar hasta la rotura, una estructura de madera, en particular, de palitos de madera como los que se usan para los helados. En esta tercera práctica sólo se les exige a cada grupo de dos alumnos que la estructura cumpla un determinado objetivo, siendo el resto de los parámetros libres y a diseñar por ellos. Por ejemplo, en el primer año en el que se puso en práctica esta metodología, la construcción debía salvar un vano de 50 cm (Figura 1). En este último año, la estructura debía ser capaz de elevar una carga que se encontraba a 50 cm del punto de apoyo (Figura 2).

De esta forma, los alumnos se enfrentan a aquellos problemas que pueden encontrarse cuando diseñen una estructura en su vida profesional. Aquellos que empiezan con que no todos los *datos* están disponibles y que terminan en como ejecutar las uniones entre las barras correctamente para que no sean los puntos más débiles de la estructura. Destacar también que, aunque en este estadio de su formación aún no conocen los problemas de inestabilidades que pueden tener las estructuras, si tienen que resolver barras cuyos esfuerzos de compresión pueden provocar el pandeo y que requieren de secciones con mayor radio de giro para poder resistir los esfuerzos que las solicitan.

El diseño, cálculo, construcción y ensayo de la estructura la realizan los alumnos en grupos de dos con la continua ayuda de los profesores de la asignatura de manera que se fomenta la discusión técnica. También esto implica una gran carga docente para el profesorado implicado en la docencia. Una vez los alumnos acuerdan la tipología de estructura con la que quieren resolver el problema empiezan a realizar los cálculos que, en algunas ocasiones, les obligan a modificar la tipología prevista. A continuación, una vez diseñada y calculada la estructura, se les aporta el material de construcción consistente en palitos de madera, adhesivo y, para aquellos que los estimen oportuno, alambres que actúan en las estructuras como tirantes. Las propiedades mecánicas de dichos materiales están disponibles y también se les da la opción de ensayar a compresión cualquier tipo de barra que diseñen. Los alumnos tienen disponible el material existente en el laboratorio para la construcción de la estructura.

Una vez construida, los alumnos entregan una memoria del proyecto en la que explican todo el proceso de diseño, cálculo y construcción y estiman la carga de rotura de la estructura basándose en los resultados obtenidos con un programa informático basado en el método de rigidez. Dicha memoria tiene que ser defendida delante de los profesores de la asignatura antes del ensayo que llevará a la estructura hasta su colapso. La evaluación de la práctica depende del diseño estructura, y también de la relación entre la carga de colapso y el peso de la estructura, y de la relación entre la carga de colapso y la carga de fallo prevista por los alumnos según sus cálculos.



*Fig. 1. Estructuras de madera realizadas los alumnos e imágenes de algunos de los ensayos.*



*Fig. 2. Estructura de madera tipo grúa realizada por un grupo de alumnos para elevar una carga.*

Los resultados obtenidos en los cursos académicos en los que se ha desarrollado esta metodología docente han sido muy buenos, siendo el porcentaje de alumnos que realiza la tercera práctica y que supera la asignatura en torno al noventa por ciento. Además, los alumnos que participan en el proyecto se involucran en gran medida y de tal forma que la mayoría de ellos se especializa o bien en Mecánica o bien en Construcción. En estas intensificaciones, en los cursos de cuarto y quinto, estudian el comportamiento dinámico de las estructuras y las inestabilidades, tipos estructurales particulares como son los casos de las placas y las estructuras laminares, y materiales estructurales como el acero y el hormigón. Por último, antes de finalizar sus estudios de la titulación

de Ingeniero Industrial, el alumno se vuelve a encontrar con una metodología docente basada en el aprendizaje a través de proyectos en la asignatura Análisis Experimental de Estructuras.

## ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE ESTRUCTURAS

En la asignatura análisis experimental de estructuras se han aplicado distintos sistemas de enseñanza y evaluación desde su implantación en el plan de estudios, si bien en todos los casos se ha fundamentado en el aprendizaje basado en proyectos. Se trata de una asignatura de último curso encaminada a transmitir conocimientos especializados y de aplicación práctica, basándose en los conocimientos previos adquiridos en otras asignaturas de la misma área de conocimiento. Estos conocimientos previos, así como la propia madurez del alumnado de los últimos cursos, facilitan la implementación de la metodología docente desarrollada en la asignatura.

La metodología docente desarrollada ha sido siempre similar, si bien se han ido haciendo variaciones en la organización del trabajo a realizar por parte del alumno, variando de alguna manera el enfoque y también las formas de evaluación. Estos cambios han ido encaminados a conseguir una mejora en la consecución de los objetivos planteados, pero también son necesarios por otro lado para mantener la atención y la motivación en la docencia del propio profesorado. Por otro lado, se evita la transmisión de material, resultados y experiencias por parte de alumnos de cursos anteriores, que desvirtúan el desarrollo de la asignatura y la credibilidad del trabajo realizado por los alumnos.

Inicialmente el trabajo práctico consistió en la realización a lo largo del curso de un pequeño trabajo de investigación sobre el comportamiento de un elemento estructural singular (vigas de hormigón armado reforzadas externamente con platabandas de fibra de carbono). Dentro de ese trabajo se incluían distintos tipos de ensayos, instrumentación, etc. La idea de esta metodología era que el alumno realizase un trabajo de larga duración, que comprendiese todo el curso, y que por medio de la aplicación de sus conocimientos previos y de los adquiridos en la asignatura, llegase a estudiar, analizar y sacar conclusiones sobre un problema nuevo para él. Esto incluía el enfrentamiento a situaciones de incertidumbre y riesgo de cometer errores propios del desarrollo de un trabajo novedoso. Al final del curso, se entregaba una memoria del trabajo desarrollado, que se presentaba en público ante el profesorado.



*Fig. 3. Pegado de la platabanda de fibra de carbono sobre vigas de hormigón armado.*

Este planteamiento original resultó de gran interés, y permitió la puesta a punto de la asignatura, lo cual no resultaba tarea fácil por ser la primera vez que se impartía una asignatura sobre esta materia. A partir de ahí, se fue modificando el programa de prácticas para conseguir un mayor rendimiento, motivación y aprendizaje por parte del alumno. Así, se optó por realizar una serie de prácticas, que resultaban ser generalmente independientes las unas de las otras, y que pretendían reforzar la constancia en el trabajo del alumno, la ilustración de contenidos teóricos y la asimilación de las ideas más importantes relacionadas con la asignatura. Este cambio también respondió a la petición por parte del alumnado de un mayor orden y regularidad en el trabajo a desarrollar a lo largo del curso, lo que conllevaba realizar una evaluación continua.

Se han ido poniendo en marcha distintas prácticas en los distintos cursos impartidos. Con estas sesiones prácticas, en las que cada uno de los alumnos desarrolla sus habilidades en el laboratorio, se pretende recoger la mayor parte de los aspectos que pueden encontrarse en el análisis experimental de estructuras: lenguajes de programación (LabView y Matlab), funcionamiento y manejo de transductores (de desplazamiento, bandas

extensométricas, acelerómetros, geófonos, vibrómetros láser), características y configuración de sistemas de adquisición de datos y máquinas de ensayo, diseño y montaje de ensayos, e incluso la participación en la realización de ensayos sobre estructuras reales (comportamiento dinámico de puentes, pasarelas, vibraciones inducidas por tráfico rodado de vehículos o trenes, etc.). Como una actividad adicional, se realizan de lo posible visitas a empresas e instalaciones relacionadas con las Estructuras.



*Fig.4. Pegado de banda extensométrica sobre probeta de hormigón.*



*Fig.5. Ensayo de flexión de viga metálica.*



*Fig.6. Identificación de parámetros modales de una estructura bajo el efecto de una carga móvil.*



*Fig. 7. Identificación dinámica de una estructura real con acelerómetros sincronizados vía GPS.*



Fig.8. Medida de las vibraciones inducidas por el tráfico rodado en un puente.

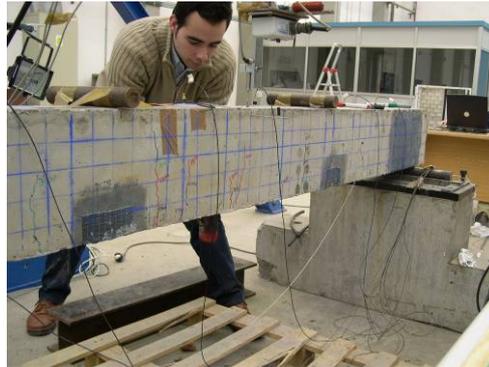


Fig.9. Aplicación de técnicas de detección de daño a vigas de hormigón armado reforzadas externamente.

En total, la asignatura incluye doce sesiones de trabajo de laboratorio que se realizan en grupos reducidos, que hasta la fecha han sido de cinco alumnos como máximo. Esto resulta fundamental para conseguir la implicación del alumno en las tareas a realizar en el laboratorio y la comprensión de los contenidos que se pretenden transmitir. Las memorias del trabajo realizado semanalmente se entregan por parejas, y previamente a la entrega se realizan presentaciones del trabajo realizado frente al profesorado y el resto de alumnos.

Mediante las sesiones prácticas, la elaboración de informes y la presentación oral del trabajo realizado, la asignatura pretende fortalecer habilidades del alumno en aspectos como la expresión oral y escrita, el trabajo en equipo, la capacidad de análisis, síntesis y autocrítica, además del aprendizaje de contenidos relacionados directamente con la materia de la asignatura.

El sistema de evaluación se basa en la evaluación continua pero también incluye un examen por escrito, en la que se realizan preguntas tanto del contenido teórico de la asignatura como del trabajo realizado en las prácticas. Este examen es normalmente sencillo (el contenido teórico de la asignatura no es ni extenso ni complicado) y es de tan solo una hora de duración. La nota de este examen supone el 30% de la nota final, y el 70% restante proviene de la notas de prácticas. La evaluación de la asignatura incluye también un sistema de autoevaluación, para comprobar el grado de acuerdo entre las calificaciones obtenidas según el criterio del profesorado y las que propusieran los alumnos. En este sistema de autoevaluación, cada alumno propone una calificación para sí mismo y el resto de compañeros de su grupo de prácticas, de los que tiene información de primera mano sobre el trabajo que han realizado. El resultado de esta experiencia de autoevaluación ha sido positivo, ya que las desviaciones son típicamente menores a un punto con respecto a las propuestas, y cualitativamente la distribución de las calificaciones entre los miembros de un grupo suele coincidir con las que proponen los alumnos. En los próximos años, se tiene previsto que el sistema de autoevaluación sirva para reforzar la matización de calificaciones entre los alumnos, de forma que en base a la distribución de calificaciones que otorguen, afecten a las calificaciones propuestas por el profesorado, premiando a los alumnos que más esfuerzo han hecho y penalizando la de los menos aplicados, de acuerdo al propio criterio de los mismos alumnos.

Tras cinco años introduciendo esta metodología docente se puede decir que los resultados son excelentes, con un grado de satisfacción muy alto tanto por parte del alumnado como por el profesorado. Al finalizar cada curso académico se han realizado encuestas sobre la calidad de la docencia (organización de la asignatura, contenidos teóricos y prácticos, sistemas de evaluación, evaluación del profesorado, etc.). Los resultados de estas encuestas indican que los alumnos agradecen esta forma de aprendizaje, aunque ello les suponga un mayor nivel de esfuerzo y dedicación.

## **CONCLUSIONES**

En este trabajo se han presentado los resultados de una experiencia de innovación docente dentro de la docencia en el ámbito de las estructuras en la titulación de Ingeniería Industrial en la Universidad de Sevilla. La metodología docente aplicada pretende motivar al alumno al aprendizaje mediante la enseñanza basada en experiencias prácticas que además permiten el tratamiento de aspectos transversales en la formación del alumno. La respuesta del alumnado a este tipo de enseñanzas es muy positiva. Por su parte, el profesorado se ha sentido motivado y satisfecho con la implementación de estas nuevas metodologías, a pesar del tiempo que ello conlleva.

Las metodologías docentes aplicadas resultan adecuadas además para su implementación dentro del nuevo Espacio Europeo de Educación Superior. No obstante, y dado el esfuerzo que conlleva para el profesorado este tipo de metodologías, esto solo resulta aplicable en grupos de alumnos reducidos. Esto ocurre en la asignatura de quinto curso de Análisis Experimental de Estructuras, pero no en la asignatura troncal de Teoría de Estructuras, donde la metodología planteada solo ha podido ser implantada con carácter de trabajo voluntario. Para la generalización de este tipo de metodología en forma de trabajo obligatorio, sería necesario aumentar los recursos humanos disponibles para la impartición de la asignatura. Este aumento de los recursos se encontraría plenamente justificado según los beneficios obtenidos en cuanto al aumento de la calidad en la formación del alumno que supone este tipo de experiencias.