

THE EVOLUTION OF STRUCTURAL ENGINEERING EDUCATION IN THE ERA OF COMPUTER

Vázquez-Boza, Manuel¹; Justo, Enrique²; Delgado, Antonio³

ABSTRACT

In the last decades, the universalization of computer analysis has meant a revolution in the structural analysis methods that are being used in the professional practice. As a consequence, the need has arisen both in academic and professional circles to redefine the teaching of structures in the engineering and architecture schools. This study analyses, in the first place, the literature on structural analysis teaching to synthesize the characteristics that should have a structural analysis course in the context of the XXI century. Starting from the analysis of shortcomings in the current teaching, a panorama on future directions in the teaching of structures is outlined, in relation to (1) the objectives, (2) the contents, (3) the instructional method.

The literature revision allowed establishing a theoretical framework for the design of a structures course syllabus adapted to the present needs. In general, it is assumed that the universalization of computer analysis should lead to a paradigm shift in the teaching of structures. Instead of focusing in learning hand analysis methods, the structures courses should be aimed at the understanding of the structural behavior, which is required to carry out successfully the tasks that the graduates should undertake in their professional practice.

Finally, we present an experience carried out in the Seville School of Architecture, where a course based in the principles outlined in the literature and also following the guidelines of the European Higher Education Area (EHEA) has been designed and implemented. The program evaluation has yielded positive results, which include a significant increase in the attendance and success rate.

Keywords: *Problem-based learning, European higher education area, Structural engineering education, Competencies, Computer assisted learning.*

¹ Department of Building Structures. University of Seville (SPAIN). mboza@us.es (Corresponding author)

² Department of Building Structures. University of Seville (SPAIN). ejem@us.es

³ Department of Building Structures. University of Seville (SPAIN). antoniodelga@us.es

1. INTRODUCCION

Esta comunicación analiza el estado del conocimiento sobre la docencia de Estructuras, con el objetivo de sintetizar las contribuciones publicadas comentando las características que debe tener un curso de Estructuras adaptado a las necesidades del siglo XXI. Partiendo de las deficiencias detectadas en la formación actual, se perfila un panorama sobre la posible evolución de la enseñanza de Estructuras en relación con (i) los objetivos, (ii) los contenidos, (iii) la metodología docente.

En segundo lugar, se presenta una experiencia innovadora llevada a cabo en la Escuela de Arquitectura de Sevilla, donde se ha puesto en marcha el programa de una asignatura básica de Estructuras, basado en las conclusiones extraídas de la revisión del estado del conocimiento y en los principios establecidos por el Espacio Europeo de Educación Superior (EEES).

2. LA DOCENCIA TRADICIONAL DE ESTRUCTURAS

La docencia tradicional en las asignaturas introductorias de Estructuras en las escuelas de Ingeniería y Arquitectura es una docencia basada en contenidos, que consiste generalmente en un curso de Resistencia de Materiales, con clases teóricas y clases prácticas. La metodología docente se centra en clases expositivas y evaluación por exámenes. En los exámenes, los estudiantes deben resolver una serie de problemas en un tiempo acotado.

Tal y como está planteado, este tipo de docencia clásica tiene dos limitaciones importantes:

- La poca relevancia de los ejemplos que son objeto de estudio. Debido a la complejidad de los métodos de cálculo en la disciplina, el repertorio de estructuras que pueden calcularse a mano es muy reducido y, en cualquier caso, excluye prácticamente a la totalidad de las tipologías reales que se emplean en edificación.
- La concepción del análisis como un fin en sí mismo. Los estudiantes realizan cálculos en modelos simplificados de estructuras y obtienen un resultado, que remarcan sin tener en cuenta sus implicaciones en el proceso de diseño o comprobación de la estructura [28].

Existen dos causas principales que han inducido a cuestionar el enfoque tradicional de la docencia de Estructuras en las escuelas técnicas: (1) la universalización absoluta del ordenador como herramienta de análisis estructural en todos los ámbitos de la práctica profesional y (2) el nuevo enfoque de la docencia por competencias contemplado en los nuevos planes de estudios de grado en el EEES.

3. EL NUEVO PARADIGMA EN LA DOCENCIA DE ESTRUCTURAS

3.1. La universalización del análisis de estructuras por ordenador

En los últimos 30 años la universalización del análisis de estructuras por ordenador ha supuesto una verdadera revolución en el trabajo cotidiano de los proyectista de estructuras. Como consecuencia de ello, en medios académicos y profesionales, ha surgido la necesidad de replantearse la enseñanza de Estructuras en las escuelas. A finales de los años 80, Jennings y Gilbert, [3], Johnson, [4] y Brohn [5] inician un debate sobre qué debería enseñarse en las asignaturas de Estructuras, teniendo en cuenta los avances existentes en los métodos de análisis con ordenador. El título del artículo de David Johnson, [4] "Why not teach computer analysis?" es ilustrativo del desafío que plantean los autores.

Brohn [5], en su artículo "A new paradigm for Structural Engineering", afirmaba:

"Creo que el nuevo paradigma es el creciente y definitivo dominio del uso del ordenador en todas las fases del análisis y el diseño, lo cual demandará un enfoque radicalmente nuevo en la enseñanza de Estructuras."

Sin embargo, pese al hecho incontestable, constatado por Brohn [6], de que "ninguno de los métodos de análisis estructural que se enseñan será usado jamás para resolver estructuras reales, por la sencilla razón de que estas son demasiado complicadas para ser calculadas a mano", el cambio se resistía a producirse. De nuevo, una década más tarde, May et al. [7] reactivan la discusión. En su artículo, "The future of structural analysis teaching", los autores advierten:

"Cuando un joven ingeniero se gradúa, se le pondrá inevitablemente en las manos un programa de ordenador para analizar estructuras. Si en la universidad no somos capaces de enseñarle el material relevante para esa tarea, el resultado será como conducir un Ferrari sin carnet: una más que probable catástrofe."

A raíz de la publicación de "The future of structural analysis teaching" se reactivó el interés y, simultáneamente, se puso de manifiesto que existían muchas dudas sobre la docencia de Estructuras que se impartía, en ese momento, en las Universidades británicas. Pocos años más tarde, la prestigiosa consultora de ingeniería Ove Arup & Partners financió un estudio sobre la enseñanza de Estructuras en las Universidades del Reino Unido [8], con los objetivos de (1) conocer el estado de la enseñanza, (2) recoger opiniones de los sectores implicados (profesores, estudiantes y profesionales), y (3) formular recomendaciones sobre el enfoque y los contenidos que deberían tener los futuros cursos de Estructuras.

Las conclusiones iniciales del estudio (que incluían reducir el tiempo dedicado al cálculo a mano de estructuras hiperestáticas, y fomentar en su lugar el uso educativo del ordenador), se publicaron en la revista "The Structural Engineer" en 2008, generando un gran interés en el seno de la profesión. En 2009, la conferencia anual de la Institución de Ingenieros Estructurales británicos (IStructE) trató sobre el tema de la enseñanza de Estructuras, con el título "Structural Engineering Education in the 21st Century" [9,10]. A raíz de esta reunión, la Institución inició un proyecto para esbozar el enfoque y contenidos en Estructuras de un plan de estudios moderno, cuyo primer borrador se publicó en 2011. Según el planteamiento desarrollado, los nuevos planes de estudios deben tener, como objetivos globales, asegurar que los graduados [11]:

1. *"Comprendan la respuesta estructural, al menos cualitativamente y, cuando sea posible, cuantitativamente, de las formas y materiales estructurales más comunes, a acciones estáticas y dinámicas."*
2. *"Desarrollen el hábito de aprender y un entusiasmo por las estructuras, para favorecer el desarrollo de las habilidades adquiridas a lo largo de toda su vida profesional"*.

Como conclusión, 25 años después del inicio de un debate sobre el cambio necesario en la docencia de Estructuras, cuyo principal catalizador ha sido el fulgurante avance tecnológico en los métodos de

análisis, el esperado cambio no se ha producido aún. A pesar de los argumentos desarrollados en la literatura científica y de contar con el beneplácito de la industria, la evolución hacia un nuevo modelo de enseñanza se produce con gran lentitud, en gran parte debido a la inercia de las instituciones académicas encargadas de llevarlo a cabo.

3.2. La docencia por competencias en el EEES

La puesta en marcha al final de la década anterior del Espacio Europeo de Educación Superior constituye un motivo de peso para impulsar un cambio definitivo del modelo de enseñanza. Uno de sus objetivos fundamentales es acercar la docencia universitaria a la práctica profesional, para lo cual los nuevos títulos de grado deben implementar una docencia por competencias [12]. La docencia por competencias obliga a un rediseño de los planes de estudio, centrándose ahora, no solo en los conocimientos que adquiere el estudiante, sino en la acción que es capaz de realizar con esos conocimientos. El nuevo perfil académico debe estar más orientado a la aplicación de conocimientos, y a la práctica profesional [13].

En el campo de la docencia de Estructuras, la elaboración de los planes de estudio de los nuevos grados coincide con el momento en que la necesidad de cambio está calando en la profesión. Lo cual debería influir de forma determinante en las características y el contenido de los programas docentes.

4. CARACTERÍSTICAS QUE DEBERÍA TENER EL PROGRAMA DE UNA ASIGNATURA DE ESTRUCTURAS

Aunque hay posiciones dispares en algunos temas, el consenso existente en la mayor parte de los autores sobre cómo debería ser el programa de una asignatura de Estructuras con un enfoque moderno, que recoge una serie de aspectos claves:

- Deficiencias en la formación actual
- Objetivos
- Contenidos
- Metodología docente

4.1. Deficiencias en la formación actual

Como tarea previa, resulta interesante realizar un diagnóstico de las carencias que presenta la formación actual, en relación con una serie de aspectos clave.

Los primeros que se preocuparon de evaluar las deficiencias en la formación en Estructuras recibida en las escuelas técnicas fueron Brohn y Cowan [14], que a finales de los años setenta publicaron "Teaching towards an improved understanding of structural behaviour", donde presentaban los resultados de un test realizado a graduados que demostraba, según los autores, que la comprensión del comportamiento estructural que demostraba el estudiante medio era peor de la esperada. La explicación de los malos resultados está relacionada, según los autores, con *"la predominancia en los exámenes de cuestiones en las que al estudiante se le exige demostrar su habilidad para calcular valores desconocidos"*, a pesar de que, paradójicamente, los objetivos teóricos de los programas estén a menudo dirigidos hacia la comprensión de los principios básicos del comportamiento estructural.

Una aproximación cualitativa a las deficiencias en la formación de la disciplina de Estructuras, es la que realiza Morreau [15], de Ove Arup & Partners, basándose en la observación de cómo los recién

graduados se enfrentan a problemas de análisis estructural. Para evaluar la comprensión del comportamiento estructural, el autor se basa en tres criterios: (a) ¿modelan correctamente la estructura antes de analizarla?, (b) ¿interpretan adecuadamente los resultados del análisis, sobre todo con vistas a detectar posibles errores? y (c) ¿son capaces de modificar con éxito el diseño de la estructura a la luz del análisis realizado?

Morreau concluye que, la mayor parte de los egresados es capaz de realizar la primera tarea, pero solo si el modelo completo de la estructura puede introducirse en el programa de análisis; las dificultades aparecen cuando el problema debe ser simplificado, ya que ello requiere una comprensión más profunda del comportamiento de la estructura como sistema. En cambio, constata que la proporción de graduados que es capaz de llevar a cabo con éxito la interpretación de resultados y las modificaciones subsiguientes es muy baja.

En cuanto a las carencias a la hora de abordar los problemas, el autor concluye:

“Con demasiada frecuencia, los jóvenes ingenieros (y también los más antiguos) se lanzan a atacar el problema con todos los megabytes de que disponen, y conquistan con éxito lo que, al final, resulta ser el objetivo equivocado”.

Como remedio, recomienda a las Universidades que cultiven en sus estudiantes *“la actitud de cuestionarse las cosas y el hábito de pensar en el problema antes de embarcarse en su solución”.*

Johnson y May [8], por otra parte, se centraron en las dificultades que encontraban los recién titulados para usar correctamente los programas de cálculo informático en el comienzo de su ejercicio profesional. Sus conclusiones señalan principalmente a (a) la falta de habilidades para modelar adecuadamente (especialmente las condiciones de enlace), (b) la falta de experiencia para predecir los resultados intuitivamente o mediante cálculos aproximados, (c) problemas con los ejes y las convenciones de signos, (d) dificultades para apreciar las limitaciones del cálculo elástico y (e) un exceso de confianza en los resultados obtenidos por ordenador, que aceptan a menudo sin sentido crítico.

La Institución de Ingenieros Estructurales (IStructE), en su conferencia del año 2009 dedicada al futuro de la docencia de Estructuras [9], planteó la cuestión de si los graduados poseen los conocimientos y habilidades necesarias. Las conclusiones obtenidas fueron bastante descorazonadoras:

- *“Los estudiantes no han adquirido las habilidades y conocimientos necesarios. No les estamos enseñando a comprender el comportamiento estructural”.*
- *“Se dedica demasiado tiempo a enseñarles cómo realizar cálculos, y muy poco a modelar una estructura y evaluar su comportamiento, llevando a cabo análisis de sensibilidad. Hace falta un cambio fundamental en la práctica docente, para enseñar a los estudiantes a pensar, en lugar de enseñarles a llevar a cabo procedimientos de cálculo”.*

- *“El sistema modular de los planes de estudio da lugar a una falta de integración. Los estudiantes aprenden a pasar exámenes, más que a comprender de forma holística el comportamiento estructural, y tienen problemas para aplicar el conocimiento adquirido”.*

En síntesis, del diagnóstico realizado podrían extraerse algunas conclusiones útiles para el diseño de los planes de estudio:

- El objetivo principal de los cursos de Estructuras, que debe ser dotar al alumno de las aptitudes necesarias para proyectar estructuras, actualmente no se alcanza.
- Existe, en general, insatisfacción con la formación actual que reciben los estudiantes, centrada principalmente en el cálculo; en su lugar, deberían aprender el razonamiento propio de la disciplina, aplicado a todo el proceso de resolución de problemas: definición del problema, modelado, cálculo, verificación e interpretación de resultados, y modificaciones en el diseño.
- Para llevar a cabo con éxito todas las fases de este proceso es esencial un conocimiento profundo de los principios básicos que rigen el comportamiento estructural, aspecto al que debe darse prioridad como objetivo en los nuevos planes de estudio.
- Los programas de Estructuras en Arquitectura deben concebirse expresamente teniendo en cuenta las peculiaridades propias de la formación del arquitecto.
- Algunas de las dificultades más importantes que encuentran los estudiantes en su aprendizaje son inherentes a la materia, y están relacionadas con la comprensión de los conceptos más relevantes y de las relaciones que existen entre ellos. Estos conceptos de especial dificultad deben ser tenidos en cuenta en los nuevos programas de las asignaturas, desarrollando estrategias que faciliten su aprendizaje.

4.2. Objetivos

En un nuevo contexto caracterizado por el dominio absoluto del ordenador, resulta necesario cambiar de un enfoque basado en las técnicas de cálculo manual a otro cuyo objetivo principal sea la comprensión profunda del comportamiento estructural [3,4,5,7,8,9,11,15,16,17,18,19,20,21]. Esta comprensión, a la que algunos autores se refieren como “intuición estructural”, no es, en opinión de Black y Duff [16], “una sensibilidad ciega”, sino más bien *“una comprensión cualitativa del comportamiento estructural, respaldada por la teoría y basada en la experiencia y la experimentación”.*

Ahora que el ordenador realiza todos los cálculos, las tareas a las que se dedicarán los graduados en la práctica profesional serán principalmente [2,4,5,9,16,20,21]:

- Diseñar la estructura: en las fases iniciales del diseño se requieren decisiones rápidas, que deben tomarse intuitivamente, sin hacer cálculos.
- Modelar la estructura para su análisis por ordenador: el modelado requiere comprender a priori las limitaciones del modelo y de los métodos de análisis, o existe el peligro de no considerar, en el modelo, formas de comportamiento importantes de la estructura original.

- Verificar e interpretar los resultados del análisis informático: la comprensión del funcionamiento de la estructura es fundamental para detectar posibles errores en el cálculo, o planear modificaciones en el diseño a la vista de los resultados obtenidos.

4.3. Contenidos

La definición de contenidos es una tarea compleja, que implica cuestionar la inclusión de conocimientos que tradicionalmente se han considerado “sagrados” en la disciplina, manteniendo solo aquellos que colaboren verdaderamente a desarrollar las aptitudes necesarias para proyectar estructuras. Las recomendaciones de distintos autores [2,3,4,7,8,16,18,20,26,27] sobre los contenidos que debería tener un curso de Estructuras se han sintetizado, agrupadas por bloques temáticos, en la tabla 1.

Tabla 1. Contenidos que debe tener un programa para aprender Estructuras según varios autores

CONTENIDOS
TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL
Conocimiento general de los sistemas estructurales, apreciando lo que es posible y lo que es apropiado
Aprender la terminología empleada en estructuras
ENLACES Y EQUILIBRIO
Un conocimiento profundo y cuantitativo de la Estática y del equilibrio, en dos y tres dimensiones
Estabilidad. Diferencia entre una estructura estable y un mecanismo. Diferencia de comportamiento entre estructuras a compresión y a tracción
Distinguir las coacciones asociadas a los distintos tipos de enlace (interiores y exteriores) y aplicarlas para dibujar la deformada de la estructura
ESFUERZOS INTERNOS Y DEFORMADA
Comprender el concepto de esfuerzos internos
Analizar a mano vigas isostáticas, para determinar el cortante, flector y la deformada
Dibujar los diagramas de esfuerzos de vigas isostáticas. No solo es de utilidad para desarrollar la comprensión del comportamiento estructural, sino también para verificar los resultados del ordenador, y para el diseño conceptual de estructuras
La relación entre el flector y la deformada
ACCIONES
Determinar las acciones según los criterios de la normativa
Determinar el flujo de carga en la estructura
MODELADO DE ESTRUCTURAS
Modelar estructuras para el análisis por ordenador, de forma que los resultados del análisis representen adecuadamente el comportamiento de la estructura real. Lleva asociado entender:
Las limitaciones del modelo

La diferencia entre modelo plano y tridimensional, y los criterios para elegir uno u otro en el análisis.
La diferencia de comportamiento entre isostáticas e hiperestáticas.
El concepto de estabilidad global, para evitar mecanismos en la estructura tridimensional real analizada con un modelo plano
La idealización de la carga
La incertidumbre inherente a cualquier situación real (geometría, fuerzas, características de los materiales)
Las lecciones idealmente hablando deberían ser un viaje de ida y vuelta, desde la realidad (percepción sensible) hacia la abstracción (modelo matemático) para regresar a la realidad (diseños)
Debe prestarse atención especial a las hipótesis del cálculo lineal elástico con teoría de pequeñas deformaciones, para comprender las limitaciones de los programas de cálculo.
TENSIONES Y DEFORMACIONES
La teoría básica de flexión de vigas, y el concepto de momento de inercia y módulo resistente
La ley de Hooke. Relación entre tensión y deformación y cómo varía en los distintos materiales. Módulo de elasticidad
DIMENSIONAMIENTO Y COMPROBACIÓN
Tener una comprensión básica de los procedimientos de cálculo
Comprender el colapso, incluyendo la estabilidad (pandeo)
Conocer los requisitos establecidos en las normas
Comprender los problemas básicos que genera el cumplimiento de las condiciones de Resistencia, Rigidez y Estabilidad, con especial atención a sus consecuencias en las decisiones de proyecto
ESTRUCTURAS HIPERESTÁTICAS
En estructuras hiperestáticas, sustituir su cálculo manual por el uso del ordenador para comprender los conceptos fundamentales relacionados con este tipo de estructuras:
La alteración del flujo de cargas al cambiar la rigidez de algún elemento, de forma que la carga se ve atraída hacia las regiones más rígidas de la estructura
La noción de continuidad
La diferencia entre estructuras isostáticas e hiperestáticas, enfocada como una diferencia de comportamiento: que sólo en estructuras hiperestáticas puede el diseñador cambiar el flujo de fuerzas, alterando las rigideces relativas de los distintos elementos, y su aplicación en cuanto al potencial creativo de la estructura.
Identificar patrones de comportamiento de estructuras hiperestáticas: ¿cómo se comporta un pórtico de varias plantas ante carga vertical/horizontal, ¿qué pasa si se añaden vanos?, ¿y si se altera la rigidez relativa viga/pilar?, ¿qué diferencias hay con estructuras isostáticas?, ¿cómo afecta la rigidez a axil?
Compatibilidad de deformaciones
ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS POR ORDENADOR
Establecer y validar un modelo de la estructura para el análisis por ordenador
Verificar resultados del análisis por ordenador, aplicando los principios básicos del comportamiento estructural
Interpretar adecuadamente los resultados del análisis por ordenador, con objeto de desarrollar la comprensión del comportamiento estructural
Experimentar por si mismos, con ayuda del ordenador, el comportamiento de estructuras reales, estudiando las relaciones entre desplazamientos, rigidez, geometría y fuerzas aplicadas.
DISEÑO ESTRUCTURAL
Procedimientos de diseño.

4.4. Metodología docente

Por regla general, en la literatura sobre docencia de Estructuras hay más referencias a los contenidos o al enfoque general del curso, que a una metodología docente concreta. Aunque varios autores han

hecho recomendaciones que podrían incluirse en este apartado, en general, la innovación docente en Estructuras tiene todavía una difusión muy limitada [8]. En la disciplina existe aún una dependencia muy fuerte de las metodologías tradicionales, a lo cual contribuyen diversos factores. Johnson [4] culpa de ello a la reticencia de la comunidad académica para familiarizarse con los programas de cálculo necesarios, a la sensación de respetabilidad académica que confiere un planteamiento más teórico y a la falta de tiempo, debida a los ya sobrecargados temarios.

Como consecuencia de ello, las experiencias de innovación docente en Estructuras son contadas, y en la mayoría de los casos se trata de implementaciones parciales de métodos de aprendizaje activo en asignaturas que siguen un esquema tradicional, o de experiencias que afectan a un número muy reducido de estudiantes.

5. UNA EXPERIENCIA DE DOCENCIA DE ESTRUCTURAS POR COMPETENCIAS EN LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE SEVILLA.

En el nuevo plan de estudios del grado de Arquitectura se ha implantado una docencia de Estructuras basada en los principios desarrollados en los apartados anteriores. Concretamente, en la asignatura de Estructuras 1 (primer curso), de introducción al diseño y análisis estructural, las bases de partida para el diseño del programa fueron las siguientes:

- La competencia específica principal es proyectar estructuras.
- Enfoque práctico y trabajo con estructuras reales.
- Énfasis en el diseño estructural, y no sólo en el análisis estructural.
- Empleo del ordenador como herramienta que facilita el aprendizaje del análisis y diseño estructural.
- Metodologías docentes activas. En Estructuras 1 se emplea aprendizaje basado en problemas (ABP).

La asignatura de Estructuras 1 que se impartía en el antiguo plan de estudios (plan 1998), con una docencia tradicional basada en clases expositivas y evaluación mediante exámenes, adolecía de graves problemas de rendimiento, con una tasa de rendimiento (aprobados/matriculados) cercana al 35%. El alto índice de fracaso académico provocó un aumento gradual del número de alumnos matriculados en la asignatura, que llegó a alcanzar los 1398 alumnos en el curso 2009-10, generando graves dificultades para la docencia.

La introducción de nuevos programas docentes en las asignaturas de Estructuras, basados en competencias, con grupos de alumnos de ratio alumnos/profesor entre 25 y 30, e implementando nuevas metodologías docentes basadas en el aprendizaje cooperativo (*e.g.* ABP), ha hecho que el rendimiento académico de las asignaturas de Estructuras mejorase ostensiblemente. Una descripción más desarrollada sobre estos programas docentes y su evaluación (qué arrojó resultados muy positivos) se puede encontrar en [24] y en [25]. Como datos significativos, se recogen en la tabla 2 algunos parámetros asociados al rendimiento y la asistencia a clase de la asignatura de Estructuras 1 en ambos planes de estudios.

Tabla 2. Comparación de resultados académicos plan 98- plan 2010.

	Tasa de rendimiento (aprobados/matriculados)	Tasa de abandono (abandonos/matriculados)	Tasa de asistencia (asistencia/matriculados)
Plan 98 (tradicional)	35%	46.8%	25.4%
Plan 2010 (ABP)	85%	8%	84%

En Estructuras 1 el curso se organiza mediante problemas de ABP como actividad principal (Fig. 1). También hay actividades complementarias, de duración breve, para clarificar los conceptos más complejos y practicar procedimientos (Fig. 2). En ambos tipos de actividades el estudiante usa el ordenador como herramienta para aprender a analizar estructuras. La facilidad en el cambio de los datos de entrada permite al alumno experimentar con los parámetros que definen el comportamiento estructural, trabajando y comprendiendo la relación existente entre ellos y su influencia en el comportamiento estructural del modelo planteado.

La evaluación del programas de la asignaturas ha indicado que, no sólo se han mejorado los rendimientos globales, sino que los alumnos indican que el uso del ordenador aumenta el interés en la asignatura y facilita la comprensión del comportamiento estructural. No sólo los resultados académicos son mejores, sino que el grado de satisfacción de los alumnos y profesores ha aumentado debido al carácter dinámico que el uso del ordenador impone a las clases.

ESTRUCTURAS 1 – PROBLEMA 2

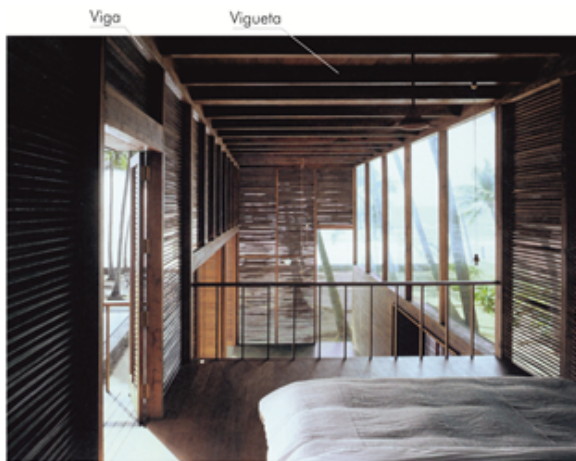
DIMENSIONADO DE UNA VIGA A FLEXIÓN

Los elementos principales de un forjado unidireccional son las viguetas, que pueden ser de madera, acero u hormigón. Sobre ellas apoyan los elementos de entrevigado (tablas o paneles de madera, bovedillas, etc...).

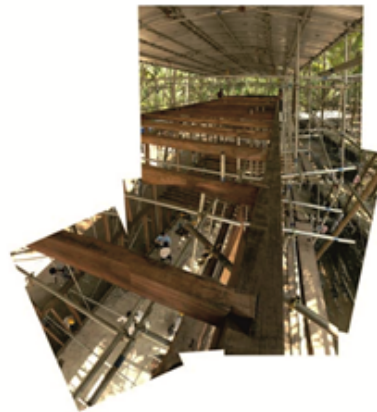
Las viguetas (vigas secundarias) están apoyadas sobre las vigas principales (o sobre los muros de carga, si los hay). La forma en que esté construida la unión entre las viguetas y la viga determina el tipo de enlace entre ambas, e influye de manera determinante en el modelo estructural que se usará para el cálculo de las viguetas.

En el dimensionado de elementos estructurales, la seguridad es un aspecto esencial. El proyectista deberá asegurarse de que su análisis es correcto planificando estrategias de control para evitar errores. Siempre que sea posible, el cálculo se debe realizar por dos métodos alternativos con diferente grado de aproximación.

¿Qué dimensiones deben tener las viguetas del edificio que se muestra (casa Palmyra)?



Casa Palmyra. Vista interior

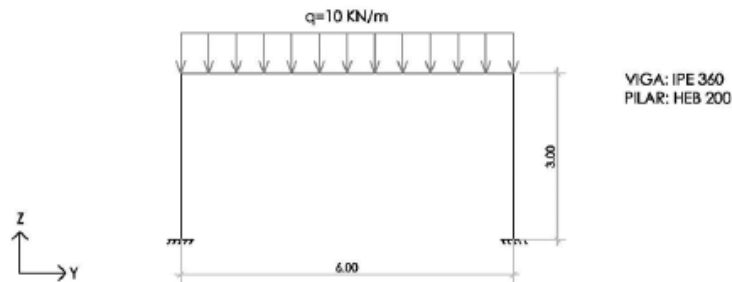


Casa Palmyra. Detalle del apoyo de las viguetas en las vigas



Figura 1. Problema de ABP presentado como una actividad principal del curso.

ESTRUCTURAS 1 - ACTIVIDAD COMPLEMENTARIA 6
ANÁLISIS DE UN PÓRTICO SIMPLE CON NM3D DE CYPE



La carga es permanente.

Acero S235.

Eje yy del pilar perpendicular al plano del pórtico.

Poner los coeficientes beta de pandeo en todas las barras iguales a cero.

La actividad se realiza individualmente y se entrega por escrito. Se puede consultar con otros compañeros del grupo y de la clase.

1. Analizar el pórtico con NM3D en caso de que los nudos internos sean rígidos

- Dibujar a mano los diagramas de flectores obtenidos en NM3D, en combinación ELU, indicando valores máximos en viga y un pilar.
- Indicar según NM3D qué verificación ELU es la más desfavorable en viga y en un pilar, y si cumplen.
- Dibujar a mano la deformada obtenida en NM3D, en combinación ELS, indicando valores máximos en viga y un pilar.
- Comprobar si se cumple la verificación de flecha máxima en la viga, a partir de la flecha obtenida en NM3D. La limitación de flecha es $L/300$.
- Indicar si es coherente la deformada con los diagramas de flectores, y por qué.
- Reajustar los perfiles de la viga y los pilares para que sean los más adecuados; indicar qué perfiles se han obtenido.

2. Analizar el pórtico con NM3D en caso de que los nudos internos sean articulados

- Realizar las mismas tareas que en el caso anterior.

3. Comparar los dos casos analizados

- Indicar en qué caso el flector en viga es mayor, y por qué.
- Indicar en qué caso el flector en pilares es mayor, y por qué.
- Indicar en qué caso la flecha en viga es mayor, y por qué.
- Comparar los perfiles más adecuados en cada caso, justificando las diferencias.

4. Realizar una reflexión global

- Indicar qué es lo que te ha parecido más instructivo e interesante de esta actividad breve.

Figura 2. Ejemplo de actividad complementaria planteada a los alumnos para su resolución con ordenador.

6. CONCLUSIONES

La revisión de la literatura sobre docencia de Estructuras ha permitido establecer las bases sobre las que deben fundamentarse los programas de las asignaturas de Estructuras adaptados a los nuevos retos del siglo XXI. En general, se asume que el dominio absoluto del ordenador como herramienta de análisis debe propiciar un cambio de enfoque en la forma de enseñar Estructuras en las escuelas. La docencia no debe estar centrada en el aprendizaje de métodos manuales de análisis, sino en la comprensión del comportamiento estructural y su aplicación a las principales tareas que deberán realizar los graduados al proyectar estructuras en la práctica profesional:

- Diseñar la Estructura
- Modelar la Estructura para su análisis
- Calcular la estructura
- Verificar los resultados del cálculo
- Interpretar los resultados
- Mejorar el diseño a la luz de los resultados obtenidos en el análisis

Estas tareas requieren una comprensión más global de los conceptos y principios básicos que rigen el comportamiento estructural. Se propone un programa centrado en esas tareas, con un enfoque práctico, con énfasis en el trabajo sobre edificios reales.

La implantación de un nuevo plan de estudios en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, adaptando la titulación al nuevo marco requerido por el EEES, ha conllevado la actualización de la docencia en las asignaturas de la disciplina de Estructuras. Hemos pasado con éxito de una docencia basada en contenidos, clases expositivas y evaluación por exámenes, a una docencia basada en competencias, con aprendizaje cooperativo y evaluación continua, usando el ordenador para mejorar la comprensión del comportamiento estructural e introducir a los estudiantes en la competencia de proyectar estructuras.

REFERENCIAS

- [1] Basset, L., Guardiola, A., & Serrano, B. (2009). Más de 30 años de cálculo de Estructuras en la ETS de Arquitectura de Valencia. IV Congreso de Arquitectos de España, Valencia.
- [2] May, I. M., (2009). The teaching of structural analysis. 2009 Annual Academics Conference: Structural Engineering Education in the 21st Century. The Institution of Structural Engineers, Londres.
- [3] Jennings, A., & Gilbert, S. (1988). Where now with the teaching of Structures?. *The Structural Engineer*, 66(1), 3-7.
- [4] Johnson, D. (1989). Why not teach computer analysis? *The Structural Engineer*, 67, 243-244.
- [5] Brohn, D.M. (1992). A new paradigm for structural engineering. *The Structural Engineer*, 70(13), 239-242.
- [6] Brohn, D.M. (1996). Engineering on the rigth. *The Structural Engineer*, 74(22), 380-382.
- [7] May, I.M., Wood, R.D., Beer, G., & Johnson, D. (2003). The future of structural analysis teaching. *Structural Engineer*, 81(7),33.
- [8] Johnson, D., &May, I. M. (2008). The teaching of structural analysis. *The Structural Engineer*, (18), 32-39.
- [9] IStructE. (2009). Conclusiones de la conferencia anual de la Institución de Ingenieros Estructurales. Londres. The Institution of Structural Engineers.
- [10] Owens, G. (2010). Structural engineering education in the 21st century: The way forward. *The Structural Engineer*, 88(1), 15.
- [11] Owens, G. (2011). Transforming undergraduate structural engineering education in the 21st century. *The Structural Engineer*, 89(2), 18-20.
- [12] Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (2007). Real Decreto 1393/2007, de 29 de octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales. Boletín Oficial del Estado, 30, 44037-44048.
- [13] González, J., & Wagenaar, R. (2003). Tuning educational structures in europe. Bilbao: Universidad de Deusto.
- [14] Brohn, D. M., & Cowan, J. (1977). Teaching towards an improved understanding of structural behaviour. *The Structural Engineer*, 55(1), 9-17.
- [15] Morreau, P. M. (1990). Understanding structural behaviour. *Structural Engineer*, 68(15), 299-300.
- [16] Black, R. G., & Duff, S. (1994). A model for teaching structures: Finite element analysisin architectural education. *Journal of Architectural Education*, 48(1), pp. 38-55.
- [17] SCOSS (1999). Structural safety 1997–99: Review and recommendations No. 12). The Standing Committee on Structural Safety. Londres: SETO Ltd.
- [18] Nethercot, D. A. (2000). On the teaching of structural engineering. Proc. Conf. on Civil and Structural Engineering Education in the 21 St. Century, Southampton Univ. (77) pp. 157-168.

- [19] Rafiq, M. Y., & Easterbrook, D. J. (2001). Interactive use of computers to promote a deeper learning of the structural behaviour. En A. Zingoni (Ed.), *Structural engineering, mechanics and computation* (pp. 1505-1511). Oxford: Elsevier Science.
- [20] MacLeod, I. (2007). Structural engineering competence in the computer era. *The Structural Engineer*, 85(3).
- [21] Molyneaux, T., Setunge, S., Gravina, R., & Xie, M. (2007). An evaluation of the learning of structural engineering concepts during the first two years of a project-based engineering degree. *European Journal of Engineering Education*, 32(1), 1-8.
- [22] Powell, G. H. (2008). Structural analysis: Are we relying too much on computers? Part 1: The problem. *STRUCTURE Magazine*, 50-52.
- [23] Cowan, J. (1986). Are we neglecting real analytical skills in engineering education? *European Journal of Engineering Education*, 11(1), 67-73.
- [24] Justo, E. & Delgado, A. (2014). Change to Competence-Based Education in Structural Engineering. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, D.O.I.: 10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000215,05014005.
- [25] Justo, E., Delgado, A., Vázquez-Boza, M., Bascón, M.C., (2014). La docencia de Estructuras por competencias mediante ABP. I Seminario Iberoamericano de Innovación Docente de la Universidad Pablo de Olavide. ISBN: 84-697-2223-9.
- [26] Aroca, R. (1997). Proyecto docente de la asignatura Introducción de las Estructuras y Mecánica de Sólidos (<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/e96-290/aroca1.html>).
- [27] Vázquez Espí, M. (1997b). Resumen de las reuniones de la unidad docente (ETSAM, plan 96), <http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/e96-290/r1.html>.
- [28] De Miguel, J. L. (1997). 15 notas sobre las prácticas de estructuras II. Consultado el 1/4/2012 en <http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/e2/notas.html>.