

APRENDIZAJE EXPERIENCIAL MEDIANTE MODELOS ESTRUCTURALES A ESCALA: APRENDER ENSAYANDO

González-Rodrigo, S.^{1*}, Magdalena Layos, F.², González Rodrigo, B.² y López García de la Osa, G.²

1: Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control. Escuela Técnica Superior de Edificación. Universidad Politécnica de Madrid.

e-mail: sonsoles.gonzalez@upm.es

web: <https://innovacioneducativa.upm.es/proyectos/E/informacion?anyo=2017-2018&id=2540>

2: Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control. Escuela Técnica Superior de Edificación. Departamento de Ingeniería Civil, Construcción, Infraestructura y Transporte. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control. Escuela Técnica Superior de Edificación. Universidad Politécnica de Madrid.

Universidad Politécnica de Madrid.

e-mail: {fernando.magdalena, beatriz.gonzalez.rodrigo, g.garcia.lopezosa}@upm.es

Resumen. *La búsqueda de la mejora continua del proceso enseñanza-aprendizaje, apuesta cada vez más por metodologías basadas en un aprendizaje experiencial, en el que la participación activa del estudiante consiga aumentar su protagonismo en el proceso.*

La construcción de las estructuras está situada en el vértice de tres materias: el material con el que se trabaja, su resistencia y sus características en la puesta en obra. La magnitud de los tres aspectos contemplados hace que no siempre resulte posible que su enseñanza pueda agruparse en una misma materia. La posibilidad de reunirlos en una experiencia, por limitada que sea, logra ofrecer una visión global del conjunto que ayuda a fijar de manera conjunta los tres aspectos.

Este proyecto pretende la implicación del alumno en un aprendizaje experiencial. Tanto en la construcción de un prototipo estructural ajustado a parámetros definidos, llevado a cabo mediante una competición de modelos estructurales entre las Escuelas de Edificación y de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid, como en la experimentación con modelos estructurales educativos, donde son capaces de comprender sencillos comportamientos en servicio de una estructura.

Las actividades desarrolladas se realizaron en el marco de un Taller de Modelos Estructurales, experiencia optativa ofertada dentro del Catálogo General de Actividades Universitarias Acreditables de la UPM.

Palabras clave: Aprendizaje Basado en Retos (ABR), Aprendizaje Experiencial, Competencias transversales, Elaboración material docente

1. Introducción

En la práctica de la ingeniería de las estructuras, los modelos físicos a escala, que facilitan la interpretación de las distintas configuraciones estructurales, simulando el comportamiento del conjunto y considerando también el de los distintos materiales que lo constituyen, han sido siempre relevantes en el estudio de las estructuras [1],

especialmente en el caso de los modelos innovadores o experimentales [2]. La información obtenida a partir de los modelos, resulta especialmente válida en el análisis y su obtención por otros métodos, resulta en ocasiones más difícil [3].

Son numerosos los trabajos donde se muestran experiencias llevadas a cabo en el uso de maquetas constructivas y estructurales a escala [4-10]. En ellos se ponen de relieve las ventajas que supone, para el estudiante de carreras técnicas relacionadas con la construcción de las estructuras, el poder poner en práctica los conocimientos constructivos y técnicos adquiridos, así como la mejora de sus habilidades de diseño, manejo de las escalas y representación. Por otro lado, el estudiante siempre es receptivo a las experiencias que impliquen su participación activa en actividades que le permitan aprender ensayando, ya que favorecen un aprendizaje en primera persona y desde dentro, de conocimientos abstractos y en ocasiones confusos. Además, la inclusión en los programas de nuevas competencias generales, que necesitan también ser desarrolladas y evaluadas, como son el trabajo en grupo, la creatividad, la capacidad de liderazgo, etc. promueve la aparición y el uso de metodologías que apuestan por un aprendizaje activo [11].

Así mismo, unos de los grandes problemas, con los que se encuentra el aprendizaje de las estructuras, es el de la visualización de las deformaciones de los elementos y desplazamientos y giros de los nudos que las constituyen una vez el sistema entra en carga. La simulación digital de la deformación de modelos arquitectónicos, puede ser observada mediante distintos programas informáticos, que permiten la modificación de distintos parámetros y la comprobación de los cambios que se originan en las deformaciones de los modelos.

2. Actividades desarrolladas

Las actividades desarrolladas dentro del proyecto de innovación educativa “Aprendizaje experiencial mediante modelos estructurales a escala: aprender ensayando” a partir de los antecedentes expuestos anteriormente son principalmente dos.

Los estudiantes que participaron en ambas experiencias, 67 estudiantes de la Escuela Técnica Superior de Edificación (ETSEM) y 26 estudiantes de Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil (ETSIC), lo hicieron dentro del Taller de Modelos Estructurales, que forma parte de las actividades optativas ofertadas dentro del Catálogo General de Actividades Universitarias Acreditables de la UPM.

2.1 Experiencia 1: Reto estructura articulada de cubierta ETSEM -ETSIC

El trabajo propuesto es un ejercicio voluntario y pretende la implicación del alumno en un aprendizaje experiencial, donde pueda aplicar los conocimientos teóricos adquiridos en clase para la construcción de un prototipo estructural que se ajuste a unos parámetros o retos que debe satisfacer, y que vienen impuestos por el profesor.

La experiencia con trabajos obligatorios de años anteriores ha puesto de manifiesto que dar un enunciado demasiado abierto, tentaba a algunos alumnos a dedicar todos sus esfuerzos creativos en buscar la manera de trabajar lo menos posible, utilizando directamente elementos y/o materiales con una alta relación resistencia/peso propio. Aunque puede argumentarse que ese es también un aprendizaje útil, en esta ocasión se pretende que la experimentación sea sobre unos conceptos determinados muy centrados en cuestiones constructivas.

a) Objetivos pedagógicos

Además de la consecución de las competencias transversales que se incorporan a este tipo de actividades, la ejecución de la maqueta pretende poner ante el alumno los diferentes modos de comportamiento de las barras de una estructura triangulada. Se trata de que el alumno, mediante la realización de la maqueta y utilizando fundamentalmente dos materiales que corresponden de modo extremo a los comportamientos de tracción y compresión (a diferencia de la estructura real en que el material constituyente tiene similar resistencia a tracción y compresión), comprenda por sí mismo las profundas diferencias entre ambos comportamientos y en qué modo cada uno de ellos afectan a las barras o a los nudos.

Se limita el número de variables con las que interaccionar a fin de fomentar que el alumno profundice en la comprensión del problema y no se pierda al ampliar excesivamente el campo de experimentación. Por otro lado, variaciones limitadas entre las maquetas permitirán una comparación entre ellas y la aplicación del método científico en su discusión. No se trata únicamente de un ejercicio de creatividad (aunque ésta será necesaria a nivel de cada equipo), tras la rotura de las maquetas de la comparación de resultados entre los diferentes equipos debería realizarse una fase de análisis.

Por otro lado, al hacer coincidir el acto de pruebas de carga con una conferencia de la empresa LANIK de estructuras metálicas espaciales de primer nivel, se incorporó a petición de ella un comportamiento poco habitual en el análisis clásico de este tipo de estructuras pero que al parecer se les había presentado durante las fases de montaje, la torsión. Para grata sorpresa del equipo de profesores la maqueta ganadora fue capaz de tratar adecuadamente este tipo inusual de sollicitación.

b) Implementación de la actividad

La competición de modelos estructurales se ha llevado a cabo entre las Escuela de Edificación y de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid, lo que ha permitido el intercambio de experiencias entre los estudiantes de asignaturas relacionadas con la construcción y el análisis de estructuras.

El modelo debe realizarse con unas dimensiones y peso limitado, y debe ser capaz de resistir cierta carga en un ensayo real en el aula. Para ello deberán recopilar, estructurar y poner en valor la información recibida, en ésta y otras asignaturas relativos a esfuerzos, resistencias de materiales y comportamiento en servicio, para su aplicación a un modelo a escala.

Para ello, la actividad titulada "Reto "cubierta articulada" ETSEM-ETSIC 2018" se ha implementado de acuerdo a las siguientes bases:

1. La competición está abierta a todos los estudiantes de las escuelas de Ingeniería Civil y Edificación de UPM que hayan participado en los "Talleres de modelos estructurales". Los equipos pueden ser de hasta tres miembros. Cada miembro individual podrá formar parte únicamente de un equipo. Sólo se permite una entrada por equipo.
2. El modelo a desarrollar será una estructura triangulada tridimensional de 81cm de longitud neta entre apoyos, formada por al menos cinco triángulos. El canto máximo del elemento es de 40 cm y la base no deberá superar los 35 cm de anchura.
3. Al reto podrán concurrir modelos basados en la topología estructural presentada en la figura (Fig.1) y serán los estudiantes quienes decidan qué cordón o barra intermedia duplica y cual deja sencillo, a fin de mantener la sección triangular.

Así mismo, podrá elaborar modelos con cordones paralelos o quebrados, pares para la formación de aguas de cubierta, o incluso arcos con cordones continuos. El trazado es libre, siendo el mantenimiento de la misma topología estructural la única condición obligada para la participación en el reto.

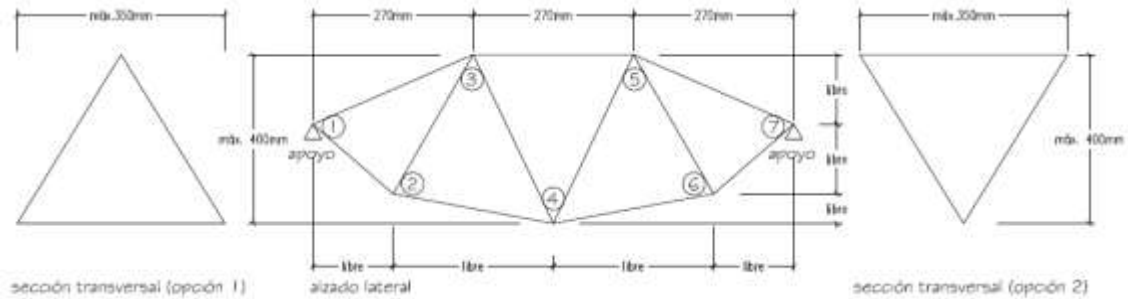


Figura 1. Topología y medidas forzadas del modelo.

- Así mismo, podrá elaborar modelos con cordones paralelos o quebrados, pares para la formación de aguas de cubierta, o incluso arcos con cordones continuos. El trazado es libre, siendo el mantenimiento de la misma topología estructural (Fig.2) la única condición obligada para la participación en el reto.

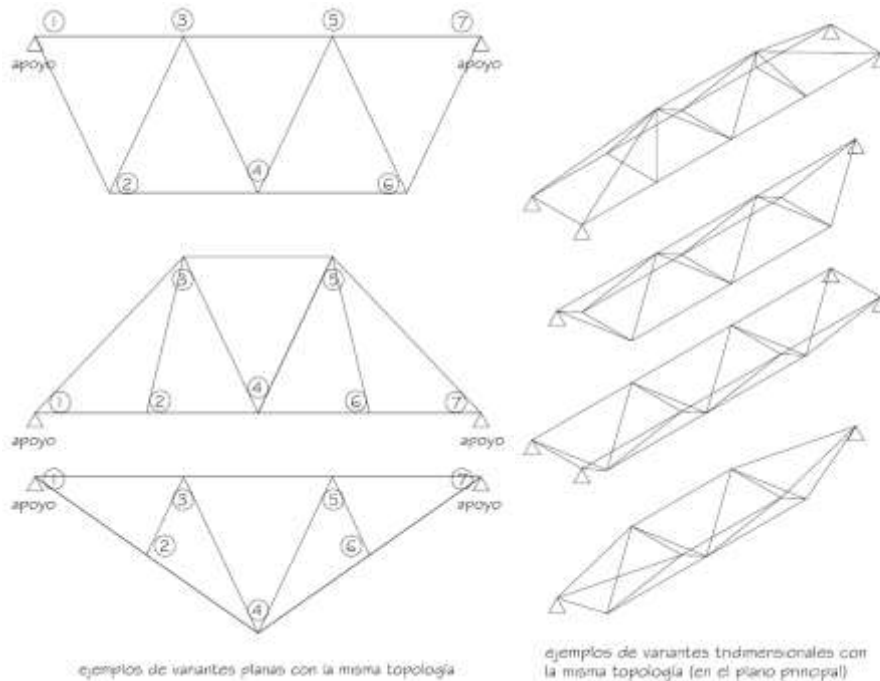


Figura 2. Variantes con la misma topología.

- La estructura de cubierta deberá ser construida utilizando madera de balsa de sección máxima 3 x 10 mm, que podrá superponerse mediante encolado hasta alcanzar un canto máximo de 9 mm de espesor por barra, e hilo trenzado de baja elasticidad (con capacidad en torno a los 10 kg). Para la formación de los nudos se utilizará pegamento, grapas y se permite el uso de pequeñas piezas planas auxiliares de 20 mm en su lado más largo como plástico, madera de pino o cualquiera propuesta por el estudiante y validada previamente por el profesorado.

6. La estructura de cubierta tendrá una luz libre entre apoyos de 81 cm. Los únicos soportes serán apoyos simples verticales (4 apoyos, dos en cada lado) sin coacciones horizontales. La estructura deberá tener las necesarias entregas para poder recibir los apoyos.
7. Tendrá una valoración especial, el grupo que intente ir un paso más allá en su modelo estructural, y manteniendo las mismas condiciones, sustente su estructura en 3 apoyos, buscando su asimetría y el refuerzo de la torsión del mismo (Fig 3). Para ello será necesario que suplemente, mediante nuevas piezas, el modelo, a fin de resistir la deformación y la rotura por torsión.

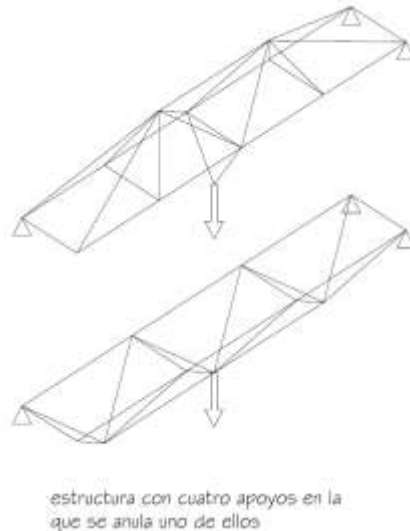


Figura 3. Ejemplo de estructura sometida a torsión.

8. Con anterioridad a su puesta en carga, todos los modelos deberán ser pesados en el momento, siendo su valor anotado y expuesto para su comparación posterior. Junto con el prototipo, se debe aportar un vídeo con una duración máxima de 2 minutos que recoja el proceso de concepción, construcción y ensayo del prototipo.
9. El ganador del "Reto modelos estructurales ETSEM-ETSIC-2018" será el modelo que, cumpliendo todos los requisitos, consiga: 1) la mejor relación resistencia- peso, buscando un diseño adecuado a los esfuerzos resultantes del análisis y con una resolución cuidada; 2) la mayor dificultad estructural y 3) el mejor diseño.

Como puede apreciarse en las condiciones del concurso, el equipo docente ha optado por fijar unas condiciones que delimitan bastante el problema a fin de que los alumnos se concentren en entender las condiciones que deben de cumplir las barras, los tirantes y las uniones entre ambos, e intentar optimizar el modelo.

c) Evaluación de los resultados del reto

Dado el carácter competitivo de la actividad se elaboró un "Baremo de evaluación del reto de la maqueta" que se dio a conocer a los participantes antes de la prueba de carga, redactado en los siguientes términos:

1. **RATIO PESO/CARGA (3p):** El objetivo general del reto es valorar la capacidad resistente del modelo ensayado. Por lo tanto, se valorará muy positivamente la menor ratio entre el peso del modelo y los kilos de arena soportados por el mismo. Este valor se tomará en el instante anterior a la rotura total o parcial del

modelo. No se tendrán en consideración las deformaciones de los mismos en este baremo.

2. **DISEÑO DEL MODELO Y CREATIVIDAD EN LA SOLUCIÓN (2p):** Los modelos a ensayar deberán basarse en la topología expresada en el enunciado, así como respetar las medidas máximas y mínimas requeridas. Será el jurado el que pondere los modelos ensayados en función de un diseño que se adecua a las solicitudes ensayadas.
3. **TRABAJO EN GRUPO y EXPOSICIÓN (2p):** Se trata de un ejercicio de grupo, por lo que será necesario que se presenten evidencias de colaboración en el trabajo en grupo con un video de 2 minutos, tal y como se recoge en el apartado 10 del enunciado del trabajo. Así mismo será necesaria una breve exposición oral del modelo antes de la carga, en la que deberá participar los 3 miembros del grupo.
4. **VALORACIÓN EXTRA DE MODELOS SUSTENTADOS EN 3 APOYOS (apoyo asimétrico) (3p):** Tendrá una valoración especial, el grupo que intente ir un paso más allá en su modelo estructural, y manteniendo las mismas condiciones, sustente su estructura en 3 apoyos, buscando su asimetría y el refuerzo de la torsión del mismo. Para ello será necesario que suplemente, mediante nuevas piezas, el modelo, a fin de resistir la deformación y la rotura por torsión.

NOTA: No podrán ser objeto de la competición aquellos modelos que no cumplan con los requisitos enunciados en la propuesta del reto, relativos a los materiales a emplear, secciones de las barras y longitudes de las piezas y del conjunto del modelo.

La puesta en carga y la entrega de premios tuvo lugar en la Escuela Técnica Superior de Edificación, en el congreso de gestión en la edificación BIMIC 2018 dentro de las actividades para estudiantes. La empresa LANIK (fig 4), especializada en estructuras atornilladas para cubiertas singulares, fue la encargada de desarrollar una charla sobre estructuras y participar como jurado en la entrega de diplomas.



Figura4: Cartel de anuncio de la charla de LANIK dentro del congreso BIMIC 2018.

2.2 Experiencia 2: con kits estructurales educativos

La segunda experiencia consistía en la experimentación de las deformaciones y rotaciones de distintos sistemas estructurales con ayuda de un kit educativo estructural. Para ello se formaron grupos reducidos de tres alumnos a los que se les facilitó un Kit para la realización de distintos modelos estructurales partiendo de los conceptos más sencillos de barra y nudos a los más complejos de estructuras porticadas y trianguladas.

Durante el taller se emplearon 6 Mola StructuralKits® (Fig5), facilitando a cada grupo 1 o 2 cajas para que pudieran realizar los ensayos. Debido a la amplia solicitud de participación en la actividad, fue necesario la realización de turnos para poder utilizar el número de Kits del que disponíamos.

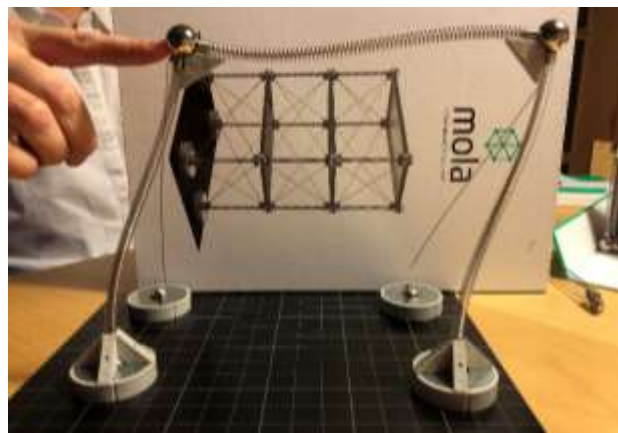


Figura 5. Kit estructural entregado a cada grupo de estudiantes.

Cada una de las sesiones realizadas comenzaba con una explicación práctica del alcance de la clase, por parte del docente. Posteriormente se dejaba a los grupos que fueran realizando sus propios modelos y los docentes se iban pasando por las mesas incidiendo en algunos aspectos o proponiendo nuevos retos. A lo largo de las sesiones realizadas se incidió en los conceptos de estructura y mecanismo, se analizó cómo se podía aumentar el número de coacciones externas e internas a una estructura y las implicaciones en el comportamiento. Se analizaron los tipos de apoyo y nudos y la influencia en la transmisión de los esfuerzos.

En la primera sesión se trabajó el concepto tracción y compresión en estructuras articuladas. A los alumnos se les facilitaron piezas de apoyo, barras y piezas para la formación de nudos y se les pidió que investigaran sobre estructuras sencillas en el plano y en el espacio. En una segunda sesión se trabajó el fenómeno de pandeo y los factores que condicionaban esta inestabilidad. Los estudiantes levantaron un prototipo con pilares muy esbeltos y fueron comprobando como conseguían disminuir este efecto incidiendo sobre las coacciones en los apoyos o disminuyendo la longitud de pandeo de la estructura. En una tercera sesión se profundizó en las estructuras reticuladas y se compararon los resultados con los obtenidos en la primera sesión. En esta ocasión los estudiantes analizaron el comportamiento de la estructura sometida a cargas dinámicas y fueron capaces de obtener el primer modo de vibración de las estructuras. En la cuarta sesión se vieron las vigas continuas (fig 6) y las estructuras emparrilladas. Se analizó entonces la transmisión de esfuerzos y la deformación y se determinó las ventajas e inconvenientes de estos sistemas estructurales. En la última sesión se propuso una serie de prototipos, similares a los existentes en obras arquitectónicas y de ingeniería

actuales. A lo largo de la misma se trabajó conceptos básicos como la jerarquización de la estructura según la transmisión de las cargas y la importancia de tener en cuenta la inestabilidad de las estructuras.



Figura6. Modelado de vigas continuas.

Al finalizar las sesiones, los estudiantes entregaron un video educativo (fig 7) de las soluciones estudiadas. En él plasmaron la adquisición de los conocimientos que se habían estado estudiando a lo largo del curso. Estos videos han sido analizados por los docentes para determinar el proceso de conocimiento adquirido por los estudiantes.

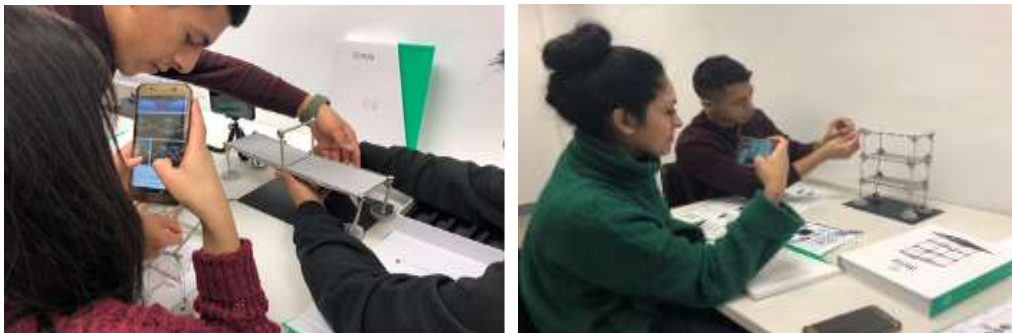


Figura 7. Estudiantes grabando videos para su entrega final

3. Resultados

3.1 Resultados del reto estructura articulada de cubierta ETSEM -ETSIC

A pesar de la insistencia en el cumplimiento de las bases, hubo equipos que no cumplieron las condiciones establecidas y por tanto quedaron descalificados. La primera enseñanza a extraer era que hay que intentar resolver el problema que se plantea respetando las limitaciones impuestas. Incluso en estos casos los alumnos se mostraron satisfechos con el trabajo realizado y quisieron someter a carga sus modelos (Fig 8a).

En los demás casos en que se respetaron las limitaciones (Fig 8b) se pudo comprobar que los alumnos habían detectado correctamente los dos comportamientos estructurales antagónicos y los habían tratado de forma adecuada. Incluso en uno de los casos los alumnos sorprendieron a los profesores con una solución inusual, que no se había explicado en clase y que resultaba más eficaz que las convencionales, pretendiendo una barra comprimida en lugar de usar un simple tirante, con lo cual conseguían reducir las deformaciones.



Figura8a. Ejemplo de maqueta que no cumple las condiciones y figura 8b Ejemplo de maqueta que si cumple las condiciones.

3.2 Resultados de la Experiencia con kits estructurales educativos

Finalmente, los 36 alumnos siguieron con asiduidad la actividad, se agruparon para entregar 12 videos educativos que muestran la síntesis de los contenidos aprendidos.

Los estudiantes mostraron la satisfacción de haber asistido a los talleres, dejándolo patente en el seguimiento íntegro de las clases, en los materiales entregados y en la participación, posterior, de actividades afines. En la ETSIC se ha observado que Resistencia de Materiales, la asignatura donde se propuso la participación voluntaria de los alumnos al taller, ha experimentado un aumento de 18 puntos en la tasa de éxito en el curso 2017-2018 respecto al anterior. Esta tasa mide el número de estudiantes que han superado la asignatura con respecto a los que se han presentado. Se estima que este aumento puede estar en parte motivado por la asistencia de los estudiantes al taller, aunque se baraja que pueda existir otros factores como número de repetidores, situación actual del grado, etc.

4. Conclusiones

4.1 Conclusiones del reto estructura articulada de cubierta ETSEM -ETSIC

En primer lugar, cabe destacar que este tipo de actividades es muy bien recibido por los alumnos (Fig 9). El simple hecho de conseguir esta buena actitud ya es un logro en materias que resultan difíciles para ellos.



Figura9. El ambiente durante la celebración del reto.

Comparando los resultados con otros años en que las condiciones a cumplir eran mucho menos estrictas, hay que decir que la profundización en los conceptos que se intentaban poner a prueba ha sido mucho mayor. Por otro lado, la creatividad ha encontrado su lugar mucho más en el esfuerzo de diseño y su optimización. Además, el análisis del comportamiento en rotura realizado en los mejores casos por los propios alumnos y dirigido en los demás por los profesores ha sido mucho más específico.

4.2 Conclusiones de la Experiencia con kits estructurales educativos

Los talleres de modelos estructurales son una oportunidad de enriquecer el proceso de formación de construcción y estructuras, siendo un complemento fundamental para los estudiantes que cursan formaciones técnicas. Estas herramientas permiten acercar al alumno a una realidad de experimentación con modelos escalados y pensados para poder analizar movimientos y solicitaciones de barras y nudos de una forma muy práctica. El alumno percibe que este proceso de adquisición de conocimientos es un juego y por lo tanto muestra una aptitud muy favorable para poder fijar los conceptos, que de forma teórica revisten mucha dificultad.

Los bajos costes de los productos adquiridos y de la realización del taller hacen de él una herramienta importante en una situación en el que los gastos de laboratorio (tanto materiales como fungibles) se están recortando sustancialmente.

En ambas experiencias, a pesar de la fuerte sensación positiva, aunque subjetiva, de los profesores y la satisfacción evidente de los alumnos, al tratarse de una primera actividad, el número de participantes ha impedido la realización de una evaluación rigurosa de los resultados obtenidos, en especial del nivel de mejora en el aprendizaje que estas actividades aportan, por lo cual en el presente año se va a repetir con mayor número de alumnos y la participación de más escuelas

Ambas actividades se siguen desarrollando en el primer semestre del curso 2018-19. En ellas están participando estudiantes de la Escuela técnica Superior de Edificación, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil y Escuela Técnica Superior de Arquitectura, todas ellas pertenecientes a la Universidad Politécnica de Madrid.

REFERENCIAS

- [1] IASS 2004. Shell and Spatial Structures from Models to Realization, Motro, R. (ed.), Editions de l'Esperou, 2004.
- [2] Gass S. and Otto F. (ed.), Experimente = Experiments. IL, 1990; 25.
- [3] Vrontissi, M. The physical model in structural studies within architecture education: paradigms of an analytic rationale?. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Amsterdam 17 - 20 August 2015*.
- [4] Salvadori, M. & Heller, R. *Estructuras para arquitectos*. Chicago Review Press (1969)
- [5] Salvadori, M. *The art of construcción*. Ed. La isla (1990)
- [6] Antuña, J. (2015). Creación de herramientas interactivas para la enseñanza de estructuras de Modelos virtuales de bóvedas nervadas de edificación: *Proyecto de innovación educativa IE1415-03015*, financiado por la Universidad Politécnica de Madrid, 2014-2015.

- [7] Ji, T. and Bell, A.J. Seeing and Touching Structural Concepts in Class Teaching. *Proceedings of the Conference on Civil Engineering Education in the 21st Century*, Southampton, UK, 26-28. 2000.
- [8] Wankat, P.C. and Oreovicz, F.S. Teaching Engineering. New York: McGraw-Hill. 1993
- [9] Prince, M. Does Active Learning Work? A Review of the Research. *Journal of Engineering Education*, 93(3), 223-231. 2004
- [10] Holmes, N. and Mullen, H. Using Model Building in Structural Engineering to Enhance Understanding of Construction Principles and Methods. *Irish Journal of Academic Practice: Vol. 2(1)*. 2013. doi:10.21427/D7SX45
- [11] Magdalena, F.; Antuña, J.; Aznar A. & Hernando, J.I. Using ArcoTSAM software as a learning tool in behavior of masonry structures. *Advances in Building Education*. Madrid (2017).