

El Impacto de las Reformas de la Educación Superior en la Formación de Ingenieros



XXV
Reunión
Nacional
de Facultades
de Ingeniería

MODELOS ESTRUCTURALES: GRAN INCENTIVO PARA APRENDER EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Daniel Ruiz ¹

Pontificia Universidad Javeriana Bogotá

Jairo Uribe ²

Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito"

Camilo Phillips ³

Universidad de los Andes

Resumen

Para el ingeniero estructural es importante comprender cabalmente el comportamiento de las estructuras con el fin de producir diseños eficientes y económicos. Con este propósito los autores han incluido en sus asignaturas de Ingeniería Estructural: Estática, Resistencia de Materiales, Análisis y Diseño Estructurales, ayudas de enseñanza propias del aprendizaje activo. Se ha estimulado la experimentación con modelos existentes en el laboratorio y la ejecución de proyectos diseñados y construidos por los estudiantes, cubriendo la mayoría de los sistemas estructurales. Estas actividades se han llevado a cabo organizando a los estudiantes en pequeños grupos de trabajo con lo cual se garantiza la participación activa de todos ellos y el uso eficiente de los recursos físicos. Los resultados obtenidos son ampliamente satisfactorios pues se evidencia una mayor asistencia a clase y una mayor participación en ellas con preguntas que reflejan su interés por resolver las inquietudes que les surgen de estas experiencias.

Introducción y Justificación

En los cursos de Ingeniería Estructural se busca formar a los estudiantes en el arte de emplear adecuadamente los materiales para producir diseños de sistemas estructurales eficientes, económicos y bellos. Eso implica entender cabalmente el comportamiento de las estructuras. Para cumplir este objetivo resulta muy apropiado llevar a cabo prácticas experimentales con modelos que permiten apreciar directamente los conceptos que se pretende enseñar [HARRIS y SABNIS, 1999]. El segundo de los autores tuvo su primera experiencia con ellos en la Universidad Nacional en 1963. Posteriormente, en 1966, tomó un curso dedicado totalmente a modelar

estructuras físicamente en la Universidad de Cornell con el profesor Richard N. White [WHITE, 1972]. Cuando regresó al país tuvo oportunidad de montar un laboratorio similar en la Universidad de los Andes a finales de la década de los 70 y de diseñar los equipos para el de la Universidad del Cauca en la década de los 80 y para la Escuela Colombiana de Ingeniería en el 2000. Por su parte, recientemente el primer autor diseñó, implementó y gestionó (con el apoyo de la Dirección de la Carrera de Ingeniería Civil) la construcción de los prototipos y aditamentos del laboratorio de modelos estructurales de la Pontificia Universidad Javeriana, que empezó a

¹ Ingeniero Civil. M.Sc. Profesor Asistente e Investigador del grupo *Estructuras*. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. E-mail: daniel.ruiz@javeriana.edu.co.

² Ingeniero Civil. M.Sc., Ph.D. Profesor Titular y Director del Grupo de Investigación de Estructuras y Materiales *GIMECI*. Facultad de Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito". E-mail: juribe@escuelaing.edu.co

³ Ingeniero Civil. M.Sc. Profesor de Cátedra e Investigador del grupo *CIMOC*. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. E-mail: c-philli@uniandes.edu.co

funcionar en el primer semestre del año 2005 como núcleo fundamental de la asignatura Laboratorio de Estructuras. Esta asignatura hace parte del nuevo currículo de la carrera de Ingeniería Civil de la misma Universidad.

Por otro lado, se dice que un profesor del siglo XXI tiene como objetivos básicos los siguientes: 1- Generar en sus alumnos orgullo por su profesión; 2- Entusiasmarlos por su materia; y 3- Enseñarles a aprender por su cuenta. Se ha encontrado que la enseñanza con modelos contribuye enormemente a lograr los dos últimos de la lista y encaja muy bien con los conceptos de aprendizaje activo, significativo y cooperativo y con el de modelos auto estructurantes que parten de la hipótesis de que el estudiante es el verdadero responsable de su aprendizaje y el único que lo puede construir. Además, contribuyen sin lugar a duda a desarrollar en el alumno las actitudes, habilidades y competencias que la sociedad espera del Ingeniero Civil en un mundo globalizado donde los avances tecnológicos y el conocimiento han adquirido una nueva dimensión.

Fundamentos Conceptuales: Teoría Constructivista y Aprendizaje Significativo

En ingeniería siempre se ha hecho énfasis en la importancia de desarrollar el buen criterio del ingeniero, ante el cual debe ceder la aplicación indiscriminada de fórmulas. Ese buen criterio es el que le ha merecido la confianza de la sociedad aún en épocas en que no existían teorías para justificar sus diseños. En el campo particular de las estructuras, como ya se dijo, siempre se ha considerado esencial entender el comportamiento de las mismas para lo cual se pueden aprovechar los modelos mencionados. En los estudios modernos sobre el proceso educativo se resalta la comprensión de la experiencia como núcleo del aprendizaje, complementada por procesos reflexivos que permiten desarrollar una actitud crítica. Según la referencia [JARAMILLO, 2005],

en los modelos autoestructurantes el objetivo de la educación es el aprendizaje a partir de la acción, experiencia y manipulación.

Se pasa así de una educación intelectual guiada desde el exterior a un proyecto en el cual el alumno se convierte en el elemento activo de un conjunto de procesos de los que él mismo tiene que asegurar la dirección ([NOT, 2002]). Dentro de este marco el papel del docente es de acompañante en la acción educativa facilitando el descubrimiento a través de ella. Por su parte el estudiante se convierte en el sujeto de la acción educativa y así la naturaleza del conocimiento está en el estudiante y debe ser descubierta y construida por él mismo surgiendo de su experiencia propia. Esto es precisamente lo que se ha estado haciendo con los modelos estructurales desde hace más de medio siglo.

El laboratorio de modelos estructurales por involucrar grupos pequeños sirve también para desarrollar habilidades de trabajo cooperativo donde se potencializan las sinergias de sus integrantes. La importancia de esto ha sido señalada por *The Foundation Coalition* [TFC, 2005].

La eficiencia del aprendizaje por medio de la experimentación ha sido comprobada en algunos estudios; según [BRENSON, 2002] y [CHROBAK, 1996], la recordación sube entonces hasta un 90% en el 90% de los estudiantes mientras que en la enseñanza magistral tradicional, el 40% de los estudiantes aprenden sólo el 40% de la materia.

Modelos Estructurales: Experiencia de Innovación Didáctica

Dentro del marco conceptual presentado anteriormente, los profesores del área de Estructuras de la Pontificia Universidad Javeriana, de la Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito" y de la Universidad de los Andes han creado una serie de espacios, de dispositivos y de herramientas para fomentar el aprendizaje activo y

auto estructurante de los alumnos, que les ha permitido comprender y analizar, a través de experimentación, los conceptos aprendidos en las clases. A continuación se presentarán una serie de casos prácticos llevados a cabo en las universidades mencionadas.

◆ Caso I: Armaduras de acero

La primera innovación ha sido incluir en los cursos de estática prácticas con modelos de armaduras, hechos en acero, instrumentados con deformímetros mecánicos y galgas extensométricas para permitirle al estudiante comparar los resultados experimentales con las predicciones teóricas y entender de esta manera las limitaciones de los modelos matemáticos con que pretende simular las estructuras reales. En la Figura 1 se presenta una cercha típica de acero sometida a cargas puntuales. Algunos de sus miembros tienen adheridas galgas que permiten medir sus deformaciones bajo la acción de las cargas y, a partir de ellas, las fuerzas a que se ven sometidos. Con los deformímetros mecánicos se miden los desplazamientos de algunos nudos.

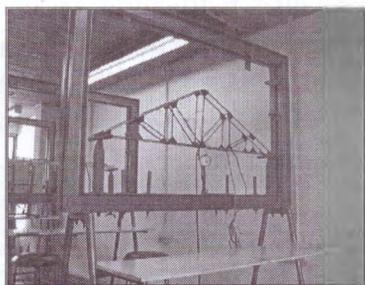


Figura 1. - Modelo de cercha en acero

◆ Caso II: Diseño y construcción de modelos estructurales con materiales de fácil consecución
Los ensayos de laboratorio de modelos a escala de estructuras reales, con el fin de extrapolar sus resultados a los de éstas, resultan muy costosos pues requieren la aplicación de las leyes de similitud y una instrumentación cuidadosa y costosa. Sin embargo, los modelos a escala reducida construidos con materiales económicos, fáciles de adquirir y de manipular (icopor, balso,

espuma compacta, pastas comestibles, pitillos), pueden utilizarse para la comprensión cualitativa del comportamiento de las estructuras reales.

La primera experiencia con ellos la tienen los alumnos del curso de Introducción a la Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana (liderado por el Ing. Mario Aguirre) a quienes se encarga diseñar y construir puentes y torres en pasta, papel periódico y engrudo que posteriormente son ensayados en la mesa vibratoria (véase la Figura 2). Debe anotarse adicionalmente que la cimentación de estos modelos estructurales se simula mediante capas de gelatina comestible. Mediante este ensayo los estudiantes observan algunos aspectos propios de la ingeniería sísmica.



Figura 2 - Edificios y grúas sometidas a movimientos en la base mediante una mesa vibratoria.

Aprovechando características particulares de estos materiales se pueden hacer comparaciones directas con materiales de la vida real: el icopor semeja el comportamiento a tensión del concreto de la misma manera que el balso simula el comportamiento de la madera y la espuma de poliuretano el del acero de refuerzo ([CARO, 2003]). En las fotografías de la Figura 3a) se presenta un ensayo a flexión de una placa maciza de icopor a la cual se le aplica unos momentos flectores en los extremos que la llevan finalmente al colapso. Este tipo de ensayos ejecutados directamente por un estudiante puede aclararle conceptos básicos de la flexión, como son los de momentos flectores, desplazamientos resultantes, módulo de rotura, etc.

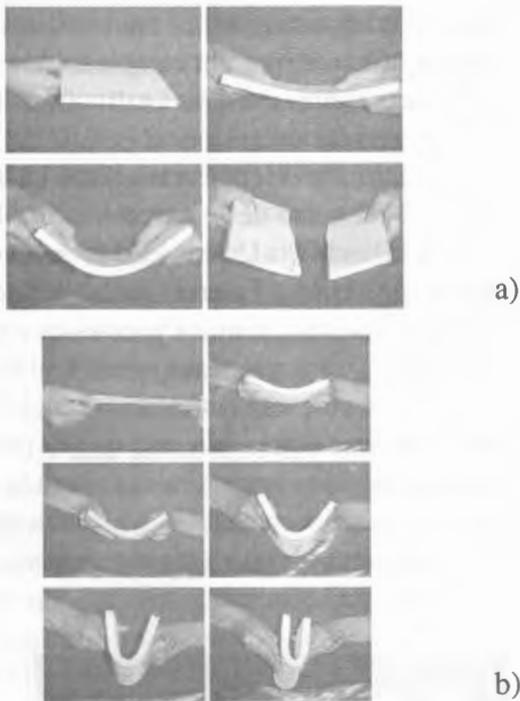


Figura 3: a) Ensayo a flexión de una placa de icopor b) Ensayo a flexión de una placa de icopor reforzada con espuma

Aprovechando este mismo ensayo, es posible explicar al estudiante de ingeniería civil conceptos fundamentales del diseño en concreto reforzado; entre ellos, el de la fragilidad del concreto y la ductilidad del acero. En ese orden de ideas, en las fotografías de la Figura 3b) se presenta el comportamiento de la misma placa maciza de icopor de la Figura 3a) pero reforzada en la parte inferior con espuma rígida. Obsérvese que al cargar la placa de igual forma a la usada en la Figura 3a), se observa un incremento considerable de la deflexión sin que haya colapso del sistema.

Por otro lado en el curso de Análisis Estructural se enseñan al alumno diversos métodos de solución de estructuras que utilizan modelos matemáticos de las mismas. Se solicita luego a los alumnos que construyan y ensayen, aplicando una carga puntual, un pórtico elaborado en balsa, al que previamente se le ha medido el módulo elástico, como el que se muestra en la Figura 4. De esta manera es posible comparar las

deflexiones experimentales con los resultados teóricos y analizar las causas de las pequeñas diferencias encontradas.

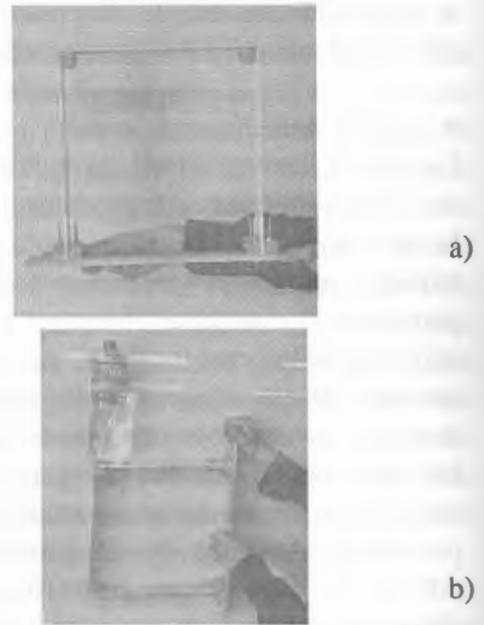


Figura 4. a) Pórtico en balsa b) Ensayo a del pórtico en balsa con una carga puntual

Finalmente los estudiantes de los cursos de Estática y Análisis Estructural, participan en un concurso de puentes tipo armadura elaborados con pastas comestibles, balsa o pitillos y algún pegante (véase la Figura 5). El objetivo primordial del concurso es que los estudiantes diseñen y construyan en pequeños grupos el puente que tenga la mayor relación *resistencia/peso propio*. Además se califican la estética y el ingenio. Una vez construidos los puentes, la estructura de cada grupo se carga mediante un balde con agua si está hecho con pasta o pitillos, o mediante una prensa si es en balsa hasta que se induce algún tipo de falla estructural. Mientras los estudiantes observan pueden analizar los diferentes mecanismos de falla que se presentan en los sistemas de armadura.

En la Escuela Colombiana de Ingeniería el concurso se hace anualmente en el marco de ECiencia con participación de alumnos de varias universidades y es uno de los eventos que atrae

más público, no sólo de Ingeniería Civil sino de todas las otras carreras.



Figura 5. Puentes elaborados con pasta, pitillos o balsa

♦ **Caso III: Ensayo de modelos estructurales instrumentados**

Los estudiantes de las asignaturas más avanzadas, llevan a cabo ensayos sobre miembros y estructuras metálicas sometidos a diferentes solicitaciones y que han sido instrumentados con deformímetros y galgas extensométricas. El alumno los carga y mide las deformaciones, desplazamientos y giros que se producen con el fin de comparar los valores experimentales con las predicciones teóricas. De esta manera toma conciencia de las bondades y limitaciones de los modelos matemáticos. En la Figura 7 se presenta el montaje de algunos de los modelos que hacen parte de estas prácticas de laboratorio.

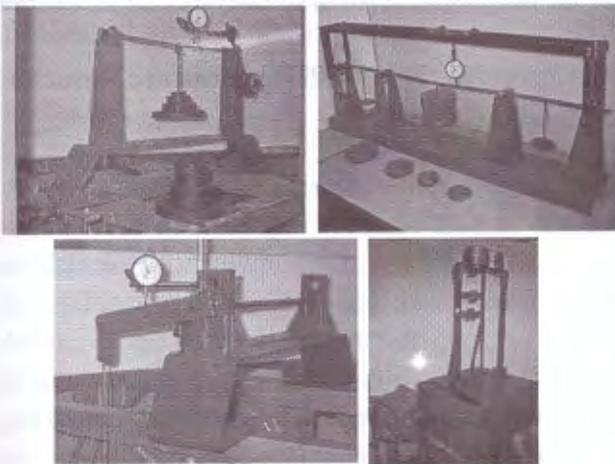


Figura 7. Montaje de los experimentos sobre algunos modelos de acero

Por último, en los cursos de diseño se ejecutan prácticas con modelos de microconcreto reforzado con alambres, fabricados por los mismos alumnos

y ensayados hasta su rotura para que entiendan el comportamiento inelástico de este material. Algunos de ellos se muestran en la Figura 8. Estos ejercicios son especialmente apropiados como tema de proyectos de grado o tesis de maestría; el segundo de los autores dirigió siete de ellos en la Universidad de los Andes, entre 1977 y 1978. El lector interesado encontrará mayor información en [URIBE y RODRÍGUEZ, 2001 y 2003].



Figura 8 - Modelos de microconcreto reforzado

Conclusiones y Recomendaciones

Las actividades descritas a lo largo del presente documento han producido los siguientes resultados:

- 1) Los experimentos que los alumnos llevan a cabo en las asignaturas del área de la Ingeniería Estructural les han permitido aclarar, ilustrar y demostrar los conceptos básicos que se enseñan en clase.
- 2) Con la ejecución de este tipo de actividades la motivación de los alumnos ha aumentado y la asistencia a clase es permanentemente alta a lo largo del semestre (más del 85%).
- 3) Durante estas prácticas se observa un interés constante por parte de los alumnos, lo cual se manifiesta en una mayor cantidad de preguntas que demuestran un alto nivel de análisis crítico.

A la luz de los resultados, se recomienda generar actividades similares en las diferentes áreas de la Ingeniería Civil así como en los currículos de otros programas de Ingeniería. Así mismo se sugiere diseñar e implementar algún tipo de indicador que permita evaluar, a largo plazo en el ejercicio profesional, el impacto que los procedimientos propios del aprendizaje activo tienen en el proceso enseñanza-aprendizaje.

BIBLIOGRAFÍA

- BRENSEN GILBERT. Constructivismo criollo: una metodología facilitadora de la educación holista. 2002. Notas de clase de la diplomatura en facilitación del desarrollo y educación experiencial compilación teórica para fines educativos
- CARO SILVIA, REYES JUAN. 2003. Prácticas docentes que promueven el aprendizaje activo en Ingeniería Civil. Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes. No 18. Pp 48-55.
- CHROBAK RICARDO. The globalization and the engineering teaching for the XXI century. 1996. Primer congreso argentino de enseñanza en la ingeniería.
- HARRIS HARRY G. y SABNIS GAJANAN M. Structural Modeling and Experimental Techniques, 1999. Second Edition, CRC Press, Boca Ratón, Florida, EE. UU.
- JARAMILLO JULIANA. Notas de clase del curso profesionalización docente, Facultad de Ingeniería, Facultad de Educación, Pontificia Universidad Javeriana, 2005.
- NOT LOUIS. Las pedagogías del conocimiento. Segunda parte: la auto estructuración del conocimiento. 2002. Fondo de cultura económica. Pp 123 229.
- RUIZ DANIEL. Aprendizaje activo en las asignaturas de Ingeniería Estructural. 2004. Revista Ingeniería Javeriana (AIJ) No. 38.
- TFC (THE FOUNDATION COALITION AND AGENT OF CHANGE). 2005. Active cooperative learning (ACL). <http://www.foundationcoalition.org>
- URIBE ESCAMILLA JAIRO y RODRÍGUEZ CARLOS ALBERTO. Diseño de un laboratorio de modelos de microconcreto para la enseñanza del comportamiento de estructuras de hormigón reforzado. 2001. Memorias de las XIV Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia, Sociedad Colombiana de Ingenieros, SCI, y Asociación Colombiana de Ingeniería Estructural, ACIES, Bogotá.
- URIBE ESCAMILLA JAIRO y RODRÍGUEZ CARLOS ALBERTO. 2003. Modelos de microconcreto para la enseñanza del comportamiento de estructuras de hormigón reforzado. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Año 13 No. 50.
- WHITE RICHARD N. Structural Behavior Laboratory, Report No. 346. 1972. Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, EE. UU.