

HERRAMIENTAS DE APRENDIZAJE ACTIVO EN LAS ASIGNATURAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL*

Daniel Mauricio Ruiz Valencia**

José Magallón Gudiño***

Edgar Eduardo Muñoz Díaz****

Resumen: los métodos de enseñanza que promueven el aprendizaje activo se enmarcan dentro de la teoría constructivista del aprendizaje. Según esta teoría, los estudiantes son el eje y los protagonistas del proceso y son ellos quienes deciden cuándo y cómo quieren aprender, mientras que el profesor es sólo un guía que orienta, motiva y retroalimenta a los estudiantes. Con este propósito, en las asignaturas de ingeniería estructural ofrecidas tanto en la carrera de Ingeniería Civil como en la de Arquitectura de la Pontificia Universidad Javeriana, se han implementado ayudas propias del aprendizaje activo. Estas ayudas y herramientas han estado relacionadas, en algunos casos, con ejemplos de investigación aplicada del grupo de investigación Estructuras; se han creado espacios de trabajo en pequeños grupos en donde los estudiantes experimentan con modelos estructurales existentes en el laboratorio y construidos por ellos mismos. Como resultado de estas actividades se han incrementado la motivación y el entusiasmo de los estudiantes y la asistencia a clase es permanentemente alta a lo largo del semestre. Así mismo, durante la ejecución de las actividades se observa un interés constante por parte de los

* Fecha de recepción: 3 de febrero de 2006. Fecha de aceptación para publicación: 24 de abril de 2006.

** Ingeniero Civil y M.Sc. en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: daniel.ruiz@javeriana.edu.co

*** Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: antonio_magallon@yahoo.com

**** Ingeniero Civil, Universidad de la Salle. M.Sc. en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: edgar.munoz@javeriana.edu.co

estudiantes, lo cual se manifiesta en una mayor participación a través de la formulación de inquietudes relacionadas con el comportamiento de las estructuras.

Palabras clave: herramientas de aprendizaje activo, ingeniería estructural, modelos estructurales, enseñanza en la ingeniería.

Abstract: the educational methods that promote active learning are based on the constructivist theory on learning. According to this theory the students are the core and the protagonists of the educational process, and they decide when and how to learn. In this process the professor is only a guide who motivates and gives feedback to the students. With this purpose in the Structural Engineering courses offered to the students of the civil engineering and architecture undergraduate programs at the Javeriana University, tools of active learning have been implemented. These tools have been related, in some cases, with examples of applied research of the research group Estructuras. In small workgroups students experiment with existing structural models of the structural lab and with models designed and constructed by themselves. As a consequence of these activities, the motivation and enthusiasm of the students have increased as well as the class attendance. Additionally, during the execution of the experiments a constant interest is observed and the students participate actively and formulate questions related to the behavior of the structural systems modeled.

Key words: active learning tools, structural engineering, structural models, engineering education.

1. Introducción y justificación

Algunas de las habilidades y competencias que debe tener el ingeniero civil y el arquitecto del nuevo siglo para adaptarse exitosamente a los cambios que están ocurriendo en el mundo (globalización, información disponible, rapidez en el avance tecnológico y nuevas tecnologías, nuevas teorías y tendencias socioeconómicas, etc.) parecen no encontrarse satisfechas del todo frente a las metodologías tradicionales de enseñanza en los cursos de técnicos y de ingeniería, en donde el profesor es el centro del aula de clase [Caro, Reyes, 2003]. Por esta razón, la educación para el nuevo siglo no debe centrarse únicamente en la transmisión del conocimiento, sino también en proporcionar herramientas para que los estudiantes construyan su propio aprendizaje. Para ello se han implementado en los últimos años metodologías de enseñanza-aprendizaje que parten de la hipótesis de que el estudiante es el verdadero responsable de su aprendizaje y es el único que lo puede construir (aprendizaje activo, aprendizaje significativo, modelos autoestructurantes, aprendizaje cooperativo, etc.). Este tipo de metodologías podrían contribuir de una manera más eficiente a conseguir las cualidades que la sociedad del nuevo siglo busca en los futuros profesionales.

En el caso de los cursos de ingeniería estructural se busca formar a los estudiantes en el empleo adecuado de los materiales para producir diseños de sistemas estructurales eficientes y económicos [Ruiz, Uribe, Phillips, 2005]. Los conceptos básicos para poder llevar a cabo este objetivo se basan en la mecánica newtoniana. Por esta razón, es posible desarrollar prácticas experimentales demostrativas sobre modelos a escala, cuantitativos y cualitativos, directamente asociadas con los conceptos que se busca enseñar [Harris, Sabnis, 1999]. Este tipo de prácticas y experimentos de aprendizaje activo permiten interiorizar mejor los conocimientos y sirven como un apoyo efectivo a las clases tradicionales.

Por otro lado, el auge de los computadores, que ha dado origen a una serie de herramientas de ingeniería estructural, ha permitido llevar a cabo estudios de sistemas estructurales complejos mediante el método de los elementos finitos [Ruiz, Yamin, 2002], [Muñoz, Núñez, 2005]. Sin embargo, este tipo de herramientas ha originado en gran medida la concepción errónea de que los programas de análisis pueden reemplazar el criterio del ingeniero estructural. En parte, esto se debe a que a pesar de que continuamente se inculca a los estudiantes que los computadores son una simple herramienta, nunca se les demuestran las limitaciones de las formulaciones matemáticas con las que se pretende modelar la realidad [Ruiz, Uribe, Phillips, 2005].

Para contribuir a la solución de este inconveniente, es posible usar los modelos estructurales a escala (físicos y cuantitativos), donde los estudiantes realicen mediciones de parámetros estimados analíticamente, que a su vez permiten mostrar la confiabilidad de los modelos matemáticos a través de técnicas de calibración (optimización).

2. Modelo pedagógico autoestructurante y aprendizaje activo

De acuerdo con Not [2002], existen tres tipos de modelos pedagógicos claramente identificados: heteroestructurantes, interestructurantes y autoestructurantes. En el primero de ellos, el estudiante obtiene el conocimiento por intermedio del docente, en quien se deposita la responsabilidad de *transmitir* las ideas al estudiante, quien a su vez es visto como el objeto de la acción educativa [Jaramillo, 2005]. Por su parte, en los modelos interestructurantes y autoestructurantes el estudiante se convierte en el sujeto de la acción educativa. En el modelo autoestructurante, la responsabilidad en la búsqueda del conocimiento recae en el estudiante y el docente es un acompañante de la acción educativa, mientras que en el modelo interestructurante, esta

responsabilidad es compartida entre el docente y el estudiante. De acuerdo con lo anterior, el modelo heteroestructurante corresponde a la manera tradicional de enseñanza. Por el contrario, las metodologías implementadas por los autores del presente artículo en sus asignaturas se enmarcan dentro de los modelos autoestructurantes, en donde el objetivo de la educación es el aprendizaje a partir de la acción, experiencia y la manipulación [Jaramillo, 2005].

En el modelo autoestructurante se pasa 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 en 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, de modo que la naturaleza del conocimiento está en el estudiante y debe ser descubierta y construida por él mismo a partir de su experiencia propia.

Según Not [2002], al adoptar el principio de *learning by doing* (aprender haciendo) o el de *hands on* (manos a la obra) se sustituye la construcción de las nociones con la acción propia y se abandona la recepción pasiva del conocimiento. En consecuencia, el proceso de aprendizaje se entiende como un aprendizaje directo, experiencial y por descubrimiento; de esta forma, los métodos adecuados para el modelo autoestructurante se basan en la experimentación (tanteo experimental, que es una actividad natural y universal) y en la exploración, donde el estudiante es el artesano de su propio conocimiento [Jaramillo, 2005]. Los recursos usados dentro de un aprendizaje autoestructurante involucran las experiencias reales, los experimentos, los proyectos, los trabajos de campo, etc.

Según Brenson [2002] en la enseñanza magistral tradicional, el 40% de los estudiantes aprenden el 40% de la materia, mientras que en la capacitación técnica tutorial, el 90% de los estudiantes aprenden el 90% de la materia. Por su parte, con una metodología constructivista, aun en un contexto grupal de aula, se puede llegar a una relación 60% - 60%. Si se considera la hipótesis de que aquellos conocimientos que no se traducen en acciones tienden a no aprenderse, las anteriores estadísticas son evidentes al observar la Figura 1, en donde un nivel de involucramiento activo genera incrementos notables en la tendencia de las personas a recordar.

Figura 1. Estimación de la recordación en función de diferentes actividades propias del aprendizaje



Fuente: tomado de [Chrobak, 1996]

Según afirma Brenson [2002] “la actividad humana consiste en acción y reflexión: es praxis y es transformación del mundo; y como praxis, requiere teoría para iluminarla. No puede ser reducida ni al mero verbalismo ni al activismo”. Esta afirmación implica que el proceso de enseñanza-aprendizaje basado en experiencias no va en contra del aprendizaje memorístico, ya que las ideas nuevas sólo pueden aprenderse, retenerse y complementarse si se reflexionan y refieren a

conceptos, supuestos o proposiciones previamente adquiridos, en muchas ocasiones obtenidos a través del esquema de aprendizaje tradicional. De acuerdo con lo anterior, las experiencias de laboratorio a través de modelos que simulen comportamientos reales son un complemento esencial de las clases teóricas magistrales tradicionales, ya que a través de ejemplos sencillos pueden aclararse conceptos, ecuaciones, teoremas, suposiciones, etc., que pueden ser difíciles de comprender sin una asociación directa con hechos observables.

3. Modelos estructurales como herramienta de aprendizaje activo

Con base en las ideas presentadas anteriormente, los autores, docentes del área de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, han diseñado e implementado actividades para fomentar ambientes de aprendizaje más eficientes, en los que la motivación adquiere un lugar preponderante. Para ello se han desarrollado algunos dispositivos y modelos a escala de estructuras para fomentar el aprendizaje activo de los estudiantes de los cursos de Ingeniería Civil y de Arquitectura.

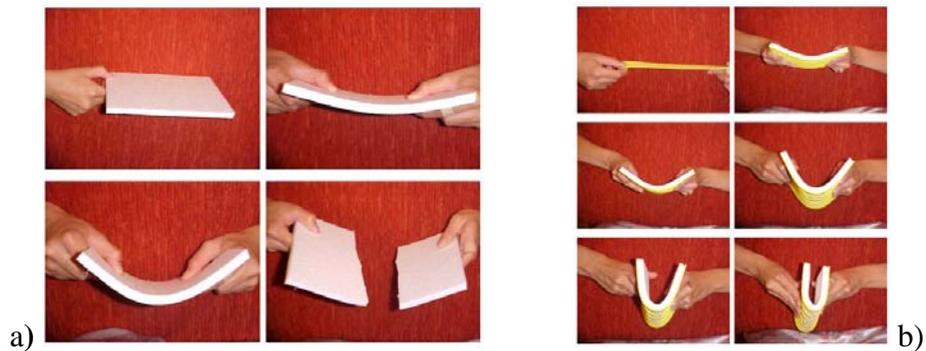
3.1. Caso I: modelos estructurales elaborados con materiales económicos

Los ensayos de laboratorio pueden ser costosos si se llevan a cabo pruebas a escala real sobre los sistemas estructurales y los materiales típicos de las obras civiles. Son igualmente costosos los modelos a escala adecuadamente instrumentados en los que se siguen las leyes de la similitud. Sin embargo, en el área de mecánica de materiales y estructuras, la elaboración de modelos cualitativos a escala reducida con materiales económicos, fáciles de adquirir y de manipular (icopor, balsa, espuma tipo *foamy*, pastas comestibles, pitillos), pueden convertirse en una herramienta para la comprensión del comportamiento de las estructuras reales [Ruiz, Uribe,

Phillips, 2005]. No obstante, debe mencionarse que estos modelos y sus materiales constitutivos no cumplen las leyes de similitud y, por lo tanto, no es posible extrapolar los resultados experimentales a sistemas estructurales reales.

Las características de estos materiales de fácil consecución se pueden comparar con las de materiales de la vida real: el icopor semeja el comportamiento a tensión del concreto, de la misma manera que el balsa simula el comportamiento de la madera y la espuma tipo *foamy*, el del acero de refuerzo [Caro, 2003]. Con base en estas similitudes, en la Figura 2a) se presenta un ensayo a flexión de una placa maciza de icopor a la cual se le aplican unos momentos flectores en los extremos que la llevan finalmente al colapso. Este tipo de ensayos ejecutados directamente por un estudiante pueden aclararle conceptos básicos de la flexión, como son los momentos flectores, los desplazamientos, los módulos de rotura, etc.

Figura 2. a) Ensayo de una placa de icopor, b) Ensayo de una placa de icopor reforzada



Fuente: [Ruiz, Uribe, Phillips, 2005].

Con este mismo ensayo, es posible explicar a los estudiantes conceptos como la fragilidad del concreto ante cargas de tracción, su capacidad de resistencia a compresión y la ductilidad del acero de refuerzo. En la Figura 3b) se presenta el comportamiento de la misma placa maciza de

icopor reforzada en la parte inferior con espuma. Se puede observar que al cargar la placa con el mismo esquema usado en la Figura 3a), se presenta un incremento considerable de la deflexión sin colapso del sistema [Ruiz, Uribe, Phillips, 2005].

Por otro lado, los estudiantes de los cursos de estática, participan en un concurso de puentes en armadura elaborados con pastas comestibles y pegante (Figura 3). La finalidad del concurso es que los estudiantes diseñen y construyan en pequeños grupos el puente que tenga la mayor relación resistencia/peso propio [Ruiz, Uribe, Phillips, 2005]. No obstante, se evalúa en los trabajos la estética, el ingenio en el diseño, los acabados, las conexiones, la filosofía de funcionamiento, los cálculos teóricos, la concordancia con modelos de puentes reales, su relación con la práctica profesional, entre otros aspectos.

Figura 3. Fotografías de diferentes diseños de puentes construidos por los estudiantes



Fuente: los autores.

Una vez construidos los puentes, la estructura elaborada por cada grupo de estudiantes se carga mediante un balde que se descuelga del puente. A continuación se empieza a agregar agua al balde hasta que se induce algún tipo de colapso estructural (Figura 4).

Figura 4. Esquema de aplicación de carga mediante agua y mediante pesas de acero

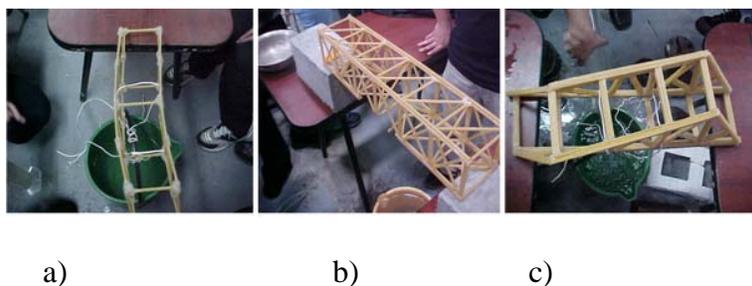


Fuente: los autores.

Mientras se ejecutan los ensayos los estudiantes pueden analizar los diferentes mecanismos de colapso de los puentes en armadura: problemas en las conexiones, fallas localizadas en algunos elementos particulares (Figura 5b), problemas originados en una mala estructuración de todo el sistema por carencia de sistemas de arriostramiento lateral (Figuras 5a y 5c).

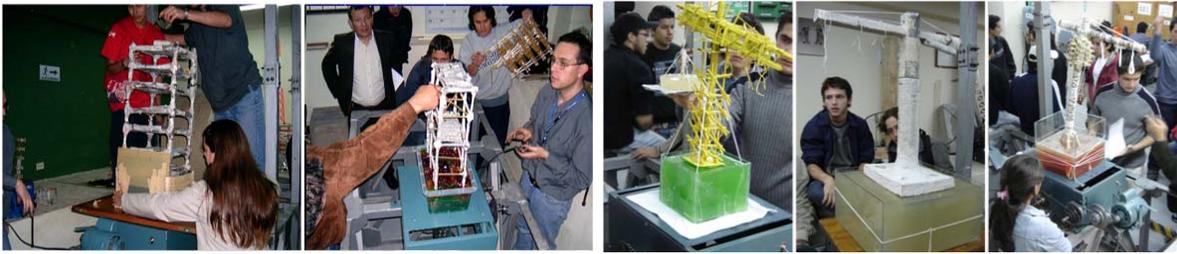
Adicionalmente, los estudiantes de los cursos de Introducción a la Ingeniería Civil diseñan y construyen modelos de edificios y torres en pasta (con su respectiva cimentación) que posteriormente son ensayados en la mesa vibratoria (Figura 6).

Figura 5. Mecanismos de colapso obtenidos durante los ensayos de puentes: a) colapsos por carencia de sistemas de arriostramiento lateral; b) fallas localizadas en algunos elementos particulares; c) colapsos por carencia de sistemas de arriostramiento lateral



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 6. Edificios y grúas sometidas a movimientos en la base mediante una mesa vibratoria



Fuente: [Ruiz, Uribe, Phillips, 2005]

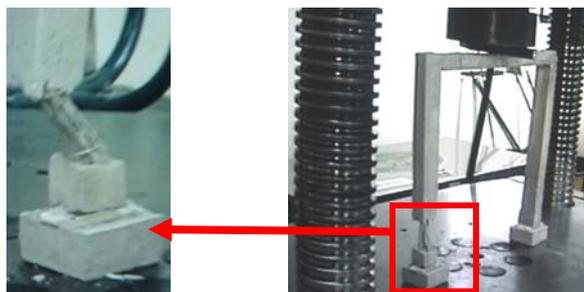
Debe anotarse, adicionalmente, que el medio sobre el cual se soportan estos modelos estructurales está compuesto por capas de gelatina comestible. Por las razones expuestas anteriormente, estos ensayos permiten que los estudiantes observen algunos aspectos propios de la dinámica estructural y de la interacción dinámica entre el suelo y las estructuras.

3.2. Caso II: construcción y ensayo de modelos estructurales a escala reducida de mortero armado y de mampostería

En algunas cursos de Arquitectura, profesores del Departamento de Ingeniería Civil han desarrollado modelos y ensayos que han permitido ilustrar el funcionamiento de sistemas estructurales de concreto reforzado mediante modelos elaborados con mortero armado. Así, se ha solicitado a los estudiantes que desarrollen modelos a escala de losas, vigas, columnas, pórticos y zapatas; así mismo, han construido muros de mampostería simple y confinada con vigas y columnas, cúpulas y bóvedas de cañón, entre otros. Estos modelos son semicuantitativos ya que, aunque se registran cargas y desplazamientos en el momento de efectuar los ensayos, los prototipos no se han diseñado siguiendo las leyes de similitud.

En estos modelos se usa el alambre negro para simular el acero de refuerzo principal a flexión, el alambre galvanizado para simular el acero de refuerzo de confinamiento (o el de cortante) y el mortero de cemento y arena para simular el comportamiento del concreto. Así mismo, se usan pequeños ladrillos de arcilla para simular el comportamiento de la mampostería. Es importante anotar que el mero proceso constructivo de dichos modelos involucra actividades que fomentan el aprendizaje activo, ya que los estudiantes deben tomar las medidas del caso para obtener prototipos con una adecuada calidad desde el punto de vista mecánico y estético. Estas actividades, y sobre todo los errores cometidos durante todo el proceso (Figura 7), son una excelente herramienta para el aprendizaje.

Figura 7. Detalle de un modelo estructural con una columna mal fundida.



Fuente: los autores.

Todos estos modelos han sido sometidos en el laboratorio a diferentes configuraciones de carga que simulan fenómenos como la flexión, la compresión, la flexocompresión, las fuerzas cortantes o combinaciones de todos estos efectos. Estos ensayos destructivos sobre los sistemas y elementos estructurales de mortero reforzado han sido llevados a cabo en la máquina universal de ensayos de los laboratorios del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana.

Estas actividades permiten establecer, tanto en forma visual como cualitativamente, las consecuencias de la carencia de acero en los lugares en donde existen esfuerzos cuando una estructura se encuentra bajo la acción de cargas de gravedad. Esto permite aclararles adicionalmente a los estudiantes el origen de las distintas clases de fisuras que se presentan en un elemento de concreto reforzado.

Así mismo mediante la construcción de modelos de vigas de mortero reforzado los estudiantes logran comprender el uso y el comportamiento de las vigas y viguetas de concreto reforzado. Para ello, se someten los modelos ante cargas puntuales (Figura 8). Así mismo, con este tipo de prácticas, los estudiantes logran observar y reflexionar sobre las características y las funciones del acero de refuerzo principal (refuerzo para cargas de flexión) y el de cortante o confinamiento.

Figura 8. Montaje y ensayos de pequeñas vigas de mortero reforzado



Fuente: los autores.

De la misma forma, la elaboración de columnas de mortero reforzado para posteriormente someterlas a fuerzas de compresión, permite que los estudiantes asocien el comportamiento mecánico de las columnas con las recomendaciones establecidas en los códigos de diseño y construcción (Figura 9).

Como parte de los sistemas estructurales, los estudiantes construyen pórticos con el fin de comprender el comportamiento de los marcos bajo la acción de cargas de gravedad. El mayor logro de esta práctica es que los estudiantes pueden observar la diferencia radical en el comportamiento entre una conexión viga-columna bien construida y una mal efectuada (Figura 10). Es importante anotar que el comportamiento observado en estos modelos de mortero reforzado coincide en gran medida con el de las estructuras reales que se pretenden modelar.

Por otro lado, y con el fin de que los alumnos conozcan el comportamiento de los muros construidos con ladrillos, se elaboran ensayos de compresión pura y de tracción diagonal en modelos a escala como el ilustrado en la Figura 11.

Figura 9. a) y b) Esquema de falla de columnas de mortero armado; c) Montaje de un sistema zapata-columna



a)



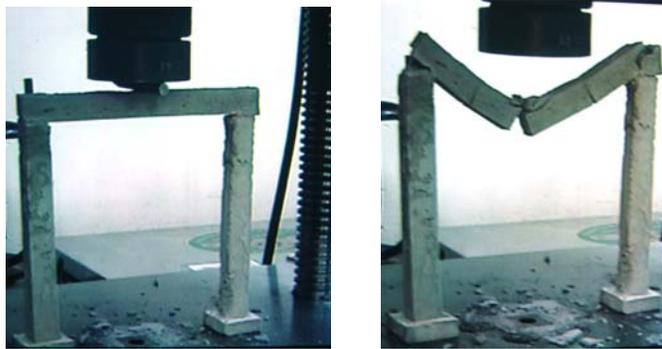
b)



c)

Fuente: los autores.

Figura 10. Montaje y falla de un pórtico a escala cargado en el centro de la luz



Fuente: los autores.

Figura 11. Muro de ladrillo antes y después de someterlo a compresión*



Fuente: los autores.

* para efectos de comparación de escala se muestra una moneda de \$100.

3.3. Caso III: ensayo de modelos estructurales instrumentados

Los estudiantes de quinto, sexto y séptimo semestre de Ingeniería Civil llevan a cabo ensayos sobre elementos de acero sometidos a diferentes tipos de carga y que se instrumentan mediante deformímetros, pesas calibradas y galgas extensométricas.

Estas actividades le permiten al estudiante comparar los resultados experimentales (medición de fuerzas, deformaciones, giros, deflexiones), analizados estadísticamente, con las predicciones

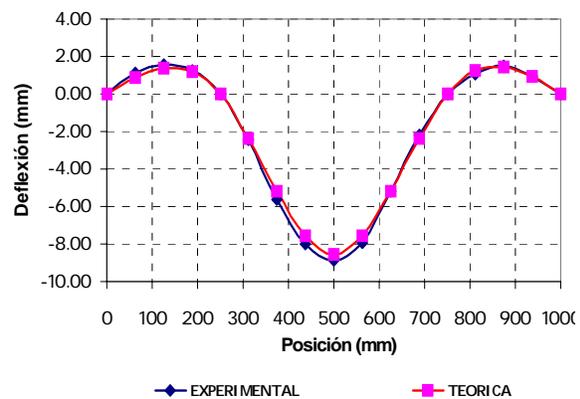
teóricas. De esta forma, es posible comprender las bondades y las limitaciones de los modelos matemáticos con los que pretende modelar el comportamiento [Ruiz, Uribe, Phillips, 2005].

Dentro de las prácticas de laboratorio ejecutadas se destacan experimentos como el de flexión de vigas continuas como el ilustrado en la Figura 12. Es importante destacar que, mediante procedimientos matemáticos, los estudiantes pueden obtener la curva elástica teórica que al compararla con la experimental (Figura 12b) presenta diferencias inferiores al 5%. Este tipo de resultados afianza los conocimientos adquiridos en las clases magistrales, puesto que los alumnos comprueban que las herramientas analíticas que les demandan horas de operaciones describen razonablemente bien el comportamiento de los sistemas estructurales, siempre y cuando se garanticen las condiciones e hipótesis de los modelos matemáticos.

Figura 12. a) Montaje del ensayo a flexión; b) Comparación entre la elástica teórica y la elástica experimental



a)

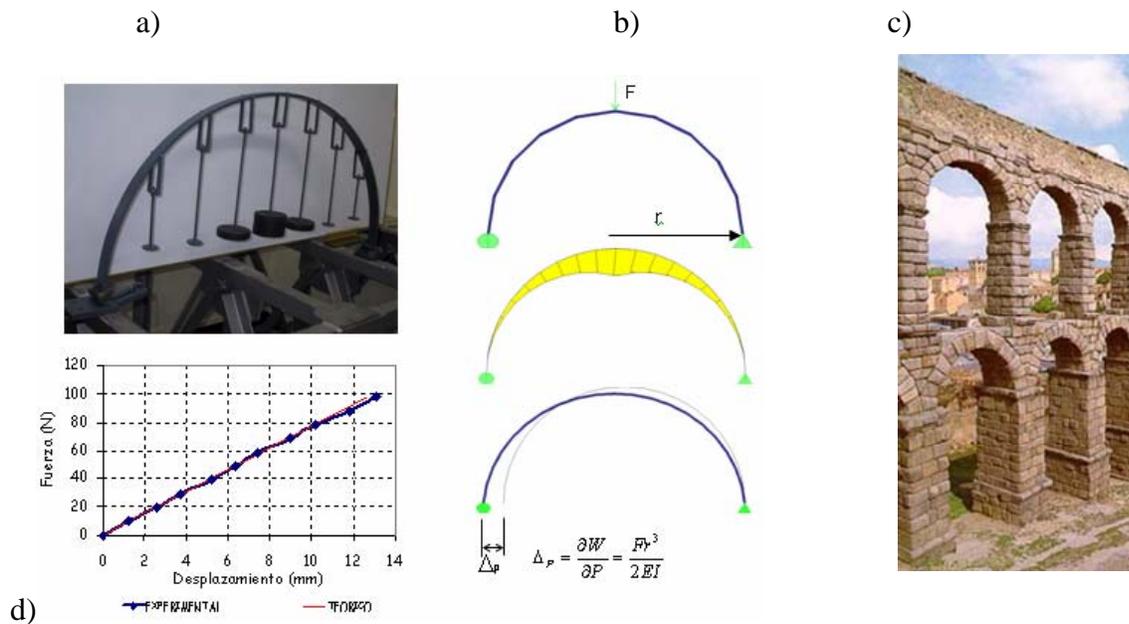


b)

Fuente: presentación propia de los autores.

Otro experimento para destacar es el ensayo de un arco biarticulado (Figura 13). Los arcos, las bóvedas y las cúpulas son algunos de los sistemas constructivos que más se han usado en la historia de la humanidad. Por ello, la comprensión de las ecuaciones que rigen el comportamiento de esta tipología de sistema estructural es fundamental para los estudiantes de ingeniería civil. Sin embargo, la simple presentación de las ecuaciones de la Figura 13b no permiten su completa asimilación, a menos que se realice el experimento ilustrado en la Figura 13a.

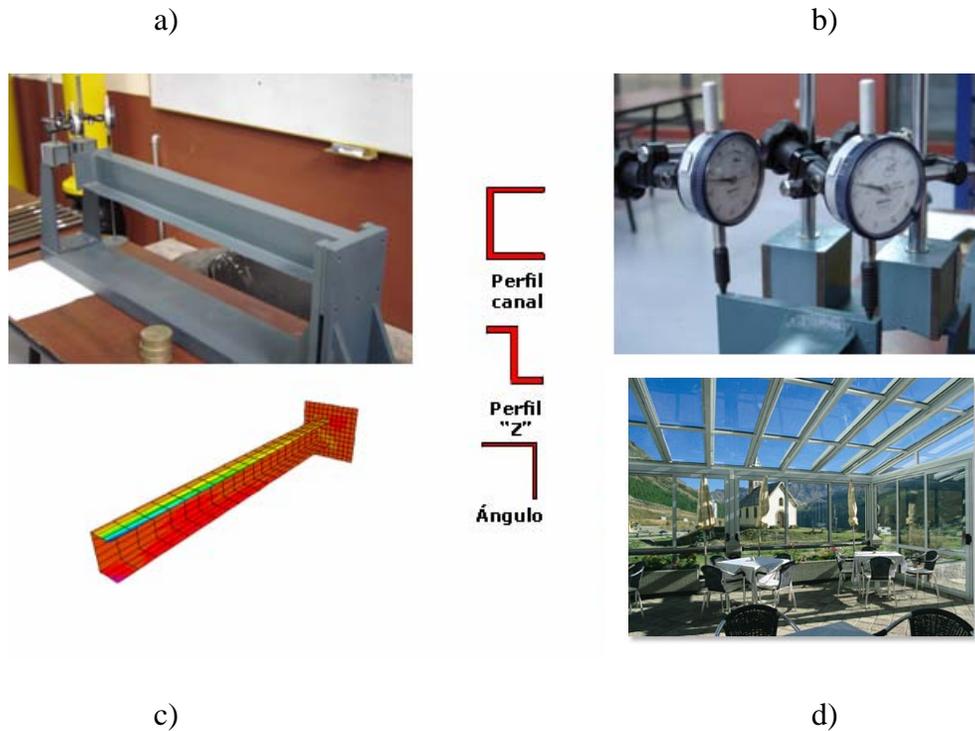
Figura 13. a) Montaje del ensayo; b) Ecuaciones que rigen el sistema; c) Arcos construidos por el hombre: acueducto romano; d) Comparación entre las curvas teórica y experimental



Fuente: presentación propia de los autores.

Otro de los ensayos efectuados por los estudiantes de ingeniería civil es el de perfiles de lámina delgada, usadas comúnmente en los sistemas estructurales para soporte de cubiertas en edificaciones (Figura 14d). En las Figuras 14a y 14b se presentan fotografías del montaje del ensayo y su instrumentación. Así mismo, el ensayo de esfuerzos sigue el comportamiento que analíticamente se muestra en la Figura 14c.

Figura 14. a) y b) Montaje del ensayo deflexión de perfiles de lámina delgada; c) Modelación analítica por el método de los elementos finitos; d) Cubierta con perfiles en acero



Fuente: presentación propia de los autores.

Por otra parte, una estrategia para minimizar los daños causados por los futuros terremotos en las obras civiles consiste en generar conciencia en los estudiantes sobre los efectos que un terremoto tiene sobre los sistemas estructurales de soporte de las edificaciones y que dicho efecto puede minimizarse al cumplir con las características de un diseño sismorresistente. Lo anterior adquiere mayor importancia si se tiene en cuenta que el trauma causado por el colapso parcial o total de las estructuras hechas por el hombre es la causa más común de muerte y lesión en la mayoría de los terremotos (Véase Figura 15d y 15e).

Dentro de este marco de referencia, la ejecución de ensayos de simulación sísmica en laboratorio sobre modelos estructurales a escala, manipulados por los mismos estudiantes, surge como una alternativa viable para lograr el objetivo planteado. Los modelos a escala reducida funcionan con los mismos principios dinámicos de sus equivalentes a escala real y su bajo costo los hacen atractivos para la enseñanza, con la ventaja de que es posible llevar a cabo múltiples repeticiones. Por este motivo, se desarrollaron dentro del laboratorio de modelos estructurales dos mesas vibratorias o mesas para generar sismos (Figura 15a). Con el fin de evaluar el efecto de cambios en las propiedades dinámicas de los sistemas estructurales de las edificaciones (masa y rigidez), se realizan diferentes ensayos sobre pórticos de diferentes alturas (Figura 15b) y pórticos con diferentes condiciones de apoyo (Figura 15c).

Figura 15. a) Mesa vibratoria; b) Pórticos de acero de diferente altura; c) Diferentes condiciones de apoyo de apoyo; d) Casa de adobe a escala real sobre mesa vibratoria; e) Estado de la casa de adobe después del ensayo



a)



b)



c)



d)

e)

Fuente: presentación propia de los autores. Las fotografías 15d y 15e fueron tomadas de durante el Congreso Sismo Adobe en la Pontificia Universidad Católica del Perú por el primer autor.

Finalmente se han incluido prácticas en el Laboratorio de estructuras de modelos a escala de puentes de acero de armadura de paso inferior (Figuras 16a y 16b) y superior (Figura 16c y 16d), instrumentados con deformímetros mecánicos y galgas extensométricas. Mediante los deformímetros mecánicos se miden las deflexiones verticales del puente ante cargas conocidas tanto en magnitud como en ubicación espacial; con las galgas extensométricas se tiene la posibilidad de medir las deformaciones unitarias de los elementos estructurales asociadas directamente con las fuerzas internas. Estos equipos de instrumentación han permitido efectuar la calibración de los modelos estructurales, mediante la comparación de los resultados analíticos con las mediciones experimentales.

En las Figuras 16a y 16b se presenta el modelo a escala del puente de Puerto Salgar, ubicado sobre el río Magdalena, que se realizó con el objetivo de servir como herramienta para la organización y planeación de algunas de las etapas necesarias para la instrumentación y monitoreo del puente real; servir como prototipo didáctico para el aprendizaje activo de algunos de los conceptos fundamentales de la ingeniería estructural en diferentes asignaturas tales como estática, laboratorio de estructuras, análisis estructural, estructuras metálicas y puentes; y medir las deformaciones unitarias y las fuerzas internas en algunos elementos principales del puente a través de galgas extensiométricos y de un sistema de adquisición de datos. Para realizar estas mediciones se diseñó e implementó en el modelo un sistema dinámico (velocidad variable) de cargas verticales a través de vehículos en movimiento (Figura 16b). Así, se motiva a los estudiantes, exponiéndoles la experiencia práctica del grupo de investigación Estructuras en sus

labores de investigación sobre el puente real, relacionándolas con prácticas o trabajos utilizando el prototipo a escala del laboratorio de estructuras, y se propicia que los estudiantes se remonten a la historia de la ingeniería y estudien las metodologías de análisis y del proceso constructivo de uno de los puentes principales del país.

Por otro lado en las Figuras 16c y 16d se presenta una fotografía y el modelo a escala del puente Cajamarca, localizado en la carretera Ibagué-Armenia. El modelo a escala se elaboró dentro de un trabajo de grado de la carrera de Ingeniería Civil [Serrano, Jussef, 2005] y es una herramienta que servirá para la planeación en el futuro de la instrumentación del puente real. Se tiene proyectado implementar en este modelo el mismo sistema dinámico de carros que tiene el puente de Puerto Salgar así como dos mesas vibratorias, una en cada una de las bases de las pilas del puente. De esta manera será posible medir deflexiones verticales y fuerzas internas de algunos elementos, a la vez que se evaluará su comportamiento dinámico mediante galgas extensiométricas y un acelerómetro.

Figura 16 a) Modelo a escala 1:25 del puente de Puerto Salgar con galgas extensométricas; b) Sistema dinámico de carros con velocidad variable sobre el modelo del puente de Puerto Salgar; c) Fotografía del puente Cajamarca; d) Modelo a escala 1:50 del puente Cajamarca.





Fuente: presentación propia de los autores de las Figuras 16 a) y b). Figuras c) y d) tomadas de [Serrano, Jussef, 2005].

4. Conclusiones y recomendaciones

Las actividades descritas a lo largo del presente artículo han generado los siguientes resultados:

- 1) Los experimentos tanto cualitativos como cuantitativos llevados a cabo en las prácticas de laboratorio sobre modelos a escala han permitido complementar los temas desarrollados en las clases magistrales de ingeniería estructural. De esta forma se ha logrado que los estudiantes se apropien de conocimientos de una manera más natural y acorde con sus experiencias.
- 2) Como consecuencia directa de la ejecución de estas actividades, la motivación de los estudiantes se ha incrementado y la asistencia a clase es permanentemente alta a lo largo del semestre.
- 3) La modificación o complementación de los métodos tradicionales de enseñanza debe basarse en profundas reflexiones sobre la enseñanza, la educación y el conocimiento, sin perder nunca de vista el sujeto de la acción educativa: el estudiante.

A la luz de los resultados, se recomienda generar este tipo de actividades en las diferentes áreas de la ingeniería civil así como en los diferentes currículos de los programas de ingeniería. Así mismo, se sugiere diseñar e implementar algún tipo de indicador que permita evaluar el impacto que los procedimientos propios del aprendizaje activo tienen en el proceso enseñanza-aprendizaje.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Carrera de Ingeniería Civil por la financiación de gran parte de los prototipos presentados en este artículo. De la misma forma, agradecen el entusiasmo y el interés de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil. Así mismo, se deben resaltar los aportes realizados por la profesora Juliana Jaramillo de la Facultad de Educación de la Pontificia Universidad Javeriana en el curso de Profesionalización Docente organizado por la Facultad de Ingeniería. Igualmente agradecen la colaboración permanente del ingeniero Camilo Otálora Sánchez del Departamento de Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana, quien ha asesorado y colaborado con los equipos electrónicos para la instrumentación y monitoreo de puentes reales y de prototipos a escala. Finalmente, los autores desean resaltar el trabajo desarrollado por el doctor Jairo Uribe Escamilla en su actividad docente de los últimos años, ya que muchas de sus iniciativas en el ámbito de los modelos estructurales han dado origen a actividades que actualmente se desarrollan en la Pontificia Universidad Javeriana.

Referencias

- Brenson, G. *Constructivismo criollo: una metodología facilitadora de la educación holista. Notas de clase de la diplomatura en facilitación del desarrollo y educación experiencial compilación teórica para fines educativos*. Manizales: Cámara Junior de Colombia-Funlibre Eje Cafetero, 2002.
- Caro, S., Reyes, J. “Prácticas docentes que promueven el aprendizaje activo en ingeniería civil”. En: *Revista de Ingeniería*, 18, 2003, 48-55.
- Chrobak, R. “The Globalization and the Engineering Teaching for the XXI Century”. En: *Primer Congreso Argentino de Enseñanza en la Ingeniería*. Río(Córdoba): 1996.
- Foundation Coalition. “The foundation coalition and agent of change. Active cooperative learning (ACL)”. En: <http://www.foundationcoalition.org>. Fecha de consulta: febrero de 2005.
- Harris, H.G., Sabnis, G.M. *Structural Modeling and Experimental Techniques*. Second Edition. Boca Ratón: CRC Press, 1999.
- Jaramillo, J. *Notas de clase del curso profesionalización docente*. Bogotá: Facultad de Ingeniería, Facultad de Educación, Pontificia Universidad Javeriana, 2005.
- Muñoz, E.E., Núñez, F. *Evaluación por confiabilidad estructural de puentes en acero apoyada en monitoreo e instrumentación*. Proyecto de investigación financiado por la Vicerrectoría Académica de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2005.
- Muñoz, E.E., Ruiz, D., Prieto, J.A., Ramos, A. “Estimación de la confiabilidad estructural de una edificación indispensable mediante análisis no lineales estáticos de *pushover*”. En: *Boletín técnico del IMME*. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2006.
- Not, L. *Las pedagogías del conocimiento*. México: Fondo de Cultura Económica, 2002.

- Ruiz, D., Yamín, L. “Seismic Vulnerability of Bridges in Colombia and Rehabilitation Strategies. Rehabilitating and Repairing the Buildings and Bridges of Americas”. En: *Hemispherical Workshop*. Puerto Rico, 2002.
- Ruiz, D., Uribe, J., Phillips, C. “Modelos estructurales: gran incentivo para aprender el comportamiento estructural”. En: *XXV Reunión Anual de Facultades de Ingeniería*. Cartagena: ACOFI, 2005.
- Serrano, M., Jussef, M. *Calibración del prototipo didáctico del modelo a escala del puente de Cajamarca*. Trabajo de grado para acceder al título de Ingeniero Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil, 2005.
- Uribe, J., Rodríguez, C.A. “Modelos de microconcreto para la enseñanza del comportamiento de estructuras de hormigón reforzado”. En: *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, 13 (50), 2003, 23-35.
- Uribe, J. Gil, J. *Lejus Versión 1.0. (Laboratorio de Estructuras)*. Bogotá: Universidad de los Andes, 1998.
- White, R.N. *Structural Behavior Laboratory, Report N° 346*. Cornell University. Ithaca: Department of Structural Engineering, 1972.