

Laboratorio de modelos estructurales. Una alternativa para la enseñanza y la investigación

Jorge Mario Cueto Baiz*

Fecha de envío: 27 de mayo de 2010

Fecha de aceptación: 30 de septiembre de 2010

RESUMEN

En la actualidad, la formación de ingenieros está rodeada de fórmulas, códigos, normas y, lo más crítico, la abrumadora importancia de programas computacionales que, aunque ayudan a comprender el comportamiento de estructuras, apenas son una herramienta que resuelve problemas matemáticos tan complejos que al ser humano le tomaría mucho tiempo resolver. Si a esto se le suma la falta de experimentación en la rama de estructuras de programas de ingeniería civil, se entendería que la idea de un laboratorio de modelos para ensayos destructivos y no destructivos, constituye un excelente complemento a las teorías dadas en las aulas de clase. Este artículo presenta diversos resultados de investigaciones desarrolladas en La Salle y en la Escuela Colombiana de Ingeniería, en las cuales se utilizaron modelos a escala reducida para entender y recrear el comportamiento de las

estructuras ante diferentes efectos de carga. Así se pudo lograr un avance significativo en la simulación de comportamientos básicos del concreto reforzado, como fallas de vigas a flexión y corte, vigas T y columnas. Asimismo, se identificó que la falta de calidad en la mano de obra es un factor importante para futuras etapas del proyecto. Actualmente se llevan a cabo investigaciones de comportamientos más avanzados como la influencia de fisuración por flexión de una viga en la resistencia al corte del concreto, el estudio del comportamiento de vigas altas utilizando un método innovador, *Strut-and-Tie-Models*, y el estudio de falla por punzonamiento de una zapata apoyada en resortes. Se esperan resultados a finales de 2010.

Palabras clave: modelos, laboratorios, prácticas, ensayos.

* Ingeniero civil y especialista en estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Profesor, Universidad de La Salle. Miembro ASCE, IABSE, AIS, ACI Internacional y Coordinador Regional del ACI Seccional Colombia. Correo electrónico: jcueto@unisalle.edu.co.

LABORATORY OF STRUCTURAL MODELS - AN ALTERNATIVE FOR EDUCATION AND RESEARCH

ABSTRACT

Nowadays, the education of the engineers has been rounded by use of formulas, codes, standards and the most critical part, a complete dependence on the use of the computer software that help to understand the behavior of the structures, but despite of that, they only were created as a tool for solving mathematical problems of such a magnitude that the human being would take an important time to solve; if we add the lack of experiments in the career and particularly on the structural field, it could be figured out that a laboratory of models is an excellent complement to the theories given in the classroom. This article shows the results of different researches conducted at Universidad de La Salle and Escuela Colombiana de Ingeniería which the reduced scale models have been used to understand the behavior of the struc-

tures under to different types of loads. As a result, important advances were achieved in the simulation of basic concepts of the behavior of reinforced concrete (RC) elements, such as flexural and shear failure in beams, T Beams and RC Columns. On the other hand, it was noticed that the absence of well qualified man-work is a relevant (if not decisive) issue for the creation of new models. Currently, this research is focused on more advanced theories such the influence of flexural cracking in the shear resistance of RC slabs, study of the behavior of deep beams using Strut and Ties Models and the punching shear failure in footings supported on springs. Results of these research works are expected on late 2010.

Keywords: Models, laboratories, experiments, test.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de enseñar de una manera mucho más interactiva con base en experimentos y ensayos, siempre ha estado latente y ahora más que nunca, dentro de la comunidad docente de la Universidad de La Salle. Una de las instalaciones menos usadas y con gran potencial es el laboratorio de modelos estructurales para ensayos no destructivos, en el cual, gran parte de sus instalaciones se encuentran listas para ser usadas pero hace falta la realización de guías para llevar estas prácticas a un nivel de laboratorio para que los estudiantes puedan desarrollar prácticas sobre los diferentes modelos que existen. Por otro lado, se tiene la necesidad de desarrollar investigación de impacto con un presupuesto bajo y que a la vez, la construcción de los modelos sea algo accesible. Lo anterior se pretende lograr en un mediano plazo siguiendo el camino que se está recorriendo con las diferentes investigaciones que se llevan a cabo y teniendo como base las hechas hasta el momento. (Gastón Muñoz y Jessica Sánchez; Johnny Sánchez; Luis Carlos Mariño; Johnny Uribe y Andrés Castro).

ANTECEDENTES

Como antecedente que marca el horizonte de la investigación, se debe mencionar la utilización de modelos estructurales en un proyecto de investigación que se llevó a cabo en la Escuela Colombiana de Ingeniería (Uribe et ál. 2006), cofinanciado por Colciencias cuyo objetivo es la enseñanza del comportamiento estructural utilizando una mesa vibratoria con la cual, se excita un modelo debido a un movimiento de la base. Esto se menciona ya que en el transcurso del proyecto se generaron ideas importantes para la construcción de diferentes clases de modelos no destructivos (Cueto, 2006) que simulan los efectos de cargas estáticas; asimismo, surge la necesidad de estandarizar y llevar los modelos de

concreto reforzado o los denominados modelos de microconcreto (Cueto, Camacho y Serna, 2003) a un nivel más avanzado, tal como se hace actualmente en la Universidad de La Salle.

DESARROLLO DEL PROYECTO

MODELOS NO DESTRUCTIVOS PARA CARGAS ESTÁTICAS

ESTUDIO DE LA REACCIÓN EN ARCOS

La forma en arco siempre ha sido una de las formas estructurales más eficientes cuando de se trata transmisión de cargas a compresión; esto se debe, entre otros factores, a que el flujo de esfuerzos sigue una trayectoria natural y suavizada hasta sus apoyos. Es ahí donde precisamente se establece la práctica, pues el talón de Aquiles del arco son los apoyos; así, resulta vital entender la fuerza que se está transmitiendo a éstos y poder compararlo contra la resistencia de nuestro material de soporte. Esta práctica consiste en medir la deformación en un extremo con libertad de desplazamiento horizontal, y colocando una carga hasta que dicha deformación vuelva a cero, se podrá conocer la fuerza que se está generando para cualquier tipo de carga vertical que se aplique.



Figura 1. Arco semicircular



Figura 2. Arco parabólico

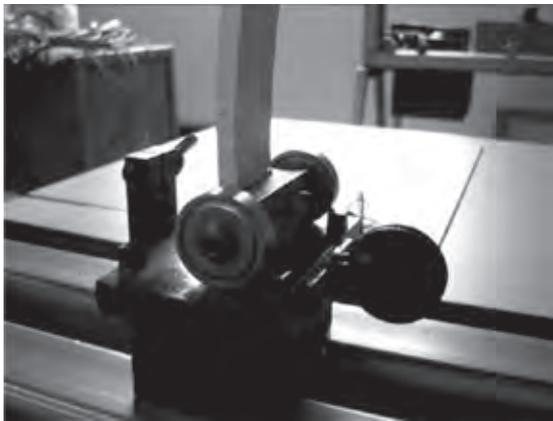


Figura 3. Detalle del apoyo

EFFECTO DE TENSION DIAGONAL EN EL ALMA DE VIGAS ARMADAS (PLATE GIRDERS)

Dentro de la construcción de puentes, existen varios tipos y denominaciones los cuales dependen principalmente de la distancia por salvar. Uno de los sistemas estructurales más usados para puentes de más de 80,0 m es el denominado puente con vigas esbeltas armadas. Estas vigas se logran ensamblando láminas metálicas entre sí para lograr una la forma tradicional de las secciones metálicas, la sección en "I". Dentro de su configuración se tiene un elemento central llamado "alma", el cual es de una magnitud tal (alrededor de 1,50 m a 2,50 m), que no puede des-

preciarse su aporte a la resistencia al efecto de tensión diagonal mediante su acción de arrugamiento en el alma. Así, se establece un modelo que refleja fielmente dicha acción llamada "acción de campo tensionado", ampliamente discutida en textos avanzados de diseño de estructuras metálicas (Salmon y Johnson, 1987).

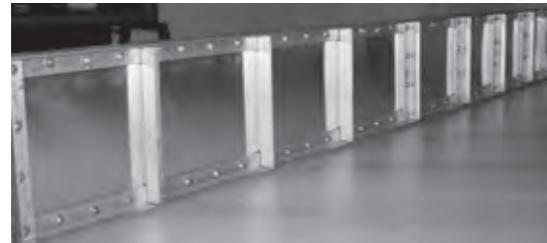


Figura 4. Modelo de viga esbelta armada

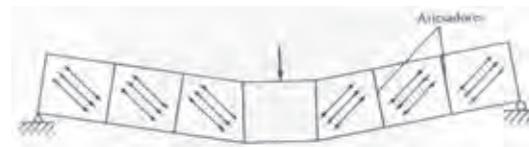


Figura 5. Esquema tomado de Salmon & Johnson para mostrar la semejanza entre lo que se aprende en la teoría y cómo se puede comparar con el modelo



Figura 6. Acción del campo tensionado en el modelo. Se observa acoplado perfectamente con lo explicado en la teoría

Estudio del pandeo lateral en vigas esbeltas: En el estudio de vigas altas se encuentra que uno de los principales problemas es el pandeo lateral en éstas. Este se genera por la relación geométrica entre la altura y el ancho de la viga; no obstante, uno de los aspectos que no se tiene en cuenta es que dicho pandeo solamente afecta la zona de compresión de la viga ya que las fibras a tensión no pueden sufrir de deformación. Esto incluso constituye un factor de importancia en estructuras de concreto reforzado las cuales tienden

a perder resistencia por el pandeo cuando la relación largo/ancho es menor que 60 en vigas simplemente apoyadas, y menores que 25 en vigas en voladizo (Park y Paulay, 1975). Para valores por encima de dichas relaciones, se debe contar con un sistema de estabilidad lateral. Así, se construye un modelo para estimar la influencia de dichos soportes para vigas cuyas dimensiones superen los límites de la geometría catalogada como esbelta.

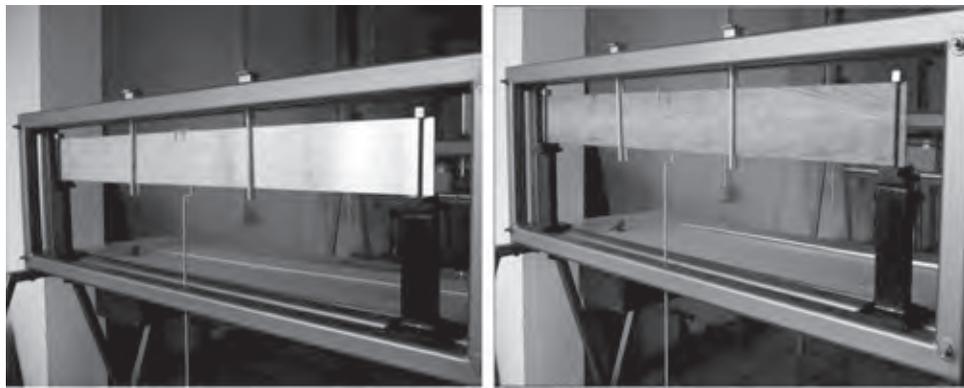


Figura 7. Montaje del modelo para pandeo lateral. Izquierda: con lámina de metálica. Derecha: con lámina de madera



Figura 8. Accesorios para brindar soporte lateral

MODELOS NO DESTRUCTIVOS PARA CARGAS DINÁMICAS

Uno de los temas más importantes en ingeniería estructural es el comportamiento dinámico de éstas. Dicho comportamiento ha sido ampliamente estudiado de forma teórica y sus bases se establecen, principalmente, en el análisis de un elemento de un solo grado de libertad extrapolándolo, mediante ecuaciones soportadas matemáticamente, a sistemas de múltiples grados de libertad. (Para una explicación gráfica se puede relacionar un sistema de un grado de libertad como un péndulo invertido y un sistema de múltiples grados de libertad como una edificación de varios pisos). Debido a esto, surge la necesidad de construir modelos que –ensayados en

una mesa vibratoria– pudieran explicar cualitativamente conceptos fundamentales del comportamiento dinámico de estructuras.

Dichos modelos construidos fueron un pórtico en dos dimensiones (se aclara que un modelo en dos dimensiones significa que la deformación principal es en su plano), hechos con láminas de acero de dos espesores diferentes 0,4 mm y 0,9 mm (figura 9); con esto se pretende demostrar las diferencias en el comportamiento cuando se varía la rigidez de uno o varios elementos de los pórticos. Sin embargo, al tener un comportamiento completamente en un plano, se hace obvia la necesidad de un modelo en el espacio que pueda deformarse en cualquier dirección y además tenga la posibilidad de rotar; para esto se consiguieron columnas hechas de un material flexible y con poca inercia en las dos direcciones principales del movimiento.

Estos elementos son llamados “dedos mecánicos flexibles”, utilizados comercialmente para recoger o sujetar elementos pequeños como tuercas o tornillos que estén en lugares poco accesibles. En este proyecto fueron utilizadas como columnas, las cuales, al ser redondas, daban las condiciones de rigidez ideales para un fácil movimiento rotacional del modelo (figura 10). A dichas columnas se adecuaron láminas de aluminio para representar el entrepiso en el cual, entre diferentes alternativas, puede variarse la localización de masas concentradas y así poder estudiar las diferencias que esto genera en el comportamiento de las estructuras.



Figura 9. Modelo en dos dimensiones apoyado en la mesa vibratoria portátil



Figura 10. Modelo en dos dimensiones apoyado en la mesa vibratoria portátil

MODELOS DESTRUCTIVOS PARA CARGAS ESTÁTICAS

Como parte de la iniciación de la simulación de estructuras de concreto reforzado en la Universidad de La Salle, a continuación se presentan algunos de los modelos básicos estudiados cuyos resultados cualitativos de falla, se asemejan a lo conocido en la teoría generando una veracidad total en el uso de estos modelos.

ESTUDIO DE LA FALLA POR FLEXIÓN Y CORTE DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO

Dos de las fallas con las que se introducen los estudiantes en el aprendizaje de las estructuras de concreto reforzado, son precisamente las fallas por flexión y corte de viga. Al respecto, resulta de vital importancia la diferenciación en cuanto a su mecanismo de falla y poder ver que la falla por flexión, estando en el rango de falla dúctil, es diferente del mecanismo de falla por corte el cual es súbito y genera más incertidumbre al momento de diseñar las estructuras.



Figura 11. Formaleta utilizada para las vigas de microconcreto



Figura 12. Detalle de la modulación de la formaleta

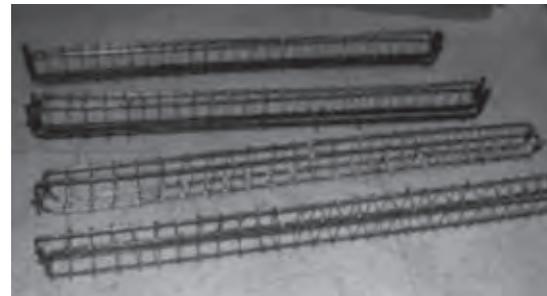


Figura 13. Imagen de las armaduras de refuerzo

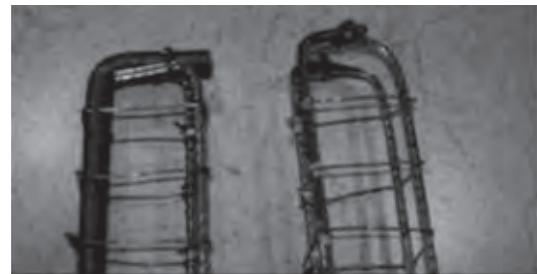


Figura 14. Detalle del refuerzo longitudinal y de los estribos



Figuras 15 y 16. Secuencia de falla por flexión de la viga. Izquierda: el estado inicial de carga. Derecha: se observa la deflexión de la viga y cómo comienza a fisurarse



Figuras 17 y 18. Secuencia de falla por corte de la viga. Izquierda: el estado inicial de carga. Derecha: se observa la típica fisura por corte en vigas

ESTUDIO DE LA POSICIÓN DEL BLOQUE DE COMPRESIONES DE VIGAS T DE CONCRETO REFORZADO SEGÚN SU ANCHO DE ALETA

Un tema un poco más avanzado en el comportamiento a flexión de las vigas de concreto reforzado, es la variación del bloque de compresiones con base en la variación geométrica de la sección. Para esto, el ejemplo clásico es el estudio del comportamiento de vigas T, en las cuales el tamaño de la aleta tiene influencia directa en la posición del bloque de compresiones.

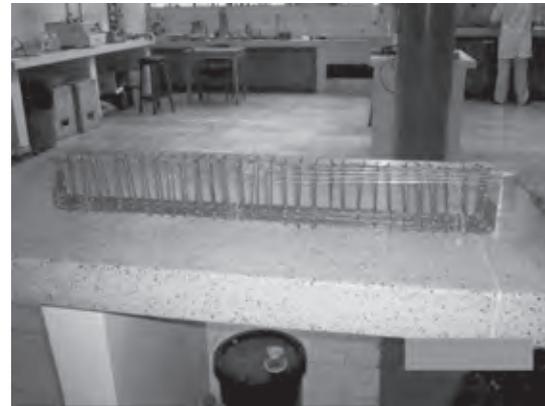


Figura 20. Imagen de la armadura de refuerzo de la viga T



Figura 19. Detalle de formaleta usada para la viga T

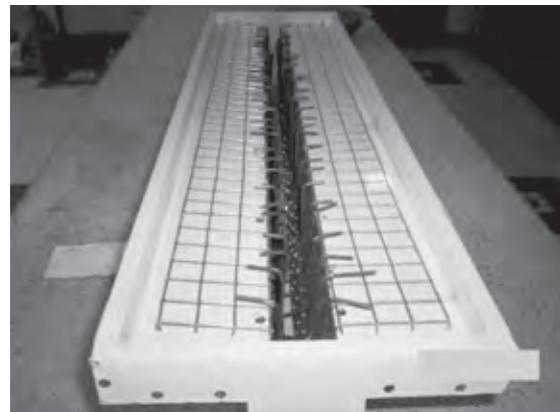


Figura 21. Detalle de la colocación de la armadura del refuerzo en la formaleta



Figura 22. Viga T ya terminada y lista para el proceso de curado



Figura 23. Montaje de la viga para su falla

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE UNA COLUMNA EN SU RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN AXIAL

Una de las teorías más importantes en el estudio de este material, es la falla por compresión de las columnas de concreto reforzado. Esto se debe a su complejo mecanismo de falla, en el cual entra en juego la relación de *Poisson* del material pues se debe entender la expansión o deformación lateral ocurrida debido a la aplicación de la carga vertical; además, resulta indispensable entender cómo dicha deformación está sujeta a la forma de la columna y a la forma del refuerzo transversal utilizado.



Figura 24. Montaje de la columna en microconcreto y lista para su falla



Figuras 25 y 26. Secuencia de falla de las columnas. Izquierda: Comienzo de la pérdida del recubrimiento que no es más que el concreto confinado que sufre en primera línea de la expansión del concreto debido a la aplicación de la carga vertical. Derecha: Pérdida significativa del concreto confinado generando que el refuerzo transversal sea el encargado de resistir la expansión lateral producto del pandeo de las barras de refuerzo

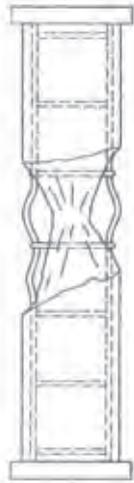


Figura 27. Esquema tomado de Nilson para mostrar la semejanza entre lo que se aprende en la teoría y cómo se puede comparar con el modelo



Figura 28. Imagen de la falla. A diferencia de la imagen mostrada en la figura 27, ésta ocurre en la base debido a sutiles defectos en el armado del refuerzo transversal en dicha zona

ESTUDIO DE LA FALLA POR COMPRESIÓN Y FLEXIÓN EN COLUMNAS DE CONCRETO REFORZADO

Como complemento de la teoría básica de columnas cortas sometidas a compresión expuesta en el modelo anterior, resulta interesante la modelación y falla



Figura 29. Imagen del estado definitivo de los dos especímenes circulares fallados a compresión



Figura 30. Imagen del estado definitivo de los dos especímenes rectangulares fallados a compresión

de estas columnas pero con un nuevo objetivo y es el de simular la falla por compresión y por flexión de una columna de concreto reforzado cuando ésta se encuentra sujeta a una carga axial excéntrica. Este modelo busca evaluar cualitativamente la falla de una columna con las condiciones ya expuestas cuando sus puntos de falla están por encima del punto balanceado de la curva de interacción (falla por compresión) y cuando están por debajo de dicho punto (falla por flexión).



Figura 31. Ensayo a tracción de las barras de refuerzo por usar en los modelos



Figura 32. Instalación del deformímetro para la medición del alargamiento de la barra

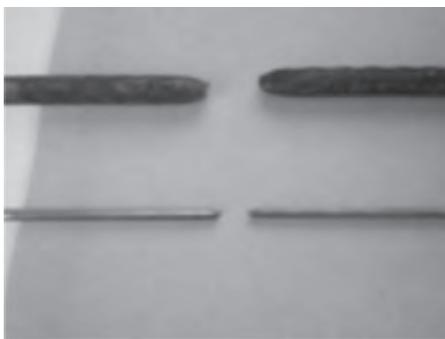


Figura 33. Falla de las barra de refuerzo por utilizar: La superior es la barra utilizada como refuerzo longitudinal. La inferior es la barra utilizada como refuerzo transversal. Se observa la falla dúctil del material



Figura 34. Formaletas para los modelos. Las dos superiores para los modelos de falla en la zona a compresión. Las dos inferiores para los modelos de la falla en la zona a tracción



Figura 35. Detalle de la armadura de refuerzo para el modelo de la falla a flexión

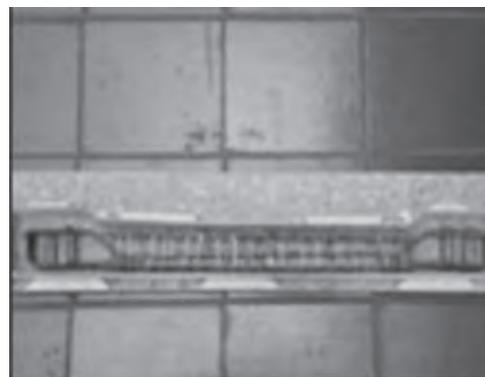


Figura 36. Detalle de la armadura de refuerzo para el modelo de la falla a compresión



Figuras 37 y 38. Por fuera de los cálculos, resultados teóricos, fallas y pruebas de la investigación. Estas figuras reflejan que el estudiante adquiere un profundo sentido de pertenencia con el proyecto ya que son ellos, con la dirección apropiada, los que tienen que concebir, planear, diseñar construir y ver fallar su creación



Figuras 39, 40 y 41. Proceso de falla a flexión. Izquierda: montaje de la columna en el marco de prueba. Derecha arriba: Comienzo de la falla por flexión. Derecha abajo: Fractura de refuerzo longitudinal y excesiva rotación



Figuras 42, 43 y 44. Proceso de falla a compresión. Izquierda: montaje de la columna en el marco de prueba. Derecha arriba: Comienzo de la falla por flexión. Derecha abajo: Exposición total del refuerzo y falla de la columna. Se observa, como era de esperarse, la similitud en la forma de falla entre este espécimen y los especímenes de la investigación de falla por compresión axial (figuras 25 y 26)

CONCLUSIONES

Los modelos estructurales entran como una verdadera alternativa para el entendimiento de las teorías básicas de las estructuras. Esto se demuestra ya que los modelos ensayados, por ejemplo el modelo de las columnas con carga axial, se muestra hoy en día en las clases de Diseño Estructural I del programa de Ingeniería Civil para explicar y ver físicamente la falla que se genera en una columna cuando se somete a sus cargas máximas. Esto crea una conciencia gráfica en los estudiantes, lo que conduce a una mayor responsabilidad en el ejercicio de su profesión.

Actualmente en la Universidad de La Salle se lleva a cabo un proyecto de investigación que sirve como referente para poner en operación lo que se llamará el Laboratorio de Modelos de Microconcreto, en el cual se estudie el comportamiento de las teorías que se ven en las clases de Diseño Estructural I y II del programa de Ingeniería Civil. No obstante, será aplicable para clases con temas afines como la electiva de Diseño de Puentes de Concreto y otras. Asimismo y viendo esta alternativa con un direccionamiento investigativo, se pretenderá implementar el uso de estos elementos para la modelación de estructuras complejas o cuya forma no sea confiable de modelar

en los programas computacionales, tal es el caso de membranas, nudos de tanques, columnas con formas irregulares, entre otros.

Desde el punto de vista de dinámica estructural, un tema vital para el entendimiento del comportamiento sísmo-resistente de las estructuras, se abre la oportunidad para que en conjunto con el programa de Diseño y Automatización, se elabore un proyecto conjunto para la creación de una mesa vibratoria; con ésta habrá la oportunidad de comprender la disipación de energía y los mecanismos de colapso de diferentes estructuras de concreto reforzado cuando son sometidos a movimientos en la base que simulen la presencia de un sismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cueto, J. (2006). *Terminación y puesta en operación del laboratorio de modelos para ensayos no destructivos*. Trabajo de grado como requisito para optar al título de Especialista en Estructuras. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá.
- Cueto, J.; Camacho, G. y Serna, J. (2003). *Modelos de microconcreto para la enseñanza del comportamiento de estructuras de hormigón reforzado*. Proyecto dirigido como requisito para optar al título de Ingeniero Civil. Escuela de Colombiana de Ingeniería, Bogotá.
- Mariño, L.C. (2009). *Modelos de microconcreto reforzado de vigas T aisladas*. Trabajo de grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de La Salle, Bogotá.
- Nilson, A. (1999). *Estructuras de concreto reforzado*. Bogotá: McGraw-Hill; Duodécima Edición.
- Park, R. & Paulay, T. (1975). *Reinforced Concrete Structures*. Ed. John Wiley & Sons; 1st Edition.
- Salmon, Ch. & Johnson, J. (1987). *Steel Structures: Design and Behavior*. Ed. Prentice Hall; 4th Edition.
- Sánchez, J. (2008). *Análisis de la influencia del refuerzo transversal en el confinamiento de columnas de sección circular y rectangular modeladas a escala reducida*. Trabajo de grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil; Universidad de La Salle, Bogotá.
- Sánchez, J. y Muñoz, G. (2008). *Estudio del comportamiento de vigas estructurales de concreto reforzado modeladas a escala reducida*. Trabajo de grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de La Salle, Bogotá.
- Uribe, J. et ál. (2006). Diseño y Fabricación de Mesas Vibratorias para el Estudio del Comportamiento Dinámico de Modelos Estructurales a Escala Reducida. En: *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, N.º 64, pp. 13-20; Bogotá.
- Uribe, J. y Castro, A. (2009). *Estudio de la falla por compresión y flexión en columnas de concreto reforzado utilizando modelos a escala reducida*. Trabajo de grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil; Universidad de La Salle, Bogotá.