



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Ingeniería Estructural, N° 4, Volumen 2, Año 2017 · ISSN: 2215-4566

Experiencia educativa práctica para estudiantes de ingeniería civil: el caso de los puentes de cartón de manila

Ing. Pablo Agüero Barrantes, M.Sc.

Unidad de Puentes

Programa de Ingeniería Estructural

Correo electrónico: pablo.aguerobarrantes@ucr.ac.cr

Ing. Andrés González Ureña, M.Sc.

Profesor - Escuela de Ingeniería Civil

Universidad de Costa Rica

Correo electrónico: andres.gonzalezurena@ucr.ac.cr



Figura 1. Estudiantes de ingeniería civil determinando la capacidad estructural de un puente tipo armadura fabricado con cartón de manila

Introducción

Desde el primer semestre del año 2013 los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica tienen la oportunidad de aplicar los conceptos de comportamiento de estructuras aprendidos en clase, mediante un sencillo pero didáctico proyecto en el que se diseñan y construyen puentes con cartón de manila (Ver figura 1), material conocido por ser con el que se fabrican carpetas para archivar documentos de papel.

El proyecto se ha realizado mediante la coordinación de profesores de la Escuela de Ingeniería Civil (EIC) de la Universidad de Costa Rica (UCR), el Laboratorio de Fuerza (LF) del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la UCR (LanammeUCR) y de la Unidad de Puentes (UP) del Programa de Ingeniería Estructural (PIE) también del LanammeUCR.

Antecedentes

El proyecto fue propuesto en los EUA por el profesor Stephen J. Ressler de la Academia Militar de los Estados Unidos y cuenta con el patrocinio de la Asociación Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en inglés).

El objetivo era incluir actividades didácticas enfocadas a la ingeniería de materiales y el análisis estructural como una alternativa al típico proyecto escolar de construir estructuras con paletas de madera para helado, y concursar por conseguir la mayor capacidad de colapso de la estructura.

El profesor Ressler se cuestionó lo siguiente: ¿qué han aprendido los estudiantes sobre ingeniería después del concurso tradicional? La respuesta del profesor fue “no mucho” y lo justifica así

- los estudiantes no diseñan el puente, simplemente pegan paletas;
- los estudiantes no aplican ni matemáticas ni ciencias;
- los estudiantes nunca experimentan la naturaleza iterativa del diseño;
- se le da al estudiante un objetivo para el éxito del proyecto que no es realista: obtener la máxima carga de colapso de la estructura, cuando en la vida real los ingenieros diseñan para lograr estructuras seguras, no para la falla de éstas.

El profesor Ressler propuso el uso de cartón de manila debido a que es un material que posee características que lo hacen ideal para un proyecto de este tipo, las cuales se mencionan a continuación:

- es un material fácilmente disponible y barato;
- fácil de trabajar,
- su comportamiento como material estructural es predecible;
- se tiene la capacidad para fabricar elementos que trabajan a compresión (cajones) y a tracción (placas);
- se tiene la capacidad de construir conexiones que son más fuertes que los elementos.

Dicho enfoque llamó la atención del profesor del curso de Diseño de Puentes de la EIC de la UCR, y en el segundo semestre del 2013, una variante del proyecto fue implementada en conjunto con la UP y el LF del LanammeUCR. Posteriormente, el proyecto fue implementado en el curso de Mecánica del Sólido II, donde tradicionalmente se construían y fallaban puente construidos con madera y alambre de acero, los cuales alcanzaban capacidades de carga muy altas de difícil predicción a partir de diseños muy masivos y de características variables poco comparables, los cuales dejaban por fuera el concepto de eficiencia

Objetivos y alcance del proyecto

El proyecto incluye hasta cinco actividades principales de aprendizaje para el estudiante, las cuales se mencionan a continuación.

Actividad 1. Determinar experimentalmente la capacidad estructural de los elementos a utilizar.

En esta actividad los estudiantes fabrican elementos tipo placa y elementos tipo cajón con secciones cuadrada y rectangular.

En el caso de los elementos tipo placa, se varía el ancho del elemento y son fallados a tracción mientras que en los cajones se varía la sección y la longitud y son ensayados a compresión (ver figura 2). Para estas fallas se utiliza un marco de carga, una celda de carga tipo S y una unidad de adquisición de datos.

Los estudiantes deben analizar los datos experimentales para determinar la capacidad estructural teórica que utilizarán en las siguientes actividades.

En las figuras 3 y 4 se presenta, a modo de ejemplo, los resultados experimentales obtenidos por un grupo de estudiantes del segundo semestre del 2016. Nótese que el comportamiento de los miembros tipo placa fallados a tracción tiene una tendencia lineal (ver figura 3), mientras en el caso de los elementos tipo cajón hay una dispersión que no permite determinar fácilmente una tendencia (ver figura 4), lo cual está relacionado con el fenómeno de falla por pandeo local de dichos elementos.

Realizando esta actividad los estudiantes se familiarizan con:

- el uso de equipo de laboratorio como celdas de carga y unidades de adquisición de datos;
- visualizar diferentes modos de falla de los elementos ensayados;
- realizar el análisis de los datos experimentales

Actividad 2. Análisis de una estructura.

Utilizando los conceptos de mecánica estructural, los estudiantes deben proponer la estructuración de un puente con elementos tipo barra para una luz específica y una condición de carga, ambas propuestas por el profesor. El uso de programas de análisis estructural y elemento finit o es permitido como herramienta de apoyo.

De esta forma, los estudiantes se enfrentan a un problema de modelado de una estructura determinando el flujo de carga de la estructura y los elementos críticos de la tipología escogida.

Actividad 3. Diseño de elementos y predicción de la capacidad de la estructura.

Con base en los datos experimentales obtenidos y en el análisis estructural de la actividad 2, los estudiantes deben optimizar la estructura con el objetivo de maximizar la relación *Carga de colapso / Peso de la estructura*. Adicionalmente, deben predecir la carga de colapso.

En esta actividad los estudiantes deben resolver un proceso iterativo de diseño y optimización, determinando el tipo de elemento para cada caso de carga (tracción o compresión) y para finalmente predecir la carga de colapso.

Actividad 4. Construir la estructura.

Los estudiantes deben construir la estructura según el diseño realizado en la actividad anterior. También deben utilizar la información obtenida el día de la falla de los elementos, referente a la calidad constructiva de los elementos.

En esta actividad los estudiantes se enfrentan al desafío de materializar su diseño y reducir la cantidad de defectos constructivos que pueden disminuir la carga máxima de la estructura.

Actividad 5. Determinación de la capacidad de carga de colapso de la estructura.

Finalmente, los puentes son fallados (ver figura 1, video 1 y video 2) para determinar la carga de colapso. Previamente, se registra el peso de cada estructura de cartón, para determinar la relación *carga de falla / peso de la estructura*.



Falla de puente primer semestre del 2017 (González, 2017)





Falla de puente primer semestre del 2017 (González, 2017)

El proceso de carga se realiza añadiendo pesos de medio kilogramo (5 N) hasta que el puente colapsa. De esta forma, los estudiantes pueden visualizar cómo se comporta la estructura para diferentes valores de carga.

Con los datos de carga de colapso y peso del puente se calcula la relación *Carga de colapso / Peso de la estructura*, y el porcentaje de error de la carga experimental con respecto a la predicción analítica calculada por los estudiantes en la Actividad 3.

Ambos indicadores dan una base para determinar la calificación que reciben los estudiantes. Además de los estos criterios de capacidad estructural, se califica la estética de los puentes.

RESULTADOS DE 33 PUENTES FALLADOS

En la figura 5 se presenta un resumen de la relación *Carga de colapso / Peso de la estructura* de los 33 puentes fallados durante los seis semestres en que se ha implementado el proyecto. Dicha relación es una forma sencilla de medir la eficiencia del uso de material, lo que se relaciona con la economía en una estructura real.

En la figura 6 se presenta el porcentaje de error de la predicción de carga la carga de colapso calculada por los estudiantes con respecto a la carga real de colapso para 19 puentes correspondientes a cuatro de los se-

mestres en que se ha realizado el proyecto. Se puede notar que por lo general, los estudiantes sobrestiman la carga de colapso (porcentaje de error negativo) y en cuatro casos la carga de colapso calculada es menor a la medida experimentalmente. Lo anterior puede atribuirse a que:

- los estudiantes de mecánica del sólido aún no han recibido conceptos de estabilidad global de estructuras y no visualizan la importancia de los sistemas de arriostamiento del puente.
- los defectos constructivos del puente producen fallas locales o inestabilidad que no está considerada en los modelos analíticos.
- se han detectado casos en que los estudiantes varían los elementos del puente utilizando elementos que no han fallado en el laboratorio, lo que provoca que no tengan respaldo experimental de la capacidad, aumentando tanto la relación capacidad / peso como el porcentaje de error en la predicción de la carga.

Lecciones aprendidas

Con base en la experiencia acumulada a través de los seis semestres que se ha realizado el proyecto se presentan las siguientes lecciones aprendidas.

La capacidad de carga de los elementos tipo cajón resistiendo cargas a compresión depende en gran me-

didada de la calidad constructiva. Se han dado casos de elementos que no están completamente unidos en toda su longitud y presentan menores cargas máximas en comparación con elementos unidos en toda su longitud.

Se debe prestar mucha atención a la estabilidad global de la estructura. En ese sentido, se han observado puentes con faltante de elementos en los diafragmas superiores afectando el comportamiento global de la estructura e induciendo fallas locales prematuras en elementos inestables.

Los puentes que presentan elementos tipo cajón con defectos, como arrugas, antes de la prueba de carga son propensos a fallas locales en dichos puntos, afectando la capacidad de carga de la estructura.

Los valores del porcentaje de error se incrementan en gran medida si se utilizan elementos que no fueron probados experimentalmente.

Conclusiones y recomendaciones

El proyecto presentado en este boletín constituye una herramienta didáctica de apoyo para los profesores de ingeniería civil.

A pesar de que se ha enfocado el análisis, diseño y construcción de puentes tipo armadura, el proyecto permite variar el tipo de estructura a otras estructuras formadas por elementos tipo barra, por ejemplo grúas, estructuras, antenas, marcos arriostrados, puentes tipo arco, entre otras.

El proyecto podría ser utilizado para hacer competencias entre universidades en congresos relacionados con la ingeniería civil.

Referencias Bibliográficas

<http://bridgecontest.org/>

Ressler, J. S. (2002). Designing and building fil -folder bridges, a problem-based Introduction to Engineering. United States Military Academy.

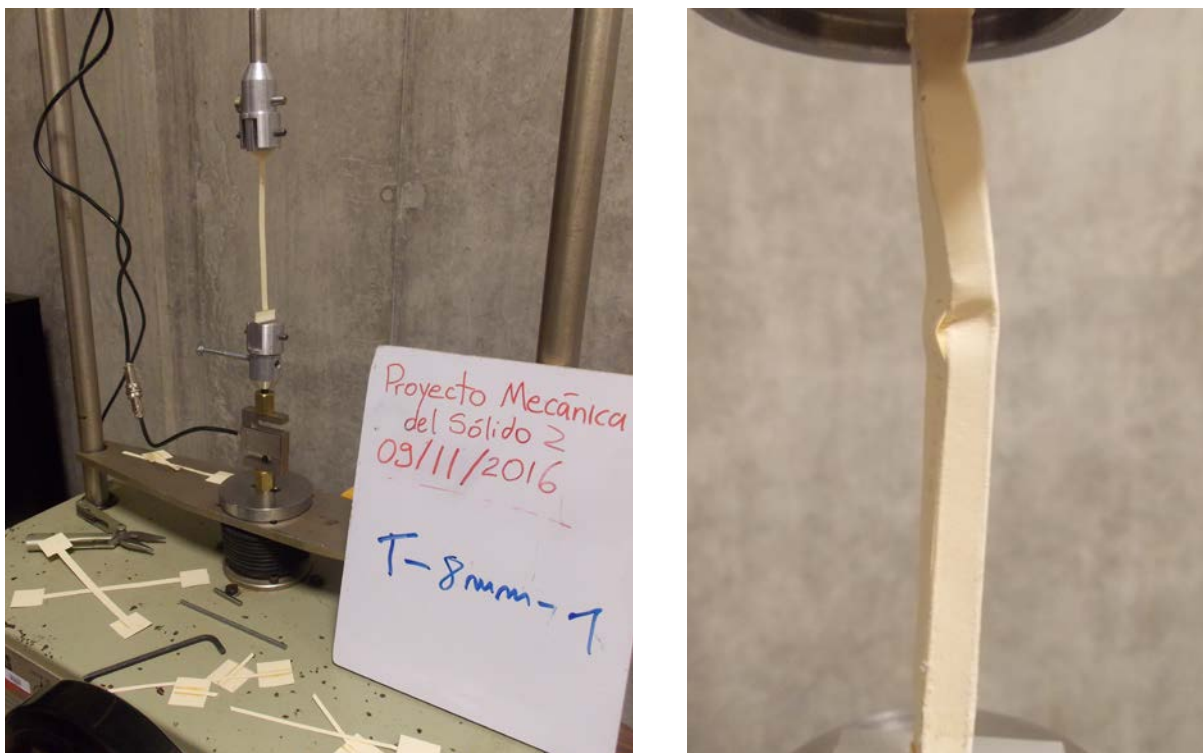


Figura 2. A la izquierda falla a tracción de elemento tipo placa y a la derecha detalle de falla local a compresión de un cajón de sección cuadrada, utilizando un marco de carga, una celda de carga y una unidad de adquisición de datos

Falla de elementos tipo barra a tracción

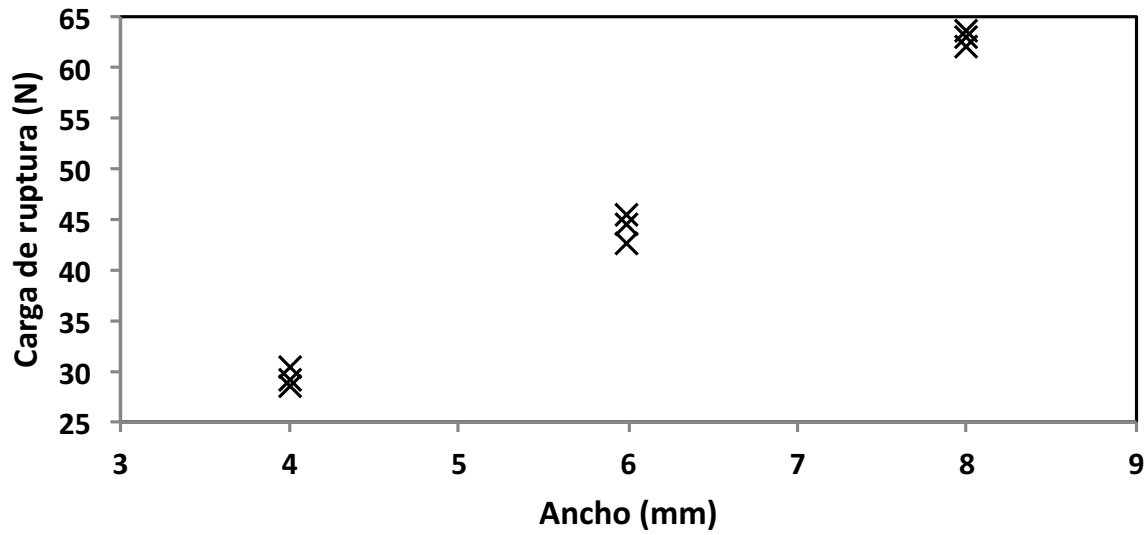


Figura 3. Resultados experimentales obtenidos de la falla de elemento tipo placa a tracción en el segundo semestre del 2016.

Falla de elementos tipo tubo a compresión

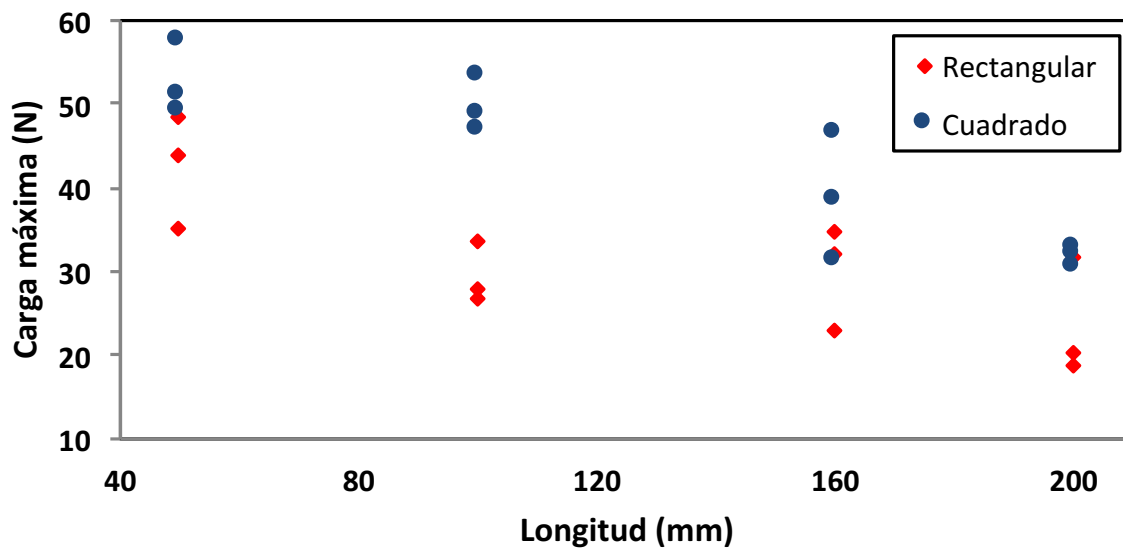


Figura 4. Resultados experimentales obtenidos del ensayo de elementos tipo cajón en el segundo semestre del 2016.

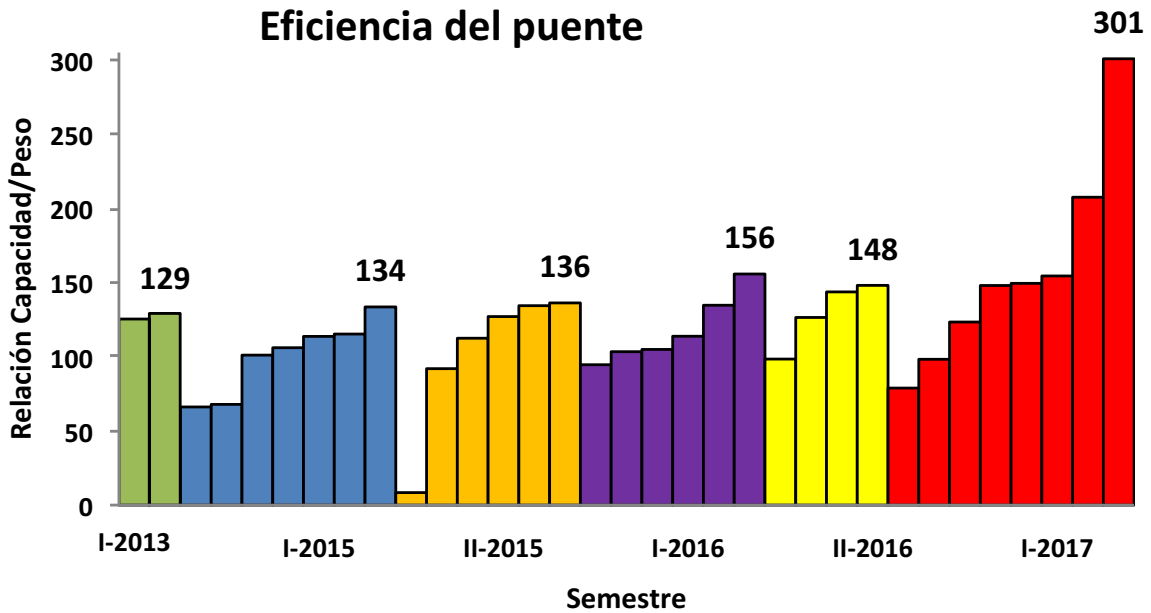


Figura 5. Valores obtenidos de la relación Carga de colapso / peso de la estructura correspondientes a la falla de 33 puentes de cartón correspondientes a 6 semestres.

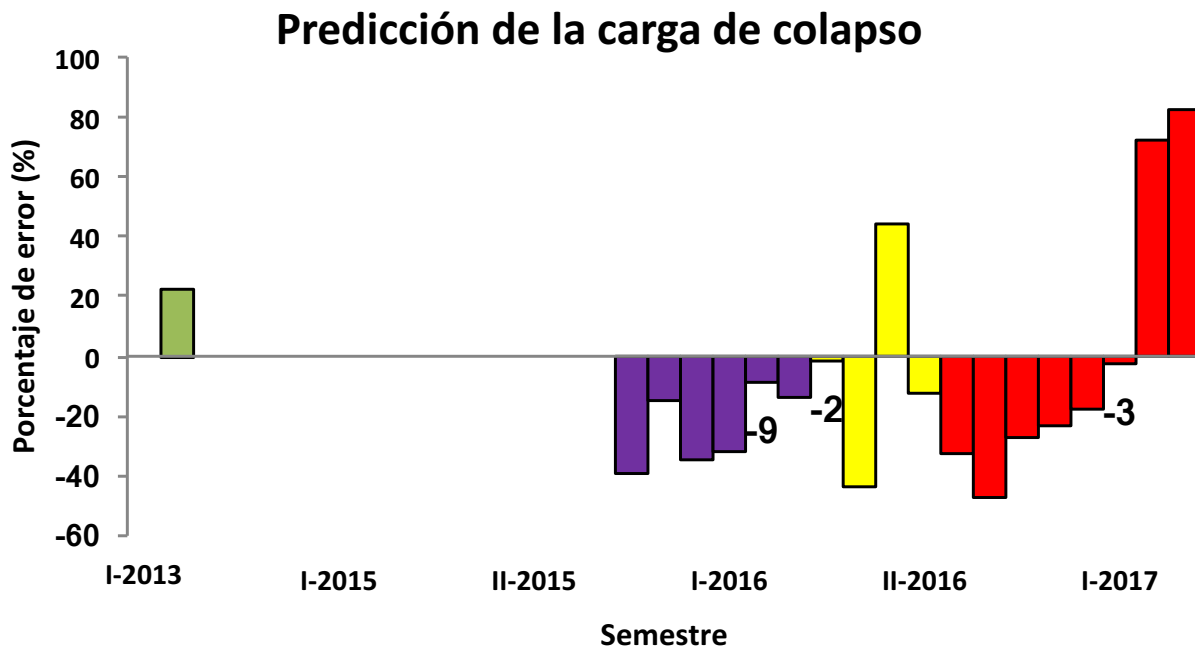


Figura 6. Valores del porcentaje de error de la carga de falla teórica calculada por los estudiantes con respecto a carga experimental de colapso correspondientes a la falla de 19 puentes de cartón correspondientes a 6 semestres (no se cuenta con datos del 2015).



LanammeUCR

**LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES**

PIE Programa de
Ingeniería Estructural

Tel. (506) 2511-2500 / Fax (506) 2511-4440 / Código Postal 11501-2060
E-mail: direccion.lanamme@ucr.ac.cr / Sitio web: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr>

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Diagramación, diseño y control de calidad: Licda. Daniela Martínez Ortiz / Óscar Rodríguez Quintana

Experiencia educativa práctica para estudiantes de ingeniería civil: el caso de los puentes de cartón de manila / Agosto, 2017

Palabras clave: proyecto estudiantil, puentes de cartón, falla de elementos, predicción de falla, mecánica del sólido.