

APOYO A LA ENSEÑANZA DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS MEDIANTE LA REALIZACIÓN DE UN CONCURSO DE RETICULADOS ESPACIALES

**Pablo A. Beneyto, Javier L. Mroginski, Juan M. Podestá, Guillermo F. Gutiérrez y
Hector A. Di Rado**

*Departamento de Mecánica Aplicada, Universidad Nacional del Nordeste.
Av. Las Heras 727, (3500) Resistencia, Chaco, Argentina.
pbeneyto@ing.unne.edu.ar, <http://ing.unne.edu.ar/mecap>*

Palabras Clave: Puente de spaghetti, materiales no convencionales, mecánica aplicada, cálculo de estructuras.

Resumen. A partir de la observación de dificultades en los alumnos para comprender los primeros planteos estructurales, aplicar conocimientos básicos de Mecánica de Sólidos, e implementar el método de los elementos finitos (MEF) para resolver problemas de Ingeniería, se lleva a cabo desde el año 2007 el concurso de Puentes de Spaghettis. El mismo consiste en el diseño, en grupos de hasta 4 alumnos cada uno, de una estructura reticulada espacial que debe superar una luz libre de 1m y soportar una carga en el centro de la luz, aplicada en forma incremental por los propios alumnos, contando con una cantidad limitada de material, en este caso 500 gr de fideos spaghetti unidos con cola epoxi o similar. Los alumnos realizan tanto el diseño estructural como su posterior resolución mediante elementos finitos para reticulados espaciales. Dicho análisis por elementos finitos se realiza mediante un programa desarrollado por los alumnos empleando un código abierto, el cual es mejorado en las sucesivas ediciones del concurso con la incorporación de nuevas variantes. Entre los logros significativos pueden detallarse los siguientes: una mejor interpretación del fenómeno físico, la programación y aplicación de software de métodos numéricos específicos, la comprensión de fenómenos de falla locales, la introducción del concepto de optimización geométrica en estructuras discretas y la comunicación de sus proyectos en forma oral y escrita, entre otras cosas. Se observó también un incremento en la motivación a trabajar en grupo para llevar a cabo proyectos, intercambiando conocimientos de desarrollo de algoritmos y técnicas numéricas, además del interés de los estudiantes a participar en competencias que involucren la programación de métodos numéricos para resolver problemas de ingeniería.

1. INTRODUCCIÓN

A partir del análisis, junto a profesores de áreas de las Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), del desenvolvimiento de los estudiantes de grado que cursaban el tercer y cuarto año de carrera, se han podido identificar falencias conceptuales y un incipiente desinterés en la interpretación del funcionamiento básico de los sistemas estructurales. En particular, en las materias del área Mecánica Aplicada se observaron dificultades para relacionar el comportamiento real con los conceptos teóricos obtenidos a partir de los cursos de física y su resolución por métodos de cálculo, como el método matricial y el de los elementos finitos (Zienkiewicz y Taylor, 1989; Awruch y Di Rado, 1998; Reddy, 2006; Chapra y Canale, 2007).

Esto motivó la búsqueda de alternativas que colaboren en la obtención de soluciones a los problemas mencionados. Entre las posibles acciones para revertir esta tendencia, surgió la idea de despertar en los alumnos cursantes el espíritu de competencia a través de un certamen que significara el desafío de obtener el mejor resultado posible a partir de condiciones limitadas de acción, proponiéndose realizar un concurso que contemple el diseño, cálculo estructural y construcción de puentes de spaghetti.

Si bien este tipo de competencia se realiza en otros países, hasta el año 2007 no se conocían antecedentes en la Argentina, siendo la referencia más cercana, la de la UFRGS (Universidad Federal de Rio Grande do Sul) de la ciudad de Porto Alegre (Segovia et al., 2005), Brasil, en la cual se han llevado a cabo certámenes similares con gran suceso desde el año 2004. Otras acciones similares se han concretado con el mismo éxito en Universidades de Chile, Ecuador, Estados Unidos, Suiza y Canadá. Desde 2010 se desarrollaron experiencias de similares características en escuelas técnicas de Misiones y en la Universidad del Comahue. Al tener todas las competencias mencionadas objetivos similares, decidimos adoptar un reglamento general semejante al de la UFRGS, con el fin de poder cotejar datos y comparar resultados.

Entre las experiencias recogidas durante el desarrollo de estas competencias se destacan: la aplicación práctica de los conceptos básicos de Resistencia de Materiales, Mecánica Estructural y la Estabilidad Estructural, el análisis e interpretación de sistemas simples de estructuras, la optimización de estructuras espaciales, el uso y desarrollo de software para resolver sistemas estructurales, el trabajo en equipo, la originalidad de diseños (topológicos y tecnológicos), la creatividad, la capacidad de comunicar y presentar desarrollos, y la capacidad de convertir ideas en diseños de ingeniería.

2. OBJETIVOS DEL CONCURSO

La propuesta llevada a los concursantes consiste en la construcción de una réplica de un puente reticulado, utilizando fideos del tipo spaghetti y colas epoxi y calientes (tipo silicona, aplicada con pistola, etc.), conforme lo especificado en el reglamento de la competición. El puente deberá ser capaz de vencer una luz libre de 1 m, sin superar los 900 gr de peso, en el cual están incluidos el material estructural (fideos), la pasta cementicia (pegamento de los nudos), una barra de acero de 10 cm de longitud donde se aplica la carga y los apoyos (tubos de PVC de 1/2").

La construcción del puente debe ser precedida del análisis de las alternativas estructurales adoptadas y de un informe detallado de la que finalmente es escogida, acompañado de una estimación de la carga de rotura. Para llevar a cabo el análisis estructural previamente indicado cada grupo de alumnos deberá desarrollar o emplear un software de cálculo basado en el Método de Elementos Finitos.

3. ACTIVIDADES PREVIAS

En primer término se realizaron reuniones junto a los docentes del Departamento de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste participantes en el proyecto, para unificar criterios acerca de las principales falencias conceptuales en el área de estática y resistencia de materiales con el objeto de diseñar las charlas a los distintos grupos participantes.

Luego se presentaron las bases del concurso a los alumnos participantes de las distintas cátedras del Departamento (las bases del concurso se encuentran disponibles en <http://ing.unne.edu.ar/mecap/PuenteSpaghettis/>).

Se formaron grupos, con hasta 4 alumnos de cada disciplina para ser orientados por un profesor tutor encargado de satisfacer sus demandas y orientarlos a medida que evolucionaban las propuestas, permitiéndose sólo un puente por cada grupo participante.

Se dictaron clases de métodos matriciales y elementos finitos, explicando su funcionamiento. Además se explicó la forma de implementarlos a partir de software educativo y mediante una codificación desarrollada en [Scilab \(2011\)](#), la cual es entregada a los alumnos participantes para que implementen las mejoras que crean convenientes, proporcionándose además apuntes explicativos.

Antes de la construcción de los puentes se organizaron reuniones entre tutores y alumnos para discutir planteos estructurales y opciones de diseño, como así también la implementación computacional de cada uno de los proyectos presentados. Previo a la realización de la prueba de carga, cada grupo debió presentar un valor estimado de carga de rotura acompañada de una memoria técnica en la que se justificaba la elección del diseño elegido sobre otras alternativas posibles. El análisis estructural se realizó mediante la utilización del método de los elementos finitos.

Durante la semana anterior a la realización de las pruebas de carga, se constituyó una comisión de fiscalización formada por los profesores y auxiliares de docencia de las materias relacionadas con la temática abordada, cuya misión fue la de verificar el cumplimiento de las disposiciones reglamentarias.

4. DESCRIPCIÓN DE LA COMPETENCIA

Inicialmente, luego de formar grupos de hasta cuatro participantes y elegir un guía o tutor, los estudiantes presentan anteproyectos de modelos de puentes analizando fortalezas y debilidades de los mismos, los cuales deben respetar las condiciones límites de altura, ancho, posición del punto de carga y apoyos establecidas en las bases del concurso.

Una vez determinado el diseño, deben obtener mediante la aplicación de los conceptos del método de los elementos finitos, o matriciales, las tensiones actuantes en cada barra de la estructura, agregando material, quitando o modificando las características de las secciones, hasta obtener una distribución uniforme de tensiones que garantice alcanzar la tensión de fluencia en todas las barras de manera conjunta. Debido a la imposición de un límite del peso de la estructura terminada, el puente que más resista será el que posea las dimensiones mejor compensadas entre sí. Para esto, es necesario hacer hincapié en el diseño y distribución de las secciones de las barras componentes, dado que un sobredimensionado en alguna de ellas significará el debilitamiento de otra sección si se pretende conservar el peso.

Las características materiales necesarias para la determinación de las secciones transversales de cada elemento estructural se obtuvieron en un primer momento a partir de datos aportados por la UFRGS, aunque actualmente existe un conjunto de datos obtenidos experimental-

mente por los propios alumnos que ensayaron diferentes tipos de barras de fideos de distintas secciones, tanto a la tracción como a la compresión. En el modelado numérico los datos de materiales más relevantes son el módulo de elasticidad E , definido en $36,000Kgr/cm^2$, y la resistencia máxima a la tracción, la cual según ensayos fue de $3,50Kgr$ por fideo.

La Fig. 1 muestra una secuencia de imágenes del proceso constructivo de un puente participante (ver mas ilustraciones en <http://ing.unne.edu.ar/mecap/PuenteSpaghettis/>).



Figura 1: Proceso de construcción

Posteriormente, los puentes elaborados son entregados a la organización del concurso un día antes del mismo, junto al análisis estructural realizado, la distribución final de tensiones, los planos y una estimación de la carga última resistente.

El día del concurso, se pesan y miden todos los puentes concursantes descartando aquellos que superen el peso máximo de 900gr. Aquellos puentes que son descartados de la competencia son sometidos de igual manera al ensayo de carga hasta su rotura para determinar la carga máxima de colapso (ver Fig. 2).

El proceso de carga en estas estructuras realizadas con materiales no convencionales no resulta un procedimiento trivial debido a que el material spaghetti se comporta como un sólido viscoplástico y la forma de aplicación de la carga afecta considerablemente su resistencia. Por tal motivo, y unificando las especificaciones empleadas en la UFRGS, se determinó que entre cada escalón de carga se deben esperar 10 segundos para una nueva aplicación. Es responsabilidad de los alumnos emplear correctamente el tiempo de aplicación y el tamaño de las pesas



Figura 2: Proceso de pesaje

adoptadas.

Si bien entre los objetivos principales del concurso no se encuentra la entrega de premios sino la participación e integración del alumnado, entre otros, la organización del concurso entrega diplomas y premios al modelo con mayor carga de rotura, el cual será considerado como el ganador del concurso. Por otro lado se premia también al grupo que logró mejor aproximación a la carga de diseño y a los que para la Comisión Organizadora hayan presentado el modelo estructural más original.

5. EXPERIENCIAS DIDÁCTICAS

En esta sección se presentan las experiencias didácticas más relevantes obtenidas del concurso, diferenciando dos grandes aspectos:

5.1. Experiencias didácticas experimentales

Los ensayos de rotura son filmados y posteriormente, en una clase especial se presenta el video para analizar en conjunto entre alumnos y docentes los aspectos a mejorar en el diseño, construcción y realización de los ensayos para próximas ediciones de la competencia. Esta última etapa resultó de gran importancia, ya que a partir del análisis de las imágenes en cámara lenta, pueden observarse fenómenos que a simple vista pasaban desapercibidos, así como también determinar la causa de la rotura y visualizar fenómenos como el pandeo o el alabeo de la estructura por errores constructivos y fallas locales por errores en la materialización de vínculos.

Esto hizo que los modelos mejoren a lo largo de las distintas ediciones, como pudo observarse tanto en la carga máxima resistente de cada puente, como en la aproximación con los valores previstos. La carga máxima de rotura del primer concurso en el año 2007 fue de 19,5 kg, y la del quinto concurso en noviembre de 2010 superó los 90 kg.

Cabe destacar que el diseño de las estructuras fue evolucionando a partir del análisis entre competencias realizado por los alumnos, y la transmisión de experiencias entre participantes. Es así que en un primer momento se idealizaban las estructuras como planas y las fallas ocurrían por no tener en cuenta la tercera dimensión, a partir de allí el análisis nunca dejó de ser tridimensional (ver Fig. 3).

Luego, la mejora en el diseño estructural se evidenció en la elaboración de secciones tubu-



Figura 3: Evolución del diseño estructural

lares huecas para las barras sometidas a compresión, elevando de esta manera el momento de inercia de la sección y mejorando así su estabilidad ante el posible efecto de pandeo con la misma cantidad de material, ver Fig. 4.



Figura 4: Secciones tubulares típicas

Finalmente un grupo de alumnos llegó a la conclusión de que la cantidad de barras que forma el reticulado era proporcional a la posibilidad de cometer un error en su construcción, por lo que los modelos actuales tienden a minimizar el número de barras de los diseños originalmente utilizados.

Esto permitió poder avanzar sobre el concepto de optimización de estructuras, que es novedoso para nuestra carrera de grado, lo que implicó clases adicionales sobre técnicas de optimización utilizadas en el área de estructuras (Mroginski et al., 2009).

5.2. Experiencias didácticas en la enseñanza del MEF

Respecto a la enseñanza de métodos numéricos en la carreras de grado de Ingeniería Civil la implementación de este concurso mostró un gran interés de los alumnos hacia las distintas

alternativas de cálculo para resolver problemas estructurales, y en particular el Método de los Elementos Finitos.

Es importante destacar que desde la implementación del concurso en el año 2007 hasta la fecha, los alumnos mejoraron notoriamente el programa inicial otorgado por la organización, que inicialmente consistía en una estructura de MEF básica para reticulados planos lineales elásticos. Entre las mejoras realizadas por los alumnos se pueden citar:

- Pasaje de 2D a 3D
- Rutina que limita la tensión de las barras de reticulado a la tensión de fluencia
- Rutina de interfase con el software de pre y post proceso [GID \(2009\)](#)
- Rutina que limita la tensión de las barras de reticulado considerando el efecto de pandeo

Para las próximas ediciones del concurso se espera que los alumnos mejoren el programa original teniendo en cuenta a la estructura como un pórtico espacial y considerando de esta manera la rigidez de los nudos. Por otro lado, se pretende implementar alguna técnica de optimización topológica siguiendo las líneas de investigación llevadas a cabo en el Departamento de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UNNE ([Gutierrez et al., 2009](#); [Mroginski et al., 2009](#); [Gutierrez et al., 2010, 2011](#); [Beneyto et al., 2011](#)).

Por otro lado, el análisis numérico permitió identificar claramente deficiencias en los diseños estructurales de algunos puentes. Este caso fue observado por un grupo de alumnos en la edición 2007 del concurso donde los mismos, a través del modelo de elementos finitos determinaron que un conjunto de barras de su diseño inicial (Fig. 5a) no estaban sometidas a esfuerzo alguno, por lo cual decidieron quitarlas en el proyecto definitivo, (barras en azul de la Fig. 5b). Así mismo, en la Fig. 6 se observa una imagen del puente terminado instantes previos a la realización del concurso.

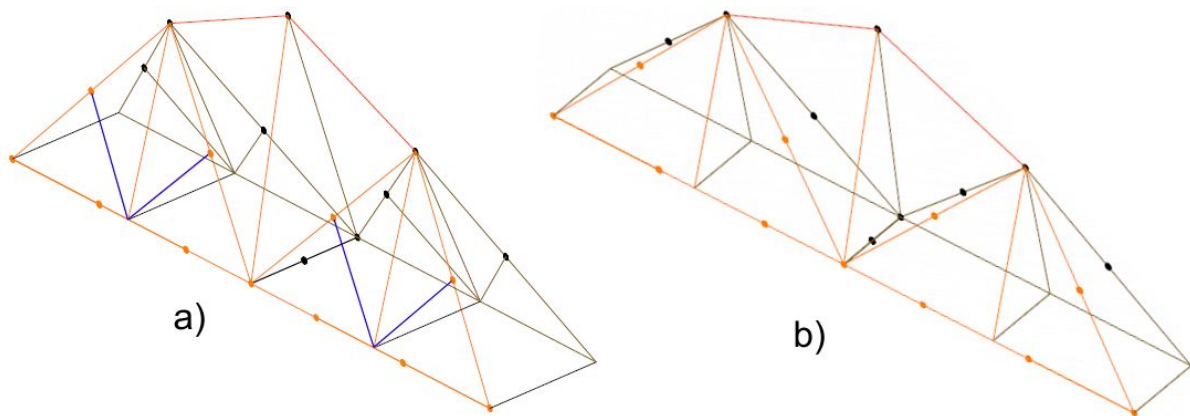


Figura 5: Modelado estructural por MEF, a) diseño original ; b) diseño mejorado

6. EXTENSIÓN A OTROS ESTABLECIMIENTOS EDUCATIVOS

Al compartir esta experiencia con docentes de la carrera de Arquitectura y con profesores de los últimos años de carreras secundarias técnicas, detectamos que los alumnos de dichas carreras presentan problemáticas similares. Esto llevó a que durante los años 2008 y 2009 la competencia se realice con equipos integrados por alumnos de diferentes carreras, los cuales

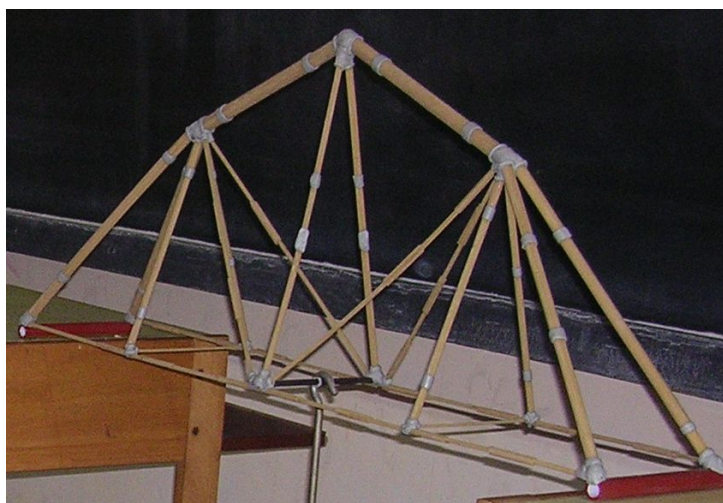


Figura 6: Modelo construido luego de su correspondiente análisis estructural

poseen distintos puntos de vista, y abordan la iniciativa a partir de diferentes posiciones, para lo cual el trabajo en grupo enriquece la experiencia inicial.

Para nivelar el conocimiento del comportamiento estructural, se organizaron clases y talleres, con contenido teórico-práctico involucrando además el manejo de software de diseño y cálculo estructural, que serían preparatorias para el concurso.

7. CONCLUSIONES

Se transitó junto a los alumnos por los caminos de la matemática, la física y la programación, conectando la simulación numérica con la vida real, investigando sobre diseño y comportamiento de estructuras y aprendiendo de las experiencias surgidas a lo largo del desafío.

Experiencias que pueden ser útiles para el futuro desempeño en la vida profesional, ejercitando la totalidad de etapas constructivas: proyecto, cálculo, ejecución y puesta en servicio.

El ensayo hasta la rotura de cada uno de los puentes permitió identificar algunas falencias como fallas locales y de diseño que no alcanzaron a ser previstas, lo cual produce un efecto de retroalimentación para las sucesivas ediciones del concurso, ya que permite identificar las mejoras a realizar en las hipótesis de cálculo y diseño en los modelos de Elementos Finitos.

Desde los primitivos planteos estructurales realizados por los participantes, hasta los que definitivamente dieron forma a los prototipos ensayados, se ha podido percibir una notable evolución tanto en los diseños estructurales como en los de las secciones de las barras individuales, demostrando el nivel de comprensión acerca del comportamiento de los reticulados espaciales.

Se ha detectado incluso, una acción enriquecedora para los docentes involucrados a través del análisis de las distintas configuraciones estructurales y del debate entre pares en relación a las diferentes configuraciones de falla.

Finalmente, es importante destacar el grado de acogida y repercusión mediática alcanzado por esta novedosa experiencia.

REFERENCIAS

Awruch A.M. y Di Rado H.A. *Introducción al método de los elementos finitos*. Universidad Nacional del Nordeste. EUDENE, 1998.

Beneyto P.A., Gutierrez G.J., Mroginski J.L., y Di Rado H.A. Análisis de estabilidad de taludes

- mediante técnicas de optimización heurística. *XIX Congreso de Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2011)*, (trabajo aceptado), 2011.
- Chapra S. y Canale R. *Métodos numéricos para ingenieros*. McGraw Hill, 2007.
- GID. *The Personal Pre and Post Processor*. <http://gid.cimne.upc.es>, 2009.
- Gutierrez G.J., Bisňuk D.E., Mroginski J.L., Beneyto P.A., y Di Rado H.A. Optimización multiobjetivo de reticulados planos utilizando algoritmo genético. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas de la UNNE 2010*, 2010.
- Gutierrez G.J., Mroginski J.L., Beneyto P.A., y Di Rado H.A. Optimización en el diseño de sistemas estructurales discretos mediante algoritmos genéticos. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas de la UNNE 2009*, 2009.
- Gutierrez G.J., Nuñez F.M., Mroginski J.L., Beneyto P.A., y Di Rado H.A. Análisis de estabilidad de taludes mediante técnicas de optimización heurística. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas de la UNNE 2011*, 2011.
- Mroginski J.L., Gutiérrez G.J., Beneyto P.A., y Di Rado H.A. Optimización topológica de sistemas estructurales bidimensionales discretos mediante algoritmos genéticos. *Mecánica Computacional*, 28:2657–2674, 2009.
- Reddy J.N. *An introduction to the finite element method*. McGraw Hill, 2006.
- Scilab. *The Free Software For Numerical Computation*. <http://www.scilab.org>, 2011.
- Segovia L.A., Morsch I.B., y Masuero J.R. Didactic games in engineering teaching - case: spaghetti bridges design and building contest. *18th International Congress of Mechanical Engineering*, 2005.
- Zienkiewicz O.C. y Taylor R.L. *The finite element method*, volumen I. McGraw Hill, 1989.