

Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1  
16/01/2017 04:30 p.m.

1.1564e-6 Max  
1.0279e-6  
8.9942e-7  
7.7093e-7  
6.4245e-7  
5.1305e-7  
3.8547e-7  
2.5698e-7  
1.2849e-7  
0 Min

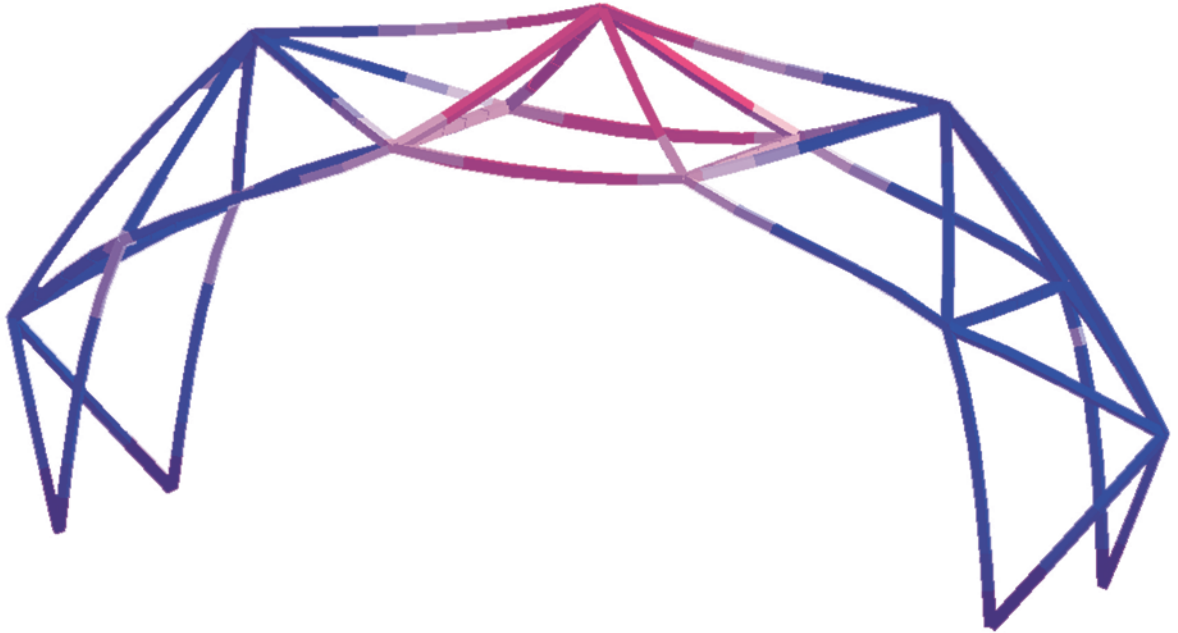


Figura 1. Software Ansys Workbench 11. Modelo digital (simulación mediante el método de los elementos finitos).

Fotografía: Pedro Jesús Villanueva Ramírez

# LA EXPERIMENTACIÓN CON MODELOS ESTRUCTURALES EN LA ENSEÑANZA DE LA ARQUITECTURA

Pedro Jesús Villanueva Ramírez  
Departamento de Tecnología y Producción

**E**n el ámbito profesional, cada vez es más frecuente que los ingenieros especialistas en estructuras utilicen los Computer Aided Engineering, conocidos como CAE, para auxiliarse en el análisis, cálculo y diseño estructural, mientras que los arquitectos se apoyan más en los Computer Aided Design (CAD) y los Building Information Modeling (BIM). Cuando estas herramientas se fusionan, trabajando en paralelo, logran reducir la brecha que existe entre el diseño arquitectónico y estructural.

Desde el punto de vista educativo, como profesor de los apoyos de estructuras y cómputo en la licenciatura en arquitectura de la UAM Xochimilco, resulta complicado enseñar los conceptos estructurales, cuando la mayoría de los alumnos carece de un soporte suficiente

y necesario en conocimientos matemáticos y métodos de cálculo en el análisis y diseño estructural arquitectónico; a esto se suma el problema de que el profesor insiste en utilizar un enfoque cuantitativo (matemático) y tradicional.

En cierta medida, ello ha ocasionado un creciente desinterés y desmotivación por parte de los alumnos, a tal grado que esto se refleja en la presentación de sus propuestas de proyectos arquitectónicos, los cuales la mayoría de las veces carecen de una idea estructural.

Existen otros métodos que pueden coadyuvar en la enseñanza, no sólo de los conceptos teóricos estructurales, sino también de los conocimientos sobre sistemas de estructuras, su morfología, comportamiento y su aplicación en proyectos arquitectónicos. Uno de los métodos es el cualitativo-conceptual, el cual permite, a través de la experimentación con modelos (físicos o digitales), desarrollar el pensamiento intuitivo y racional del alumno de arquitectura.

Este método de hecho no es nuevo; Mario Salvadori, profesor de estructuras arquitectónicas en la Universidad de Princeton y de Columbia, en los años sesenta, fue uno de los primeros especialistas contemporáneos en exponer una manera diferente de enseñar la teoría estructural, basándose en el desarrollo intuitivo.

Así como Salvadori, a lo largo de los años, otros arquitectos, ingenieros, profesores y autores de reconocidos libros relacionados con la enseñanza de estructuras han armonizado con la misma idea cualitativa respecto a la enseñanza de estructuras, pero sin olvidarse del empleo de fórmulas matemáticas y de métodos de análisis y cálculo estructural, lo cual significa que el método cualitativo sólo debe ser el prerequisite al estudio cuantitativo.

De acuerdo con esta idea, se recomienda utilizar el método cualitativo como complemento del tradicional método cuantitativo en las primeras etapas del proceso proyectual.



Figura 2. Ejemplos de libros relacionados con la enseñanza de sistemas estructurales



Figura 3. Galileo Galilei. Dibujo que muestra un modelo físico de un voladizo  
Tomada de: [www.goo.gl/wNtOii](http://www.goo.gl/wNtOii)

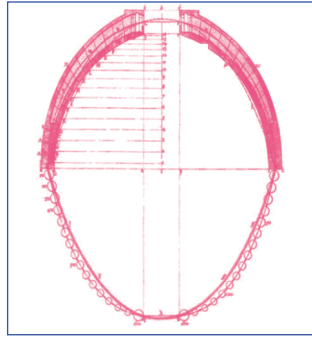


Figura 4. Modelo de cadenas colgantes de la Cúpula de San Pedro de Poleni  
Tomada de: [goo.gl/mHLomR](http://goo.gl/mHLomR)



Figura 5. Antonio Gaudí. Modelo físico de la Capilla de la Colonia Güell en Barcelona  
Tomada de: [www.goo.gl/k8XR0l](http://www.goo.gl/k8XR0l)

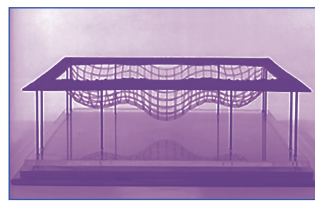
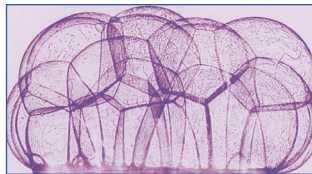


Figura 6. Frei Otto. Pompas de jabón y modelo físico de cadenas de suspensión  
Tomada de: [goo.gl/ZIEqy6](http://goo.gl/ZIEqy6)

Desde el surgimiento de la ingeniería estructural, cuyo pionero fue Galileo Galilei en 1638, pasando por Poleni, Antonio Gaudí, Frei Otto y Halppod, los modelos físicos han sido empleados para la investigación y experimentación de la optimización estructural; esto se ha llevado también al ámbito educativo.

Hoy día, por ejemplo en la Ciudad de México existen diversos laboratorios en modelos estructurales en universidades como la UNAM y la UAM Azcapotzalco. Desde mi perspectiva, estas propuestas no son suficientes para un completo entendimiento del fenómeno estructural,

sobre todo en sus diversas tipologías.

Una de las razones es que el alumno depende del tiempo asignado a las prácticas de laboratorio. Otra razón es que no se cuenta con un número suficiente de modelos físicos o aparatos que permitan experimentar con los diferentes elementos y sistemas estructurales.

Como complemento al modelo físico, se tiene el modelo digital, empleado en el ámbito profesional desde hace años por ingenieros, arquitectos y firmas de renombre como Ove Arup. En este caso, el objetivo educativo es similar al modelo físico: mediante modelos simplificados, buscar entender el comportamiento de las estructuras ante diferentes condicionantes que se presentan en el mundo real; además de explorar y experimentar con distintas alternativas de diseño tanto arquitectónicas como estructurales, permitiendo con esto, extraer conclusiones o realizar predicciones, llegando así, a una solución óptima del objeto diseñado.

La diferencia radica principalmente en que los modelos digitales están codificados en bits (cifras), por lo que permite su manipulación informática. Esto brinda algunas ventajas con respecto a los modelos físicos como la posibilidad de que el alumno administre su tiempo para realizar la experimentación sin depender, para ello, de espacios, modelos y aparatos especializados; poder repetir, en condiciones idénticas y a partir de su modelación, procesos y fenómenos que son difíciles de lograr en condiciones reales; disminuir riesgos y costos (en tiempo y dinero) que siempre se presentan en la interacción con la realidad, principalmente cuando se habla de modelos a escala real.

Los modelos digitales presentan también algunas desventajas como no tener el suficiente conocimiento en la teoría

que soporta los softwares en cuestión y realizar interpretaciones erróneas de los resultados, así como no conocer la interfaz de los softwares lo suficiente.

En el ámbito educativo, estas desventajas se pueden resolver si el profesor o instructor cuenta con el conocimiento teórico estructural, elige los softwares más adecuados de acuerdo con los alcances que se presentan en los programas de estudio, conoce la arquitectura con la que diseñaron los softwares elegidos, aplica una metodología idónea y crea modelos experimentales adecuados que permitan cumplir con el objetivo de que los alumnos comprendan el comportamiento del fenómeno estructural arquitectónico.

Además de estas desventajas, otro problema, que en lo particular he detectado al aplicar el método cualitativo mediante modelos digitales, es no contar con programas computacionales que sean accesibles económicamente, tanto para el alumno como para el profesor, e inclusive para la propia institución educativa.

A este respecto, existe una gran variedad de licencias para softwares (CAE), que van desde las llamadas *open source* (código abierto) hasta el software libre o software de propietario. También algunas empre-

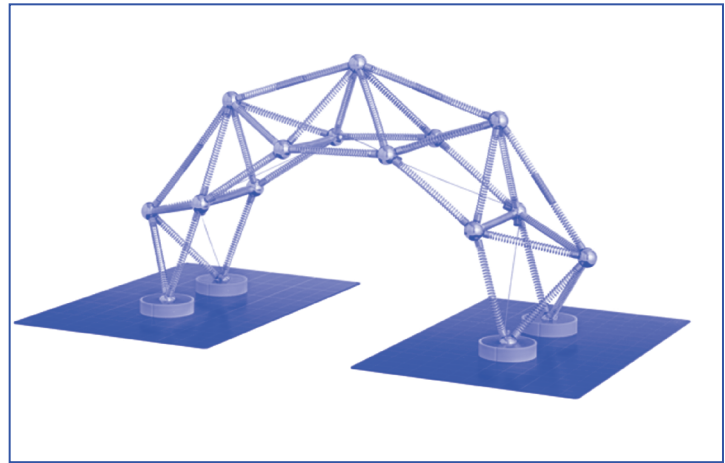


Figura 7. MOLA. Kit de modelo físico. [www.goo.gl/3h2u6b](http://www.goo.gl/3h2u6b)  
Realizado por Marco Oliviera

sas o instituciones cuentan con licencias académicas.

Para una correcta elección de los programas computacionales que serán utilizados en el proceso de enseñanza aprendizaje de estructuras es necesario percibir que no sólo el aspecto económico es importante, también se deben tomar en cuenta (principalmente por los profesores o instructores) los siguientes aspectos:

En primer lugar, al generar el modelado del o de los sistemas estructurales, principalmente en 3D, éste debe ser compatible entre los mismos softwares CAE,

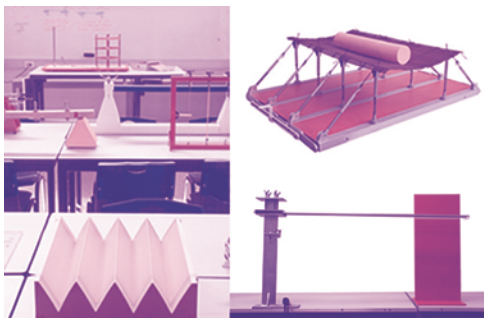


Figura 8. Laboratorio de Modelos estructurales CyAD Azcapotzalco. Modelos físicos y prototipos de diversos sistemas estructurales.

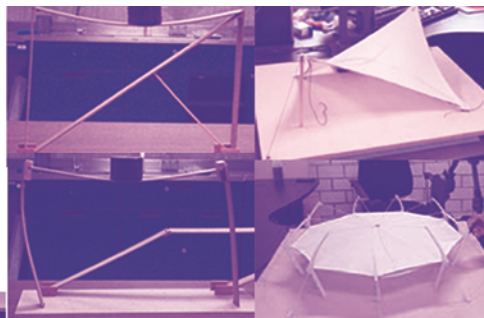


Figura 9. LAVSIMADI.-CyAD Xochimilco. Modelos físicos: marco rígido y tensoestructuras

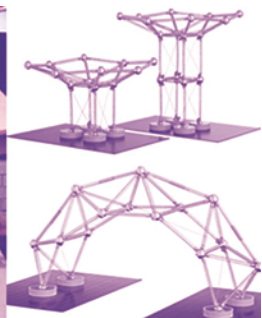
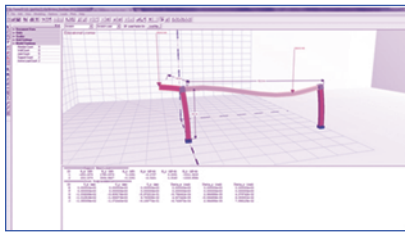
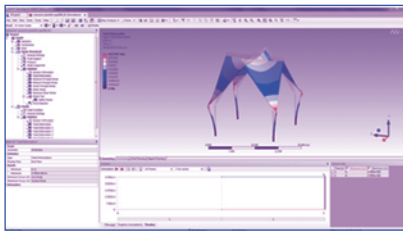


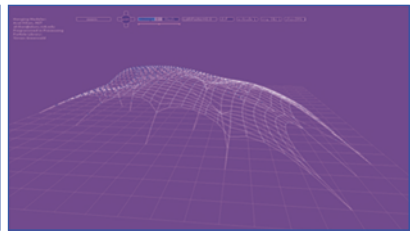
Figura 10. Kit de modelo físico estructural - MOLA de Marco Oliviera.



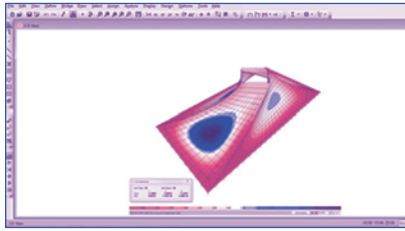
Dr. Frame 3D®



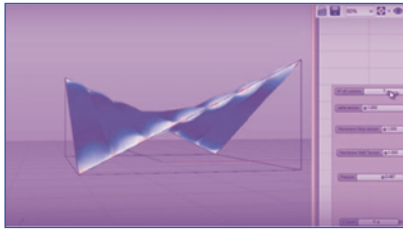
Ansys WorkBench®



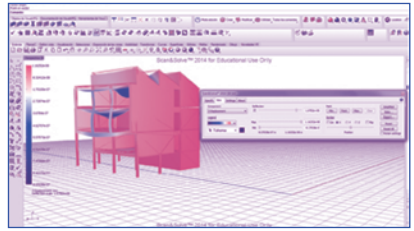
Cadenary®



SAP 2000®



Rhinomembrane®



Scan & Solve®

Figura 11. Modelos digitales de diversos sistemas estructurales mediante software CAE

softwares CAD o softwares de otro tipo como los de análisis bioclimático, ya sea de forma unidireccional, bidireccional (software BIM) o *roundtrip* (flujo de trabajo de ida y vuelta).

**La simulación no pretende reemplazar las pruebas físicas de los prototipos**

En segundo, definir los datos de entrada (conocidos como condiciones de frontera) como pueden ser las condiciones de apoyo, las fuerzas (cargas) actuantes, los materiales por utilizar, incluyendo las propiedades mecánicas y geométricas de éstos, considerando para esto, los principios de comportamiento de cada sistema estructural elegido. En tercero, definir el tipo de análisis del

modelo por experimentar. En cuarto, contar con una interfaz gráfica amigable y de fácil aprendizaje donde se visualicen e interpreten los resultados en tiempo real o retardado, fijo o animado, mediante colores falsos o gráficas de esfuerzo. En el caso de llevar a cabo el diseño estructural (concreto armado, acero, madera, mampostería, entre otros), es necesario que los softwares CAE manejen la normatividad existente en nuestro país o, al menos, alguno similar.

Como conclusión, a pesar de las ventajas que presentan los modelos digitales sobre los modelos físicos, es conveniente estar consciente que la simulación mediante modelos digitales (simulación infográfica) no pretende reemplazar las pruebas físicas de los prototipos que se requieren para validar cualquier diseño; por el contrario, ambos modelos, junto con los conocimientos matemáticos, se deben complementar para un mejor entendimiento del fenómeno estructural. ➤