

## LA ENSEÑANZA CONTEMPORÁNEA DE ESTRUCTURAS TRACCIONADAS

### Caso de estudio: Carrera de Arquitectura. UAM-X<sup>i</sup>

Ing. Pedro Jesús Villanueva Ramírez

Arq. Alfredo Flores Pérez

Mtro. Arturo Mercado Escutia

Profesores investigadores del Depto. de Tecnología y producción

CyAD, UAM-X. México.

e-mail: pedroj\_villanueva@yahoo.com.mx

aflorep@hotmail.com

arturo\_merc@prodigy.net.m

DI. Diemel Hernández Unzueta

Ayudante de investigador del Depto. de Tecnología y producción

diemel@gmail.com

### Introducción

Hoy día, la aparición de tecnologías computacionales, cada vez más avanzadas, utilizadas como herramientas de generación, análisis, cálculo y simulación infográfica, así como el desarrollo tecnológico de nuevos materiales y la innovación de procesos constructivos, han permitido a los ingenieros, especialistas y diseñadores en general, una mejor comprensión morfológica de la estructura formal arquitectónica, dando lugar a una revolución morfogénica arquitectónica real. Tal es el caso de las tenso-estructuras (estructuras de forma activa<sup>ii</sup>) que se valen de su geometría, anticlástica mecánicamente pretensada o sinclástica neumáticamente tensionada, para reducir la dimensión seccional resistente a la mínima compatible con su función<sup>iii</sup>.

Sin embargo el logro obtenido, gracias en gran parte al soporte de las tecnologías computacionales, en el ámbito profesional en lo referente al diseño y construcción de las estructuras arquitectónicas, particularmente las tenso-estructuras, no se ha llevado por igual en el campo didáctico de la enseñanza de la arquitectura en México. De hecho existen contados programas académicos dedicados al estudio de la morfología de estructuras ligeras como el prestigiado seminario de investigación permanente sobre geometría estructural<sup>iv</sup> que se lleva a cabo en el laboratorio de estructuras del Centro de Investigaciones y estudios de Posgrado de la Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México bajo la dirección del Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas, sucesor del Arq. José Luis Mirafuentes quien inicio con el Laboratorio en los años 60, o el laboratorio de modelos estructurales de la División de Ciencias y Artes para el Diseño de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco cuyo pionero fue el Arq. Francisco Montero.

La Unidad Xochimilco no fue la excepción en aplicar y enseñar estos sistemas estructurales, siendo el Mtro. Arturo Mercado Escutia, pupilo del Arq. Mirafuentes Galván quien lo implemento dentro de la currícula de la licenciatura de arquitectura a través de la creación del laboratorio de modelos físicos<sup>v</sup> a principio de los 80.

### Antecedentes

La División de Ciencias y Artes para el Diseño (CyAD) de la UAM-X, adoptando la misma metodología de enseñanza aprendizaje conocida como Sistema Modular que estableció desde sus inicios (1974) la propia Unidad con las otras Divisiones académicas que la constituyen (CBS y CSH<sup>vi</sup>), construye su modelo educativo tomando el proceso de diseño como la estructura medular que ordena a los departamentos de investigación, así como las unidades de enseñanza-aprendizaje (UEA) de los diseños. De esta manera la licenciatura de Arquitectura toma como objeto de estudio el espacio habitable lo que deriva en ciertas disciplinas que permiten su conocimiento, manipulación y corrección<sup>vii</sup>. Para cumplir con esto se crea el Taller Modular el cual "funge como centro organizador de recursos y actividades e indicador

de conocimientos y habilidades, actitudes y aptitudes; se utiliza como recurso educativo el objeto de diseño que se deriva de los problemas eje, y que al contemplarse en toda su amplitud, se convierten en objetos de transformación”<sup>viii</sup>

En este taller convergen las tres especialidades principales que comprenden cada módulo de la carrera: Diseño, Teoría y Tecnología (figura 1) las cuales deben integrarse adecuadamente para solucionar el problema eje dado por el objeto de transformación, buscando un desarrollo en la creatividad del estudiante a través de la vinculación de las cuatro funciones sustantivas que debe darse en el sistema modular: Investigación, docencia, servicio y difusión de la cultura.

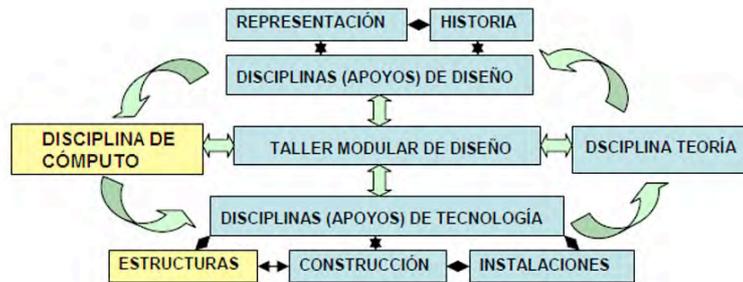


Figura 1: Las diferentes especialidades que constituyen el taller modular de diseño de la licenciatura de Arquitectura en la UAM-X.  
Fuente: Ing. Pedro Jesús Villanueva Ramírez

#### Estructura organizativa de la Licenciatura de Arquitectura, UAM-X

La estructura organizativa de la carrera de Arquitectura está dividida en doce módulos de estudio agrupados en tres niveles cuya duración es de cuatro años (3 trimestres por año).

El primer nivel, conocido como tronco general, comprende el tronco interdivisional –TID- (módulo I) donde se mezclan todas las disciplinas (licenciaturas) que comprenden las tres divisiones de la UAM-X y el tronco divisional –TD- (módulos II y III) donde se concentran exclusivamente las licenciaturas de la División de CyAD (Diseño de la Comunicación Gráfica, Diseño Industrial, Planeación Territorial y Arquitectura). En estos dos módulos, con una duración de 1 año escolar, el alumno incorpora los conocimientos generales del diseño y sus campos de aplicación; adquiere destrezas y desarrolla actitudes de trabajo esenciales para el correcto abordaje de los problemas de los espacios arquitectónicos y urbanos.

El segundo nivel, con duración de 2 años escolares, ya dentro de la licenciatura de Arquitectura, está formado por los módulos IV, V, VI, VII, VIII y IX y se le conoce como tronco básico profesional –TBP-, En cada uno de estos 6 módulos el alumno realiza una investigación que constituye el eje del trabajo modular. Esto le permite desarrollar una gran capacidad para el análisis crítico, el planteamiento de soluciones y la aplicación práctica de las mismas.

Por último, el tercer nivel se conoce como tronco (área) de concentración –TC- y está constituido por los últimos tres módulos de la carrera (X, XI y XII) y cuya duración es de un año escolar. En el módulo X se analiza y estudia las técnicas y métodos, así como la reglamentación que incide en el diseño urbano y su interrelación con el diseño arquitectónico. El módulo XI cubre el estudio particular de las posibilidades de la reutilización de edificios y entornos preexistentes.

En el módulo XII se realiza un estudio más profundo relacionado al diseño del equipamiento urbano.

Programa de estudios de la de la Licenciatura de Arquitectura, UAM-X (1994)

Desde el punto de vista de los contenidos sintéticos de las UEA, el apoyo de estructuras cubre prácticamente los tópicos teóricos más importantes, que manejan, al menos, las instituciones de educación superior (IES) analizadas.

En el módulo IV se estudia la estática con los temas: Comportamiento de las estructuras isostáticas y Equilibrio de las estructuras y propiedades de las secciones.

En el módulo V se estudia el tema de Resistencia de materiales, sus conceptos, carga axial y esfuerzos internos.

En el módulo VI se estudian los temas de predimensionamiento y diseño de secciones, los criterios básicos para el diseño estructural y las diferentes alternativas de estructuración y sistemas constructivos; columnas, trabes, entrepisos, techumbres y cubiertas.

En los módulos VII y VIII respectivamente se inicia con el estudio de los sistemas estructurales tradicionales como los marcos rígidos, en concreto armado y acero y sistemas basados en muros de mampostería, así como el sistema de cimentaciones.

En el módulo IX, el tema de estructuras a estudiar queda supeditado al proyecto arquitectónico y sistema constructivo, de tal suerte que se pueden estudiar diversos sistemas estructurales.

En el módulo X el curso de estructuras no es considerado oficialmente dentro de la curricula de la licenciatura, y, aunque el programa de estudios indica la introducción al estudio de los criterios generales del diseño urbano; este mismo tema se toca nuevamente en el módulo XII.

El módulo XI se analiza las posibilidades de reutilización de edificios y entornos pre-existentes, por lo que el apoyo de estructuras hace énfasis en el estudio de métodos apropiados de diseño de este tipo de edificación.

Por último en el módulo XII, se estudia el diseño estructural para el equipamiento urbano.

### **Planteamiento del problema**

Como se observa en este análisis los tópicos estructurales son generales, abiertos y flexibles, adecuándose al objeto de transformación que se estudie en el taller de diseño. Esto tiene como ventaja incluir el estudio de los diversos sistemas estructurales en cualquiera de los módulos del tronco básico o de concentración. En particular, la UEA "Desarrollo de espacios arquitectónicos I" del módulo X se presta para hacer la inclusión de los sistemas estructurales de forma activa ya que es un sistema muy socorrido para el complemento de estructuras existentes que por su un valor patrimonial no pueden ser modificadas o alteradas.

Sin embargo, se presenta una gran desventaja en los cursos de estructuras, incluyendo lo referente a los sistemas estructurales de membrana flexible pretensada, los conceptos estructurales se enseñan vía un soporte cuantitativo-matemático (fórmulas matemáticas) que hoy en día resultan poco atractivos para los estudiantes de Arquitectura, debido principalmente a su falta de formación en tópicos matemáticos. Sí a esto le añadimos la mínima o casi nula vinculación con la realización de modelos físicos, los cuales, la mayoría de las veces, terminan siendo simples maquetas que resaltan solo los aspectos estéticos del proyecto arquitectónico en estudio, el resultado

es una formación limitada respecto al conocimiento del comportamiento estructural y su aplicación al proyecto arquitectónico, a pesar de contar con los laboratorios de materiales y modelos, respectivamente.

### **Propuesta**

Una solución al problema anteriormente descrito, objeto de este trabajo, se encuentra en el empleo de las herramientas computacionales, como un instrumento didáctico<sup>ix</sup> que permita al estudiante saber cómo se generan las estructuras arquitectónicas a través de la experimentación y el descubrimiento. Para ello primero es necesario que el estudiante conozca como generar las formas sinclásticas y anticlásticas (form finding) lo cual se puede llevar a cabo mediante el empleo de la ingeniería inversa, la fotogrametría digital o la generación de modelos tridimensionales computarizados a través de sistemas CAD y Plug-in's especializados en modelos estructurales membranales 3D. Segundo, el estudiante debe aprender a analizar y entender, en tiempo real, el comportamiento de los diferentes aspectos y conceptos que intervienen en la generación de las tenso-estructuras y otros elementos estructurales secundarios como postes, vigas, arcos o cables; esto se logra mediante la aplicación de la simulación infográfica basada en métodos analíticos de idealización de la geometría como el del elemento finito no lineal, el de densidad de fuerzas o el de relajación dinámico. Siguiendo estos dos pasos recursivamente, se privilegia el aprendizaje inductivo y por descubrimiento guiado. Por último, es necesario que los estudiantes conozcan las diversas maneras de la producción arquitectónica, así como los nuevos enfoques de pensamiento prospectivo referente a la gestión y colaboración de proyectos, a la sustentabilidad, el cuidado del medio ambiente y el uso y manejo de enotecnias. Este punto se puede lograr con el auxilio, tanto de tecnologías digitales CAM, como de gestión tecnológica y de estudio medioambiental.

La integración de estos tres pasos coadyuvará a los estudiantes a aprender el cómo hacer y concebir la nueva arquitectura, sin olvidar, claro esta, del concepto cronotopos<sup>x</sup> – La arquitectura se da como un instrumento cultural en un tiempo y lugar específico.

### **Metodología**

En un esquema educativo en el cual los factores limitantes como temporales, espaciales, económicos, de seguridad, entre otros, juegan un papel importante, el manejo de modelos físicos como instrumento didáctico resulta insuficiente por lo que es necesario buscar nuevas estrategias y recursos didácticos que faciliten y optimicen la instrucción de la asignatura de estructuras que involucren tanto los aspectos teóricos como prácticos.

En este punto, como ya se comento, la instrumentación de las nuevas tecnologías digitales juegan un papel importante debido a que sus características se apegan, en gran medida a los planteamientos de la teoría constructivista del aprendizaje<sup>xi</sup>, base del sistema modular, la cual se fundamenta en una acción en donde el docente se convierte en un guía y mediador del proceso de enseñanza y aprendizaje, induciendo al alumno a aprender a través de la construcción orientada de su propio conocimiento aprovechando, para ello, sus capacidades creativas potenciales, trabajos colaborativos y activación de sus capacidades investigadoras. Este abordaje pedagógico, requiere de fuentes generosas de información, garantizadas hoy por los beneficios esperados de la utilización de los medios digitales en el proceso educativo, sobre todo si consideramos la necesidad de una trasmisión de la información con un fuerte contenido textual, pero sobre todo visual (fijo o dinámico). Es en este punto donde la teoría del Construccinismo, desarrollada por Seymour Papert, toma una gran valía, ya que su teoría, basada en la teoría del constructivismo de Piaget y Viwosky, hace énfasis en el manejo de la tecnologías; esto es, el arte de aprender o de aprender a

aprender, utilizando la tecnología y en la importancia de hacer cosas para aprender. “Para Papert la proyección de la intuición y de las ideas resulta ser una parte importante para el aprendizaje”<sup>xii</sup>.

En el curso convergen los apoyos (asignaturas) de estructuras y computación con un total de 6 horas por semana. Si consideramos que el curso es trimestral (11 semanas más la semana de evaluación), estaríamos hablando de un total de 66 horas/trimestre de duración.

Los pasos que se siguen dentro de la metodología son:

1. Generación de la forma (form finding) de la membrana pretensada. En este paso se emplean diversos métodos para determinar la forma de una velaría. Para ello se parte de dividirlos en tres grupos o subsistemas:
  - a. Tipo cono de casquete, anillo, ojo o paracaídas
  - b. Parabolooides hiperbólicos (hypars) o de silla de montar
  - c. Con Arcos de compresión: Dos arcos paralelos, Un arco central o arcos con inclinación alternada.

Para determinar su forma, se utilizan diferentes herramientas computacionales con la finalidad de que el alumno de arquitectura aprenda que el comportamiento estructural de una membrana de tela pretensada se logra a través de diseñar su forma, lo que coadyuva a mejorar su creatividad y razonamiento.

2. Análisis de la morfología obtenida. En este punto se emplean software especializado, ya sea dedicado exclusivamente al diseño y análisis de estructuras membranales flexibles, basados en cualquiera de los métodos: de densidad de fuerzas o Relajación dinámica, o mediante el empleo de un software de análisis estructural genérico basado en el método del elemento finito.
3. A través de la inducción y el descubrimiento guiado se asegura al estudiante una retroalimentación del conocimiento.

Las técnicas, herramientas (hardware y software), así como los alcances logrados se indican en la tabla 2:

Técnica	Hardware	Software	Alcances
Tradicional con modelos físicos.	Escáner 3D de puntos, Modelo físico, PC.	CAD 3D	Se utiliza para idealizar parcialmente la idea tridimensional en la fase del diseño conceptual. La búsqueda de la superficie mínima en este punto no es importante. Sin embargo el estudiante empieza a entender la importancia del concepto de pretensado.
Ingeniería inversa (Figuras 2, 3 y 4).	Cámara Reflex Digital, Modelo físico, PC.	Software de fotogrametría y CAD 3D	Una vez encontrado la forma óptima de la membrana idealizada, las técnicas de ingeniería inversa, mediante el empleo de un escáner 3D, o de la fotogrametría, mediante un software especializado, permiten al estudiante, en primer lugar digitalizar el modelo físico, en segundo lugar, realizar adecuaciones de acuerdo al proyecto

			arquitectónico y, en tercer lugar, analizar estructuralmente el modelo virtual mediante algún software para tal fin.
Fotogrametría (Figura 5).	PC	Página Web: Membranes24.com	Esta técnica permite al estudiante, mediante biblioteca específica, enfrentarse al entendimiento del comportamiento estructural de las membranas, logrando, a través de la experimentación y exploración, permitiendo construir su propio conocimiento.
Plug in's (Figuras 6 y 7).	PC	CAD 3D y Plug-in's	El manejo de algún software CAD con herramientas de generación de superficie libre como el Rhino, permite al estudiante, una vez experimentado con alguna de las técnicas anteriores, descubrir nuevas formas de membranas que cumplan con la morfología estructural.
CAD.	PC	CAD 3D	
CAD Especializado (figura 8).	PC	Software especializado para generar la forma con membranas flexibles	Este tipo de software se recomienda utilizar en la última etapa del proceso de enseñanza-aprendizaje ya que por su nivel de especialización, el estudiante debe conocer un gran porcentaje de los conceptos estructurales, mismos que, en gran medida se basan en la teoría de membranas.  Además debe familiarizarse con la interface y el método de análisis a emplear: De densidad de fuerzas, Relajación dinámica o elementos finitos no-lineales. La gran ventaja que se tiene es que con ellos se puede llevar a cabo todo el proceso de proyectuación de la estructura membranal, desde su concepción, hasta obtener su patrón de corte, pasando por el análisis estructural, incluyendo otros tipos de elementos como postes, vigas, cables de borde, así como las propiedades de los materiales de las telas a emplear (nailon, poliéster, vidrio, kevlar, entre otros).

Tabla 2. Técnicas, hardware, software, manejados en el curso de tenso-estructuras, así como los alcances a cubrir en cada técnica.



Figuras 2, 3 y 4. Se muestra el escaneado 3D por puntos del modelo físico de una velaría y el resultado de la superficie pretensada en el software Rhinoceros.  
Fuente: Ing. Pedro Jesús Villanueva Ramírez.



Figura 5. Muestra la interface del Software PhotoModeler Scanner con un proceso fotogramétrico de un modelo físico de una velaría.  
Fuente: Ing. Pedro Jesús Villanueva Ramírez.

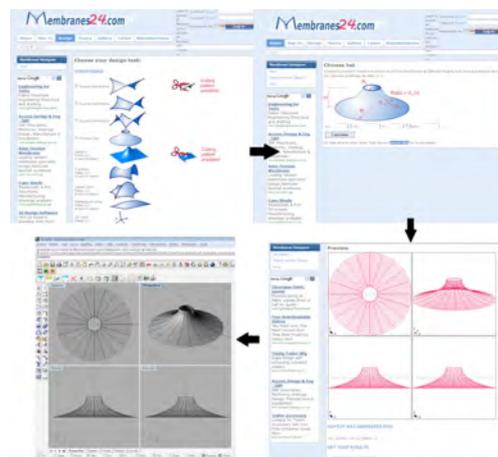


Figura 6: Muestra la herramienta Web Membranes24.com a través de uno de sus ejemplos de biblioteca (superficie tipo cono) y su resultado final en el software Rhinoceros. Cabe decir que dicha superficie tiene considerados los parámetros de tracción ( $r = \sigma_m / \sigma_t$ ).  
Fuente: [www.membranes24.com](http://www.membranes24.com) e interface del software Rhinoceros

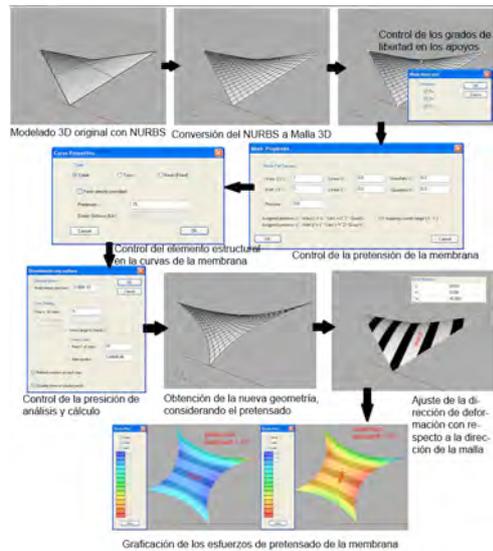


Figura 7. Proceso de generación de una membrana traccionada con el plug-in Rhino Membrane.

Fuente: Ing. Pedro Jesús Villanueva Ramírez.

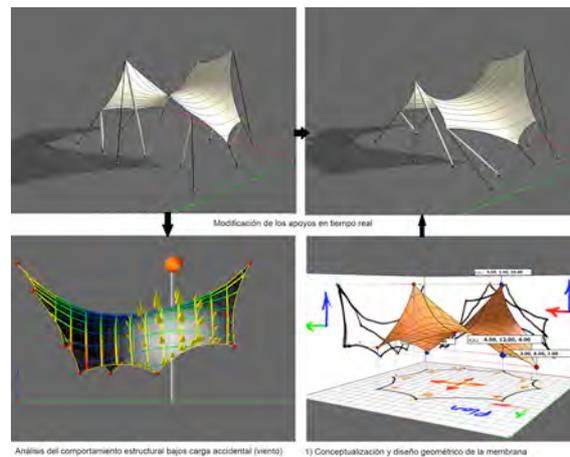


Figura 8. Muestra la manera en que trabaja el software Tess 3D (trial)

Fuente: Ing. Pedro Jesús Villanueva Ramírez.

## Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología didáctica para la enseñanza-aprendizaje del diseño de estructuras de membranas traccionadas flexibles a través del empleo de herramientas computacionales, metodología ya experimentada en los cursos de apoyo de estructuras y cómputo en la carrera de Arquitectura (módulo X) durante 2009 y 2010.

Como se ha podido constatar a lo largo de este trabajo, las tecnologías por sí mismas no tienen la capacidad de modificar y mejorar la calidad de la enseñanza del diseño estructural y arquitectónico, sin embargo si son conducidas y atendidas adecuadamente dentro del contexto metodológico didáctico podrían coadyuvar a mejorar sustancialmente el nivel cognoscitivo de los estudiantes de la licenciatura de Arquitectura. Es en este punto donde la tecnología computacional, con su lenguaje

visual, ayudaría a solucionar el bloque existente en el proceso de enseñanza y aprendizaje de las estructuras arquitectónicas, esto es, entre el diseño arquitectónico y diseño estructural, sobre todo en lo referente al manejo de sistemas estructurales del tipo velarías, que hoy día, son un referente para los diseñadores, ingenieros y arquitectos que buscan constantemente diseñar espacios destinados a proporcionar un grado de confort, funcionalidad y estética, además de buscar la protección de condicionantes climáticos y de seguridad estructural óptima, la cual se logra gracias su resistencia formal y ahorro de material.

## **Bibliografía**

- Branko Kolarevic, *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Editorial Taylor & Francis; Idioma inglés. 2003.
- Farshid Moussavi. *The Function of Form*. Actar and Harvard Graduate School of Design. Idioma inglés.
- Martin Bechthold. *Innovative Surface Structures: Technologies and Applications*. Editorial Taylor & Francis. ; Idioma inglés. 2008.
- Helmut Pottmann, Andreas Asperl, Michael Hofer, and Axel Kilian. *Architectural Geometry*. Editorial Bentley Institute Press. Idioma inglés. 2007.
- Pagina web: [www.membranes24.com](http://www.membranes24.com)®.
- Manuales de usuario de los software: Rhinoceros®, RhinoMembrane®, Autocad®, PhotoModeler®.
- Video de demostración del software Tess 3D (trial) ®.

## **Referencias**

---

<sup>i</sup> Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco.

<sup>ii</sup> Término acuñado por Heino Engel en su libro *Sistemas de Estructuras*". Editorial Gustavo Gili. Barcelona.

<sup>iii</sup> Martin Bechthold. *Innovative Surface Structures (technologies and applications)*. p. 48.

<sup>iv</sup> Actualmente este seminario se llama mecametría –concepto acuñado por el Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas– que implica la mecánica y la geometría aplicadas al diseño arquitectónico y estructural.  
<http://www.100.unam.mx/images/stories/universitarios/dhc/PDF/oliva-salinas-juan-gerardo.pdf>. El documento fue consultado el 30 de octubre de 2010.

<sup>v</sup> Desafortunadamente y por cuestiones ajenas a las académicas el laboratorio de modelos lleva varios años sin funcionar. Actualmente se esta trabajando en los mecanismos y estrategias idóneas que permitan restablecerlo.

<sup>vi</sup> División de Ciencias Sociales y Humanidades y División de Ciencias Biológicas y de la Salud

---

<sup>vii</sup> Programas de Estudio de la Licenciatura en Arquitectura. CyAD, UAM-X., p.p. 8.

<sup>viii</sup> Ibid., p.p. 13.

<sup>ix</sup> Estas herramientas computacionales y digitales se emplean dentro de las asignaturas (apoyos) de computación y estructuras de la licenciatura de arquitectura.

<sup>x</sup> Este concepto es mencionado y analizado por el Arq. José Villagrán García en su libro Teoría de la Arquitectura. UNAM. México., 1989.

<sup>xi</sup> Harper, B. D. Squires and A. McDougall, "Constructivist Simulations: A New Design Paradigm", en Journal of Educational Multimedia and Hypermedia, 2000, pp. 115-130.

<sup>xii</sup> Zaldívar Colado Xiomara P. y otros autores. Enseñanza y Tecnología, un enfoque Papertiano. Facultad de Informática Mazatlán – Universidad Autónoma de Sinaloa. Mazatlán, México., p.p. 4. Documento electrónico (PDF) consultado el 1 de noviembre de 2010.