

Emociones precisas: fabricación digital en la enseñanza de la arquitectura

Precise emotions: Digital fabrication in the teaching of architecture

Rodrigo García Alvarado

rgarcia@ubiobio.cl

Universidad del Bio-Bio. Avda. Collao 1202, Concepción, Chile

Rodrigo Lagos

rlagos@ubiobio.cl

Universidad del Bio-Bio, Avda. Collao 1202, Concepción, Chile

Pedro Salcedo

psalcedo@udec.cl

Universidad de Concepción. Victor Lamas 1290, Concepción, Chile

Mario Ramos

mramos@ubiobio.cl

Universidad del Bio-Bio, Avda. Collao 1202, Concepción, Chile

Claudio Labarca

clabarca@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile. El Comendador 1916, Santiago, Chile

Underlea Bruscato

bruscatop@unisinis.br

Unisinis. Avda. Unisinis 950, 93022-000, Sao Leopoldo, RS, Brasil

Resumen

La formación arquitectónica debe desarrollar habilidades técnicas y estéticas para realizar proyectos de construcción. Las nuevas máquinas de fabricación digital permiten elaborar modelos materiales de los diseños, así como elementos constructivos industrializados, generando nuevas capacidades que deben ser adecuadamente integradas en la enseñanza profesional. El artículo analiza implicancias de estas tecnologías en la formación arquitectónica basado en siete experiencias educativas. Se describen brevemente actividades realizadas en instituciones de Chile, Brasil y Argentina, con distintos equipamientos, duraciones y contenidos, revisando su contribución en el aprendizaje de aspectos constructivos y la vinculación con la enseñanza de proyectos, la motivación y creatividad. Se identifica la influencia de estas tecnologías en la comprensión material y en las lógicas de diseño, que evolucionan del desarrollo de formas globales a sistemas de ejecución, modificando la condición cognitiva de los proyectos. Además se revisa su proyección industrial y social, ya que la automatización de la construcción generan transformaciones productivas. Se plantea finalmente que estos nuevos recursos obligan a revisar la acción profesional y educativa

Abstract

Architectural education must develop technical and aesthetic skills in order to elaborate constructions projects. New digital manufacturing machines allow to the creation of material models, as well as industrialized components creating new capabilities that must be properly integrated into professional teaching. This article discusses the implications of these technologies in the architectural education based on seven academic experiences. The activities were guided by authors in different institutions in Chile, Brazil and Argentina, with different equipments, extensions and contents. These experiments contributed to the learning of constructive subjects, and the relationship of design teaching, motivation and creativity. This study detected the influences of these technologies in the material understanding and design logic, that evolve from the development of global shapes to constructive systems, changing the cognitive condition of design. This article also discusses the industrial and social projection of these technologies in building, since they encourage automation in construction generating productive changes. Finally, it states that these new resources promote a review the work and educational activity in architecture, and motivating a more precise elaboration of design's qualities.

en arquitectura, motivando una elaboración más precisa de las cualidades del diseño.

Palabras clave: proyecto, enseñanza de la arquitectura, fabricación digital.

Key words: project, architectural education, digital manufacturing.

Introducción

La enseñanza de la arquitectura debe formar profesionales para el desarrollo de proyectos de construcción, en una situación de crecientes cambios tecnológicos, sociales y ambientales. Debe otorgar capacidades creativas y sensibles, conjuntamente con conocimientos prácticos para la ejecución de edificios (Sola-Morales *et al.*, 2000), desarrollando de manera integrada habilidades técnicas y estéticas. Lo que se aborda tradicionalmente a través de talleres de proyectos y asignaturas teóricas, que plantean el diseño de edificios y sus condiciones técnicas y culturales.

Las nuevas máquinas de fabricación digital permiten realizar objetos físicos directamente a partir de diseños computacionales, ya sea modelos de prueba o elementos definitivos. Esto otorga nuevas modalidades de estudio y ejecución material para los proyectos de arquitectura e ingeniería. Diversas experiencias han demostrado potencialidades de la fabricación digital en el trabajo arquitectónico (Stacey, 2004; Afify y Elghaffar, 2007; Gramazio y Kohler, 2008), sugiriendo nuevas posibilidades de diseño y producción material. También se han realizado actividades en la formación profesional (Daubmann, 2004; Boza, 2006; Kotsoupulos y Sass, 2008), que han logrado resultados innovadores pero también revelan diversas dificultades técnicas y pedagógicas. Se han sugerido procedimientos para implementar estas tecnologías en la enseñanza arquitectónica (Garber y Jabi, 2006; Celani y Pupo, 2008), pero no se han identificado estrategias para integrarlas, ni tampoco se han aclarado mayormente sus condiciones en el aprendizaje y la actividad profesional.

Las sistemas de fabricación digital consisten en equipos que reciben información geométrica desde un computador, elaborando elementos físicos por procedimientos sustractivos o aditivos (Seely, 2004). Los sistemas sustractivos extraen material por medio de fresas, cuchillos, láser o plasma, en mesas de trabajo con equipos deslizantes o brazos robóticos, ejecutando volúmenes rebajados o cortando elementos planos. Los sistemas aditivos solidifican material a partir de gases, líquidos o polvos, elaborando formas complejas, aunque normalmente en tamaños pequeños. Estos equipos se denominan generalmente máquinas CNC (Control Numérico por Computador), CAD/CAM (diseño y manufactura asistida por computador), RP (prototipo rápido), enrutadoras (routers), cortadoras o impresoras 3D. Se diferencian por sus magnitudes de trabajo (desde pequeñas máquinas de escritorio, hasta grandes sistemas industriales) y ejes de movimiento, como también por los materiales posibles de trabajar, las velocidades de operación y terminaciones.

Con estos equipos se pueden elaborar desde maquetas de estudio hasta elementos constructivos industrializados, aportando en diferentes aspectos. Los elementos pueden ser más rápidamente ejecutados, más precisos y/o variar durante su ejecución. Los modelos pueden apoyar la comprensión volumétrica del diseño y revisar propiedades de masa, textura, luminosidad y apariencia. También comprobar comportamientos estructurales, físicos, ambientales o constructivos. Se pueden realizar volúmenes completos, elementos parciales, soportantes o paramentos, estableciendo procesos de montaje y terminación. La fabricación digital requiere definir computacionalmente los trazados precisos de ejecución, como los acabados, soportes y acciones operativas (de ejecución, montaje, replicabilidad, etc), sugiriendo la

realización de elementos masivos, que se pueden componer y/o modificar diversamente, promoviendo una industrialización variable (Kieran y Timberlake, 2004). Por lo que la fabricación digital inspira una renovación en los procesos de diseño y construcción, considerando nuevas procesos de producción eficiente y diversa.

Este artículo, derivado del proyecto de investigación 1080328 del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico del Gobierno de Chile, resume algunas experiencias realizadas de fabricación digital en la enseñanza de arquitectura, con el fin de caracterizar procedimientos y condiciones, describiendo las actividades y discutiendo sus implicancias pedagógicas y productivas.

Experiencias

Se realizaron siete experiencias dirigidas por los autores en distintas instituciones de Chile, Argentina y Brasil. Las experiencias consistieron en actividades dentro de asignaturas, mayormente talleres de proyectos, o eventos especiales asociados a la formación arquitectónica. Las actividades abordaron distintos temas de trabajo, con diferentes duraciones y equipos.

La experiencia más extensa fue el "Taller de Ensamble Digital" realizado en la Escuela de Arquitectura de la Pontificia Universidad Católica de Chile, en cuatro oportunidades (primer y segundo semestre 2007, primer y segundo semestre 2008). Con aproximadamente 15 estudiantes de cuarto o quinto año cada vez, en quince semanas de duración con dos tardes de trabajo a la semana (aprox. 240 hrs. totales). Se abordó la prefabricación y manufactura digital, desarrollando como temas de cada semestre; un sistema constructivo, una ampliación de vivienda, un habitat mínimo o un refugio de montaña. Se realizó análisis de referencias, diseño y modelación digital, y fabricación de prototipos utilizando el laboratorio de producción digital de la PUC, que posee cortadoras láser, enrutadoras e impresoras 3D.

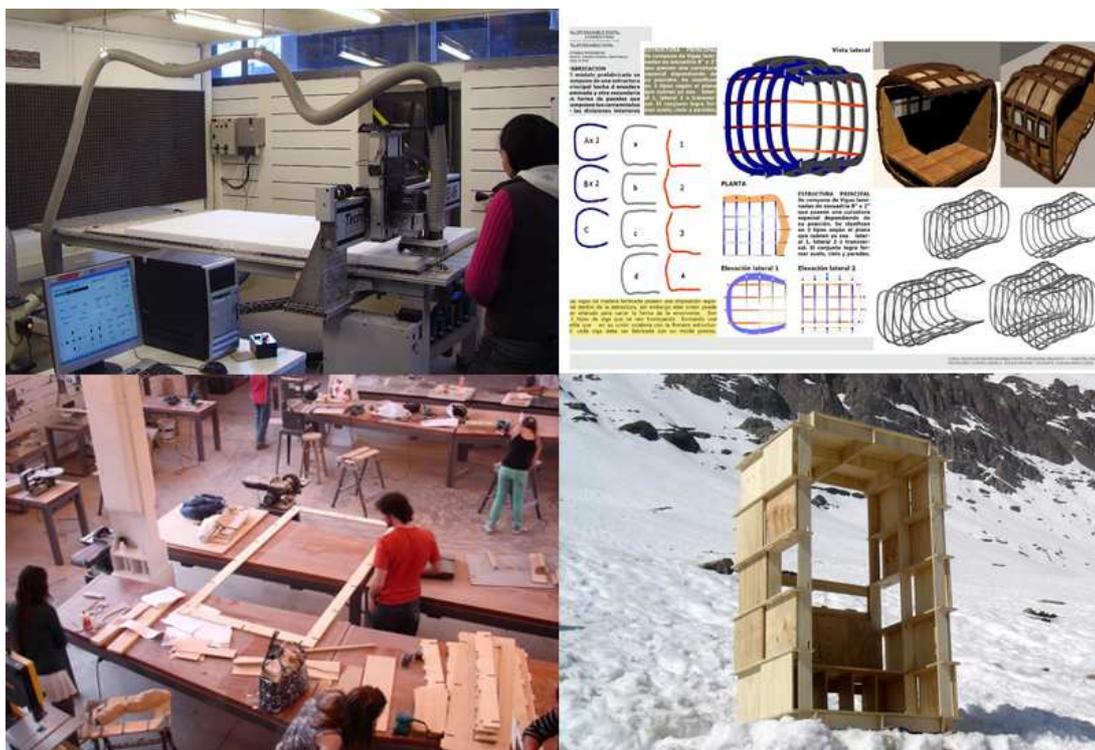


Figura 1. Taller Ensamble Digital (PUC, Chile, 2007-2008).
Figure 1. Studio Ensamble Digital (PUC, Chile, 2007-2008).

Se efectuó también una experiencia en una asignatura optativa de medios digitales en quinto año de la carrera de arquitectura de Universidad del Bio-Bio, el segundo semestre del 2008 con 25 alumnos. Se dedicó al diseño, modelación, ejecución y evaluación de una rejilla de protección solar (sombreadero) en parejas de alumnos, utilizando cortadora láser, además de mesa solar para pruebas de iluminación natural. Con una sesión a la semana mas trabajo personal (aprox. 80 hrs. totales).

Se realizó un curso especial a fines del 2008 en la carrera de arquitectura de la Universidad de Vale do Rio Sinos, Brasil, denominado "Workshop de Arquitectura y Fabricación Digital", con 20 participantes, incluyendo desde alumnos de primer año hasta profesionales titulados (mayormente estudiantes de cuarto y quinto año). Con veinte horas de duración continuada en tres días de trabajo, los primeros días en laboratorio de computadores y el ultimo día dentro de una industria manufacturera de placas de madera. Se efectuó el diseño, modelación y elaboración de un muro-mueble a escala real con máquinas cortadoras y enrutadoras, inicialmente en parejas, luego en grupos de 5 participantes.

En un taller de arquitectura de cuarto año de la Escuela de Arquitectura de la Universidad del Bio-Bio se realizo a mediados del 2008 un estudio de edificios en altura. La actividad involucró 25 estudiantes durante dos semanas (aprox. 20 hrs. totales), y consistió en la elaboración de modelos de edificios que se evaluaron ambientalmente en túnel de viento y mesa solar (heliódón). Los modelos fueron realizados por un técnico ayudante en fresadora, según formas geométricas básicas y réplicas de edificios existentes. Los estudiantes conocieron el proceso de fabricación y realizaron pruebas ambientales y estudio de alternativas.

También se elaboraron modelos finales de proyectos de título de la misma carrera con 12 alumnos correspondientes al sexto año. Se les ofreció realizar sus maquetas a través de la cortadora láser, implicando la interpretación constructiva, diseño de las piezas, elaboración y montaje de los modelos completos, con una duración general de tres a cuatro semanas cada uno (aprox. 80 horas totales).

El primer semestre del 2009 se efectuó en un taller de tercer año de arquitectura de la Universidad del Bio-Bio, la elaboración de modelos de estadios para rodeo (llamados "medialunas"). Con 21 alumnos en cuatro grupos que realizaron un registro fotográfico y planos de cuatro casos existentes, luego la re-interpretación constructiva, diseño de piezas y montaje, utilizando cortadora láser, con una dedicación de dos tardes a la semana durante tres meses (aprox. 120 hrs. totales).

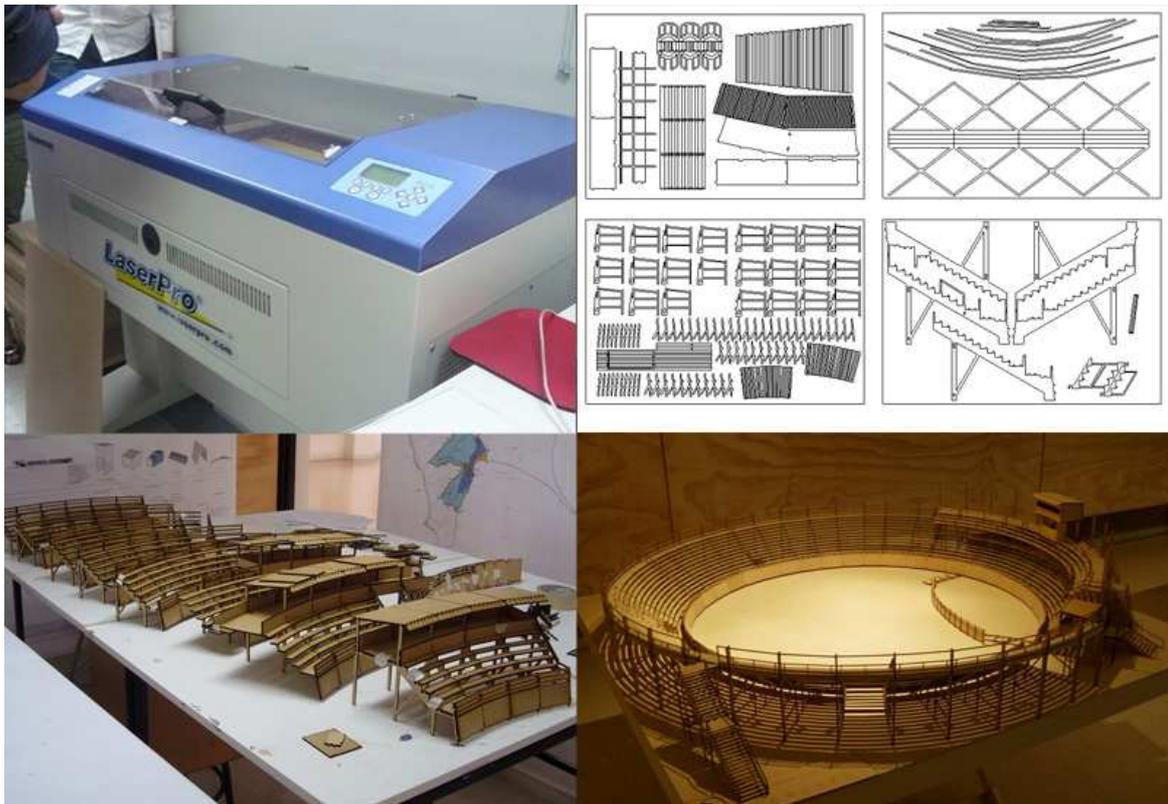


Figura 2. Ejercicio de estadios para rodeo (UBB, Chile, 2009).

Figure 2. Exercise of rodeo stadiums (UBB, Chile, 2009).

Finalmente se realizó un seminario para estudiantes de la “Maestría en Diseño de Procesos Innovativos” de la Universidad Católica de Córdoba en Argentina, a comienzos del año 2009. Con 25 profesionales durante tres días continuados (30 hrs.), se desarrolló una propuesta de diseño, modelos digitales y prototipos en cortadora láser y presentación final de un equipamiento urbano.

Estas experiencias fueron registradas y evaluadas de manera común en una plataforma virtual desarrollada con el software libre “moodle” e instalada en el dominio www.fabricacion_digital_arquitectura.com. Para la evaluación general se utilizó un cuestionario, aplicado luego de obtener consentimiento informado, revisando condiciones del aprendizaje basado en problemas (ABP) como marco conceptual para medir el proceso pedagógico, y aspectos constructivos como la contribución específica otorgada por la actividad. Además se recopilaron y revisaron algunos trabajos elaborados en las actividades. En una experiencia (curso optativo en la UBB) se registro todo el proceso de cada estudiante en la plataforma, y en otra experiencia (el taller de ensamble digital) se efectuó una revisión del desempeño curricular de los alumnos involucrados y entrevistas grupales.



*Figura 3. Workshop Arquitectura y Fabricación Digital (Unisinos, Brasil, 2008).
Figura 3. Workshop Architecture and Digital Fabrication (Unisinos, Brasil, 2008).*

Aprendizajes con fabricación digital

El aprendizaje basado en problemas (ABP) se utiliza frecuentemente en la formación arquitectónica, especialmente en el taller de proyectos. Como modalidad educativa se caracteriza por el enfrentamiento de desafíos similares al "mundo real", establecidos como contextos en los que los estudiantes desarrollan su capacidad crítica y de solución de problemas, al tiempo que adquieren los conceptos esenciales de un determinado ámbito de conocimiento (Sola, 2005). Al aplicar el ABP, los estudiantes adquieren aptitudes que perdurarán todas sus vidas, como la capacidad de encontrar y usar recursos apropiados, frecuentemente combinado con trabajo cooperativo-colaborativo cuando se abordan problemas complejos y variedad de recursos. Cuando se habla de aprendizaje colaborativo, se hace referencia a la formación de grupos de trabajo con objetivos de aprendizaje determinados y donde cada participante del grupo interviene en todas y en cada una de las partes del proyecto o problema. Para el caso del aprendizaje cooperativo, cada uno de los integrantes del grupo, tiene asignada una tarea específica dentro del proyecto o problema a resolver. De otra forma se puede decir que, cada participante realiza una tarea más individual como parte del trabajo total. La resolución de problemas, en el marco del trabajo en grupos cooperantes y colaborativos a través de la mediación tecnológica, permite a los estudiantes la construcción de sus aprendizajes, estimulando su creatividad (Álvarez *et al.*, 2004). De este modo, se espera formar profesionales capaces de desarrollar proyectos y por consiguiente de investigar, evaluar y resolver problemas.

En las experiencias realizadas, se aplicaron las tres técnicas mencionadas, que fueron evaluadas utilizando la plataforma virtual. Las actividades consideraron grupos colaborativos y cooperativos y se presentaron problemas reales sobre los cuales debieron trabajar los grupos. Utilizando foros de discusión y portafolios separados por grupos, fue posible evaluar el comportamiento de cada alumno, su participación y el interés a

través de las actividades en las que participaron. Finalmente, a través de una encuesta, fue posible revisar condiciones logradas al utilizar estas técnicas.

En la encuesta con los alumnos, se midieron fortalezas y debilidades según los principios de ABP y las técnicas cooperativas-colaborativas, utilizando 11 preguntas. Con un resultado medio positivo en todas las experiencias, valorando especialmente la aplicación de conocimientos previos e interacción en equipo, lo que refleja que lograron una fuerte vinculación pedagógica y social. Destaca también la motivación en el uso de la tecnología y la proyección de habilidades, lo que expresa un compromiso emocional. Sólo se produce una diferencia con el trabajo en equipo, débilmente valorado en los "proyectos de título" que son individuales y solo interactuaron con operadores y comparaciones con compañeros. En términos generales el "taller de ensamble digital" presenta el resultado más positivo (probablemente por su extensión y desarrollo de proyecto) y el "ejercicio de edificios en altura" el más bajo, siendo el más reducido y con menos diseño, ratificando esta condición de diferencia. En ese sentido, la evaluación demuestra una validación positiva de las experiencias en relación al aprendizaje basado en problemas, distinguiendo el desarrollo, interacción y aplicación tecnológica como factores contribuyentes.

Por otro lado, en 22 preguntas se midió la valoración del aprendizaje de aspectos constructivos, como comprensión de la materialidad, desempeño estructural, especificación técnica, comportamiento ambiental, ejecución, costos, manutención, innovación, prefabricación, etc. En esta evaluación también se observa una media positiva general, destacando el aprendizaje de la realidad material, desarrollo constructivo, posibilidades de prefabricación y condiciones estructurales básicas. Con un resultado débil en aspectos de costos, manutención y desempeño energético, es decir de comportamiento posterior de la obra. Presentando un perfil similar entre las distintas experiencias, con una comprensión valiosa, pero irregular de las condiciones constructivas, es decir con aspectos específicos que deben ser complementados.

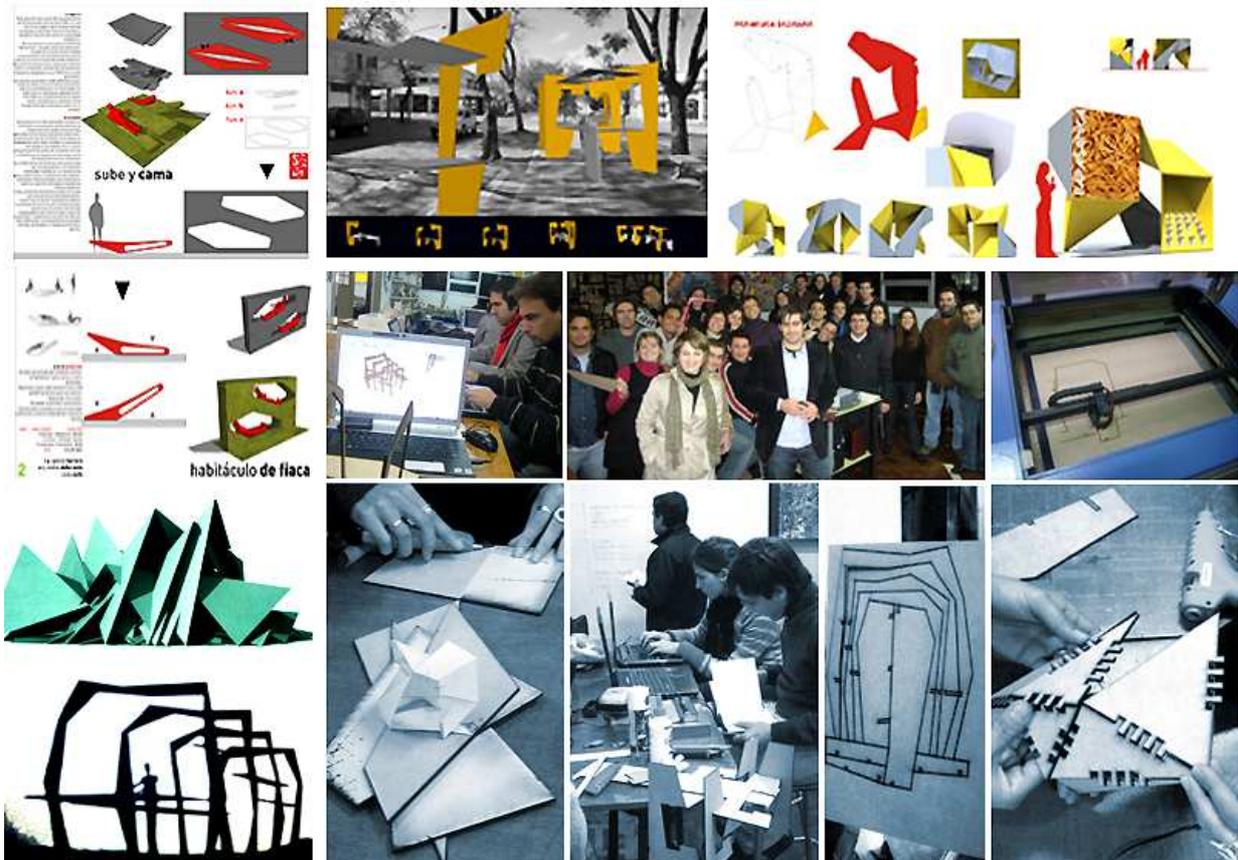
Al analizar el desempeño curricular de los alumnos en los talleres de ensamble digital, en base a sus calificaciones finales y correlacionándolas con sus notas con las asignaturas del área de edificación y estructuras se obtiene un valor de 0,06 (prácticamente nula), mientras con la asignaturas de taller es 0,41. Aunque es baja, en general posee una variación relevante en la trayectorias académicas de estas asignaturas, por lo que expresa una relación significativa. Esta vinculación revela que el desarrollo y resultados de aprendizaje en las experiencias están basados mayormente en sus capacidades aprendidas de diseño, que de conocimientos técnicos. Esto expresa el valor integrador de estas tecnologías, pero también su desvinculación con la enseñanza constructiva.

Finalmente, en la experiencia más extensa se efectuaron entrevistas grupales con docentes y alumnos, en Junio 2008 y Abril 2009, esta última grabada en audio y video, y conversaciones abiertas en relación a los aspectos consultados en el cuestionario, además de apreciaciones generales, las cuales concluyeron entre otros puntos que:

- la alta motivación de los estudiantes que, en muchos casos, les llevó a continuar estudios de postgrado en el área.
- los alumnos hacen notar que los conocimientos que vienen de antes, de otras asignaturas, son en su mayoría necesarios en esta asignatura al necesitar resolver problemas reales y prácticos.

- los docentes observan cómo el trabajo en equipo colaborativo se da en este taller, en la busca de soluciones en conjunto, para posteriormente pasar a un trabajo más individual en la implementación de cada solución.
- los alumnos colaboran en el aprendizaje de sus pares, son algunos los que se atreven en un principio a manejar las máquinas y muestran a sus compañeros.
- son los alumnos los que terminan conociendo mejor las máquinas, más que el profesor que muestra más "lo teórico". Muchos de ellos terminan siendo los ayudantes en estas asignaturas, justamente por el conocimiento que logran de las máquinas en lo práctico y en el trabajo día a día con sus compañeros.

Las experiencias más valoradas se caracterizan por elaborar proyectos integrales y aplicados, desarrollados de manera colectiva y alcanzando una alta motivación y comprensión constructiva. Elaborando propuestas innovadoras, con novedosos sistemas constructivos, funciones singulares y sugerentes resultados formales, a pesar de las restricciones materiales y operativas.



*Figura 4. Seminario Arquitectura y Proyecto Digital (UCC, Argentina, 2009).
Figura 4. Semminar Architecture and Digital Project (UCC, Argentina, 2009).*

Lógicas de diseño

Las tendencias que se advierten en el uso de los nuevos equipos de manufactura digital expresan una participación significativa en el proceso de aprendizaje y la elaboración del proyecto. Mas allá de representación física que pueden asumir, parecen ser una oportunidad de conocimiento y evolución del

diseño, cambiando los paradigmas de enseñanza y trabajo proyectual, que oscila del *¿qué se hace?* o *¿por qué se hace?*, hacia el *¿cómo se hace?*. Resolviendo la elaboración, que también modifica la solución de las primeras preguntas. La materialización preliminar o definitiva del diseño, obliga a revisar sus condiciones y sentido, transformando las formulaciones y supuestos iniciales.

Desde el comienzo del desarrollo del proyecto se reconocen las posibilidades materiales y de ejecución disponibles, y por ende el diseño debe adecuarse y aprovechar esas características (Male-Aleman y Sousa, 2003). Promoviendo soluciones diferentes y efectivas, y orientando las cualidades de propuesta a condiciones técnicas y sensibles factibles de realizar. Además el proceso de diseño se modifica al considerar elementos o características determinadas de ejecución (tipos, cantidades o dimensiones de piezas). Convirtiendo la solución formal, mas allá de un volumen global, en un conjunto de componentes que debe articularse adecuadamente. De hecho, las técnicas gráficas varían significativamente, fomentando la elaboración de modelos tridimensionales, que permiten estudiar la combinación volumétrica de los elementos, y descripciones desplegadas de componentes (Sass y Botha, 2006). El lenguaje gráfico tradicional de representaciones ortogonales (plantas, elevaciones, cortes) pierde relevancia en el proceso y tiene un escaso rol. Más aún, las pruebas materiales, la verificación de productos, conexiones y operaciones, adquieren una acción de diseño, no sólo de sus características específicas, sino también de las condiciones globales de acabado, combinación, ejecución y posibilidades formales. Al elaborar la solución propuesta suelen surgir alternativas que hacen revisar el diseño y plantear nuevas configuraciones, haciendo comparecer los requerimientos iniciales. Es decir, revisando las condiciones generales del encargo para identificar si las variaciones cumplen los requerimientos, o incluso revelan nuevos aspectos o amplían posibilidades. De este modo, el proceso de diseño se constituye en una secuencia de actividades mas diversas en participantes, recursos, acciones y condiciones involucradas, en que sus aspiraciones cualitativas y funcionales se constituyen en una orientación global, que exige un meticuloso control y revisión constante.

El proyecto cambia su sentido premonitorio general (concebir la forma total de la obra), por una acción mas variable y operativa, pero igualmente sensible, en el que se deben coordinar las condiciones factibles, por lograr soluciones creativas, pertinentes y significativas. Este proceso se aproxima indudablemente más a las realidades laborales en que se ejecutan los edificios, como una combinación de intereses, participantes y posibilidades, que las acciones idealizadas de diseño planteadas en la enseñanza profesional o en las practicas tradicionales. De modo que se diluye la concepción del proyecto como una actividad autónoma y secuencial, y, por ende, la enseñanza en torno al sentido y refinamiento global del volumen, apareciendo nuevos aspectos y posibilidades.

Enseñanza del proyecto

Desde el punto de vista epistemológico, el proyecto es una actitud cognitiva determinada que se constituye como hecho colectivo-cultural que se retransmite en la enseñanza (Grassi, 1980). El aprendizaje de arquitectura son las operaciones cognitivo-figurativas que le dan forma. Esta formación se encuentra hoy inmersa en un quehacer más complejo, que ha puesto en crisis los actuales modelos de conocimiento. Desde una singular tradición en la enseñanza, la arquitectura vuelve a considerarse, más que como problema técnico o artístico, como un hecho cultural (Monedero, 2003). Una tradición constitutiva de la disciplina ha sido su particular didáctica: el proyecto como centro de los programas de estudio y base de formación. En la

perspectiva pedagógica de la "reflexión en la acción", en que el sujeto es autoformador: a la vez que conoce sobre su hacer, se constituye y modifica por acción reflexiva en el mismo proceso cognitivo (Schön, 1992). Desde esta tradición se intenta hoy comprender la cultura que globaliza mercados, incrementando la competitividad y el impacto tecnológico.

La excelencia del oficio, que antes se adquiría haciendo junto, o mirando, a los maestros se da desde el siglo XIX en academias donde la producción arquitectónica de los docentes, apartados de su práctica, es menos relevante que la calidad de la comunicación que puedan generar en torno de los aprendizajes. Con un giro hacia lo que podemos llamar entornos de acción proyectual: un conocimiento basado en objetos tornaría a otro enfocado sobre procesos de enseñanza-aprendizaje, más inclusivos que exclusivos. Nuevos modos de pensar y trabajar sobre el lenguaje han generado cambios radicales, y también nuevos modos de mirar y actuar: el proyecto es un entorno comunicativo y constituye un dominio generativo capaz de crear nuevas realidades (Echeverría, 2003). Se trata de un proceso cognitivo que tiene como finalidad la producción consensuada de artefactos de significado relevante a través de la captura, manipulación, generación y comunicación de conocimiento. Este conocimiento (proyecto) concierne no solamente a la información necesaria para describir el artefacto en cuestión sino adicionalmente conocimiento acerca del proceso para realizarlo. El proceso de diseñar pone en juego variables gracias a las cuales es posible la generación, transformación, análisis y producción de artefactos. Estas variables definen el conocimiento propio del proyecto (Lyon, 2006).

En la base de transmisión educativa, el taller, una estructura académica basada en el saber del enseñante debería dar lugar a un entorno flexible con contenidos y estrategias que rescatan capacidades de aprendices y enseñantes como co-gestores de aprendizajes. Un quehacer educativo situado frente al sujeto que aprende y a la sociedad en la que actúa y una formación por competencias para su inserción social. Enlazado con una historia vivida: el conocimiento se relaciona con el hecho de estar en un mundo que resulta inseparable de nuestro cuerpo, nuestro lenguaje y nuestra historia social (Varela, 1998).

Estas experiencias de fabricación digital en la enseñanza establecen una demostración del interés por determinar la base cognitiva de los procesos proyectuales, que nos sitúa en un entendimiento más profundo, no solamente basándose en los artefactos y las acciones que ejecutamos para producirlos, sino también en el entorno y los instrumentos con que son producidos. Para la investigación en la acción proyectual y los procesos de enseñanza y aprendizaje es fundamental la noción de artefactos cognitivos, entendidos como dispositivos mentales o físicos que ayudan o refuerzan nuestras capacidades cognitivas. La preferencia de los alumnos por las acciones que han involucrado mayormente diseño podría entenderse como una comprobación de que proyectar es una acción que produce instrumentos de conocimiento más que objetos físicos. Los objetos son realizados o fabricados fuera de esos "instrumentos de conocimiento" con nuevos procesos de génesis instrumental. Especialmente, cuando comprobamos que las acciones proyectuales son mediadas por artefactos cognitivos, es decir, por representaciones, modelos, métodos, técnicas, herramientas, etc.

El proyecto, desde el punto de vista de los procesos de enseñanza aprendizaje, no es una simulación de un encargo profesional, vinculado a saberes de generaciones anteriores y a procesos productivos: entorno de su eficacia, aplicabilidad o rentabilidad inmediata en el mercado, sino una producción arquitectónica vinculada al desarrollo de competencias, que explicita sus coordinaciones y coherencia interna en la acción proyectual, validada en el entorno socio-educativo de la formación como hecho cultural. Y es aquí donde se produce una apertura desde lo cognitivo a lo metacognitivo, concepto que definió Flabell (Crespo, 2004);

la apertura al conocer cómo se conoce, al ver qué se ha aprendido y cómo se ha hecho, estimulando la capacidad que tenemos de ser conscientes de los procesos y productos internos cognitivos.

De este modo, podemos entender que la integración de estas instrumentaciones de manufactura digital en la enseñanza arquitectónica esta mediada por su incorporación en el proyecto como acción cognitiva, en especial meta-cognitivas. Permiten darse cuenta a los estudiantes de los procesos de ejecución, de diseño, y mas propiamente, de las incidencias permanentes en la aproximación del diseño como sistema productivo y social. Cuestionando la dirección tradicionalmente autónoma del proyecto como objeto concluso, hacia procesos de realización en entornos cambiantes, y despertando una comprensión mas amplia, significativa y evolutiva del proyecto.

Debemos comprender también que la enseñanza y trabajo de proyecto se ha constituido dentro de una filosofía moderna que promueve la consideración autónoma de los conceptos de materia y forma (Goycoolea, 2004). El racionalismo moderno concibió una separación de las tareas de extensión de la forma (el dibujo), de su ejecución (la construcción), que han provocado ineludiblemente elaboraciones independientes. Aunque progresivamente cuestionadas en el mundo contemporáneo, por los intereses fenomenológicas y culturales que exigen una comprensión integral de las acciones, como también por los requerimientos económicos y tecnológicos que establecen una relación mas directa entre estos aspectos.

Industrialización de la construcción

En las economías modernas, la industria de la construcción está sometida a las reglas del mercado. Como todo producto, una vivienda o una construcción industrial están sujetas a los intereses de los clientes. Al igual que en la industria manufacturera, la industria de la construcción enfrenta requerimientos de flexibilidad y competitividad, con variabilidad de productos en tamaños de lotes que permitan costos unitarios competitivos. El paso del paradigma del proyecto único a otro que combine la variabilidad y con volumen de producción se hace cada vez más necesario, lo que es conocido en la industria de la manufactura.

Los Sistemas Flexibles de Manufactura (FMS: *Flexible Manufacturing Systems*) han venido a llenar la transición entre proyecto único y fabricación en serie, gracias a las tecnologías avanzadas de manufactura y al manejo de diseñadores y profesionales de la producción. En el ámbito de la arquitectura y construcción el panorama no es evidente. Los contenidos pedagógicos en la enseñanza de la arquitectura difieren de los entregados en ingeniería, en cuanto a tecnologías y a la comprensión del concepto económico de la cadena de valor de un producto, en este caso de una obra arquitectónica. Si en una obra única, la fase de diseño tiene directa relación en los costos de producción y en las tecnologías asociadas a su fabricación, más significativa es esa relación si la obra se repite muchas veces. Los costos de fabricación y de configuración secuencial tienden a tener un peso mucho más relevante según la función de costos del ciclo de producción de un producto (Rembold *et al.*, 1994).

La fabricación flexible es un concepto que permite la producción automática y simultánea de una familia de productos minimizando, y a veces eliminando, los costos unitarios reservados para la fabricación de grandes series. Es una tecnología apropiada para producciones con gran variedad de componentes en lotes de tamaños intermedios, y para productos de rápida obsolescencia y elevado nivel de cambios o modificaciones.

Los Sistemas Flexibles de Manufactura ofrecen un compromiso entre productividad y flexibilidad, disminuyendo principalmente el ciclo de fabricación de productos en el proceso, reduciendo sustancialmente los tiempos de configuración y de diseño. La reducción de tiempos de configuración se da por la facilidad que tienen máquinas y equipos de cambiar sus programas de fabricación a través de tecnologías de control numérico, y con la ayuda de manipuladores robóticos para el traslado de piezas y componentes. De igual forma, la reducción de tiempos de diseño se da por la fuerte incorporación de tecnologías CAD (*Computer Aided Design*) y CAE (*Computer Aided Engineering*), Tecnología de Grupo (*Grouping Technology*) y metodologías de diseño de productos como QFD (*Quality Function Deployment*) e Ingeniería Concurrente. Todas estas tecnologías son sustanciales en la reducción del tiempo de diseño del producto, en un escenario de fuerte variabilidad y continuos cambios en la demanda. Por su parte, el concepto de CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) pretende agrupar estas tecnologías, dotando al sistema de producción de redes de comunicación y de bases de datos comunes y locales capaces de compartir la información y permitir una integración eficaz de todos los actores del ciclo de producción de producto.

Un reciente estudio realizado en Estados Unidos (Crowley, 1998), muestra que mientras la industria manufacturera ha crecido en productividad a tasas promedio del 10% en los últimos 40 años, la industria de la construcción ha decaído en el mismo periodo. Los autores indican que éste es el caso en casi todos los países desarrollados. Las principales razones que explican ese comportamiento son: (a) la industria de la construcción no tiene mecanismos efectivos de captura y re-utilización del conocimiento generado en el diseño y las distintas etapas de la construcción; (b) la industria de la construcción no tiene líneas de producción fijas; y (c) la industria de la construcción no tiene la habilidad de "probar antes de fabricar". La industria manufacturera adopta la descomposición del producto en partes elementales re-utilizables, bajo una estructura en árbol jerarquizada, lo que le permite una rápida actualización de componentes a través de la realización de modificaciones al proceso de producción para un nuevo diseño. De esta manera, el conocimiento es re-utilizado con ayuda de tecnologías, especialmente el trabajo en red y el CAD/CAM que automatizan y disminuyen notoriamente el proceso de diseño. En contrapartida, la industria de la construcción no tiene esa capacidad. Normalmente, un nuevo diseño comienza cada vez con nuevas especificaciones, nuevos contratos y nuevos equipos de trabajo. La productividad en la manufactura es determinada por la ruta de los productos, las máquinas y la gestión de operaciones, mientras que en la construcción, el juicio humano tiene una alta preponderancia. Por último, según Crowley (1998), la poca habilidad de adelantarse o de prever el comportamiento de un proyecto hace de la construcción un negocio de mucho riesgo, lo que sugiere que herramientas como la simulación podrían otorgar una contribución poderosa.

Hay interés por traspasar los conceptos de la manufactura flexible y de las tecnologías avanzadas de manufactura a la arquitectura y construcción, en particular desde la industria automotriz japonesa (Gann, 1996). Este autor sostiene que los inicios de la industrialización de la construcción se inician por las influencias de Le Corbusier, Gropius, Bernis y Buckminster Fuller en la primera mitad del siglo 20, quienes creían firmemente en la mecanización de la construcción a través de la racionalización y la aplicación de métodos científicos. Estas influencias desembocan en los años sesenta en los llamados sistemas constructivos prefabricados donde confluye diseño e ingeniería. Los principios de estandarización, prefabricación y sistemas constructivos pasaron a ser los principios de la industrialización de la construcción de viviendas. El paralelo realizado por Gann entre la industria automotriz y de la construcción, muestra como la tecnologías CAD/CAM y *just-in-time* son aplicables y escalables a la manufactura de viviendas en hormigón, acero o madera. En la misma línea, (Li *et al.*, 2008), se discute la aplicación de manufactura

flexible por computador en la industria de la construcción. La principal conclusión es que la construcción debería ser vista necesariamente como un proceso de manufactura.

En la formación en arquitectura se hace necesario ir más allá en la cadena de valor. La comprensión de los principios de CIM y tecnologías de avanzadas de manufactura permitirían al arquitecto un mayor interacción con aquellos que deberán fabricar o ejecutar muchas veces una obra. La visión del proceso de manufactura como un todo permite no solo una comprensión holística de la cadena de valor, sino que lleva a una reducción importante de costos en la etapa de diseño. Mientras antes se tomen las decisiones de especificaciones de una obra que tengan en consideración como esa obra se fabricará, mayores serán las reducciones por cambios de diseños en la etapa de producción. Esto en una suerte de ingeniería concurrente, donde la interacción entre arquitectos y especialistas en CIM se realiza a momentos tempranos, en el diseño.

De modo que las tecnologías de diseño y fabricación digital están acordes con una evolución de la industria de la construcción hacia la automatización variable, de manera de alcanzar una adecuada competitividad. En la cual se producen relevantes transformaciones productivas y laborales, tanto en la utilización de mano de obra (más reducida y calificada técnicamente), como en su orientación (a productos masivos y variados). En ésta el diseño se refiere a características de producción en relación a requerimientos de mercado, como soluciones flexibles y sistematizadas. En una coordinación distribuida de condiciones técnicas, económicas y estéticas, en ordenaciones colectivas distantes de la autorías individuales y secuenciales. Por tanto, la labor del diseñador esta diseminada y combinada con acciones productivas, lo que implica una sustancial renovación de la formación profesional. Abordando no solo nuevas capacidades tecnológicas, sino también habilidades de trabajo colectivo y productivo, controlando aspectos sustanciales de los diseños, pero integrados en procedimientos efectivos.

Conclusiones

En las experiencias realizadas de fabricación digital se advierten características e implicancias relevantes para la enseñanza arquitectónica. En estas actividades se reconoce una importante vinculación con el desarrollo de proyectos, en que aportan aspectos técnicos y creativos. De modo que se puede sugerir la utilización de manufactura automatizada en la formación profesional, especialmente en la enseñanza de proyectos, abordando requerimientos constructivos e innovaciones de diseño, considerando además algunas transformaciones en el proceso de proyecto y en sus alcances. Una aproximación creativa, grupal y variable, desarrollando la ejecución del diseño concebido como un sistema de partes, una interconexión de elementos físicos, productivos y culturales, en que se realiza una alternativa posible, considerando las condiciones sociales, materiales y laborales implicadas. Formulando intervenciones flexibles, precisas, adecuadas y cualitativamente significativas. En éstas las propiedades sensibles del diseño pueden ser cabalmente desarrolladas y logradas, con un trabajo cooperativo y una elaboración minuciosa.

Modificando la comprensión del proyecto como acción arquitectónica y como contenido de enseñanza, al requerir actitudes mas precisas, abiertas e integradas, se debe reconocer, además, que los sistemas de fabricación digital promueven transformaciones del proceso de construcción, de los recursos, actividades y resultados implicados. Estimulando soluciones industrializadas, que involucran un mayor proyección de sus productos, una planificación mas elaborada, mecanización de sus producciones, reducción de mano de obra, mayor difusión y diferenciación de sus logros. Produciendo, por ende, un cambio del rol profesional en estos

procesos, una evolución desde la creación aislada hacia la colaboración técnica, participando en la cadena de valor, con un sentido integrador y sensible. Lo que sugiere mudar algunos enfoques educativos y laborales en arquitectura, acorde con las orientaciones de un mercado global productivo y alejada de las ideales artísticos convencionales en la disciplina. En que la contribución creativa se articula con procesos generales y efectivos, en que las cualidades logradas por el diseño se definen y ejecutan de manera acuciosa.

Agradecimientos

Esta investigación fue realizada con apoyo del proyecto FONDECYT Nº 1080328. Agradecemos también las universidades Chilenas, Universidad Bío-Bío, Universidad de Concepción y Pontificia Universidad Católica; en Argentina a Universidad Católica de Córdoba y en Brasil a Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos).

Referencias

AFIFY, H.; ELGHAFAR, Z.A. 2007. Advanced digital manufacturing techniques (CAM) in architecture. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ARAB SOCIETY FOR COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN*, 3, Alejandria, 2007. *Anais...* Alejandria, p. 67-80.

ÁLVAREZ, I.; AYUSE, A.; CASALS, E.; LLERAS, J.; GARCIA, I.; GOSSET, J.; GROS, B.; GUERRA, V.; MARINEZ, M.; NOGUERA, E.; PAYA, M.; TEY, A.; ROMANÍA, T. 2004. Experiencias de aprendizaje orientado a la solución de problemas con soporte tecnológico. *In: CONGRÉS INTERNACIONAL DE DOCÈNCIA UNIVERSITARIA I INNOVACIÓ*, 3, Girona, 2004. *Anales...*Girona, España, p. 1-14.

BOZA, L.E. 2006. (Un)intended discoveries: Crafting the design process. *Journal of Architectural Education*, **60**(2):4-7.

CELANI, G.; PUPO, R. 2008. Prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção: definições e estado da arte no Brasil. *Cadernos de pós-graduação em arquitetura e urbanismo*, **2008**(1):31-40.

CRESPO, N.M. 2004. La Metacognición: Las diferentes vertientes de una Teoría. *Signos*, **33**(48):97-115.

CROWLEY, A. 1998. Construction as a manufacturing process: Lessons from the automotive industry. *Computers & Structures*, **67**(5):389-400.

DAUBMANN, K. 2004. Teaching Digital Fabrication through Design. *In: ANNUAL CONFERENCE OF ACADIA AND THE 2004 CONFERENCE OF THE AIA TECHNOLOGY IN ARCHITECTURAL PRACTICE KNOWLEDGE COMMUNITY*, 23, Cambridge (Ontario), 2004. *Anales...* Cambridge (Ontario), p. 244-255.

ECHEVERRIA, R. 2003. *Ontología del lenguaje*. Stgo. de Chile, Ed. Comunicaciones Noreste Ltda, 433 p.

GANN, D.M. 1996. Construction as a manufacturing process? Similarities and differences between industrialized housing and car production in Japan. *Construction Management and Economics*, **14**(5):437-450.

GARBER, R.; JABI, W. 2006. Control and collaboration: Digital fabrication in academia and practice. *International Journal of Architectural Computing*, **4**(2):121-143.

GOYCOOLEA R. 2004. Autonomía de la forma y hacer arquitectónico en el pensamiento moderno. *In: CONGRESO INTERNACIONAL DE EXPRESIÓN GRÁFICA ARQUITECTÓNICA*, X, Granada, 2004. *Anales...* U. de Granada, España. p. 1-6.

GRAMAZIO F.; KOHLER, M. 2008. *Digital Materiality in Architecture*. Baden, Muller Publishers, 112 p.

GRASSI, G. 1980. La arquitectura como oficio. *In: GRASSI A., La arquitectura como oficio y otros escritos*. Barcelona, Ed Gustavo Gili., p. 158-181.

KIERAN, S.; TIMBERLAKE, J. 2004. *Refabricating architecture: How manufacturing methodologies are poised to transform building construction*. New York, Ed. McGraw-Hill, 175 p.

KOTSOPOULOS, S.; SASS, L. 2008. Teaching architectural design through computer modeling, rendering and digital fabrication. *In: SIGRADI 2008, Libro de Ponencias*. La Habana, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, p. 1-4.

LI, H.; HUANG, T.; KONG, C.W.; GUO, H.L.; BALDWIN, A.; CHAN, N.; WONG, J. 2008. Integrating design and construction through virtual prototyping. *Automation in Construction*, **17**(8):915-922.

LYON, E. 2006. Cognición del diseño. *SPAM_arq.*, **1**(3):20-31.

MALE-ALEMANY, M.; SOUSA, J.P. 2003. Hyper D-M Process: Emerging conditions for digital design and manufacturing in architecture. *In: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE*, 21, Graz, 2003. *Anales...* Graz, p. 343-346.

MONEDERO, J. 2003. *Enseñanza y práctica profesional de la arquitectura en Europa y Estados Unidos*. Unión Europea. Barcelona, ETSAB/COAC, 263 p.

REMBOLD, U.; NNAJI, B.O.; STORR, A. 1994. *Computer integrated manufacturing and engineering*. New York, Addison-Wesley, 640 p.

SAAS, L.; BOTHA, M. 2006. The instant house: A model of design production with digital fabrication. *International Journal of Architectural Computing*, **4**(4):109-123.

SCHÖN, D. 1992. *Formación de profesionales reflexivos: hacia un nuevo diseño de la enseñanza y el aprendizaje en las profesiones*. Barcelona, Ed. Paidós, 310 p.

SEELY, J. 2004. *Digital fabrication in the architectural design process*. Boston, MA, EUA. Tese de mestrado. Massachusetts Institute of Technology – MIT, 77 p.

SOLA, C. 2005. *Aprendizaje basado en problemas. De la teoría a la práctica*. Madrid, Ed. Trillas, 221 p.

SOLA-MORALES, I.; LLORENTE, M.; MONTANER, J.; RAMON, A.; OLIVERAS, J. 2000. *Introducción a la Arquitectura: conceptos fundamentales*. Barcelona, Ediciones UPC, 156 p.

STACEY, M. 2004. *Digital Fabricators*. Ontario, University of Waterloo School of Architecture Press, 95 p.

VARELA, F. 1998. *Conocer. Las ciencias cognitivas: tendencias y perspectivas. Cartografía de las ideas actuales*. Barcelona, Ed. Gedisa, 120 p.

Submetido em: 27/08/2009

Aceito em: 22/09/2009