



1 de agosto de 2016 | Vol. 17 | Núm. 8 | ISSN 1607 - 6079

ARTÍCULO

FABRICACIÓN DIGITAL EN ARQUITECTURA: TÉCNICAS, RECURSOS Y CONOCIMIENTO MATERIAL

(<http://www.revista.unam.mx/vol.17/num8/art61>)

*Ana Teresa Robles González
(Licenciada en Arquitectura por la Facultad de Arquitectura y
Diseño de la UAEM)*

FABRICACIÓN DIGITAL EN ARQUITECTURA: TÉCNICAS, RECURSOS Y CONOCIMIENTO MATERIAL

Resumen

La fabricación digital en arquitectura se ha podido desarrollar a través del estudio de procesos de fabricación artesanal e industrial (como el automotriz y aeroespacial), con el objetivo de adaptarlos y crear técnicas que ayuden a materializar diseños tridimensionales complejos. Este artículo describe cinco métodos de fabricación digital, documentados por especialistas en el tema, así como máquinas de fabricación digital y algunos ejemplos de materiales utilizados.

La siguiente metodología busca dar al diseñador un panorama sobre las técnicas de fabricación digital utilizadas en arquitectura, detallando con ejemplos las ventajas, desventajas y máquinas que se pueden utilizar en cada una de ellas, esto con el fin de informar a los arquitectos que no están familiarizados con la construcción por medio de maquinaria CNC (computadora de control numérico) para la materialización de sus diseños.

La siguiente metodología busca dar al diseñador un panorama sobre las técnicas de fabricación digital utilizadas en arquitectura, detallando con ejemplos las ventajas, desventajas y máquinas que se pueden utilizar en cada una de ellas, esto con el fin de informar a los arquitectos que no están familiarizados con la construcción por medio de maquinaria CNC (computadora de control numérico) para la materialización de sus diseños.

Palabras clave: CAD/CAM, fabricación digital, técnicas, materiales.

“
La arquitectura basa mucho su práctica en el comportamiento y desempeño de materiales que trabajan en conjunto.
”

DIGITAL FABRICATION IN ARCHITECTURE: TECHNIQUES, RESOURCES AND MATERIAL KNOWLEDGE

Abstract

Digital fabrication in architecture was developed by the study of craft and industrial fabrication methods, (automobile and aerospace industries) in order to adapt them and create techniques that could help materialize complex 3D designs. This article describes five different fabrication techniques, CNC machines and materials for the physical development of a digital model.

With this methods, it is given to the designer a perspective of digital fabrication with examples, advantages, disadvantages and machinery that can be used for an specific purpose, with the goal of approaching information of CNC fabrication to designers interested in materializing design proposals.

Keywords: CAD/CAM, digital fabrication, techniques, materials.

FABRICACIÓN DIGITAL EN ARQUITECTURA: TÉCNICAS, RECURSOS Y CONOCIMIENTO MATERIAL

Introducción

El diseño asistido por computadora (CAD) y la manufactura asistida por computadora (CAM), se han vuelto las herramientas más importantes del diseñador del siglo XXI, pues ambos marcan una revolución en la forma de hacer arquitectura al ampliar las posibilidades creativas y de innovación en el ámbito del diseño, ya que con la disponibilidad de maquinaria más económica, la fabricación de piezas únicas ya no es exclusiva de grandes empresas; esta tecnología se ha puesto al alcance de más personas.

La fabricación digital en arquitectura tiene la particularidad de permitir la experimentación y, con ello, la invención e innovación en las propuestas de diseño. Una de sus virtudes es que está íntimamente ligada al conocimiento y experimentación material, así como la arquitectura lo está con los materiales, razón por la cual la tecnología actual abre un canal de reencuentro entre diseñador y materia, la cual permite acercarnos a un trabajo artesanal en los proyectos de diseño que por décadas se ha obviado.

Actualmente, la fabricación digital tiene una actitud parecida al hazlo tú mismo, pues ahora se puede experimentar y prototipar con el material, observar fallas y aciertos, y mejorar el modelo virtual antes de su construcción; ahora el diseñador tiene más posibilidades de solucionar limitaciones materiales durante el desarrollo (IWAMOTO, 2009).

Fabricación digital, conceptos y antecedentes

Ésta se define como un método para dirigir un proceso de manufactura con el uso de datos digitales que controlan los procesos de fabricación respaldándose en maquinaria y herramienta controlada por computadora para construir o cortar piezas (DUNN, 2012). El diseño asistido por computadora (CAD) y la manufactura asistida por computadora (CAM) son conceptos que existen en el diseño industrial e ingeniería (automotriz e industria aeroespacial) desde hace medio siglo.

A principios de los noventa, el despacho arquitectónico Gehry Architects de Londres, comenzó a experimentar la fabricación de formas complejas a través del uso de tecnología utilizada en la industria naval y aeronáutica, adaptando el software hacia el diseño y fabricación de piezas complejas (IWAMOTO, 2009). Las primeras aproximaciones de fabricación digital marcaron una revolución en el diseño, con lo que comenzaron a surgir innovaciones e invenciones en la arquitectura a inicios de siglo XXI.

Así, poco a poco los diseñadores e investigadores buscaron maneras de materializar sus proyectos de diseño, estudiando metodologías como la de Antoni Gaudí, Frei Otto, o Felix Candela, así como los métodos de construcción de diferentes industrias con el fin de llegar a modelos físicos de los diseños virtuales a través de las técnicas constructivas y de la maquinaria industrial. Con esto se fueron documentando técnicas y estrategias para la fabricación digital desde el enfoque arquitectónico.

La experiencia material

El arte contemporáneo de los cincuenta y sesenta, revalorizó al material como un objeto artístico; el artista guía al espectador para percibir el objeto de otra forma y verlo con una sensualidad que normalmente pasaba desapercibida. Peter Zumthor, arquitecto suizo, establece como inspirador la forma precisa y sensual del uso material en el arte pobre o arte Povera, llamado así en los sesenta por el uso de materiales humildes, usualmente no industriales y su arquitectura premiada a nivel mundial (altamente sensorial y llena de significado). Su obra se disfruta por medio de todos los sentidos y gran parte de las sensaciones que logra transmitir en los espacios que diseña lo hace a través de los materiales.

Zumthor afirma que el arquitecto es capaz de generar situaciones significativas con los materiales "Los materiales por sí solos no son poéticos", para él, las cualidades compositivas y acústicas de éstos son elementos que, como arquitectos, están obligados a utilizar, pero las sensaciones emergen cuando se le inyecta un significado específico al material en el proyecto particular en el cual se utiliza. "Si se tiene éxito en lograr esa meta, el material vibra y brilla".

La arquitectura basa mucho su práctica en el comportamiento y desempeño de materiales que trabajan en conjunto. La fabricación digital ha permitido la reconexión del arquitecto con la materia, ya que desde el proceso de diseño se debe pensar en el material adecuado, y la experimentación permite un estudio de las propiedades de éste para ser trabajado con cierta máquina.

La experimentación con materiales para la creación física de formas complejas, expande los límites creativos del diseñador y lo sumerge en una búsqueda por transformarlos o buscar materiales diseñados para distintos fines a los de la construcción.

El proceso de diseño digital

El modelo tridimensional del diseño debe poseer la información necesaria para verificar si éste se puede materializar, convirtiéndose en un conjunto de principios y parámetros estructurales, organizacionales y compositivos necesarios, así como en una realidad por sí mismo y un recurso para explorar y experimentar (BERKEL en GLOBA, et al. 2012). El proceso de diseño para fabricación se puede definir como circular y requiere modificaciones continuas a partir del modelo con el fin de llegar a un diseño óptimo y pasar al siguiente paso del proceso (ibíd).

Asimismo, estos modelos tridimensionales, generados a través de software cada día más avanzado y amigable, dan al diseñador las herramientas visuales necesarias para buscar soluciones constructivas a un diseño. Más allá de la representación virtual, las máquinas de control numérico por computadora (CNC) permiten la creación de prototipos físicos que facilitan el diálogo entre el modelo físico y virtual, generando un proceso de diseño en el cual el primero retroalimenta al segundo de forma cíclica y posibilita al diseñador la preparación (desde su concepción hasta la fabricación) y la mejora constante de la geometría.

Una vez que se tiene la geometría tridimensional, se debe buscar la transformación a un lenguaje que una máquina CNC (Control Numérico por computadora) pueda entender para poder convertir los datos digitales, generados en un software de diseño, a un formato

CAD/CAM. A su vez, el diseñador necesita desarrollar una comprensión de cómo trabajan estos procesos para poder explotar las capacidades de la máquina y decidir con qué software, máquinas y herramientas se puede desarrollar de la mejor manera la idea (DUNN, 2012).

En la metodología de diseño para fabricación no todo el proceso es digital, hay etapas en las que participa el diseñador y se hace un encuentro entre la parte digital y la artesanal del modelo. En este punto el diseñador puede verse limitado en cuanto a la capacidad de la maquinaria con la que cuenta.

Asimismo, hay pasos o procesos que se deben hacer de forma manual, por ejemplo, quitar el material sobrante que la máquina no haya removido del todo, el recubrimiento del objeto, la aplicación de pinturas o barnices, y el lijado de la superficie.

Descripción de técnicas de fabricación digital

Existen varias técnicas que pueden ayudar al diseñador a concebir, desde la etapa de diseño, el proceso de construcción de las piezas que integrarán el modelo y, dependiendo de la geometría, hay técnicas que se adecuarán más o que en combinación otra permitirán su construcción física. En la fabricación digital se identifican cinco técnicas para distintas aplicaciones y materiales; la creatividad del diseñador, el conocimiento material, y los procesos de manufactura tradicional pueden enriquecerlas, generando propuestas innovadoras. A continuación se presentan las técnicas descritas por Iwamoto en 2009, así como sus ventajas, desventajas y algunos ejemplos:

1. **Seccionado (*Sectioning*):** Puede definirse como seriación de planos, un recurso utilizado frecuente en la creación de superficies no lineales a través de perfiles cuyo contorno se transforma siguiendo las líneas de una superficie geométrica. Estos perfiles en conjunto forman una superficie y la separación entre piezas pueden suavizarla o hacerla más escalonada, asimismo éstos dan rigidez, forman la superficie y permiten soluciones livianas. Se trata de un proceso constructivo que se utiliza en la fabricación de barcos y aviones. Un ejemplo en arquitectura es la Capilla de Notre Dame en Ronchamp, Francia, diseñada por Le Corbusier en los cincuenta. El recurso constructivo de secciones en serie se utilizó en este proyecto para crear una cubierta no uniforme, que además fuera ligera (IWAMOTO, 2009).

Entre las diversas ventajas del seccionado (*Sectioning*) está la posibilidad de dar rigidez a materiales delgados, la repetición de planos para crear volúmenes y la fabricación digital, precisión a través del corte, así como una manufactura rápida. Su proceso de fabricación es sencillo ya que, al utilizar materiales planos, se puede emplear un Router CNC de tres ejes o una cortadora láser. Los procesos de ensamble pueden realizarse de forma artesanal, lo cual no requiere de mano de obra especializada o maquinaria para la construcción del modelo.

Una desventaja de esta técnica es la cantidad de material requerido para generar un modelo tridimensional, ya que la seriación de planos necesita de una gran repetición de piezas similares. Otra desventaja puede ser el desperdicio material, si la geometría generada requiere varios planos seriados de gran tamaño, se deberá optimizar desde el diseño de los planos para corte, los espacios disponibles en cada tablea para ocuparlos en su máxima capacidad y generar el mínimo desperdicio.

Entre los materiales más utilizados en el seccionado se encuentran tableros industriales de madera como mdf y triplay, polímeros, cartón corrugado y acrílico, pues éstos se comercializan en tableros de diferentes espesores y en formatos de grandes dimensiones.

2. **Mosaico (*Tessellating o Tiling*)**: Se define como una colección de piezas que encajan en conjunto sin huecos entre ellas, con la finalidad de crear planos o superficies como una especie de rompecabezas. Un ejemplo son los azulejos marroquíes que, a través del ensamble de distintas piezas, se forma uno solo.

Con software de diseño tridimensional, esta técnica artesanal ha expandido sus límites, pues sus procesos de modelado dan origen al concepto *superficies aproximadas*. Éstas permiten que modelos con doble curvatura se materialicen a través de *meshes* poligonales¹. La geometría generada puede estar integrada por piezas únicas,

con lo cual su construcción no puede realizarse con materiales estandarizados, ampliando, así, las posibilidades creativas del diseñador en la búsqueda de materiales útiles para la fabricación.

Las geometrías que se pueden generar con polígonos son más intrincadas y permiten a los diseñadores expandir sus lenguajes formales, con base en criterios de comportamiento material, constructivos, estructurales y espaciales (IWAMOTO, 2009).



Las ventajas de esta técnica es su diseño

bidimensional que permite una manufactura sencilla, ya que los cortes que se necesitan se pueden fabricar con precisión mediante un Router CNC de tres ejes o una cortadora láser y esto permitirá el ahorro material y la reducción de los procesos de ensamble.

Las desventajas se encuentran en el conocimiento material, pues se debe hacer experimentación para observar cómo reacciona el material al corte, además de considerar los procesos de ensamble que, dependiendo de su selección, pueden significar otro reto de diseño.

En el mosaico se hace uso de una gran cantidad de materiales, desde el concreto, polímeros, maderas y tableros industriales, hasta textiles y fibras. La técnica tiene una repetición de patrones que pueden crearse inclusive con un tejido que se duplica (MC.KNELLY, 2008).

3. **Doblez (*Folding*)**: En esta técnica se transforman materiales bidimensionales en volúmenes tridimensionales y sirve para crear una estructura a partir de una geometría específica. Por ejemplo, en una caja hecha de cartón el material bidimensional se corta y plega, permitiendo hacer figuras tridimensionales, rígidas y auto portantes. Otro ejemplo es el origami en el cual, a partir de dobleces de papel, se generan formas o figuras con rigidez. Esta práctica se ha estudiado por arquitectos para poder transferirla a la creación de estructuras de mayor escala que pueden doblarse y desdoblarse.

Este método parte de principios tradicionales y con la fabricación digital la técnica ha tomado una nueva dimensión y se ha utilizado constantemente en el campo arquitectónico para el diseño de estructuras y fachadas. El diseñador que emplea el doblez, busca que las formas tridimensionales no sólo tengan una esté-

Outdoor chair. Foto: Juan David Cadena ValdeRuten.



[1] El software de modelado utiliza polígonos y subdivisiones como triángulos y cuadriláteros para poder aproximarse a superficies continuas.

tica visual, sino un desempeño estructural, lo que requiere conocer principios de física, conocimiento material y experimentación a través de prototipos a escala.

Una desventaja puede ser la durabilidad de los materiales, pues son de poco espesor y peso, en algunos casos. Ante esto, es pertinente realizar un estudio y experimentación material que permita generar proyectos durables.

4. **Contorneado (Contouring):** Se trata de una técnica en la cual se reconfigura la superficie de un material para crear relieve, esto se logra a través de un proceso

de desbaste sucesivo de capas de material, sustrayéndolo para generar una forma tridimensional a partir él.

Esto se conoce también como grabado, una técnica antigua usada en materiales de la naturaleza, como madera y piedra. Los ejemplos se remontan a objetos de culturas antiguas, como las esculturas mesoamericanas talladas en piedra, o las columnas de Grecia que se esculpían en mármol y otras piedras de la región.



En arquitectura hay muchos ejemplos, pero durante la arquitectura del siglo XX esto se fue limitando debido a los costos y tiempos de ejecución. La Revolución Industrial y la producción en masa permitieron reducir los precios de productos prefabricados, sin embargo se perdió la personalización y el trabajo artesanal.

Actualmente, la fabricación digital permite que el grabado ya no resida solamente en una práctica artesanal, ahora han resurgido propuestas arquitectónicas, como el caso de las superficies ornamentadas. Los materiales para el contorneado pueden ser industriales como los tableros de madera y polímeros, o materiales naturales (piedras y madera).

Una de las ventajas de la fabricación digital de grabados es la reducción en el tiempo de ejecución, ya que permite diseños precisos y elaborados que dan al diseñador libertad de expandir sus límites creativos. En cuanto a la desventaja pueden, ésta puede ser el alto nivel de desperdicio material, pues se sustrae material que difícilmente se reutilizará.

5. **Moldeado (Forming):** Es una práctica altamente utilizada en diseño industrial, ya que forma parte de la producción en masa que conforma muchos de los productos que nos rodean. Se requiere de moldes para hacer piezas volumétricas, los procesos de moldeado necesitan el uso de moldes negativos (hembra) y moldes positivos (macho). Muchos de éstos se fabrican con la técnica de *contorneado*, pero en este caso la pieza creada sirve como el molde, no como la pieza final.

El proceso tiene una parte costosa en la etapa del diseño y fabricación del molde, la ventaja es que con el mismo molde se pueden fabricar muchas piezas idénticas.

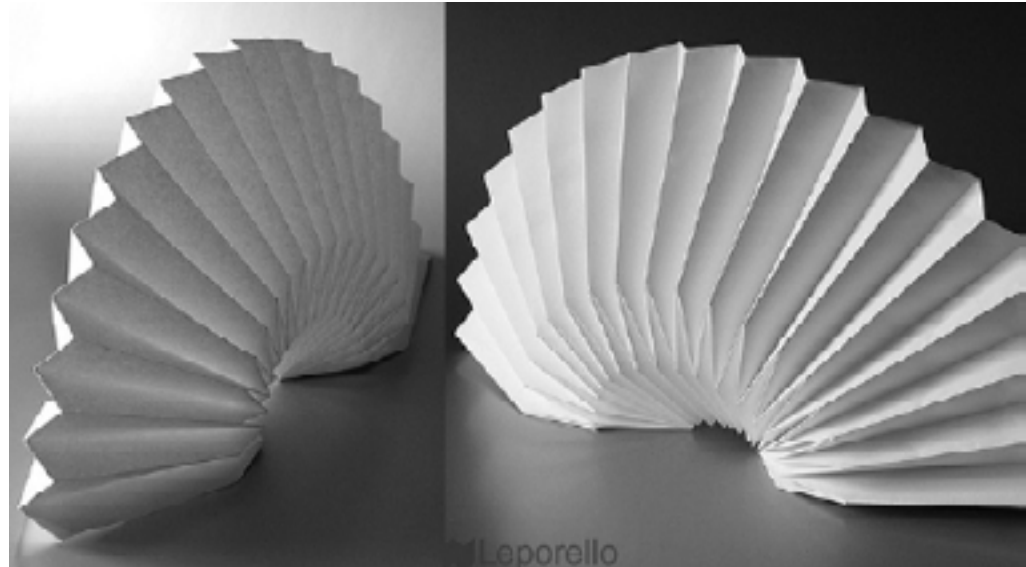
En el área de construcción, la técnica se utiliza para elaborar tabiques, prefabricados de concreto, tejas y otros materiales. La fabricación digital posibilita la producción de piezas no estandarizadas, pero su desventaja se presenta cuando se busca crear demasiadas piezas irregulares, ya que la fabricación de distintos moldes requiere mayor experimentación y costo.

Something different from Daniel Libeskind. Foto: allen.



[1] El software de modelado utiliza polígonos y subdivisiones como triángulos y cuadriláteros para poder aproximarse a superficies continuas.

Origami vějíř. Foto: Hana Vyoralová



Maquinaria de fabricación digital y el control numérico por computadora (CNC)

El conocimiento e innovación en fabricación, se va a dar a medida que podamos tener mayor tiempo para experimentar con el material, el software y la máquina, y si la maquina no puede ser manipulada por el alumno, se verán limitadas las propuestas de diseño (DUNN, 2012).

Shimmering Contours. Foto: Shawn Clover.

El proceso de control numérico por computadora o CNC, por sus siglas en inglés, es con el que funcionan la mayoría de las tecnologías de fabricación, las cuales siguen una serie de instrucciones a través de sistemas que las generan a partir de códigos y que van controlando el movimiento de máquinas herramienta. Un programa CNC maneja diversas tareas, como movimientos, cambios y rotación de herramientas, lo cual le permite al diseñador una variedad muy amplia de opciones.

Cuando se organiza la operación y movimiento de la cabeza del router, las variaciones, por mínimas que sean en las instrucciones que se le dan a la máquina, pueden generar grandes diferencias en el acabado del producto. Los comandos de CNC son scripts cortos conocidos comúnmente como código G porque utilizan esta letra en su designación. Una de las instrucciones que se pueden definir es la velocidad del movimiento, si el mov-



imiento será controlado en línea recta o curva, o para información de una herramienta.

La tecnología de fabricación digital disponible para la transformación material se puede dividir en dos tipos de sistemas, los sustractivos, que extraen material, y los aditivos, que lo solidifican. En el primero, se utilizan herramientas de corte, como brocas, chorros o cuchillas, las cuales desbastan el material por medio de desplazamientos, en coordenadas y en distintas direcciones, controlados por computadora,. Sus posibilidades de trabajo se definen por el material utilizado, las velocidades de operación y la cantidad de ejes de movimiento que la herramienta controlada puede seguir (GARCÍA, 2011). La tecnología CNC se define por las habilidades y los conocimientos del usuario, la habilidad para utilizar una máquina con un sentido artesanal. "Es necesario que el diseñador tenga un grado de intuición material, ya que la fabricación digital está más vinculada con la interacción entre herramienta y el material" (BEOKREM, 2013).

Algunos laboratorios de fabricación digital pueden incluir máquinas como impresoras 3D, Router CNC, máquinas de corte láser, entre otras. A continuación se describen sus principales características:

Ultra-lab en la Printer party.
Foto: Ultra-lab.



- **Impresión 3D.** También conocidos como equipos de prototipado rápido (Rapid Prototyping). Actualmente, hay muchas versiones que utilizan diferentes materiales para fabricar, por lo que crear modelos físicos a escala de una propuesta de diseño ya no es inalcanzable como años atrás. Estas máquinas permiten ver defectos del diseño antes de su fabricación y corte en Router o láser.

En la actualidad, se han presentado proyectos innovadores con el uso de la tecnología aditiva de impresión 3D. Por ejemplo, Dus Architects, junto con otra firma llamada Ultimaker, desarrollaron una impresora capaz de construir piezas de 2 x 2 x 3.5 m de una mezcla de bioplástico constituido en un 75% de aceite vegetal, con el cual pueden construir casas de varios niveles por medio de piezas ensambladas.

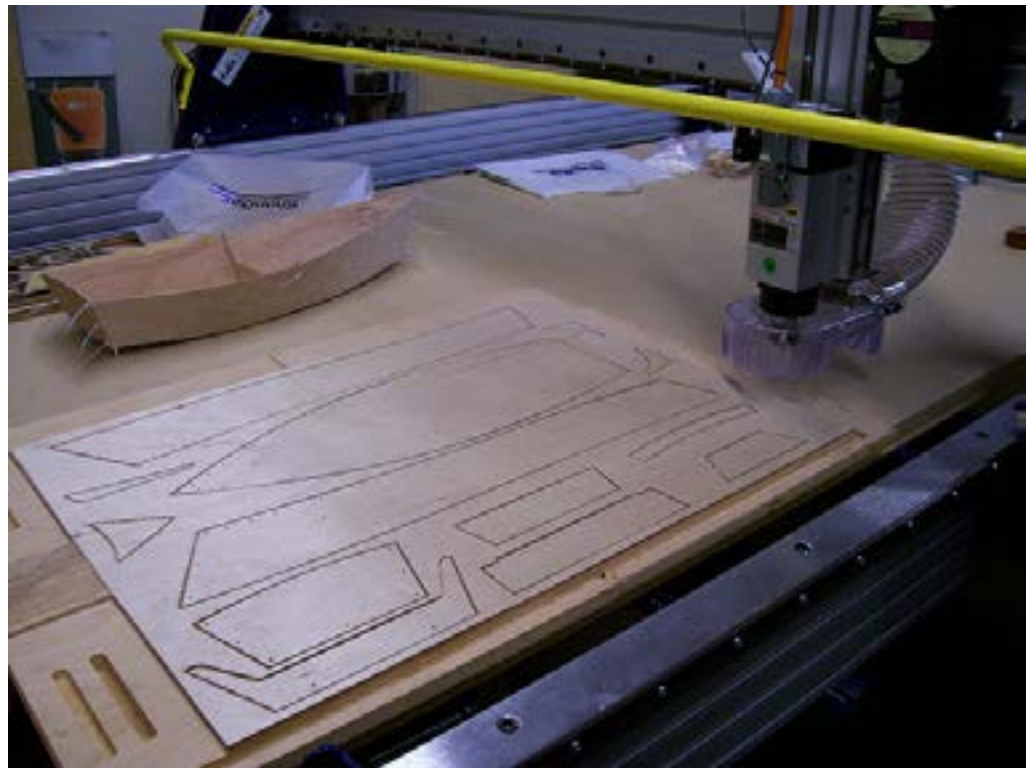
Este proyecto experimental y muchos otros, han generado una discusión sobre

la forma en la que se proyectan los edificios, y buscan resolver problemas comunes en la construcción: costos de transportación de materiales, nula producción de desperdicios y reciclaje total de los elementos que conforman las estructuras (DUS ARCHITECTS, 2014).

- CNC Router/Milling:** Fresadora o milling, esta máquina utiliza un cortador rotativo para sustraer material de un volumen. Comúnmente se le llama milling a la maquinaria usada para metales y el Router sirve para maderas y plásticos. En la cabeza se pone la herramienta que hace los movimientos y cortes, la cama es la superficie donde se coloca el material, el cual no se mueve (en el caso de los routers de hasta tres ejes), y el aumento de ejes permite hacer piezas más intrincadas, pues éstos pueden moverse por otros cantos del material.

Un CNC Router se divide en el número de ejes en el que trabaja, existen de 2, 2.5, 3, 4 y 5 ejes. El principal uso de estas máquinas es remover material en un volumen, por ejemplo, esculpir una pieza de madera, facilitar la construcción de componentes no estandarizados y también funcionan para crear moldes precisos, detallados o con alto grado de complejidad de diseño.

CNC Router. Foto: Bill Ward.



Existen los brazos robóticos que usualmente se utilizan en industria automotriz, pues permiten mayores movimientos gracias a los más de tres ejes que se pueden usar. El taladro se mueve a través de distintos cantos del objeto y con ello se hacen piezas más complejas y se reducen los tiempos de fabricación. Contar con cinco ejes, (dos ejes adicionales perpendiculares entre ellos) facilita que la cabeza cortadora penetre en áreas interiores de la pieza.

- **Cortadora Laser (CNC laser cut).** El corte laser facilita cortes limpios y precisos, contornos extremadamente finos y delicados, con diversos materiales como cartón, madera, metales y acrílicos de distintos espesores.

Conclusiones

Actualmente, en la práctica profesional muchos arquitectos utilizan el software de diseño como herramienta de representación y dejan de lado el potencial creativo y de producción que estos programas ofrecen. La fabricación digital permite que los diseñadores puedan expandir sus límites creativos, pues vivimos en una época privilegiada en la que la tecnología, las plataformas abiertas y la maquinaria como impresoras 3D, están disponibles a costos muy accesibles para el que busca experimentar y crear.

Un CNC router puede comprarse desde 999,00 dólares con la empresa Shapeoko, (startup que, por medio de plataformas de crowdfunding como Kickstarter, obtuvo la inversión para crear su máquina), o inclusive fabricarse de forma hazlo tú mismo a través de tutoriales en línea.

La plataforma creada por MIT, Fab Lab, tiene una interconectividad global y permite a cualquier persona con acceso a Internet el libre acceso a cursos y clases con expertos alrededor del mundo, pues su objetivo es democratizar el conocimiento y aprender a fabricar casi todo, como su lema lo dice. La red de conocimiento compartido, posibilita consultar, crear foros y retroalimentar proyectos con miles de personas.

En el ámbito arquitectónico y de diseño, la fabricación digital ayuda a generar propuestas materiales únicas, esta unicidad es una de las búsquedas del arquitecto proyectista y se puede aprovechar para enriquecer una práctica básica del diseño arquitectónico, la cual se trata de la creación de espacios que generen experiencias más placenteras en el usuario.

En este momento, la tecnología y la capacidad de fabricación de modelos a escala han regresado al diseñador a una posición más relacionada a la háptica, y esto se ve reflejado en diseños más sensibles y en la mejora de las experiencias del usuario en un determinado espacio u objeto. La fabricación digital también promueve la innovación en el diseño todo el tiempo, es una experimentación constante que reta al diseñador en cada propuesta, cada geometría tendrá infinitas posibilidades de materialización. ■

Bibliografía

- [1] BEORKREM, Christopher, *Material Strategies in digital Fabrication*, Estados Unidos: Routledge, 2013.
- [2] DELANEY, M., Gorman, Anne, *Studio Craft and Technique for Architects*, Laurence King: Londres, 2015.
- [3] DUNN, Nick., *Digital Fabrication in Architecture*, Laurence King Publishing: Londres, 2012..
- [4] DUS Architects, *The 3d print canal house in Amsterdam*, Países Bajos, 2014, [en línea]: <http://www.dusarchitects.com>.
- [5] GARCÍA, R., *Fabricación digital de modelos constructivos: Análisis de equipos y procesos*, Chile, 2011.
- [6] GLOBALA, A., Donn, M. y Twose, S., *Digital to Physical: Comparative evaluation of three main CNC fabrication technologies adopted for physical modelling in architecture. International Journal of architectural computing*, 2012.
- [7] IWAMOTO, L., *Digital Fabrications. Architectural and Material Techniques*. Princeton: Architectural Press, Estados Unidos, 2009.
- [8] KOLAREVIC, B. y Klinger, K., *Manufacturing material Effects. Rethinking Design and Making in Architecture*, Routledge, Estados Unidos, 2008.
- [9] MC. NELLY, C., *Knitting behavior: a material-centric design process*, Tesis MIT, Estados Unidos, 2015.
- [10] ZUMTHOR, P., *Thinking Architecture*, Birkhauser: Suiza, (NA).

Mesografía

- [1] Plataforma Fab Lab, [en línea]: www.fabacademy.org, [Consulta: 10 enero de 2016].
- [2] CNC router de mesa, [en línea]: <http://carbide3d.com/shapeoko/>, [Consulta: 4 abril de 2016].
- [3] Soelberg Industries, [en línea]: www.soelbergi.com, [Consulta: 3 abril de 2016].