

## **Fabricación digital de modelos constructivos: análisis de equipos y procesos**

### **Digital fabrication of construction models: analysis of equipments and procedures**

*Rodrigo García Alvarado\**

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

(Recibido el 11 de agosto de 2010. Aceptado el 16 de marzo de 2011)

#### **Resumen**

Este trabajo plantea una clasificación preliminar de los equipos de fabricación digital, y sus usos posibles en el diseño y ejecución de edificios. Se propone la elaboración de modelos constructivos por cortadoras láser para estudiar posibilidades materiales e industriales. Luego, se plantean estrategias de diseño digital para la elaboración de estos modelos, y se expone el desarrollo de un programa interno en un software de modelación 3D. Finalmente se analizan algunas condiciones de los modelos ejecutados con esta implementación, verificando la revisión de aspectos constructivos en el diseño, así como de optimización e industrialización.

----- *Palabras clave:* Construcción, diseño, fabricación digital, modelos, cortadoras láser

#### **Abstract**

This paper sets out a preliminary classification of digital fabrication equipment and possible uses in the design and execution of buildings. It proposes the elaboration of construction models by laser cutters in order to study material and industrial possibilities. Digital design strategies for the execution of these models are set out, and the development of an internal script in 3D-modeling software is presented. Finally, several conditions of the elaborated models are analyzed, verifying the constructive issues review on design, as well as, optimisation and industrialization.

----- *Keywords:* Construction, Building design, digital fabrication, models, laser-cutter

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 56 + 41 + 273 14 40, fax: + 56 + 41 + 273 10 38, correo electrónico: rgarcia@ubiobio.cl. (R. García)

## Introducción

Recientemente se dispone de diversos equipos de fabricación de elementos materiales que se pueden controlar por computador a través de información digital, por lo que son denominados normalmente maquinas de control numérico (*CNC: computer numeric control*). Las cuales se están usando en industrias metalmecánicas, y comenzado a aplicar también en actividades de la construcción. Estos sistemas permiten relacionar el diseño digital con la ejecución de productos físicos por medio de distintas tecnologías de manufactura, facilitando el control y la variedad de producción [1, 2]. En la industria de la construcción, grandes fabricantes de elementos estructurales están utilizando maquinas de fabricación digital, para aumentar el volumen y calidad de sus productos [3], aunque sin mayor relación con el diseño global de la edificación. Por otro lado, algunas oficinas de arquitectura están utilizando equipos, especialmente de fabricación de pequeñas piezas o prototipos rápidos (*RP: rapid prototyping*), fundamentalmente para realizar maquetas de edificios complejos [4]. Sugiriendo también nuevos sistemas constructivos y alternativas de industrialización variable [3, 5], aunque sin desarrollar mayormente estas posibilidades. Varias instituciones de enseñanza profesional han implementado estos equipos para realizar modelos y experimentar propuestas innovadoras [4, 6]. Pero no se dispone de una caracterización general de estos equipamientos en relación a sus aplicaciones potenciales en la edificación, ni una descripción de sus procedimientos y capacidades específicas.

Este trabajo plantea una clasificación preliminar de tecnologías de fabricación digital, mencionando algunas características principales y usos posibles en el diseño y ejecución de edificios. Posteriormente se describen aplicaciones generales en el proceso de proyecto, proponiendo en particular la ejecución de modelos constructivos por cortadoras láser para estudiar posibilidades materiales e industriales. Por lo que luego se proponen estrategias de diseño digital y elaboración de estos modelos, y se expone la implementación de una

de las estrategias a través del desarrollo de un programa interno en un software de modelación 3D. Finalmente se analizan algunas condiciones de los modelos ejecutados, verificando la revisión de los aspectos mencionados inicialmente. Aportando una aproximación específica para la elaboración de modelos constructivos por fabricación digital.

### **Tecnologías de fabricación digital**

La fabricación digital puede ser definida como un “proceso computacional que transforma elementos materiales” [7]. Lo que en general se puede realizar a través de dos sistemas; sustractivos o aditivos. Los sistemas sustractivos extraen material y se asocian a las máquinas de control numérico (CNC). Los sistemas aditivos solidifican material y se vinculan a las máquinas de prototipo rápido (RP). Aunque estas dos últimos términos no son precisos, porque todos los equipos de fabricación digital se controlan numéricamente y pueden producir prototipos, pero se reconocen modalidades de trabajo diferentes [1].

Los sistemas sustractivos utilizan cuchillos, brocas o chorros que se desplazan bajo control digital para desbastar material, y se diferencian fundamentalmente por la cantidad de ejes de movimiento y sus magnitudes de trabajo, además de las técnicas utilizadas (que implican a su vez los materiales posibles de trabajar, las velocidades de operación y terminaciones).

Los sistemas aditivos a su vez, solidifican un material, originalmente en polvo, gas o líquido, por capas sucesivas en procedimientos electrónicos dentro de una cámara sellada. Con volúmenes de trabajo que oscilan de los 20 a 60 cm. por lado, por lo que se prestan para piezas especiales de pequeño tamaño, como prototipos de diseño. Estos equipamientos, también son llamados *impresoras 3D*, permiten crear vacíos interiores, por lo que se puede elaborar formas sofisticadas. Los volúmenes pueden ser preparados en software de diseño tridimensional y luego deben ser traspasados en formato STL como formas unitarias. Luego son procesados en

el software de control, regularizando la geometría y estableciendo los niveles horizontales de solidificación.

Los equipos sustractivos de mayor variedad de movimiento, en todos los ejes y sentidos posibles, son las *fresadoras*, aunque poseen dimensiones reducidas de trabajo y usan mecanismos sólidos de rebaje. Cuando incluyen un gran versatilidad de herramientas, de distinta precisión y dirección, son denominados *centros de mecanizado*. Los equipos que se desplazan solo en un plano logran mayores magnitudes de trabajo, pero operaciones más limitadas (fundamentalmente de corte, aunque también en tramos rectos o curvos). Encontrándose desde cortadoras de cuchillos para materiales delgados, cortadoras láser para maderas y plásticos, hasta grandes equipos industriales de corte por plasma o arco eléctrico. Algunas mesas cortadoras pueden variar herramientas y profundidades de trazado, por lo que son denominados *router*.

Las fresadoras sustraen material por fricción, en distintos ejes de desplazamiento y rotación (o giro de la base), desde un bloque de madera, plástico o metal. Permitiendo elaborar piezas de maquinarias, pequeños elementos de sujeción o modelos volumétricos de edificios (maquetas). Las formas también pueden ser preparadas en cualquier software de diseño tridimensional y luego exportados a software auxiliares (como CADMill o MasterCAM), para definir las trayectorias de fresado, enviando las instrucciones a la máquina en el lenguaje de control, normalmente *código G*.

Las cortadoras de cuchillo, llamadas también *plotters de corte*, desplazan una fina hoja metálica en un eje, con rotores que mueven el material en el otro sentido, logrando realizar cortes rectos o curvos. Aunque solo con laminas de materiales blandos de pequeño espesor (inferior a 1 mm.) como papeles, cartones o vinilos, con tamaños de hasta un 1 mt. de ancho y largos ilimitados. Con estos equipos se pueden realizar siluetas o modelos tridimensionales constituidos de perfiles delgados simples (maquetas de papel o cartón).

Las cortadoras láser (figure 1) desplazan un haz de luz de alta intensidad en dos ejes simultáneamente, desvaneciendo pequeñas ranuras del material (madera, plástico, cartón o cueros), sin tener contacto físico con el producto y con una alta precisión. Como producen el corte por calor, usualmente tiznan los costados y a veces también las superficies del material, expeliendo humo y produciendo ocasionalmente inflamación. Utilizan como fuentes de láser gas CO<sub>2</sub> en cámaras horizontales, que normalmente alcanzan de 50 a 90 cm. por lado. Algunas cortadoras láser se pueden abrir lateralmente para introducir piezas de mayor magnitud y elaborar elementos por partes (aunque con riesgo de escape de humo). La altura libre de operación es hasta unos 50 mm., pero la profundidad de trabajo depende del material y es difícil de determinar con antelación. Normalmente se realizan pruebas iniciales con cada material o partida de elementos, definiendo la intensidad y velocidad apropiada para cortar totalmente el material o una parte (grabar). Algunos materiales, como el vidrio, piedra o metal solo se pueden grabar. Los trazados de corte se envían directamente desde el software de diseño y se establecen velocidades e intensidades según las capas o colores de dibujo. De este modo se pueden elaborar perfiles de materiales rígidos, trozar revestimientos o componer modelos de edificios por piezas.

Las cortadoras industriales poseen chorros de plasma (gas supercalentado e ionizado), arco eléctrico o agua a alta presión, que permiten seccionar laminas de metal de hasta 200 mm. de espesor, sobre mesas de trabajo para planchas de hasta dos metros de ancho. Normalmente desplazándose en un eje y la base en otro. Con los cuales se pueden trozar planchas de revestimientos metálicos de gran tamaño y placas para piezas estructurales de pilares o vigas, así como preparar también moldes para vaciado. Algunas maquinas se dedican exclusivamente a cortar en un sentido, perforar agujeros para apernado, plegar o soldar en línea, requiriendo amplias plataformas de trabajo y sistemas semi-automatizados de sujeción de las planchas.

Los brazos robóticos son equipos de gran versatilidad de movimientos y operación, en una ubicación fija o trasladable (a veces motorizados), normalmente con tres o cuatro articulaciones que alcanzan un amplio radio de acción y variados ejes de trabajo. Utilizando sujetadores de precisión para trasladar elementos, afianzar perforadoras o cortadoras, de modo que pueden realizar operaciones complejas controladas digitalmente. Se utilizan mayormente en la industria automotriz y experimentalmente se han utilizado para elaborar elementos constructivos o tareas en terreno. Se pueden complementar con otros equipos y con correas transportadoras de

materiales, conformando *celdas de manufactura flexibles*, es decir sistemas de producción material que se pueden modificar rápidamente a través de los controles digitales.

En la tabla 1 se indican los sistemas generales de fabricación digital con los distintos tipos de máquinas disponibles, una descripción sucinta de cada tecnología, los materiales habitualmente utilizados para trabajar, las dimensiones máximas usuales del área de trabajo, y sus posibilidades de aplicación en la construcción (en modelos o componentes).

**Tabla 1** Sistemas y Máquinas de Fabricación Digital

<b>Sistemas</b>	<b>Tecnología</b>	<b>Materiales</b>	<b>Magnitudes max.</b>	<b>Aplicación en construcción</b>
<b>Aditivos</b>				
Impresoras 3D	Solidificación por capas en cámara	Cera, Polvos, Líquidos	60x60x40 cm.	Modelos tridimensionales detallados Moldes pequeños
<b>Sustractivos</b>				
Fresadoras	Desbaste por rotación de broca en distintos ejes de aplicación	Bloques Ferrosos, Madera, Plásticos	30x30x30 cm.	Modelos Volumétricos Piezas de Sujeción
Plotter de Corte	Escisión por desplazamiento de cuchillo en dos ejes	Cartones, Vinilos	100 cm. de ancho Espesor 1 mm	Modelos de perfiles delgados simples
Cortadoras Láser	Combustión por haz láser desplazado en dos ejes	Laminas de Cartón, Maderas, Plásticos	60x90 cm. Espesor 50 mm	Modelos de perfiles gruesos complejos Elaboración de Revestimientos
Cortadoras Industriales	Escisión por agua a presión y abrasivo, o por plasma (gas con arco eléctrico)	Planchas Metálicas	400x200 cm. Espesor 200 mm	Piezas estructurales, conectores y revestimientos
Routers	Desbaste por rotación de fresa en dos ejes principales mas laterales	Planchas de Madera y Plásticos	240x150 cm. Espesor 200 mm.	Modelos topográficos Revestimientos, divisiones, soportes, moldes,
Brazos Robóticos	Desplazamiento, afianzamiento o desbaste en distintos ejes	Bloques y Planchas Metálicas, Hormigón, Arcilla, Madera, Plásticos	300x300x300 cm.	Modelos Volumétricos Mamposterías, Revestimientos, Encajes

### **Modelos constructivos**

La fabricación digital puede participar en diferentes etapas de la elaboración de un edificio, desde los modelos de diseño (maquetas) hasta componentes definitivos de construcción. Aportando en diferentes aspectos. Los modelos físicos apoyan primeramente la comprensión tridimensional del diseño, al contar con representaciones volumétricas. Así como propiedades de masa, textura, luminosidad y apariencia material. En algunos casos, similares a los elementos a ejecutar según los materiales de trabajo. Otorgando de este modo también una comprensión física del diseño, que normalmente se trabaja en vistas bidimensionales, y ocasionalmente en representaciones tridimensionales, pero de configuración material diferente a la ejecución real.

Los modelos de fabricación digital permiten revisar también algunas condiciones de comportamiento estructural (estabilidad estática, dinámica, conexiones, etc), físico (aislamiento acústico, térmico), ambiental (sombreamiento, asoleamiento, disposición al viento), constructivo (elementos estructurales primarios, secundarios, revestimientos, secuencias de montaje, dimensión de piezas, etc). Comprender las configuraciones espaciales en relación a condiciones constructivas o ambientales en momentos preliminares de diseño es altamente importante para mejorar la propuesta del proyecto. Además se pueden revisar algunos aspectos separados, por ejemplo los revestimientos o el sistema estructural, que poseen procedimientos diferentes de ejecución y escasamente se estudian de manera tridimensional y constructiva.

Así mismo la fabricación digital introduce en el proyecto explícitamente acciones de ejecución, tanto en las características materiales (espesores, terminaciones, soportes), como operativas (trazados, procesos de trabajo, replicabilidad, etc). Sugiriendo también conceptos de industrialización o masificación, normalmente desatendidos en los diseños convencionales o tratados de manera independiente. Considerando aspectos de producción de la obra, y más que nada el sentido de eje-

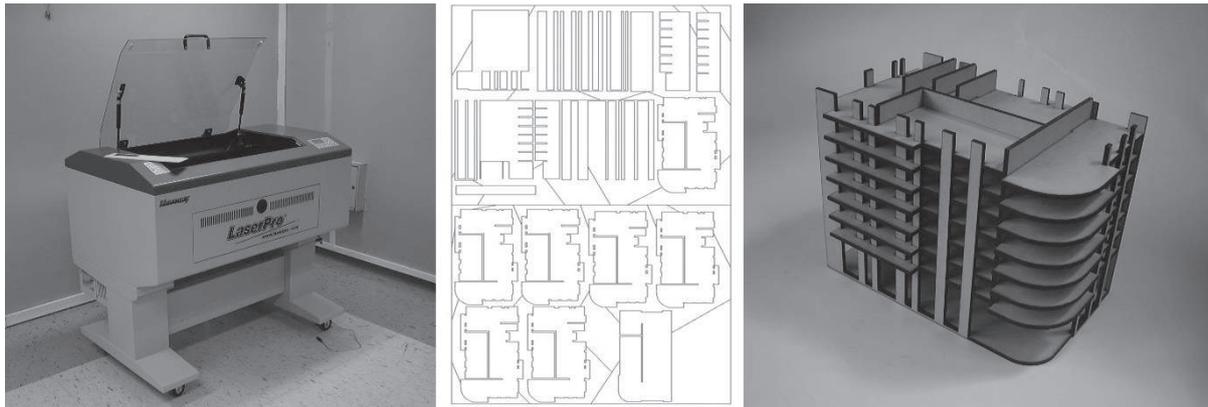
cución (diseño, fabricación, montaje, variación, desmontaje). Incorporando una dimensión de temporalidad y de responsabilidad material, que se vincula con la necesaria conciencia sustentable de la edificación.

La fabricación digital se vincula además a las estrategias de producción masiva variable. El desarrollo económico exige elaborar objetos más diversos (pequeños lotes), promoviendo la industrialización en procesos más rápidos, precisos y flexibles. Lo que se ha avanzado con modalidades de gestión controladas digitalmente de manera integrada (*CIM: computer integrated manufacturing*), que permitan cambiar rápidamente las condiciones de producción [2]. Esta aproximación es adecuada al proceso de edificación, por su gran diversidad de elementos y procedimientos artesanales y escasamente eficientes. En este sentido, la fabricación digital sugiere una renovación relevante en los procesos de diseño y construcción [3], que requiere considerar nuevas estrategias de masificación personalizada, a través de recursos paramétricos o generativos [4, 6]. Estableciendo una vinculación más estrecha entre el diseño y la ejecución.

Por esta razón es relevante que los modelos se aproximen a la descripción constructiva, más que a reproducciones volumétricas generales. Debido a que estos modelos permiten considerar aspectos de ejecución, estructuración e industrialización en el diseño. Los aspectos constructivos de los edificios suelen ser diferenciados a partir de los componentes (cimentaciones, muros, cubiertas, instalaciones, etc.), según la secuencia temporal de la ejecución [8]. Conformando sistemas integrales entre las estructuras principales, paramentos y revestimientos, que se aplican mayormente de maneras modulares, con piezas planas que conforman los cerramientos (muros, techos, pisos, vigas o pilares con dos dimensiones mayores). Debido a que los elementos constructivos requieren fundamentalmente envolver los espacios edificados y maximizar las resistencias superficiales [9]. En ese sentido una modelación por elementos planos permite alcanzar una descripción adecuada de la estructura y construcción de un edificio.

Por lo que se plantea que la configuración de modelos a partir de cortadoras láser es una opción adecuada para el estudio de sus aspectos constructivos, ya que permite realizar elementos relevantes. Además que su elaboración se asemeja a equipamientos de producción industrial, lo que permite proyectar

posibilidades de fabricación. Aunque evidentemente hay diferencias de composiciones materiales, conexión y grado de detalle. De modo que podemos considerar que dentro de las opciones de manufactura automatizada, es una tecnología pertinente para modelos constructivos de edificios.



**Figura 1** Cortadora laser, planos de corte y modelo constructivo de edificio

### Metodología

Para ejecutar el modelo constructivo de un edificio en cortadora láser, se requiere el dibujo digital de los elementos relevantes (pilares, vigas, muros, pisos, techumbres, etc). Específicamente de los perímetros y terminaciones de cada pieza, distribuidas en una superficie equivalente al área de trabajo de la maquina, según la escala de ejecución. Lo que se puede preparar en software CAD, trazando perfiles de los elementos, seccionando volúmenes o formas agregadas.

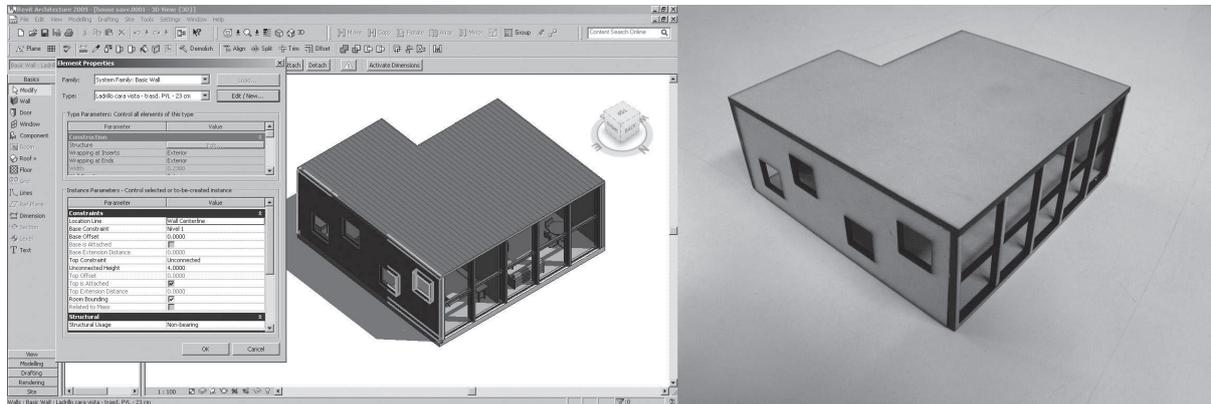
El trazado de perfiles consiste en dibujar el contorno de cada componente de acuerdo a las medidas correspondientes. Lo que se puede realizar a partir de las plantas, elevaciones o cortes, dibujando en capas sobrepuestas. Identificando los elementos constructivos más relevantes, especialmente piezas estructurales y paramentos. Lo que requiere interpretar la configuración y ocasionalmente dibujar partes que no están representadas en la planimetría. Este procedimiento se facilita con un software de modelación constructiva (*BIM: building information modeling*), como Archicad,

Revit o VectorWorks, en que dispone de la información geométrica tridimensional de todo el proyecto y la identificación de sus componentes. Por lo que basta precisar la clase de elementos y una modalidad de visualización bidimensional que presente los perímetros. Luego se puede convertir a un trazado geométrico para realizar ajustes menores, reproducción de algunos componentes y su distribución. Los software BIM permiten también la especificación constructiva de los elementos, logrando de este modo establecer una relación entre los componentes constructivos reales y su ejecución física (figure 2).

La definición de elementos por seccionado está basada en la capacidad de algunos software de intersectar planos en una forma tridimensional. Permitiendo generar automáticamente el perfil de la intersección. De este modo se puede elaborar el volumen general de una edificación y aplicar planos en los bordes, ejes o cada ciertas modulaciones. Lo que permite una rápida elaboración de perfiles de muros, techos, pisos, piezas o marcos estructurales, que luego se pueden ajustar y distribuir. Además que

constituyen piezas mayores, promoviendo la definición de componentes industrializados y definiendo elementos constructivos relevantes

en fases tempranas del proyecto. Vinculando decisiones de formas y espacios generales con sistemas estructurales y paramentos.



**Figura 2** Software de modelación constructiva (bim) y modelo de cortadora láser

El volumen del edificio, se puede elaborar en los software de diseño tridimensional, a través de formas tridimensionales básicas (paralelepípedos, cilindros, esferas, etc) que se alteran modificando la descripción geométrica y/o anexan para conformar conjuntos complejos. También se pueden elaborar volúmenes sustraídos, en que se aplican operaciones booleanas de extracción de formas, especialmente para definir vanos o espacios interiores. El volumen general, adicionado, alterado y/o sustraído, debe quedar finalmente como una forma sólida completa. Luego se aplica el plano de sección en una de las vistas ortogonales, a una profundidad determinada, cerca de la superficie si se desea el perfil perimetral o a ciertas distancias repetidas. Después se extrae de cada plano, el perfil correspondiente, trasladándolo de posición. Luego todos los perfiles deben ser alineados y distribuidos en un plano para la fabricación.

El modelo para seccionado también se puede generar de una agregación de formas correspondientes a los elementos constructivos, normalmente en base a su trazado bidimensional, conformando los recintos interiores. Integrando luego los elementos como un volumen único y realizando secciones en los ejes correspondientes. Sin embargo, esta estrategia requiere realizar un

modelo detallado y similar a los planos, por lo que no contribuye sustancialmente al desarrollo del proyecto, sino más que nada a su verificación.

Después los perfiles deben ser distribuidos y repetidos para ejecutar cada pieza, ordenados gráficamente según el área de trabajo de la maquina o del material a utilizar. Por lo que es conveniente trazar un rectángulo correspondiente a la placa de trabajo según la escala de ejecución. Estableciendo una relación adecuada entre la dimensión real del edificio y sus elementos, con respecto al área o material de trabajo, según la escala posterior del modelo (considerando también la ejecución en varias placas). En la tabla 2 se expone la relación entre la longitud mayor del elemento a ejecutar en metros (en la primera fila horizontal), con respecto a la magnitud principal del área o material de trabajo en centímetros (en la primera columna izquierda), sugiriendo la escala de reproducción correspondiente (en las celdas interiores). Naturalmente se pueden lograr escalas mayores, subdividiendo piezas en distintas placas, pero también se debe controlar la cantidad total de material. Así mismo, se pueden dimensionar escalas intermedias o efectuar un dimensionamiento gráfico de los diseños para aprovechar al máximo el área de trabajo (dejando un borde de seguridad).

**Tabla 2** Escalas de reproducción según dimensión del diseño y magnitud de elaboración.

<i>Magnitud de trabajo (cm)</i>	<i>Longitud del Diseño (m)</i>						
	2	10	25	50	100	250	500
20	10	50	125	250	500	1250	2500
30	7	33	83	167	333	833	1667
40	5	25	63	125	250	625	1250
50	4	20	50	100	200	500	1000
60	3	17	42	83	167	417	833
80	3	13	31	63	125	313	625
100	2	10	25	50	100	250	500

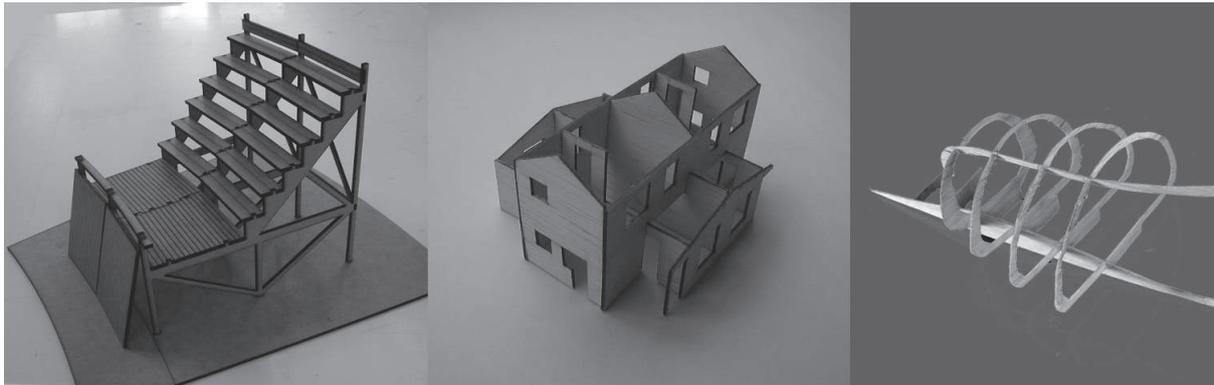
Los trazados deben ser ordenados aprovechando la mayor ocupación del área, acercándolos y rotándolos para enlazar formas complejas. De preferencia las figuras deben quedar contiguas, debido a que esto ahorra tiempo de corte realizando una sola pasada para el costado de dos piezas (aunque se debe tener la precaución de eliminar uno de los trazados para evitar la doble acción del haz láser). Si se desarrollaron los perfiles en un software de diseño tridimensional, es conveniente luego traspasarlos a una visualización o programa bidimensional, que permite controlar con más precisión el trazado. Se debe verificar que las figuras estén conformadas por trazados completos con detalles adecuados, especialmente en las curvas, que algunos software simplifican en tramos rectos. Además se debe separar las figuras que utilizaran distintos materiales para ordenar los procesos de trabajo, y dentro de un mismo conjunto diferenciar en capas o colores los trazados que corresponden a distintas profundidades de corte o grabado. En general es conveniente utilizar una capa adicional invisible en que se numeran las figuras para facilitar su montaje posterior. Los elementos que en los modelos se dispondrán en ángulo (por ejemplo, muros en esquinas), deben considerar el espesor del material, agregando o reduciendo el perfil según la medida real a escala. Es conveniente también ejecutar elementos colineales (muros, vigas o losas consecutivas) en

una pieza continua para facilitar su elaboración, considerando intersecciones entre piezas, con ranuras de ensamble según el espesor de material. Es frecuente en estos modelos considerar variados ensambles, aunque no correspondan a las uniones efectivamente utilizadas en la construcción real (realizadas con clavos, pernos o soldaduras que no se representan), pero que contribuyen al montaje del modelo y la compresión de su ejecución, además que una alternativa posible para su ejecución industrializada.

Los materiales para elaborar modelos constructivos en cortadoras laser pueden ser cartones, maderas o plásticos (figure 3). Los cartones son baratos, pero de escasa rigidez y conservación, los plásticos son más limpios (no se tiznan los cortes) y de buena presentación, pero caros. Las maderas son baratas y rápidas de cortar, especialmente en placas reconstituidas (MDF), logrando una rigidez, conservación y apariencia similar a materiales reales de construcción. Un espesor de 3 a 8 mm. logra una representación adecuada de elementos constructivos de 10 a 50 cm. en la realidad a escalas usuales para diseños de edificación. El proceso de corte con la máquina láser se controla directamente desde el software CAD, enviando el dibujo a través de un controlador de impresión (*driver*). Se debe configurar el área de impresión según el tamaño del material disponible. En el controlador se diferencia la intensidad,

velocidad y resolución de corte por colores o capas. La ejecución de los cortes se realiza por cada placa, cambiándolas manualmente. Las superficies suelen quedar ligeramente tiznados, por lo cual la primera tarea posterior es una limpieza. Luego se separan las piezas, lo que puede implicar algún repaso manual si algunas partes no fue-

ron debidamente cortados. El montaje se puede realizar por encaje, adhesivos o elementos adicionales de refuerzo (tornillos, bisagras, ángulos, etc.). Es recomendable utilizar una base general con el trazado similar al utilizado en el diseño, con soportes o marcas en los elementos, para asegurar un montaje adecuado.



**Figura 3** Ejemplos de modelos constructivos

## Resultados y discusión

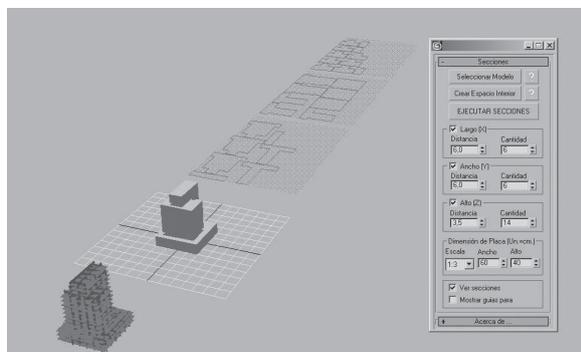
Para facilitar la elaboración de modelos constructivos por cortadora láser se implemento la estrategia de seccionado de volúmenes programando una rutina interna en un popular software de diseño tridimensional (3D-Studio Max de Discreet). El programa fue elaborado en lenguaje Max-Script (similar a C++) y se presenta como una ventana sobrepuesta al ambiente de trabajo (figure 4). Permite identificar una forma tridimensional elaborada previamente y realizar planos de sección en los tres ejes ortogonales (X,Y,Z). Estableciendo por parte del usuario la cantidad o la distancia de los planos entre si, como una modulación constructiva. El programa sugiere inicialmente una cantidad o distancia de acuerdo a la extensión total de la forma en cada eje. Así mismo solicita la dimensión de la placa o área de trabajo de la maquina, y la escala de reproducción (considerando que las unidades del diseño corresponden a metros). Luego puede ejecutar automáticamente los planos de sección, extrae los polígonos de intersección y los distribuye, en un costado del modelo, sobre trazados rectangulares equivalentes a la

dimensión de las placas a la escala definida. La distribución de los perfiles se realiza de manera sumativa, según su dimensión más extensa, y va creando rectángulos (placas) según la cantidad de piezas generadas. Posteriormente este trazado de los perfiles se puede acomodar y exportar para un software CAD o ejecutar directamente a través del controlador.

Adicionalmente el programa puede realizar un vacío interior, efectuando un duplicado del mismo volumen seleccionado, reduciéndolo un 10% y sustrayéndolo desde el centro de la base de la forma inicial. Generando un volumen hueco con un contorno equivalente a 1/20 de la longitud mayor, de modo que las secciones generadas pueden representar esquemáticamente marcos estructurales. Además el programa puede efectuar opcionalmente una modelación tridimensional de las secciones con un espesor equivalente a un décimo de la distancia, para visualizar la conformación de los elementos cortados y facilitar su montaje posterior.

Los planos de sección se realizan sobre todas las formas existentes en el ambiente de trabajo,

por tanto el volumen debe estar independiente o surgirán perfiles adicionales. Los perfiles pueden quedar abiertos si las formas tridimensionales no están completamente cerradas o se componen de partes separadas, como también pueden surgir detalles irregulares en curvas complejas. Pero el trazado se puede rectificar o completar después. También se pueden definir ranuras de ensamble. La programación pretende avanzar en la ejecución automática de las ranuras y optimizar la distribución de piezas en las placas.



**Figura 4** Programa de seccionado ejecutado sobre volumen de edificación

Para evaluar el programa, se ha aplicado en una diversidad de formas, estudiando alternativas de ejecución de algunos volúmenes sencillos. Por ejemplo, en la tabla 3 se indican la cantidad de placas necesarias para ejecutar a distintas escalas y distintos tamaños, un mismo modelo. En este caso, un volumen de 50x50x50 mts., con planos verticales cada seis metros en ambos sentidos horizontales, y cada tres metros en vertical (que pueden corresponder a muros estructurales y losas de entepiso en un edificio habitacional), lo que genera treinta y tres elementos constructivos (una cantidad significativamente reducida para la variedad de espacios generados, lo que facilita su industrialización). Adicionalmente se indican los porcentajes de ocupación de la placas (con perfiles llenos). Como se puede ver, decrece significativamente la cantidad de placas necesarias a mayor escala de reproducción. Sin embargo el porcentaje de ocupación es mayor en escalas intermedias menores (1:500, 1:300), que demuestran ser más eficientes (permiten realizar el modelo de mayor tamaño sin desperdiciar mucho material).

**Tabla 3** Cantidad de placas y ocupación de material para un modelo a distintas escalas y tamaños

Placas Escala	60x40 cm.		80x60 cm.		120x90 cm.	
	cant.	ocupación	cant.	ocupación	cant.	ocupación
100			33	52,08%	17	44,93%
200	17	50,55%	6	71,61%	3	63,66%
300	6	63,66%	3	63,66%	1	84,88%
500	3	45,83%	1	68,75%	1	30,56%
1000	1	34,38%	1	17,19%	1	7,64%
1500	1	15,28%	1	7,64%	1	3,40%
2000	1	8,59%	1	4,30%	1	1,91%
2500	1	5,50%	1	2,75%	1	1,22%
5000	1	1,38%	1	0,69%	1	0,31%

La tabla 4 plantea el análisis de diferentes volúmenes ortogonales para una misma superficie ocupable (2.500 m<sup>2</sup>) con distinta cantidad de niveles o pisos, con similar modulación horizontal y vertical (cada seis y tres metros). Reduciendo progresivamente las dimensiones

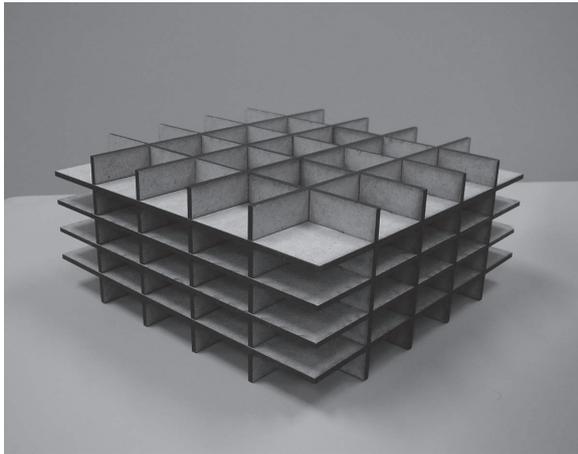
laterales de similar magnitud (una base cuadrada), y determinando la cantidad de elementos y material utilizado en el modelo. De este modo podemos tener una aproximación de costo de ejecución de distintas alternativas formales (más allá de una estimación homogénea). En

este caso, los volúmenes de cuatro y cinco pisos, con un volumen de 25 y 22,36 m de lado respectivamente, presentan la menor cantidad de elementos constructivos, que es notablemente baja para la cantidad de recintos y superficie generada, y más adecuada para su ejecución industrial. Estos volúmenes implican una ocupación de sitio de aproximadamente 500 m<sup>2</sup> de superficie. Aunque la forma más extendida (de

un nivel), presenta la menor cantidad de material requerido, exige el sitio de mayor dimensión (2500 m<sup>2</sup>). Planteando un consumo de material un 30% inferior, pero un espacio urbano cinco veces superior, que seguramente compensa esta diferencia. Lo que sugiere que la proporción de edificio de cuatro o cinco pisos sea la menor costo global y mayores facilidades de industrialización para esta superficie requerida (figura 5).

**Tabla 4** Utilización de material en volúmenes de la misma superficie ocupable y distinta altura

<i>Lado del volumen (m)</i>	<i>Pisos</i>	<i>Altura del volumen (m)</i>	<i>Cantidad de elementos</i>	<i>Superficie de material (m<sup>2</sup>)</i>
50,00	1	5,00	18	733,33
35,36	2	8,00	14	941,67
28,87	3	11,00	13	1011,11
25,00	4	14,00	12	1045,83
22,36	5	17,00	12	1066,67
20,41	6	20,00	13	1080,56
18,90	7	23,00	13	1090,48
17,68	8	26,00	14	1097,92
16,67	9	29,00	15	1103,70
15,81	10	32,00	15	1108,33
15,08	11	35,00	16	1112,12
14,43	12	38,00	17	1115,28
13,87	13	41,00	18	1117,95
13,36	14	44,00	18	1120,24
12,91	15	47,00	19	1122,22
12,50	16	50,00	20	1123,96
12,13	17	53,00	21	1125,49
11,79	18	56,00	22	1126,85
11,47	19	59,00	23	1128,07
11,18	20	62,00	24	1129,17
10,91	21	65,00	25	1130,16
10,66	22	68,00	26	1131,06
10,43	23	71,00	26	1131,88
10,21	24	74,00	27	1132,64
10,00	25	77,00	28	1133,33



**Figura 5** Modelo de 5 pisos según análisis de seccionado

## Conclusiones

En este trabajo se caracterizan tecnologías de fabricación digital y se sugieren posibilidades en el diseño y ejecución de edificios. Identificando sistemas sustractivos y aditivos, a través de impresoras 3D, máquinas de fresado, cortadoras de cuchillo, láser, plasma, arco eléctrico, agua y brazos robóticos. Las cuales poseen diversos materiales y magnitudes de trabajo que permiten realizar modelos o componentes de construcción. Se comentan las contribuciones eventuales de estas tecnologías en el proceso de proyecto, específicamente vinculadas al estudio material del diseño. Planteando que la modelación por corte láser se prestan especialmente para la revisión de condiciones constructivas y su proyección industrial, al trabajar sobre elementos relevantes de la edificación y aproximarse a los procesos automatizados de fabricación.

Luego se expone el procedimiento de ejecución de modelos constructivos por cortadoras láser, a través de diversas estrategias de diseño digital. Trazando los perfiles de piezas en software CAD, basado en los planos de proyecto o sistemas de modelación constructiva. Detallando en particular el procedimiento basado en el seccionado de volúmenes, que permite definir elementos constructivos en el volumen inicial de la edificación, integrando tempranamente posibilidades estructurales e industriales.

Además se describe un programa interno elaborado para un software 3D, que implementa la estrategia de seccionado de volúmenes, facilitando el trazado de las piezas y su distribución. Con capacidades de generación de volúmenes con espacios interiores y la visualización previa de los elementos seccionados. Luego se presentan la ejecución de diversos modelos, en particular alternativas de escala y tamaño de placas para las mismas formas, analizando la ocupación de material y disposiciones generadas. Se desarrollaron también alternativas de modelos en base a la misma superficie edificada, con diferentes alternativas de altura, revisando la cantidad de elementos generados y su consumo de material. Lo que permitió identificar en ambos casos condiciones más óptimas de ejecución.

De este modo se verifican las posibilidades de estudio e integración de aspectos constructivos en el diseño. Sugiriendo posibilidades de optimización material e industrialización, que deben ser comprobadas en obras edificadas para ser sustentadas productivamente, sin embargo las experiencias previas y desarrollos elaborados sugieren potencialidades efectivas. Se considera avanzar en actividades educativas y profesionales para integrar estas tecnologías, aprovechando las capacidades planteadas. Se debe investigar mayormente en los procedimientos de diseño y elaboración, así como en las maquinarias capaces de sostener procesos económicamente viables. Explorando sistemas constructivos y condiciones tecnológicas eficaces en diferentes contextos.

## Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación FONDECYT 1080328 y 1100374 del Fondo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica del Gobierno de Chile.

## Referencias

1. M. Groover. *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Materiales, Procesos y Sistemas. Ed. McGraw-Hill. México. 2007. pp. 1062.

2. A. Scheer. “*CIM : computer integrated manufacturing : towards the factory of the future*”. Ed. Springer Verlag. Wiesbaden (Germany). 1995. pp. 292.
3. S. Kieran, J. Timberlake. “*Refabricating Architecture, How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction*”. Ed. McGraw-Hill. New York. 2004. pp. 175.
4. M. Stacey. *Digital Fabricators*. Ed. University of Waterloo School of Architecture Press. Waterloo (Canada). 2004. pp. 95.
5. F. Gramazio, M. Kohler. “*Digital Materiality in Architecture*”. Ed. Muller Publishers. Baden (Switzerland). 2008. pp. 112.
6. B. Kolarevic. “*Architecture in the digital age: design and manufacturing*”. Ed. Spon Press- Taylor & Francis Group. Nueva York. 2003. pp. 320.
7. J. Seely. “*Digital Fabrication in the Architectural Design Proces*”. Tesis de Maestría. Massachusetts Institute of Technology. Boston (MA). 2004. pp. 77.
8. H. Schmitt, “*Tratado de Construcción*”. 7ª. ed. Ed. G. Gili. Barcelona (España). 1998. pp. 744.
9. I. Paricio. *La Construcción de la Arquitectura*. 4ª. ed. Ed. Instituto de Tecnología de la Construcción de Catalunya. Barcelona (España). 1999. pp. 174.