

# DISEÑO ORIENTADO A LA MANUFACTURA EN ARQUITECTURA: RELACIONES ENTRE EL DISEÑO Y LA FABRICACIÓN DE SUPERFICIES CURVAS

Eduardo Lyon  
College of Architecture  
Georgia Institute of Technology  
eduardo.lyon@coa.gatech.edu

Charles Eastman  
College of Architecture  
Georgia Institute of Technology  
Charles.Eastman@coa.gatech.edu

## Abstract

### *Design for manufacturing in architecture: mapping between the design and fabrication of curved surfaces*

*This paper explores new ways to integrate manufacturing processes information in to design phases. Through the analysis of related fields and looking at the relations between its design methods and production processes, we analyze design processes and design representations that already have embedded in them specific ways to materialize through production the artifacts they define. Subsequently, we explore curved surface fabrication using cutting and bending technologies. As a summary, we conceptualize from this top-down development approach to design a framework that integrates design and construction in architecture, based on three possible applications fields:*

- *Design processes improvement*
- *Building production process improvement*
- *CAD-CAM Tools development*

## 1. Introducción:

El diseño tradicional se ha basado en una evidente división entre la generación de conocimiento acerca de los artefactos propuestos, seguido por la generación de la información necesaria para construirlos. Por otra parte, el diseño orientado a la manufactura (DFM) intenta resolver al interior del proceso de diseño cómo el artefacto puede ser construido o manufacturado. El considerar el conocimiento acerca de la fabricación del artefacto durante el proceso de diseño resulta especialmente importante al explorar tecnologías alternativas a los métodos tradicionales de construcción, donde no está bien definido el espacio de opciones para la fabricación del artefacto. Las ventajas del diseño que integra conocimiento de manufactura se pueden entender al comparar el costo de resolver problemas al momento en que se presentan en la etapa de diseño o cuando se hacen evidentes durante los procesos de producción. La

resolución de problemas de forma tardía es mas costosa que cuando estos problemas se resuelven tempranamente. (Ahmadi y Wurgraft, 1994).

## 2. Aprendiendo de otras disciplinas:

Las modos de representación son específicos a las disciplinas que los utilizan y casi todas las disciplinas del diseño utilizan algún tipo de representaciones en sus procesos de diseño y fabricación. El diseño de vestuario y el diseño de embarcaciones utilizan representaciones específicas para describir los artefactos creados y sus correspondientes procesos de fabricación.

### 2.1. Procesos de diseño de vestuario:

El diseño de vestuario posee una tradición quizás mas antigua que la propia arquitectura. El proceso de diseño puede iniciarse a partir de un bosquejo o directamente cubriendo el cuerpo humano o un maniquí con trozos

de papel o del material a utilizar en la fabricación de la prenda. Luego se incluyen los cortes, dobleces, y bolsillos que contribuyen a dar la forma final a la prenda. Finalmente se adicionan los botones, cierres y accesorios. El proceso antes descrito se denomina patronaje y “draping”. (Glock y Grace I., 2000, Carr y Latham, 1994). El diseño de vestuario utiliza fundamentalmente los patrones como medio de representación. Los dibujos de patrones incluyen las descripciones de la forma deseada y también instrucciones para la fabricación de la prenda; ver Imagen 1: Patrón para vestido de The Lady’s Book, Louis A.Godey 1850.



Figure 1. Patrón para vestido de The Lady’s Book, Louis A.Godey 1850.



Figure 2. Patrón para vestido a la izquierda de The Lady’s Book, Louis A.Godey 1850.

Lady’s Book, Louis A.Godey 1850. y Imagen 2: Patrón para vestido a la izquierda de The Lady’s Book, Louis A.Godey 1850.

## 2.2. Proceso de diseño de embarcaciones:

El diseño de embarcaciones se inicia con el delineamiento del diseño en planta, secciones longitudinales y transversales como se muestra en la Imagen 3: Líneas longitudinales para bote de 17 pies tipo Hampton de Chapelle, H.I., Boatbuilding,1941. y en la Imagen 4: Líneas transversales para bote de 17 pies “tipo Hampton” de Chapelle, H.I., Boatbuilding,1941.

El proceso de diseño de embarcaciones consiste en la producción de patrones bi-dimensionales a partir de una secuencia de secciones o cortes a través del objeto. Las secciones se deben producir a lo largo y a lo ancho del eje principal del casco, como se muestra en la imagen 3 y 4. Debido a que el casco es simétrico, sólo la mitad de la secciones transversales del casco son dibujadas

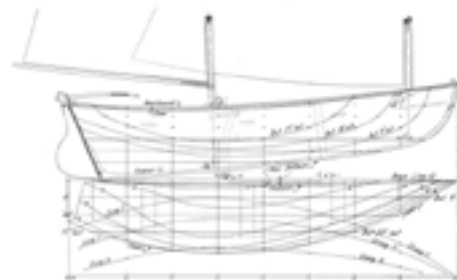


Figure 3. Líneas longitudinales para bote de 17 pies tipo Hampton de Chapelle, H.I., Boatbuilding,1941.

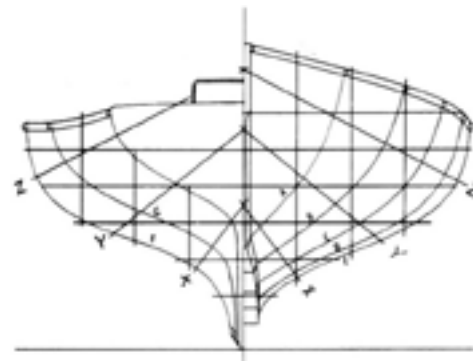


Figure 4. Líneas transversales para bote de 17 pies “tipo Hampton” de Chapelle, H.I., Boatbuilding,1941.

(Chapelle, 1941). Estos dibujos constituyen la base para la realización del “lofting” proceso en el cual se trazan en el espacio todas las curvas en dimensión real, las cuales constituyen la información necesaria para dar inicio a la fabricación de la embarcación.

### 3. Diseño orientado a la manufactura:

El diseño orientado a la manufactura incluye la manufacturabilidad como parte de las consideraciones de diseño y de manera explícita incluye información acerca de la forma en que se construirá el artefacto. Fundamentalmente el modelo asume que los diseñadores necesitan tener conocimiento adecuado acerca de los diferentes procesos de manufactura para así poder proporcionar información detallada y exacta para alimentar esos procesos. De algún modo las tecnologías de manufactura digital constituyen un alejamiento definitivo de los modelos de construcción dirigidos por contratistas y del mismo modo nos indica que la organización de la producción de edificios no estará limitada solamente a los métodos tradicionales de construcción (Groák, 1992, Sebestyén, 1998). Esencialmente, la fabricación digital representa un cambio substancial en los métodos convencionales de producción en masa en donde la economía de recursos se basaba en la repetición. Con el uso de la manufactura asistida por computador (CAM), las variaciones en un artefacto o inclusive la producción de artefactos a medida ya no representan un costo adicional (Kieran y Timberlake, 2004).

### 4. Superficies Curvas:

Aun cuando los artesanos en piedra fabricaron geometrías altamente complejas y los métodos de corte de la piedra desarrollaron sofisticadas heurísticas para generación de formas curvas, por décadas los métodos de representación en arquitectura estuvieron limitados a los dominios de la geometría euclidiana. Finalmente en 1868 Beltrami probó que las geometrías no-euclidianas era tan consistentes en su lógica como lo era la geometría euclidiana (Mlodinow, 2002). En nuestros días, producto de la ubicuidad y uso intensivo de los modeladores de sólidos en la generación de formas, se observa un

aumento notable en el uso de superficies curvas en el campo de la arquitectura.

#### 4.1. Las Superficies NURBS:

Antes de la aparición de los computadores los arquitectos podían dibujar sus diseños usando lápiz, papel y una gran variedad de instrumentos de dibujos. Estos instrumentos incluían reglas de diferentes tipos como reglas rectas y reglas T para dibujar líneas rectas, compases para dibujar círculos y arcos circulares, reglas triangulares y transportadores para dibujar líneas en variados ángulos. Adicionalmente juegos de curvas específicas eran normalmente empleados en cada disciplina para el trazado de curvas, ver Imagen 5: Juego de Curvas para barcos “Copenhagen” de <http://www.reuels.com>. y Imagen 6: Juego de curvas para diseño de vestuario de <http://www.reuels.com>.



Figure 5. Juego de Curvas para barcos “Copenhagen” de <http://www.reuels.com>.



Figure 6. Juego de curvas para diseño de vestuario de <http://www.reuels.com>.

A medida que los computadores fueron introducidos en los procesos de diseño las propiedades físicas de las superficies curvas fueron estudiadas. En los sistemas CAD las superficies curvas son mayormente representadas mediante mallas poligonales o superficies del tipo NURBS. Debido a su flexibilidad y precisión, las superficies NURBS son usadas intensivamente en el modelado de superficies en diferentes disciplinas, en aplicaciones desde la ilustración y la animación hasta la manufactura (Farin, 1999).

## **5. Cortado y doblado de paneles como procesos de producción:**

Tal como revisamos en secciones anteriores las superficies curvas pueden ser transformadas en patrones planos para ser fabricadas. La manufactura de esos patrones planos involucra principalmente dos tipos de procesos; corte y doblado. Cada proceso de manufactura requiere de un conjunto específico de información para ser ejecutado. En la sección siguiente revisaremos algunas de estas consideraciones de manufactura.

### **5.1. Operaciones de corte:**

Las operaciones de corte se pueden diferenciar según la manera que el corte es efectuado; una modalidad es la de remover material y la segunda es derriéndolo. Los procesos de remoción de material en construcción generalmente se realizan con sierras o cortadoras CNC y son aplicados mayormente en materiales como la madera, plásticos no inflamables como el acrílico y aleaciones de metales blandos. En general el corte por temperatura es mas adecuado para los metales y es de uso extensivo en la industria de la construcción (Callicott, 2000).

### **5.2. Operaciones de doblado:**

En la operaciones de doblado, la forma deseada se obtiene presionando la pieza mediante una herramienta de formado contra una matriz o pasando la pieza a través de una serie de rodillos, siendo el primer proceso denominado doblado con prensa y el segundo doblado de rollo (Kalpakjian y Schmid, 2002). Los plásticos, laminas de madera y algunos metales son posibles de doblar

mediante aplicación localizada de calor permitiendo la redistribución del material y el posterior doblado. Este método es conocido como termo formado y es utilizado en el doblado de plásticos, laminas de madera y laminas de metal. (Stacey, 2001).

## **6. Proceso de diseño para la fabricación de superficies curvas mediante corte y doblado de paneles:**

Esencialmente, analizaremos un proceso para diseñar y fabricar superficies curvas utilizando tecnologías de corte y doblado bi-dimensional. Este proceso será estructurado en cuatro etapas principales; la generación de la forma, el análisis, la optimización y su fabricación.

### **6.1. Generación de superficies NURBS:**

La generación de superficies curvas es un proceso de múltiples alternativas y muy flexible. La primera etapa es determinar la información disponible para generar la superficie curva, algunos de los formatos posibles son dibujos en papel, modelos digitales o modelos físicos. A si mismo múltiples métodos están disponible para la generación de la superficie curva.

### **6.2. Análisis de Superficies NURBS:**

El propósito inicial en hacer el análisis de las superficies generadas es tener un mejor entendimiento de las características de la superficie curva y de los parámetros específicos que la controlan. A pesar de las múltiples conexiones entre ellos, la fase de análisis fue dividida de acuerdo a las propiedades mas comunes presentes en las superficies NURBS. Estas son curvatura, parámetros y datos de evaluación.

### **6.3. Optimización de Superficies NURBS:**

Los aspectos de las superficies curvas tomados en consideración en la fase de optimización fueron; estética, propiedades del material, manufactura y ensamblaje. El aspecto estético es quizás el mas idiosincrásico de los considerados y por lo mismo es el mas impredecible. Los aspectos relativos al material incluyen la flexibilidad, el

tamaño de el panel, la dirección de la veta y la rugosidad de la superficie del material. Los aspectos relativos a la manufactura y al ensamblaje incluyen los mas comunes encontrados en la literatura relativa al tema (Ahmadi y Wurgraft, 1994, Kalpakjian y Schmid, 2002, Chang et al., 1998, Boothroyd, 2002, Schodek et al., 2004).

#### 6.4. Subdivisión de Superficies NURBS

La primera operación de fabricación es la subdivisión de la superficie y consiste en la partición de la superficie según el tamaño de panel determinado. A pesar que los modeladores de superficie incluyen herramientas para controlar la subdivisión de la superficies curvas, no es fácil encontrar herramientas que realizan la partición de manera adecuada y con cierto nivel de exactitud. Adicionalmente incluimos una secuencia de numeración para la correcta identificación de los paneles resultantes de la subdivisión.

#### 6.5. Desarrollo de Superficies NURBS:

La siguiente operación de fabricación consiste en desarrollo de la superficie. Los métodos para generar patrones planos a partir de superficies curvas dependen mayormente de la figura del panel, su espesor y materialidad. (Elber, 1992). Sin embargo, las herramientas disponibles para desarrollar superficies, incluidas en el software del CAD usado en este estudio, no toman en cuenta el espesor material, o aún peor ignoran la materialidad.

#### 6.6. Diagramación y anidado de los patrones:

Diagramación consiste en la preparación de los patrones ya desarrollados para fabricación, asignándoseles la información correspondiente al maquinado. Esta información incluye descripción de la herramienta, trayectoria de la herramienta, punto de entrada y salida de la herramienta, y soportes adicionales para mantener la pieza en su lugar durante la operación de maquinado. La disposición de los patrones desarrollados en el panel, con el fin de obtener el mejor aprovechamiento del material, se conoce como anidado y ha sido sujeto

de estudio en múltiples investigaciones que emplean diferentes métodos incluyendo el uso de computadores (Babu y Babu, 2000, Lamousin y Waggenpack, 1997).

### 7. Conclusiones e investigación futura:

La transferencia de información de manufactura hacia las etapas de diseño se esta volviendo cada vez mas importante. Los sistemas CAD mayormente ignoran esta realidad , sin embargo existen algunas excepciones notables. Por otro lado los sistemas CAM consideran el re-dibujo y el uso de algoritmos de reconocimiento como las técnicas fundamentales para la generación de información de maquinado a partir de la información generada en los sistemas CAD. El proceso alternativo considerado en este estudio considera la inclusión de conocimiento de manufactura en las etapas de diseño a partir de modelos que describen los procesos de diseño, análisis y manufactura. Estos modelos se pueden integra fácilmente en las rutinas de los sistemas CAD. Adicionalmente este estudio plantea el uso de representaciones de diseño para la implementación de la propuesta.

### Referencias

- Ahmadi, Reza H., and Hernan Wurgraft. 1994. Design for Set Manufacturability. In *Management of design: engineering and management perspectives*, edited by D. Sriram and C. Eastman. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Babu, A. Ramesh, and N. Ramesh Babu. 2000. A generic approach for nesting of 2-D parts in 2-D sheets using genetic and heuristic algorithms. *Computer-Aided Design* 33 (12):879-891.
- Boothroyd, G. / Dewhurst, Peter. / Knight, W. A. 2002. *Product design for manufacture and assembly*. Translated by P. K. Dewhurst, W. A. 2nd ed., rev. and expanded. ed. Vol. 58, Manufacturing engineering and materials processing. New York: Marcel Dekker.
- Callicott, Nick. 2000. *Computer-Aided Manufacture in Architecture - The Pursuit of Novelty*: Elsevier Science & Technology.
- Carr, Harold., and Barbara. Latham. 1994. *The technology of clothing manufacture*. Translated by B. Latham. 2nd ed.

- London; Boston: Blackwell Scientific Publications.
- Chang, Tien-Chien, Richard Wusk, and Hsu-Pin Wang. 1998. *Computer-aided manufacturing*. Translated by R. A. W. Wusk, Hsu-Pin. 2 ed, Prentice Hall international series in industrial and systems engineering. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- Chapelle, Howard Irving. 1941. *Boatbuilding: a complete handbook of wooden boat construction*. New York: W.W. Norton.
- Elber, Gershon. 1992. Model fabrication using surface layout projection. *Computer-Aided Design* 27 (4):283-291.
- Farin, Gerald. 1999. NURBS: from projective geometry to practical use. Translated by G. E. Farin. 2nd ed. ed. Natick, Mass.: A.K. Peters.
- Glock, Ruth E., and Kunz Grace I. 2000. *Apparel manufacturing: sewn product analysis*. Translated by G. I. Kunz. 3 ed. Upper Saddle River, NJ: Merrill.
- Groák, Steven. 1992. *The idea of building: thought and action in the design and production of buildings*. 1st ed. ed. London; New York: E & FN Spon.
- Kalpakjian, Serope, and Steven Schmid. 2002. *Manufacturing processes for engineering materials*. 4th ed ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- Kieran, Stephen, and James Timberlake. 2004. *Refabricating Architecture*. 1 ed. New York NY: McGraw-Hill Companies.
- Lamousin, Henry, and Jr Warren N Waggenspack. 1997. Nesting of two-dimensional irregular parts using a shape reasoning heuristic. *Computer-Aided Design* 29 (3):221-238.
- Mlodinow, Leonard. 2002. *Euclid's Window: The Story of Geometry from Parallel Lines to Hyperspace*: Simon & Schuster Adult Publishing Group.
- Schodek, Daniel, Martin Bechthold, James Kimo Griggs, Kenneth Kao, and Marco Steinberg. 2004. *Digital Design and Manufacturing: CAD/CAM Applications in Architecture*. Hoboken NJ: Wiley.
- Sebestyén, Gyula, 1921-. 1998. *Construction: craft to industry*. London; New York: E & FN Spon.
- Stacey, Michael. 2001. *Component Design*. Oxford; Boston, Mass.: Elsevier Science & Technology.



**Eduardo Lyon**

Graduate Research Assistant at PhD program, College of Architecture, Georgia Institute of Technology  
Arquitecto, Universidad de Chile, Master of Architecture University of Maryland

Research interests: Design Computing, Design Cognition, Digital, Building Information Modeling, and Digital Design Theory.

Ph.: (404) 385-4854

Fx.: (404) 385-2916



**Charles Eastman**

Professor in the colleges of Architecture and Computing, Director, COA Ph.D. Program, Georgia Institute of Technology

M. Arch. U. California, Berkeley

Research interests: geometric and parametric modeling, design repositories, product modeling, Building Information Modeling, and design cognition.