



## Sobre cáscaras y blobs

### Superficies estructurales de la era digital<sup>1</sup>

*Martin Bechthold* Profesor de Harvard University Graduate School of Design

*Fig. 01*

Las nuevas técnicas de representación en arquitectura han ampliado las posibilidades de exploración formal hacia lo que algunos interpretan como un mayor grado de libertad. ¿Cómo relacionar ese potencial del proyecto con los asuntos que la gravedad (entendida como peso, empuje y resistencia) plantea a la obra construida?

*Fig. 02*

Todos sabemos que la tecnología de producción CAD/CAM ha activado una proliferación de diseños constructivos de formas complejas, que incluyen las formas libres que denominamos *blobs*. Pero hemos olvidado que muchas de estas formas fluidas tienen un parentesco con las cubiertas de cáscaras de hormigón surgidas en la primera mitad del s. XX, estructuras creadas para cubrir grandes luces con un mínimo de material. Además de estas similitudes, hay también diferencias, y ellas tienen que ver con la estructura.

Por lo general se supone que todas las superficies curvas son necesariamente rígidas y por ende útiles como elementos estructurales primarios. La curvatura de la superficie, sin embargo, forma un cascarón estructuralmente efectivo sólo si permite que se desarrollen tensiones de membranas eficientes, que a su vez habilitan a las delgadas superficies para soportar cargas importantes. Esta elegancia estructural contrasta con la relativa torpeza de los sistemas de soporte para las formas irregulares generadas actualmente a nivel digital.

Es cierto que las cáscaras o cubiertas ligeras no pueden ofrecer el grado de libertad formal presente en los *blobs* para construir superficies y cubiertas. Pero considerando su eficiente (y por lo mismo compensatorio) uso del material, ¿por qué han quedado prácticamente olvidadas en medio del entusiasmo suscitado por los *blobs*? Las facultades de arquitectura ofrecen generalmente clases de diseño digital, pero rara vez alguna de ellas aborda el diseño de superficies estructurales<sup>2</sup>. Esta falta de interés en las cáscaras data de comienzos de los años ochenta y refleja los intentos por esquivar los inmensos desafíos de construcción que plantean estos sistemas. Pero ¿puede la tecnología CAD/CAM hacer más fácil la construcción de superficies estructurales ligeras y eficientes? ¿puede la tecnología digital no solamente ayudar a ampliar el diseño formal, sino además permitir el uso de sistemas estructurales que optimicen el uso del material? Como el discurso actual se ha centrado en los principios formales posibilitados por la *arquitectura digital*<sup>3</sup>, los arquitectos a menudo pasan por alto que la complejidad formal de un *blob* se concreta materialmente a través de medios estructurales y constructivos convencionales: esqueletos armados con elementos lineales y curvilíneos, que soportan otros elementos secundarios y superficies envolventes no estructurales. Curiosamente, estas propuestas se fundamentan en la capacidad estructural de elementos doblados, el menos eficiente entre los esquemas básicos para soporte y transmisión de cargas: en general la superficie visible de las figuras de forma libre es estructuralmente inútil (fig. 01). Las curvaturas presentes en los *blobs* rara vez permiten que se desarrollen tensiones en la membrana, puesto que los algoritmos subyacentes en sus formas se calibran y optimizan con fines visuales, no pudiendo simular y modelar con exactitud una conducta estructural. Estas formas dejan pocas posibilidades de usar otros sistemas de soporte que no sean los basados en la ineficiente acción del doblez. Las tensiones contenidas en el plano de la membrana de una cáscara son muchísimo más eficientes: se requiere menos material para soportar cargas análogas.



## On shells and blobs

### Structural surfaces in the digital age<sup>1</sup>

*Fig. 01*

New representation techniques have expanded the possibilities of architectural form, to what could be understood as an expansion for creative freedom. How can we relate this new potential with the engagement that gravity force (as weight, thrust and resistance) demands on built work?

*Fig. 02*

We all know that computer-aided design and manufacturing (CAD/CAM) technology has triggered a proliferation of complexly shaped building designs, including the free forms we call *blobs*. But we have forgotten that many of these fluid shapes resemble concrete roof shells that appeared in the first half of the 20<sup>th</sup> century –shells devised to cover long spans with a minimum of material. There is, of course, a difference, and it hinges on structure.

It is often assumed that all curved surfaces are necessarily stiff and thus useful as primary structural elements. Surface curvature, however, forms a structurally effective shell only if it enables efficient membrane stresses to develop, which in turn allow thin surfaces to carry significant loads. This structural elegance contrasts with the relative clumsiness of the support systems for digitally generated irregular shapes. It is often assumed that all curved surfaces are necessarily stiff and thus useful as primary structural elements. Surface curvature, however, forms a structurally effective shell only if it enables efficient membrane stresses to develop, which in turn allow thin surfaces to carry significant loads. This structural elegance contrasts with the relative clumsiness of the support systems for digitally generated irregular shapes. It is true that shells cannot offer the degree of formal freedom for building skins and roofs that blobs offer, but why, given their compensating efficient use of material, are they practically forgotten amidst the frenzy about blobs? Architecture schools generally offer digital design classes, but hardly any schools address the design of structural surfaces<sup>2</sup>. This disinterest in shells dates back to the early 1980s and reflects an avoidance of the immense constructional challenges that these systems pose. But can CAD/CAM technology make the construction of material-efficient structural surfaces easier? Can digital technology not only assist in expanding formal design, but also enable the use of material-efficient structural systems?

With current discourse focusing on the underlying shaping principles of *digital architecture*<sup>3</sup>, architects often overlook the fact that the formal complexity of the blob is achieved through conventional constructional and structural means –skeletons assembled from linear and curvilinear members that support secondary members and non-structural building skins. These systems rely heavily on bending stresses –the least efficient of the basic load-carrying methods. The visible surface of the free-form shape is structurally functionless (see image 01). The curvature present in free-form shapes rarely allows membrane stresses to develop, since the underlying shaping algorithms are optimized for visualization purposes and cannot accurately simulate and model structural behavior. These shapes leave little choice other than those structural systems that rely on inefficient bending action. The in-plane membrane stresses of the shell are vastly more efficient: less material is needed to carry comparable loads. Structurally efficient shells use construction technology that has progressed only marginally since the 1980s. This stagnation in technology contrasts starkly with the significant advances in digital design and manufacturing systems for skeletal structures. *Steel Detailing Software* and the related *computer numerical control* (CNC) manufacturing facilities partially automate the design and fabrication of structural members of skeletal frames, including the complex support systems of free-form shapes. Now new computer-driven manufacturing technology is needed



<sup>1</sup> Este artículo fue publicado por primera vez en *Harvard Design Magazine* No. 19.

<sup>2</sup> En abril de 2003 hice un estudio de los cursos de estructuras. El curso que impartí en Harvard era el único que cubría las cubiertas ligeras o cáscaras con cierto grado de profundidad. Las facultades de Arquitectura que incluí en el estudio fueron Yale, Princeton, Cornell, la Universidad de California en Berkeley, MIT, UCLA, la Universidad de Colorado en

Bodler, la Universidad de Florida, el Instituto de Tecnología de Georgia, IIT, Tulane, la Universidad de Michigan, Columbia, la Escuela de Diseño de Rhode Island, la Universidad Estatal de Nueva York en Buffalo, Rensselaer y la Universidad de Texas en Austin.

<sup>3</sup> Ver, por ejemplo, *Journal of Architectural Education* de noviembre de 2002, y muchos libros y publicaciones recientes.

*Fig. 03*



Las cáscaras estructuralmente eficientes usan tecnologías constructivas que desde los años ochenta han progresado sólo marginalmente. Este estancamiento contrasta fuertemente con los importantes avances en los sistemas digitales de diseño y fabricación de esqueletos estructurales. La combinación de programas como *Steel Detailing Software* y las plantas de manufacturación por *control numérico computacional* (CNC) automatizan parcialmente el diseño y la fabricación de componentes para estos esqueletos, incluidos los complejos sistemas de soporte de las figuras de forma libre. Lo que ahora se necesitaría es una nueva tecnología de fabricación computacional para la construcción de cáscaras, si este sistema eficiente en el uso de los materiales se transforma en una alternativa viable.

En la década del veinte el desarrollo de cáscaras estructurales para cubiertas provino de la fascinación con un material nuevo –el hormigón armado– y la necesidad de cubrir luces medianas y grandes en forma económica. Félix Candela en México, Eduardo Torroja en España, Eladio Dieste en Uruguay, Franz Dischinger y Ulrich Finsterwalde en Alemania, Heinz Isler en Suiza y Anton Tedesco en Estados Unidos fueron algunos de los pioneros en la construcción de dichas estructuras ligeras. La intensa ocupación de mano de obra para la construcción de la compleja forma se justificaba económicamente a través de importantes ahorros en material: la cubierta de Candela para un restaurante en Xochimilco, construida en 1958 (fig. 02) se extiende en 32 m y es una lámina de hormigón de sólo 4,3 cm de espesor.

Las cáscaras de hormigón incluyen formas de curvatura simple tales como cilindros y conos, así como una variedad de geometrías de doble curvatura. La forma sinclástica de la doble curvatura (donde las curvas giran en la misma dirección) y anticlástica (donde las curvas giran en direcciones opuestas) son particularmente eficientes, pero la construcción de sus moldajes es técnicamente más exigente. Los paraboloides hiperbólicos (PH) y los hiperboloides (fig. 03 y 04) forman un grupo particular dentro de las estructuras anticlásticas. Ellos combinan un mecanismo eficiente de soporte de carga con una relativa facilidad de construcción; el encofrado para estas superficies puede ser fabricado principalmente con tablas rectas de madera describiendo una superficie reglada. La mayoría de las cáscaras de hormigón de Candela, así como otras fabricadas en madera por otros diseñadores, se basan en paraboloides hiperbólicos.

Los primeros constructores de cáscaras empleaban geometrías simples que se podían describir y construir fácilmente<sup>4</sup>. En los años cincuenta, Heinz Isler desarrolló un nuevo concepto para estas superficies, definiendo su geometría a partir de experimentaciones con modelos físicos exactos, como membranas de goma inflable o tela colgante. Estas cáscaras son figuras equilibradas: sus formas distribuyen las cargas, como el peso propio del cascarón, a través de las tensiones de la membrana. Igualmente en los años cincuenta, los investigadores del Instituto de Construcción Ligera Frei Otto de la Universidad de Stuttgart experi-



<sup>1</sup> This article was first published in the *Harvard Design Magazine* No. 19 .

<sup>2</sup> In April 2003, I conducted a survey of courses offered at nineteen major American architectural schools. Occasionally shells were briefly mentioned in survey structures courses. My course at Harvard Design School was the only one to cover shells in any depth. The schools included in the survey are Yale, Princeton, Cornell, the University of

California at Berkeley, MIT, UCLA, the University of Colorado at Bolder, the University of Florida, Georgia Institute of Technology, IIT, Tulane, the University of Michigan, Columbia, Rhode Island School of Design, the State University of New York at Buffalo, Rensselaer and the University of Texas at Austin.

<sup>3</sup> See for example *Journal of Architectural Education*, November 2002, and many recent books and publications.

*Fig. 04*

for shell construction if this material-efficient system is to become a viable alternative. The development in the 1920s of structural roof shells stemmed from a fascination with a new material –reinforced concrete– and the need to cover medium to large spans economically. Félix Candela in Mexico, Eduardo Torroja in Spain, Eladio Dieste in Uruguay, Franz Dischinger and Ulrich Finsterwalde in Germany, Heinz Isler in Switzerland, and Anton Tedesco in the United States were among the pioneer shell builders. The labor-intensive construction of the complex shape was economically justified through significant savings in materials: Candela’s 1958 shell for a restaurant in Xochimilco, Mexico (see image 02), spans 106 feet with concrete just 1.7 inches thick. Concrete shells include single-curved shapes such as cylinders and cones, as well as a variety of double-curved geometries. Double-curvature synclastic (with curves running in same direction) and anticlastic (with curves running in opposite directions) shapes are structurally particularly efficient, but the construction of their formwork is technically more demanding. Hyperbolic paraboloids (HP) and hyperboloids (see images 03, 04) form a particular group within anticlastic shells. They combine an efficient load-bearing mechanism with relative ease of construction: the formwork for these surfaces can be made mostly from straight wooden boards. The majority of Candela’s concrete shells –as well as some timber shells by other designers– are based on HP shapes. Early shell builders employed simple geometries that could easily be geometrically described and built<sup>4</sup>. Heinz Isler developed a new concept for shells in the 1950s by deriving shell geometry from experiments with accurate physical models such as inflatable rubber membranes or hanging fabric. These shells are equilibrium shapes –their shapes balance loads such as the weight of the shell through membrane stresses. Also in the ’50s, researchers at Frei Otto’s Institute of Lightweight Construction at Stuttgart University experimented with form-finding methods for tensile systems by studying minimal surfaces using soap bubbles and other methods. Their physical models were later complemented and partially replaced by computational form-finding methods, applicable to both tensile systems and shells. Designing an equilibrium shell means defining a structurally efficient shape through the specification of its support conditions and loads. Each prescribed combination of support and load will yield a unique geometry.

The advances in computational form-finding of the 1970s came at a time when the interest in shells was rapidly fading. Fabric structures, cable nets, and space frames (triangulated bar networks) presented equally efficient structural solutions for spanning larger distances, but their constructional problems were more readily solved with the established building technology for skeletal structures. The few shells built after the 1970s were mostly grid shells, with the continuous surface replaced by linear or curvilinear interconnected members.

What are the current technical impediments to shell construction?



mentaron en la búsqueda de formas para sistemas tensados, estudiando entre otras superficies mínimas de burbujas de jabón. Sus modelos físicos fueron complementados posteriormente y reemplazados en parte por métodos computacionales para determinar formas estructuralmente apropiadas, aplicables tanto a sistemas tensiles como a cáscaras. Diseñar una cáscara *en equilibrio* significa definir una figura estructuralmente eficiente, especificando sus condiciones de apoyo y cargas: cada combinación prescrita de apoyo y carga producirá una geometría única.

Los avances de medios digitales para la determinación de formas en la década del setenta llegaron en un momento en que el interés por las cubiertas ligeras o cáscaras se estaba desvaneciendo rápidamente. Las estructuras de telas, redes de cables y estereométricas presentaban soluciones estructurales igualmente eficientes para cubrir distancias más grandes, pero sus problemas de construcción eran resueltos más fácilmente con la tecnología constructiva establecida para esqueletos estructurales. Las pocas cáscaras construidas después de los años setenta fueron principalmente nervadas, sustituyéndose la superficie continua por partes lineales o curvilíneas interconectadas.

¿Cuáles son los impedimentos técnicos actuales para la construcción de cáscaras? La realización de una superficie de forma compleja es necesariamente un desafío, aún más si esa superficie pasa a ser el elemento estructural principal. La construcción de una cáscara puede ejecutarse aplicando técnicas constructivas convencionales para moldeado de materiales delgados, como láminas de metal o tableros de madera; sin embargo, estos materiales solos no son suficientemente resistentes para estos propósitos. Las técnicas de construcción de cubiertas ligeras se han basado tradicionalmente en el uso intensivo de mano de obra, y en consecuencia, hoy día se ven dificultadas por su alto costo. Entre 1958 y 2002 el valor de mano de obra (no reajustado por inflación) aumentó entre factores de ocho (mano de obra no especializada) (Williamson, 2003) y once (mano de obra de producción)<sup>5</sup>, mientras que el costo de los materiales de

construcción (no reajustados por concepto de inflación) en el mismo período aumentó solamente por factores entre 3,8 (productos fabricados en acero) y 4,8 (hormigón premezclado)<sup>6</sup>. Para que la construcción de cáscaras sea factible hoy en día, es necesario crear técnicas de construcción menos demandantes en mano de obra. El encofrado da cuenta de una parte importante del costo de las cáscaras de hormigón; si solamente fuera posible reutilizar estos costosos y grandes moldajes podrían hacerse ahorros significativos. Heinz Isler, uno de los pocos constructores de cáscaras que siguen activos, reutiliza el encofrado en diferentes proyectos, aceptando la severa restricción de diseño a la geometría regular del plano, la repetición de formas idénticas (fig. 05), y cierta incapacidad de ajustarse a las condiciones locales.

Investigaciones en Harvard Graduate School of Design han estado sugiriendo nuevos procesos para la construcción de cáscaras usando tecnología CAD-CAM. La exactitud de la fabricación por CNC ahora permite la descomposición de grandes cáscaras en fragmentos que pueden ser prefabricados, transportados a las faenas y ensamblados conformando cubiertas de gran escala. Estas pesquisas están desarrollando prototipos sobre la base de tres esquemas: cascarones tipo *sandwich* de láminas de madera, sistemas de placas plegadas de ferrocemento (fig. 06) con delgadas losas de hormigón reforzadas en malla de acero, y un sistema de cáscara de hormigón construido con moldajes prefabricados *perdidos*, insertos en la estructura.

La cáscara de madera es una estructura rígida tipo *sandwich*, con un núcleo de espuma de alta densidad protegido por dos capas de madera laminada. El núcleo de espuma de cada fragmento de cáscara puede ser fabricado con una máquina fresadora CNC; múltiples capas de franjas precortadas de madera gruesa, aglomerada o contraplacada, son laminadas luego sobre la superficie y curadas bajo presión al vacío (fig. 07). Ensamblados o *fingerjoints* especialmente desarrollados conectan los paneles individuales y forman el cascarón; la estructura *sandwich* de capas

<sup>5</sup> Según datos del Ministerio del Trabajo de Estados Unidos de América, Departamento de Estadísticas Laborales.

<sup>6</sup> *Ibid.*

<sup>7</sup> Una estructura reciente de placas plegadas, aunque es un híbrido de una combinación con armazones, es el techo del Terminal Portuario de Yokohama de Foreign Office Architects.

<sup>8</sup> J. Lambot en Francia inventó el ferrocemento en 1848, un año antes del uso de Monier del hormigón armado. La combinación ferrocemento se caracteriza por un control excelente de grietas debido a la gran superficie adhesiva entre las capas de la malla y la matriz. Es extremadamente versátil y ha sido usada con éxito en un amplio rango de aplicaciones que van desde naves oceánicas y estanques de agua a paneles prefabricados para viviendas y sistemas de techo de medio tramo.

intercaladas puede ser diseñada de manera de satisfacer los actuales requisitos de aislamiento térmico, resistencia a incendios y rigidez estructural. El espesor del sistema general de la cáscara es suficiente para admitir la existencia de elementos de servicio embutidos, aumentando aún más la multifuncionalidad de estas cubiertas de geometría compleja. Este conjunto de elementos traslapados y la combinación adecuada de materiales del núcleo y de la superficie, pueden generar suficiente rigidez para acomodar esfuerzos de curvatura moderados. Con este método se pueden fabricar no solamente cáscaras, sino también figuras de forma libre en tanto la rigidez de la curvatura del *sandwich* sea suficiente. Finalmente, *la cáscara atrapa al blob*: una tecnología desarrollada para construir superficies estructurales puede ser una alternativa viable para levantar esqueletos de figuras de forma libre (Bechthold, 2001 y Schodek et al., 2004).

El sistema de láminas plegadas de ferrocemento vuelve a revivir un sistema olvidado y un material atractivo que ya no se usa en los países industrializados. Las láminas plegadas están estrechamente relacionadas con las cáscaras, porque su mecanismo de soporte de carga se deriva principalmente de las tensiones en el plano de una superficie plegada delgada<sup>7</sup>. Uno de los problemas de la construcción de placas plegadas es la relativa complejidad del encofrado cuando se trata de hormigón y la dificultad de crear conexiones eficientes entre paneles planos cuando se construyen en madera. Una solución obvia es usar un material que combine la rigidez con cierta capacidad de plegado, sin necesidad de un elaborado encofrado hecho en terreno: láminas delgadas de ferrocemento reforzado con malla<sup>8</sup>. Los paneles de ferrocemento reforzados pueden ser fabricados en forma eficiente con moldajes planos y reutilizables: las líneas predeterminadas de pliegues no son cubiertas con mortero durante este proceso y actúan efectivamente como bisagras durante el plegado. Aquí la malla metálica de refuerzo admite manipulaciones y curvaturas, permitiendo que las placas planas puedan ser plegadas como origami en una estructura tri-

<sup>5</sup> U.S. Department of Labor, Bureau of Labor Statistics.

<sup>6</sup> *Ibid.*

<sup>7</sup> A recent folded-plate structure, albeit a hybrid through a combination with trusses, is the roof of the Yokohama Ferry Terminal by Foreign Office Architects.

<sup>8</sup> J. Lambot in France invented ferro-cement in 1848, a year before Monier's use of reinforced concrete. Ferro-cement features excellent crack control due to the large bonding surface between the mesh layers and the matrix. It is extremely versatile and has been successfully used for an extremely wide range of applications ranging from seagoing vessels and water tanks to prefabricated housing panels and medium-span roof systems.

The making of a complexly shaped surface is necessarily challenging, even more so if this surface becomes the primary structural element. Common shaping or forming techniques may be applicable to thin materials such as sheet metal or wooden boards, but these elements by themselves are insufficient for roof shells. Shell construction techniques have traditionally relied heavily on labor, and consequently are hampered by today's high labor costs. Labor costs (not adjusted for inflation) between 1958 and 2002 increased between factors of eight (unskilled labor) (Williamson, 2003) and eleven (manufacturing labor)<sup>5</sup>, whereas the cost of construction materials (not adjusted for inflation) increased during the same time period only by factors between 3,8 (steel milled products) and 4,8 (ready-mixed concrete)<sup>6</sup>. Less labor-intensive construction techniques need to be devised if shell construction is to become feasible today. Formwork accounts for a major part of the cost of concrete shells, and only by reusing these expensive, large molds can shells be economical. Heinz Isler, one of the few remaining active shell builders, reuses formwork in different projects, accepting the severe design restriction to regular plan geometries, the repetition of identical shapes (see image 05), and the inability to adjust to local conditions.

Research at the Harvard Design School has been suggesting new processes for shell construction using CAD-CAM technology. The accuracy of CNC fabrication now enables the subdivision of larger shells into panels that can be prefabricated, transported to sites, and assembled into larger roof shells. Researchers are developing and prototyping three types: a laminated timber-sandwich shell, a ferro-cement folded plate system (see image 06) with thin cement slabs reinforced by steel mesh, and a concrete shell system constructed with prefabricated *lost* formwork that becomes embedded in the structure.

The timber shell is a rigid sandwich with a high-density foam core and laminated wood facings. The foam core of individual panels can be fabricated on a CNC milling machine.

Multiple layers of precut strips of sliced thick veneer or plywood are then laminated over the surface and cured under vacuum pressure (see image 07). Specially engineered lap or finger joints connect individual panels and form the shell. The sandwich can be designed to satisfy current thermal insulation requirements, fire-resistance, and structural rigidity. The depth of the overall system is sufficient to embed service elements, thus further enhancing multifunctionality in the geometrically complex roof. The sandwich, in combination with certain core and facing materials, can generate enough stiffness to accommodate moderate bending stresses. Not only shells, but also free-form shapes can be manufactured according to this method, as long as the bending stiffness of the sandwich suffices. At last *The Shell Catches Up With the Blob*: a technology developed for structural surfaces can be a viable alternative to the skeletal construction of free-form shapes (Bechthold, 2001 and Schodek et al., 2004).

The ferro-cement folded plate system revisits both a forgotten system and an exciting material no longer used in industrialized countries. Folded plates are closely related to shells, because their load-bearing mechanism is principally derived from the in-plane stresses of a thin folded surface<sup>7</sup>. The constructional problems of folded plates are the relative complexity of formwork in concrete systems and the difficulty of creating efficient connections between flat panels in timber systems. An obvious solution is to use a material that combines stiffness and a capability for folding without relying on elaborate on-site formwork: thin sheets of a mesh-reinforced composite –ferro-cement<sup>8</sup>. Ferro-cement panels can be manufactured efficiently on flat, reusable formwork. Predetermined fold lines are not covered with mortar during this process –these lines effectively act as hinges in the folding process. Here the steel reinforcing mesh yields on bending, and flat concrete plates can be folded like origami into a three-dimensional structure. The open joints are covered with mortar after the folding. Based on a 1980 Australian patent applica-



02



03



04



05

01 Frank Gehry & Partners. Stata Center, Cambridge, 2004  
 02 Félix Candela. Restaurante Los Manantiales, Xochimilco, 1958  
 03 Félix Candela. Iglesia de la Virgen de la Medalla Milagrosa, Ciudad de México, 1954–1955.  
 La cubierta se compone de paraboloides hiperbólicos inclinados  
 04 Eduardo Torroja. Marquesina del Hipódromo de la Zarzuela, Madrid, 1935  
 05 Heinz Isler. Canchas de tenis, Heimbach, 1980-1985

01 Frank Gehry & Partners. Stata Center, Cambridge, 2004  
 02 Félix Candela. Los Manantiales Restaurant, Xochimilco, 1958  
 03 Félix Candela. Iglesia de la Virgen de la Medalla Milagrosa, México City, 1954–1955.  
 The roof is composed from inclined HP shapes  
 04 Eduardo Torroja. The cantilevering roof of Hipódromo de la Zarzuela, Madrid, 1935  
 05 Heinz Isler. Tennis Hall, Heimbach, 1980-1985

<sup>9</sup> En 1980 dos conferencistas en Ingeniería Civil de la Universidad de Sydney, Wheen y Jackson, solicitaron una patente para plegar losas de ferrocemento. R.J. Wheen y G.N. Jackson, "Método de curvar losas endurecidas y rígidas", Solicitud de patente australiana, No. PE 3167, abril de 1980.

<sup>10</sup> Mi equipo y yo utilizamos un sistema de láminas plegadas comparativamente simple para desarrollar una estrategia detallada de articulación y el mecanismo de plegado. El proceso fue sometido a prueba posteriormente en un prototipo de 190 cm de largo.

<sup>11</sup> Estos proyectos actuales de investigación son realizados y financiados por Harvard University GSD. Los miembros del equipo incluyen a Jerome Chang, Jason Halaby, Chung-Ping Lee, Mark Oldham, Tyrone Yang y a mí.

dimensional. Finalmente, después de haber sido dobladas, las uniones abiertas se cubren con mortero. De acuerdo a una solicitud de patente australiana de 1980, todavía este concepto no ha sido utilizado más allá de experimentos a pequeña escala, realizados en la Universidad de Sydney<sup>9</sup>.

La tecnología CAD/CAM moderniza el proceso diseño/producción. Complejos sistemas plegados son generados en forma digital y las herramientas integradas de análisis estructural proporcionan una rápida retroalimentación sobre la factibilidad de las configuraciones. Con ayuda de un *software*, los componentes de los modelos plegados son aplanados en patrones bi-dimensionales que se reproducen con ploteos de corte láser o *routers* CNC. Cada uno de estos fragmentos planos es fabricado rociando el mortero en forma manual o parcialmente automatizada sobre una malla de acero reforzada. Los pliegues deben ser realizados cuidadosamente, evitando una excesiva curvatura de las placas durante el plegado<sup>10</sup>. Con este método se puede producir caso a caso un amplio rango de formas; el sistema prácticamente anula la incidencia que una modulación irregular tendría en los tiempos y costos de fabricación. Se pueden producir y montar variaciones paramétricas de un sistema de láminas plegadas (que es de por sí simple de generar utilizando programas de desarrollo de diseño como *SolidWorks* o *Catia*) con una eficiencia que no ofrecen las técnicas tradicionales de construcción en obra.

Una tercera investigación está desarrollando un sistema de planos complejos de ferrocemento que son usados en terreno como molde perdido para una capa estructuralmente resistente de hormigón armado preparado en obra. Este enfoque, estrechamente relacionado con el uso que hizo Pier Luigi Nervi del encofrado perdido en los años cincuenta y sesenta, aborda específicamente la necesidad de reducir los costos del molde al transformarlo en parte estructural de la cáscara terminada. Los elementos de ferrocemento son fabricados con exactitud fuera de la faena utilizando máquinas CNC y proyectando mortero, en una forma que puede ser parcialmente automatizada. Las conexiones estructurales entre paneles adyacentes de la cáscara terminada son confiadas a barras de refuerzo traslapadas, que se incorporan al momento de hormigonar en terreno<sup>11</sup>.

Estos tres procesos para el diseño y la produc-

ción de superficies estructurales no seriables y eficientes en el uso del material utilizan la tecnología CAD/CAM para permitir a los arquitectos acceder a mayor variedad de formas a la vez que reducir el costo adicional relacionado normalmente con la construcción formalmente *no sistémica*. Sin embargo, aceptar el uso de elementos idénticos y seriables en la construcción no es una condición limitada a las cáscaras; es parte de la actividad constructiva en general. El uso de productos y componentes estándares es un imperativo de diseño generalmente aceptado. Cada día los productos de la construcción, desde la madera aglomerada y el acero estándar a los sistemas de cielos suspendidos y accesorios livianos, tienen menos variantes. La industria de la construcción opera en gran medida bajo principios económicos que se originan en las primeras leyes de la producción industrial masiva, y el diseño de productos a la medida generalmente significa importantes aumentos de costos. La tecnología CAD/CAM, ¿eliminará por completo la necesidad de la serie productiva, afectando drásticamente la forma en que diseñamos?

La posibilidad de diseños y edificios *personalizados* con componentes únicos parece atractiva para los arquitectos. La *personalización masiva* ha permitido a otras industrias producir productos individualizados a un precio similar al de artículos equivalentes producidos a gran escala. Los productos masivos hechos *a la medida* van desde libros personalizados a máquinas individualizadas para la producción industrial. La industria de la construcción ha estado adaptando esta tendencia: ahora es posible diseñar *on-line* ventanas a pedido, y sus componentes por lo general se manufacturan automáticamente. Algunas albañilerías se construyen utilizando bloques prefabricados que son diseñados, cortados por CNC, y entregados en obra *justo a tiempo*, aumentando la velocidad de la construcción y reduciendo el volumen de desechos. Esta implementación creciente de *personalización masiva* en la industria de la construcción apenas ha sido advertida. Es probable que continuemos usando productos y materiales estándares en los edificios, pero pueden surgir oportunidades interesantes para los diseñadores, ingenieros y contratistas donde menos se las espera. Un ejemplo reciente es la fabricación de mallas de enfierradura para losas de concreto, diseñadas digitalmente y

soldadas por robots, que pueden ahorrar un porcentaje sustancial de acero porque cada una es diseñada precisamente a la medida de las tensiones y deformaciones presentes en la losa.

¿Cuál puede, o más bien, debe ser el propósito de la fabricación personalizada? El estudio de las cáscaras demuestra que puede permitir sistemas de construcción estructuralmente eficientes, proporcionando riqueza a la experiencia espacial y usando responsablemente los recursos materiales. La personalización a través de CAD/CAM podría y debería ser dirigida hacia una respuesta más eficiente del proyecto a demandas de rendimiento tan diversas como programa, estructura, eficiencia de energía, iluminación y mantención. La tecnología digital no es un fin en sí misma, pero debería desempeñar un papel importante en crear un ambiente más humano, socialmente responsable y sustentable. Suponemos que no pasará mucho tiempo antes que los actualmente separados discursos sobre sustentabilidad y diseño digital se conecten en forma productiva. **ARQ**

**Bibliografía** | Bechthold, Martin. *Complex shapes in wood: Computer aided design and manufacturing techniques*. Tesis doctoral, Harvard University, Cambridge, 2001. | Herzog, Thomas and José Luis Moro. "Zum Werk von Félix Candela". *ARCUS* 18, 1992, pp. 10-22. | Schodek, Daniel; Bechthold, Martin; Griggs, James Kimo; Kao, Kenneth y Marco Steinberg. *Digital design and manufacturing: CAD / CAM Applications in architecture and design*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2004. | Williamson, Samuel H. "The relative cost of unskilled labor in the United States, 1774-present". *Economic History Services*, marzo de 2003. <[www.eh.net/hmit/unskilledlabor/](http://www.eh.net/hmit/unskilledlabor/)>.

<sup>9</sup> In 1980 two lecturers in Civil Engineering at the University of Sydney, Wheen and Jackson, applied for a patent on the bending of ferro-cement slabs. R.J. Wheen and G.N. Jackson, "Method of Bending Hardened and Stiff Slabs", Australian Patent Application No. PE 3167, April 1980.

<sup>10</sup> My team and I used a comparatively simple folded plate system to develop a hinge detailing strategy and the folding apparatus. The process was then tested on a six-foot long prototype.

<sup>11</sup> These ongoing research projects are conducted at and funded by the Harvard Design School. Team members include Jerome Chang, Jason Halaby, Chung-Ping Lee, Mark Oldham, Tyrone Yang and me.

tion, this concept has not yet been pursued beyond small-scale experiments carried out at the University of Sydney<sup>9</sup>. CAD/CAM technology streamlines the design-to-production process. Complex folded systems are generated digitally, and integrated structural analysis tools provide rapid feedback on the feasibility of schemes. The components of the design models are then digitally flattened into 2-D production patterns that are produced on CNC-lasers or routers. The reinforced panels are fabricated through either manual or partially automated spraying of the mortar over the reinforcing mesh. The folds have to be carefully engineered, and excessive bending of the plates needs to be avoided during folding<sup>10</sup>. A wide range of custom shapes can be produced by this method: the number of individually shaped panels in a project has little impact on manufacturing time and costs. Parametric variations of a folded plate system –inherently simple to generate using design development software such as *SolidWorks* or *Catia*– can be manufactured and assembled more efficiently than they could be using traditional on-site construction techniques.

A third research investigation is developing a system of shaped ferro-cement panels to be used on site as lost formwork for a load-bearing layer of cast-in-place concrete and reinforcement. This approach –closely related to Pier Luigi Nervi's use of lost formwork in the '50s and '60s– specifically addresses the need for reduced formwork cost by making the formwork a structural part of the finished shell. The ferro-cement elements are manufactured accurately off-site using CNC machines and spraying of mortar that may be partially automated. Overlapping reinforcement bars that become embedded in the cast-in-place concrete secure structural connections between adjacent panels in the finished shell<sup>11</sup>. These three processes for the design and production of individualized and material-efficient structural surfaces use CAD/CAM technology to allow architects greater variety of shapes while reducing the additional cost normally associated with customized construction. The problem of having to employ identical elements repetitively is, however, not limited to shells; it is a part of much building construction. The use of standard products and components is a generally accepted design imperative. Everyday construction products –from plywood and standard steel

shapes to suspended ceiling systems and light fixtures– come in few variations. The building industry operates largely under economic principles that originate in the laws of early industrial mass production, and the customization of products usually implies significant cost increases. Will CAD/CAM eliminate the need for repetition altogether, thus drastically affecting the way we design?

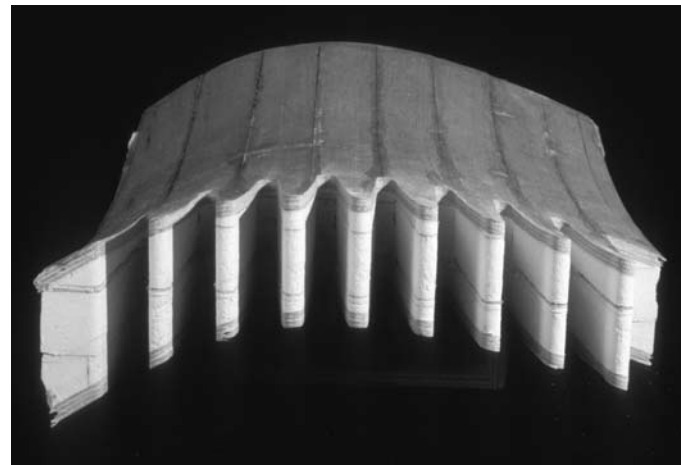
The possibility of thoroughly customized buildings with individualized components is attractive to architects. *Mass customization* has enabled the production of individualized products in other industries at a price similar to that of equivalent mass-produced items. Mass customized products range from customized books to individualized machines for industrial production. The building industry has been adapting to this trend: individualized windows are now designed online, and the components are usually manufactured automatically. Walls are constructed using sets of prefabricated building blocks that are designed, CNC cut, and delivered to sites *just-in time*, increasing construction speed and reducing waste. This incremental implementation of mass-customization in the building industry has hardly been noticed. It is likely that we will continue to use standard products and materials in buildings, but interesting opportunities for designers, engineers, and contractors may arise where they are least expected. A recent example is the manufacture of custom steel reinforcement mats for concrete slabs –digitally designed and robotically welded– that can save a substantial percentage of steel because each mat is precisely tailored to the stresses and deflections present in the slab.

What objective can, or rather, should customization serve? The study of shells demonstrates that it may enable structurally efficient construction systems, provide a rich spatial experience, and use material resources responsibly. Customization through CAD/CAM could and should be directed towards a more efficient response to performance requirements as diverse as program, structure, energy efficiency, lighting, and maintenance.

Digital technology is not an end in itself but should play a role in creating a more human, socially responsible, and sustainable environment. Before long, today's separate discourses on sustainability and digital design will, we can assume, productively connect. **ARQ**



06



07

06 Elemento de origami de concreto plegado  
07 Panel tipo sándwich de madera laminada y espuma

06 Folded concrete origami element  
07 Laminated Wood-Foam sandwich panel

**Bibliography** | Bechthold, Martin. *Complex shapes in wood: Computer aided design and manufacturing techniques*. Doctoral thesis, Harvard University, Cambridge, 2001. | Herzog, Thomas and José Luis Moro. "Zum Werk von Félix Candela". *ARCUS* 18, 1992, pp. 10-22. | Schodek, Daniel; Bechthold, Martin; Griggs, James Kimo; Kao, Kenneth and Marco Steinberg. *Digital design and manufacturing: CAD / CAM Applications in architecture and design*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2004. | Williamson, Samuel H. "The relative cost of unskilled labor in the United States, 1774-present". *Economic History Services*, March 2003. <[www.eh.net/hmit/unskilledlabor/](http://www.eh.net/hmit/unskilledlabor/)>.