

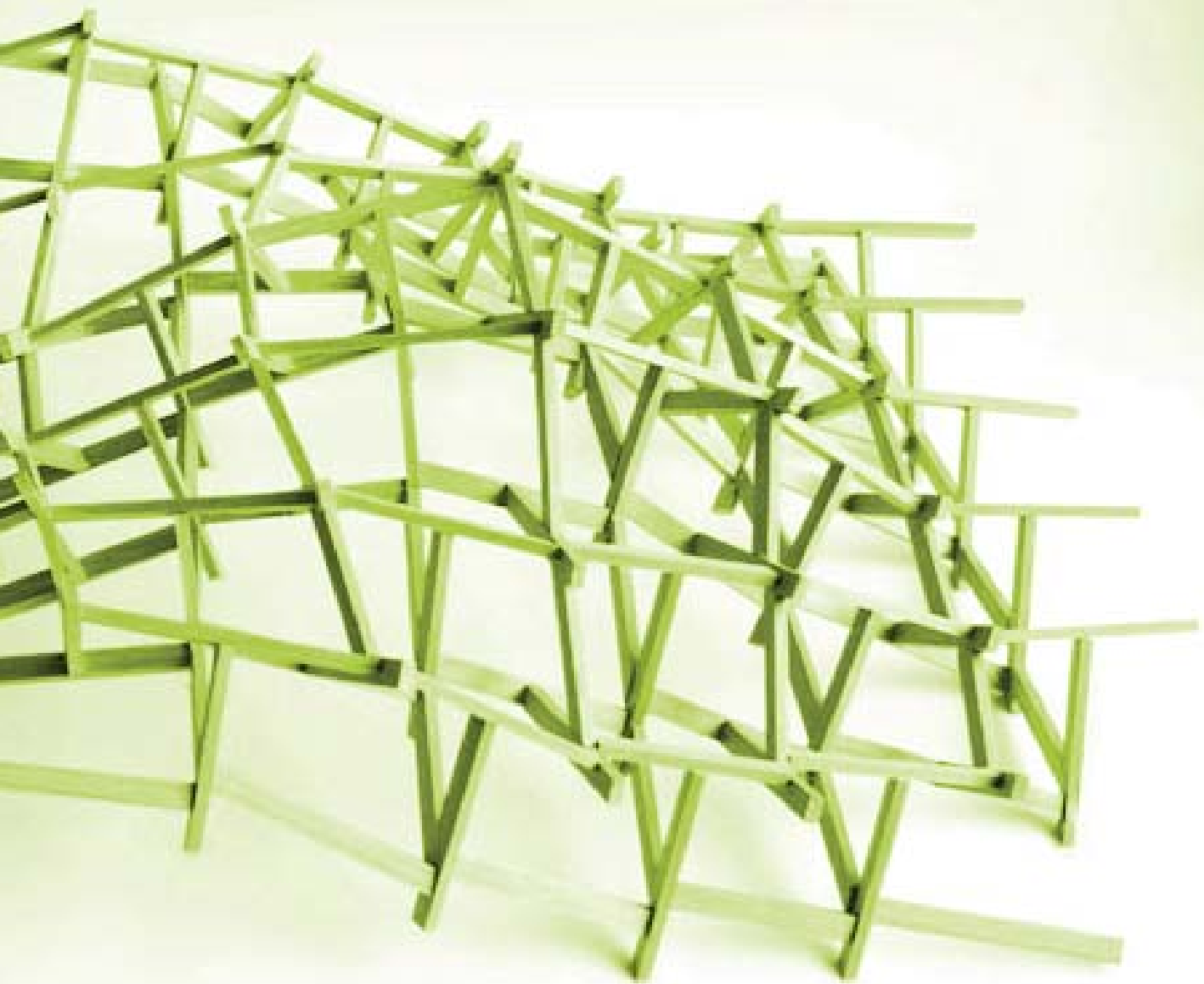


Fig. 1: Spatial Aggregations 5, Gramazio and Kohler, ETH Zürich, 2013. Estudio de procesos constructivos, geometrías evolutivas y fabricación robotizada en estructuras de madera.
Fuente: <http://dfab.arch.ethz.ch>

Estructuras de madera. Procesos de génesis. Hacia el Diseño Computacional y la Fabricación robotizada (1).

Antonio José Lara Bocanegra
Antonio Roig Vena
Ismael Domínguez Sánchez de la Blanca

En la actualidad la tendencia creciente del empleo de la madera como material estructural de primer nivel es ya evidente. La convergencia de diversos vectores está propiciando un nuevo resurgimiento del material al tiempo que muestra el nuevo papel protagonista que, sin duda, tendrá la madera en un futuro próximo.

La permanencia de la tradición heredada (2) (propia del diseño estructural en madera basado en los tipos clásicos), los nuevos desarrollos tipológicos (propiciados por la aparición de nuevos productos estructurales como el panel contralaminado que está permitiendo el desarrollo de tipologías en altura (3)), la aparición de novedosas propuestas arquitectónicas (posibles a la evolución de las herramientas de diseño y

fabricación digital), los nuevos requerimientos ecológicos y las nuevas propuestas estructurales, provenientes de ámbitos académicos (basadas en procesos, simulados computacionalmente), dibujan una realidad compleja y heterogénea en la que, si bien el diseño arquitectónico de estructuras de madera está experimentando un gran impulso, lo está haciendo desde ámbitos muchas veces inconexos y con importantes diferencias en los planteamientos y procesos generativos.

Por tanto, los procesos de génesis en estructuras de madera oscilan entre el uso de los conocimientos heredados sobre las tipologías y sistemas constructivos y las nuevas posibilidades que ofrecen las tecnologías digitales. El catálogo tradicional de tipologías estructurales resulta insuficiente e incluso inadecuado para explicar los procesos de génesis estructural de muchas producciones arquitectónicas contemporáneas. Parece adecuado, por tanto, intentar dibujar un nuevo mapa, más amplio, que permita un acercamiento más fructífero a los procesos actuales de génesis de la forma estructural.

Un primer paso hacia esta nueva cartografía podría realizarse identificando puntos estables, proponer relaciones posibles y a partir de ellos localizar y situar otros más ambiguos y de coordenadas más dudosas. Bajo esta perspectiva podríamos identificar, en una primera instancia, tres grandes estrategias de generación de la forma estructural en madera:

(1) El presente artículo surge como desarrollo de las investigaciones llevadas a cabo durante el curso 2012-2013 en el marco de la asignatura Diseño Arquitectónico de Estructuras de Madera y Fabricación Digital -FabLab- impartida en la ETSA de Sevilla, cuyo resultado final ha sido presentado en la exposición “Nueva generación en Madera. Sostenibilidad y Nuevas Tecnologías en Estructuras Arquitectónicas”. En dicha asignatura se planteaba el acercamiento a veinticinco arquitecturas en madera de los últimos años a través del análisis de documentación de proyecto y obra y la fabricación de un modelo estructural a escala mediante las tecnologías disponibles en FabLab Sevilla.

(2) Aunque la madera fue prácticamente desterrada como material estructural con la implantación del estilo internacional, las denominadas arquitecturas orgánicas y vernáculas siempre mantuvieron la tradición del uso de la madera como reivindicación del valor de lo local. Así mismo los grandes desarrollos suburbanos producidos en EUA tras la 2ª G.M

realizados de modo masivo con construcciones residenciales en madera o el empleo de la madera laminada en estructuras de grandes luces, ha mantenido el uso y la industria de la madera en plena actividad, aunque generalmente apartada de la arquitectura de renombre internacional.

(3) En 2009 se construyó en el Reino Unido el edificio residencial Stadhaus, de nueve plantas de altura. En 2010 se finalizó el edificio Forté en Melbourne de 10 plantas. En la ciudad de Kirkenes, en Noruega está prevista la construcción de un edificio de 18 plantas para el 2014 y actualmente existen varios despachos de arquitectura en el mundo trabajando en colaboración con ingenierías para el desarrollo de propuestas de gran altura como el Tall Wood de Michael Green, rascacielos de 30 plantas para Vancouver (Canadá) o el Proyecto de Berg I C.F. Møller, en colaboración con los consultores Tyréns, que están desarrollando un modelo de rascacielos de 34 plantas para el centro de Estocolmo.

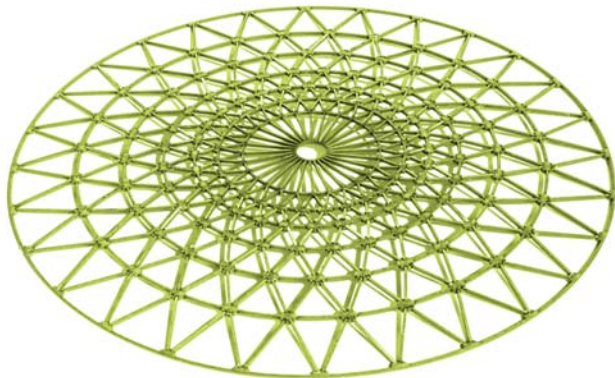
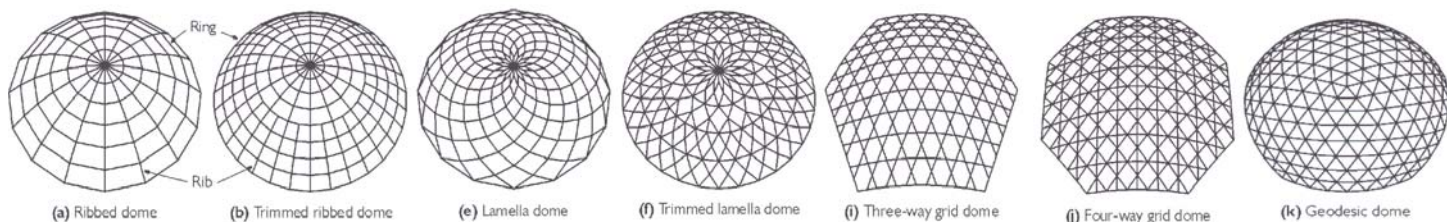


Fig. 2: Cúpulas de mallas de barras de una sola capa. Algunos tipos estructurales. Fig. 3: Cúpula de madera del centro comercial Las Arenas. Foto: Flaqué Internacional Fig. 4: Modelo a escala de la estructura principal de la cúpula de madera del centro comercial Las Arenas. Trabajo de curso. Foto: A. Arévalo. fotowork.es

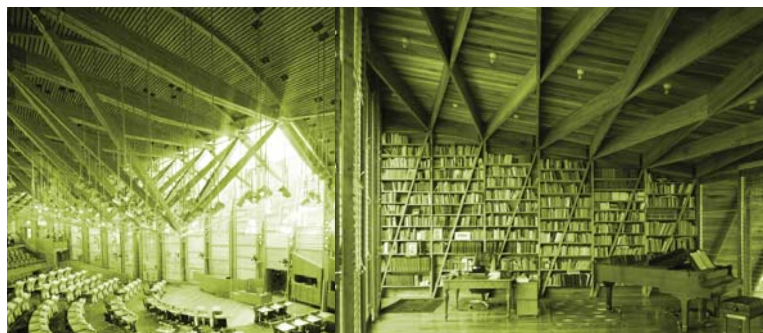
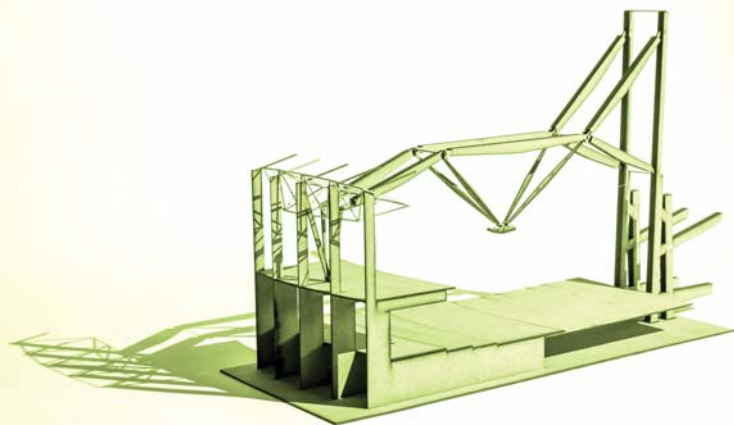


Fig. 5: Sala principal del Parlamento de Edimburgo. Fuente: www.mirallestagliabue.com. Fig. 6: Casa KiKé. Fuente: www.giannibotsford.com. Fig. 7 y 8: Modelos a escala. Uno de los pórticos de la Sala principal del Parlamento de Edimburgo y Casa Kiké. Trabajos de curso. Fotos: A. Arévalo. fotowork.es.



1. La génesis estructural a partir del tipo.

Un diálogo con la forma.

Conocimiento y creación.

"Cada material tiene una personalidad específica distinta, y cada forma impone un diferente fenómeno tensional. La solución natural de un problema –arte sin artificio–, óptima frente al conjunto de impuestos previos que la originaron, impresiona con su mensaje, satisfaciendo, al mismo tiempo, las exigencias del técnico y del artista." (4).

Los tipos estructurales, entendidos de modo amplio en el modo que los analiza Torroja, ofrecen información muy valiosa, no solo sobre su comportamiento estructural, sino también, sobre el material y procesos de ejecución más apropiados.

El conocimiento de las leyes, imposiciones y libertades que ofrece tanto el tipo estructural como el empleo de la madera como material permite, desde las primeras etapas de diseño, poder trabajar con una inmensa variedad de opciones que satisfacen simultáneamente los requisitos arquitectónicos, estructurales y de ejecución.

Los procesos que podemos detectar en este sentido son diversos y van desde la simple adopción del tipo canónico hasta sus transformaciones digitales pasando por una infinidad de posibles modificaciones creativas realizadas a partir de aproximaciones con modelos a escala.

El tipo canónico (5).

El procedimiento más elemental consiste en recurrir directamente al tipo ideal en su forma pura. Esto resulta especialmente conveniente, sino obligado, en grandes estructuras con el-

evados esfuerzos o deformaciones donde la optimización estructural adquiere especial importancia. Es el caso habitual de estructuras de grandes luces o edificios en altura, donde la arquitectura suele quedar supeditada al proyecto estructural. Un claro ejemplo de esta posición es la Cúpula de madera del centro comercial Las Arenas (Barcelona, 2011 (6)), de Alonso & Balaguer en asociación con R.Rogers. El esquema estructural coincide exactamente con el Trimmed Lamela Dome, uno de los esquemas clásicos para la resolución de grandes cúpulas de mallas de barras de simple capa (7).

Juegos analógicos y manipulaciones creativas de los tipos.

La creación a partir de modificaciones de los tipos, adaptándolos a requerimientos arquitectónicos de diferente índole, desde las primeras fases del proyecto y normalmente a través a aproximaciones mediante modelos a escala, ofrece posibilidades prácticamente infinitas. Este planteamiento ha sido empleado de modo amplio por la producción arquitectónica internacional. Valga para ilustrar esta línea de trabajo proyectos tan dispares como la cubierta de la sala principal del nuevo Parlamento de Edimburgo (Escocia, 2004) de EMBT, la Palmyra House (India, 2007) del Estudio Mumbai, la casa Kiké (Costa Rica, 2007) de Gianni Bostford Architect o el Edificio de Oficinas de Tamedia (Suiza, 2013) de Shigeru Ban, donde manipulaciones creativas de los tipos, tan diversos como el entramado ligero, el entramado diagonal, el entramado pesado o las cerchas trianguladas subtensionadas, han ofrecido soluciones satisfactorias de modo simultáneo a los requerimientos arquitectónicos y estructurales. Las relaciones que se establecen en este caso con las tecnologías digitales son muy diversas y cubren un amplio espectro que

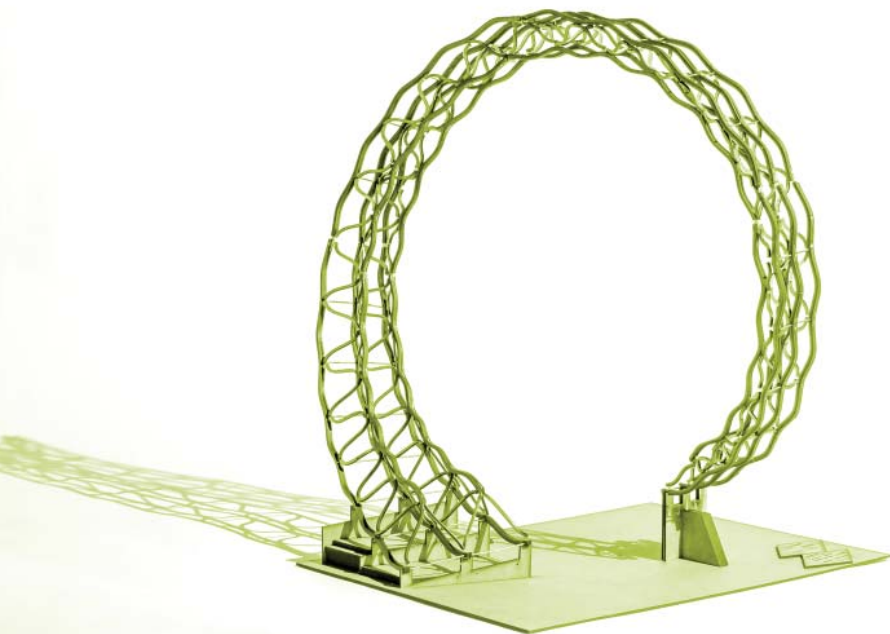
(4) Torroja, E. Razón y ser de los tipos estructurales. 3ªEd. Madrid: CSIC; Ministerio de Fomento; CEDEX-CEHOPU; CICCIP, 2007. Pág. 11.

(5) En esta estrategia se encontrarían infinidad de obras arquitectónicas y, especialmente, las correspondientes al ámbito de la ingeniería y edificaciones industriales o rurales.

(6) La fecha referenciada en las diferentes obras corresponden con la

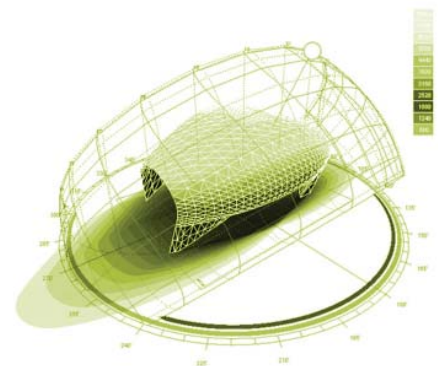
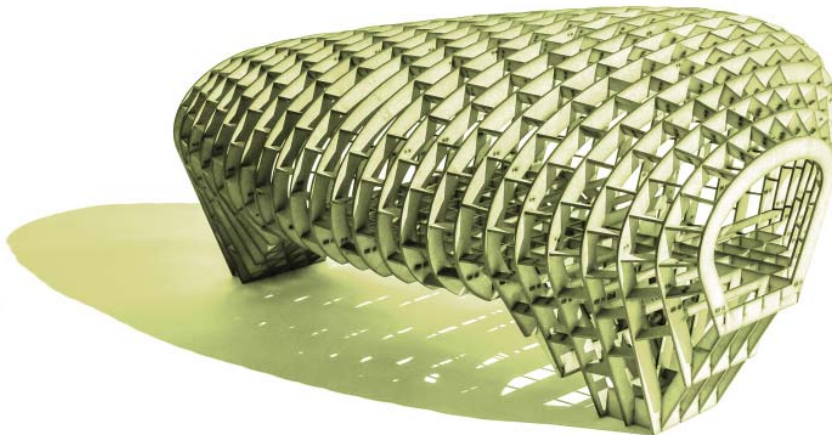
finalización de la mismas.

(7) La contribución de las herramientas digitales ha resultado decisiva en las etapas de análisis estructural (ha sido necesaria la comprobación de numerosas hipótesis de cálculo en segundo orden) y de fabricación mediante técnicas CNC (Software Bocad) pero insignificante en el proceso de la definición formal inicial.



Timber Wave >

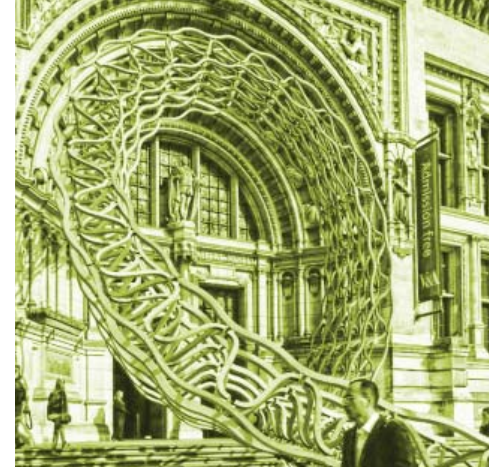
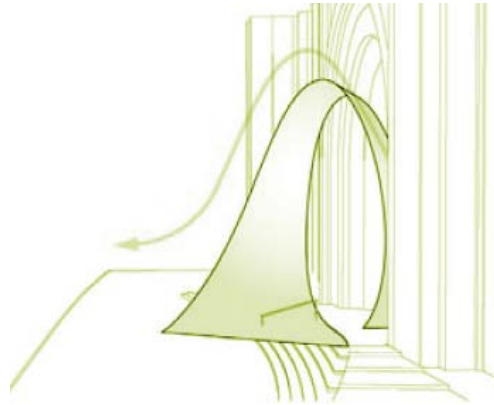
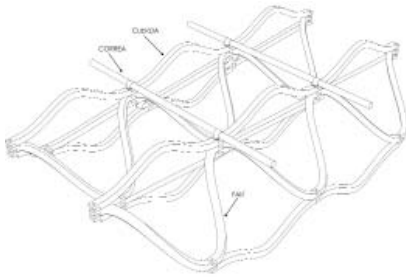
Fig. 9: Modelo a escala. Trabajo de curso. Foto: A. Arévalo. fotowork.es. Fig. 10: Proceso de fabricación de los cordones longitudinales curvos de madera laminada. Fig. 11: Esquema estructural inicial. Fig. 12: Superficie generadora. Fig. 13: Aspecto de la obra terminada. Fuente (10, 11, 12 y 13): Timber Wave. Catálogo. Imágenes de Dennis Gilbert/V&A Museum.



FabLab House >

Fig. 14: Modelo a escala de la estructura. Trabajo de curso. Foto: A. Arévalo. fotowork.es. Figs. 15 y 16: Modelo virtual para el análisis de la radiación solar y aspecto de la obra final. Fuente: www.fablabhouse.com





discurre desde el diseño y ejecución con técnicas totalmente artesanales, representadas por la Palmyra House hasta casos como el edificio de Oficinas para Tamedia (8) en el que se ha realizado un proceso totalmente industrializado a través de tecnologías CNC.

Parametrizaciones y transformaciones digitales del tipo.

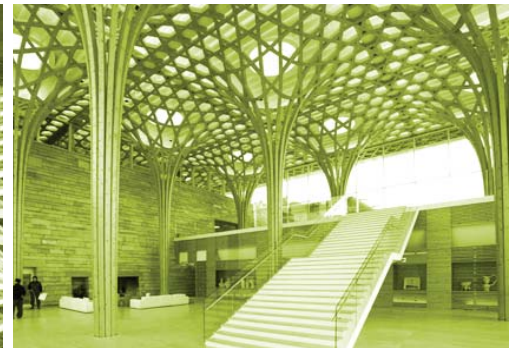
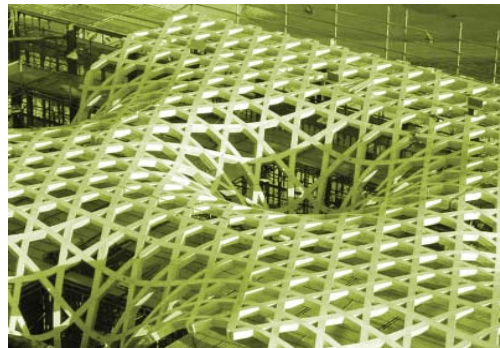
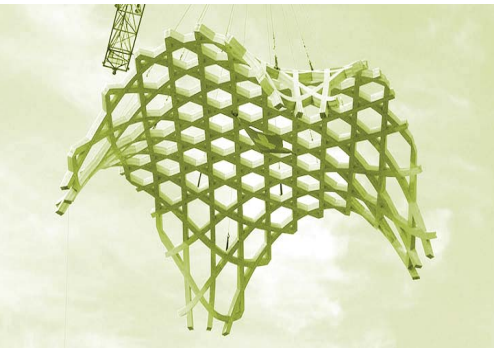
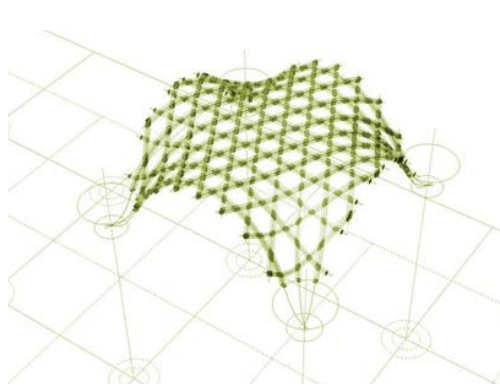
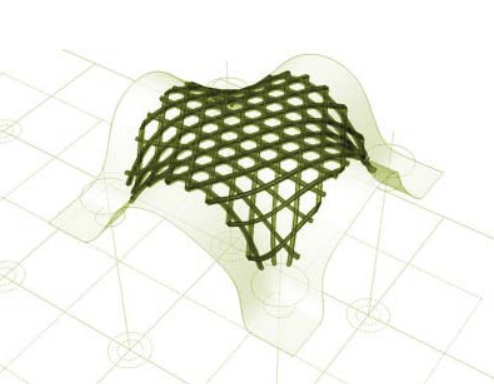
En este proceso estarían aquellas obras que, habiendo decidido desde etapas tempranas del proceso de diseño un tipo estructural adecuado, la búsqueda o desarrollo formal no se produce fundamentalmente a través de modelos físicos a escala sino que se realiza a través de transformaciones de un modelo digital convenientemente parametrizado. De este modo la geometría sencilla del tipo puede transformarse y adaptarse a los requerimientos arquitectónicos exigidos, pudiendo llegar a alcanzar un nivel de complejidad formal que difícilmente se hubiese logrado por métodos analógicos. Un ejemplo claro de este procedimiento es la Timber Wave (Londres, 2011) de AL_A (Amanda Levete) donde la transformación y adaptación de un emparrillado de doble capa a un perfil elicoidal ha generado una geometría

compleja compuesta de multitud de piezas curvas de diferente tamaño (9).

Pero más allá de lograr formas complejas más o menos interesantes la potencialidad del proceso de parametrización reside en que el diseño resultante contiene de modo intrínseco una familia infinita de posibles soluciones formales. La definición del modelo digital a partir de una geometría analítica en lugar de una geometría descriptiva supone una de las verdaderas revoluciones de las nuevas herramientas de diseño. La propuesta que el IACC realizó para la competición internacional del Solar Decathlon 2010 es un paradigma en este sentido. El modelo digital de la FabLab House incluye variables y parámetros ambientales como la radiación solar directa incidente sobre la cubierta-fachada dotada de un sistema fotovoltaico de producción eléctrica. El modelo paramétrico permite adaptar automáticamente la forma de la envolvente y de su estructura portante a cualquier latitud. La propuesta, de este modo, se convierte en un modelo que combina las ventajas de la producción industrial masiva, a través de procesos de mecanización por tecnología CNC, con las del diseño individualizado, más próximo a la producción artesanal personalizada.

(8) Se trata del edificio de oficinas más alto del mundo construido con estructura de madera. La empresa suiza fabricante de la estructura, Blumer-Lehmann, fue también la responsable de otras obras de Shigeru Ban como el Centro Pompidou-Metz y el Edificio del Club de Golf Haesley en Nine Bridges.

(9) El curvado de piezas de madera laminada implica necesariamente la realización de moldes individuales para cada pieza y procedimientos manuales de fabricación. Cowley Timberwork fue la empresa encargada de fabricar la escultura.



Club de Golf Haesley Nine Bridges >

Fig. 17, 18 y 19: Proyección del patrón gráfico sobre la superficie, definición de las uniones en los encuentros y aspecto de una de las piezas de madera laminada alveada, tras el mecanizado de dichas uniones por CNC. Fuente: www.designtoproduction.ch. Fig. 20 y 21: Montaje de la estructura. Fuente: www.blumer-lehmann.ch. Fig. 22: Aspecto de la obra terminada. Fuente: www.shigerubanarchitects.com

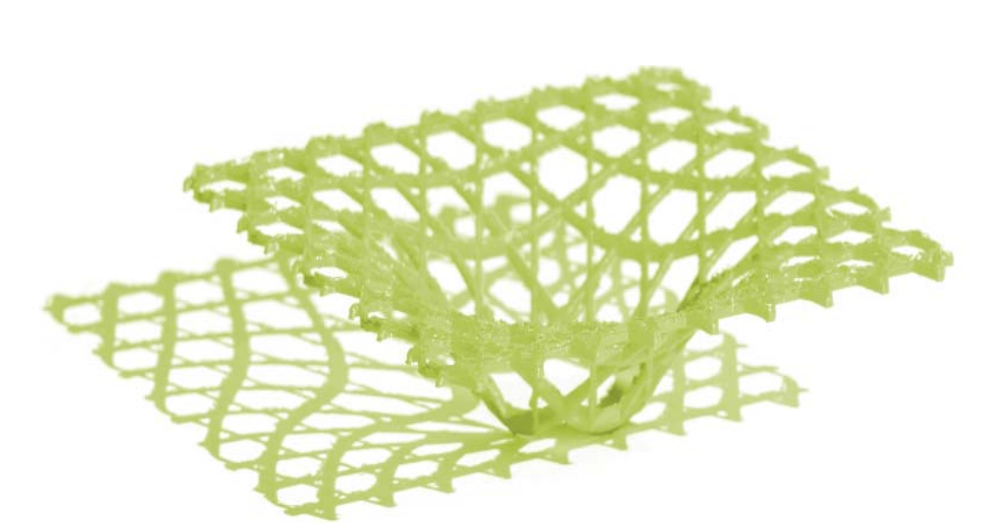
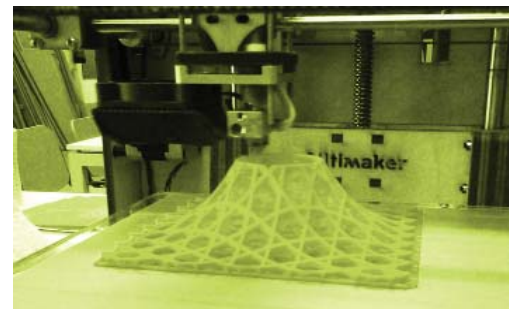


Fig. 23: Modelo a escala de uno de los módulos de cubierta. Trabajo de curso. Foto: A. Arévalo. fotowork.es. Fig. 24: Fabricación de modelo con impresora 3D. Foto: FabLab Sevilla



2. La génesis a partir de la composición arquitectónica. La imposición de la forma (10).

No son pocos los proyectos cuyo origen se encuentra más cercano a criterios compositivos que estructurales. Se trata de propuestas en las que el interés fundamental reside en investigar sobre la materialización de patrones gráficos, planos o espaciales, o formas escultóricas y, aunque la estructura soporte resultante pueda tener, en ocasiones, relaciones con alguno de los tipos estructurales clásicos, su origen, desde un punto de vista generativo se encuentra en el campo compositivo y no en el estructural.

La enorme evolución que han sufrido tanto los procesos de mecanizado industrial de la madera, que permiten la realización de cualquier forma por compleja que resulte con una precisión milimétrica, como las herramientas de análisis estructural, permiten construir prácticamente cualquier forma imaginable.

El patrón gráfico como estructura soporte.

Se trata de patrones gráficos que, proyectados sobre una superficie, se convierten en elemento estructural. Habitualmente poseen numerosos entrecruzamientos que obligan a un cierto funcionamiento como emparrillado pues la superficie sobre la que se proyecta no posee una geometría óptima que le permita trabajar como lámina. Se hace por tanto necesario recurrir a secciones capaces de resistir los esfuerzos de

flexión resultantes y a soluciones de enlace con la mayor rigidez posible. Las herramientas de diseño digital permiten realizar las operaciones de definición del patrón, de la superficie y de la proyección del primero sobre la segunda (11).

Casos ejemplares de esta posición serían el Edificio del Club de Golf Haesley Nine Bridges (Corea del Sur, 2010) o el Centro Pompidou-Metz (Francia-2010), ambos de Shigeru Ban. Se trata de estructuras realizadas con piezas de madera laminada alabeadas en el espacio que debido a su gran tamaño y complejidad geométrica requieren de una especial atención en la coordinación de las etapas y herramientas de diseño con las de producción (12).

En el caso concreto de que la superficie sea plana la operación de proyección del patrón queda simplificada pero, puesto que la rigidez obtenida por la geometría de la superficie es nula, se hace necesario, si cabe, prestar mayor atención a la rigidización de los nudos.

El pabellón Sumika (Japón, 2007) de Toyo Ito es una muestra de ello. Un patrón de apariencia irregular, inspirado en la imagen de los cerezos en flor, define la geometría de la estructura soporte de fachada y de cubierta. Dicha estructura se realizó en madera laminada mediante uniones encoladas resueltas mediante el empleo de barras de acero corrugado y resina epoxi.

(10) La generación de la forma producida por la imposición de un proceso exterior, ajeno a la realidad constructiva y estructural ha sido un aspecto que ha generado profundos e interesantes debates en el campo de la crítica arquitectónica, en especial a partir del último cuarto del S.XX en el que han proliferado las formas libres y se ha puesto en entre dicho la coherencia como cualidad inherente de la arquitectura. El discurso pronunciado por José Rafael Moneo en su ingreso en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando en el año 2005 titulado “Sobre el concepto de arbitrariedad en arquitectura” es muy elocuente al respecto. En él analiza los procesos de generación formal de diferentes arquitecturas y sus relaciones con lo arbitrario y lo causal, diferenciando claramente aquellas que se generan como propuestas objetuales y escultóricas de aquellas otras que surgen de la invención del proceso constructivo.

(11) La modelización de los sistemas de unión, cuestión primordial en el diseño de estructuras de madera, puede requerir de programación mediante scripts, ya que la complejidad alcanzada suele generar uniones que, aunque conceptualmente sean iguales, geométricamente resulten todas diferentes.

(12) Los diferentes software de modelado y fabricación (Cadwork, Bocad, etc.) empleados por las empresas de mecanizado de la madera, aunque incorporan herramientas potentes, pueden resultar insuficientes ante geometrías tan complejas como la de las obras mencionadas que suelen desarrollarse en entornos como Rhinoceros y Rhinocript. Desingtoproduction, fue la empresa especializada encargada de coordinar ambos proyectos realizando modelos digitales que incorporan en el diseño la información para su fabricación y construcción.

Pabellón Sumika >

Fig. 25: Modelo parcial de la estructura. Trabajo de curso. Foto: A. Arévalo, fotowork.es. Fig. 26: Interior del pabellón. Fuente: www.iwan.com Fig. 27: Prueba de la rigidización del nudo mediante el empleo de barras de acero corrugado. Fuente: http://eee-web01.kenchiku.tokyo-gas.co.jp/su-mika_project

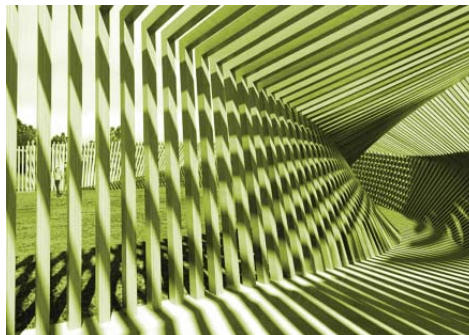
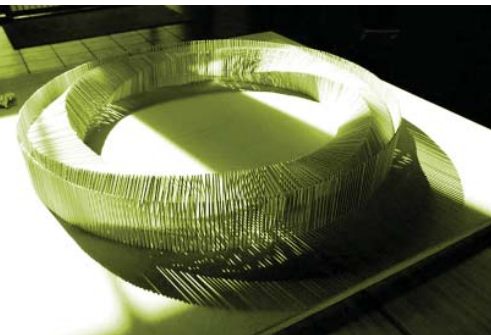
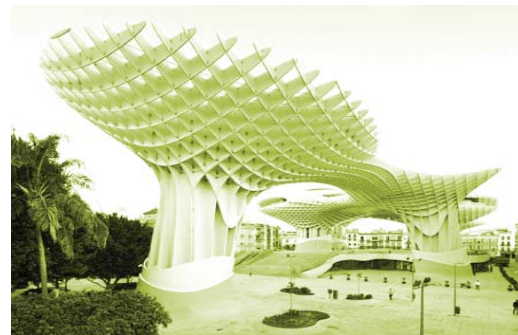


Fig. 28 y 29: Exterior e interior de la instalación Dunescape. Fuente: www.shoparc.com. Fig. 30 y 31: Exterior e interior de la instalación Ekko. Fuente: www.thilofrank.net. Fig. 32: Metropol Parasol.



Procesamientos digitales de formas escultóricas complejas.

Si bien en el caso anterior el patrón se proyectaba sobre una superficie dotándola en última instancia de un comportamiento estructural, en esta ocasión se trata de realizar operaciones geométricas digitales sobre un volumen con un cierto carácter escultórico con el objetivo de dotarlo de un soporte constructivo y estructural.

Este tipo de operaciones (secciones múltiples paralelas, radiales, etc.), que la mayoría del software de diseño permite realizar de modo prácticamente automático, resultan muy útiles y operativas en el campo del diseño y la arquitectura efímera para la construcción sencilla de geometrías complejas como sucede en la instalación Dunescape (New York, 2000) de Shop Architects para el MoMa/PSI o la instalación Ekko (Dinamarca 2012) de Thilo Frank. Sin embargo, en el caso de grandes estructuras, como el Metropol Parasol (Sevilla, 2011) de Jürgen Mayer, en las que las formas no tienen un sentido estructural original, pueden encontrarse grandes inconvenientes durante el proceso de resolución constructiva y estructural de la misma, tanto a nivel de solución de las uniones como de la misma elección del material estructural (13).

3. Procesos generativos computacionales y fabricación digital. Descubriendo la forma (14). Los pabellones como campo de experimentación.

(13) Nótese la cercanía de procedimiento con arquitecturas como la de Ghery o Eisenman en la que la producción de una forma escultórica compleja es previa e independiente a la de su soporte material resultando necesario el posterior procesamiento informático de la misma para la definición de su sistema estructural.

(14) Resulta muy interesante traer a colación las reflexiones que realiza Rafael Moneo, en su mencionado discurso de ingreso a la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, sobre la forma en la obra de Gaudí que, lejos de su aparente arbitrariedad, se presenta como necesaria cuando se analiza y comprende los procesos constructivos que, a la postre, coinciden con el proceso de génesis de la misma: “la invención de la forma coincide con la invención del proceso constructivo” y continua

La búsqueda de la forma a partir de investigaciones y manipulaciones geométricas o materiales ha sido utilizada ampliamente a lo largo del siglo XX en ámbitos académicos, artísticos, arquitectónicos e ingenieriles (15), dando como resultado, en el ámbito estructural, la incorporación de nuevos tipos como las membranas, las mallas de cables y, en el caso específico de la madera, los afamados gridshells de F. Otto, entramados de láminas delgadas de madera que mantienen su forma gracias al pretensado producido por la flexión elástica de las mismas.

Con la evolución de las tecnologías digitales y su capacidad de simular procesos generativos, derivados del desarrollo de herramientas de diseño capaces de incorporar lenguajes de programación y algoritmos (16), la experimentación con la forma se ha trasladado, en gran medida, al ámbito de las tecnologías computacionales y los medios de fabricación digital.

Bajo este prisma, el interés radica en el diseño del proceso y de los comportamientos más que sobre la búsqueda de un resultado final concreto (17).

En el ámbito estructural las estrategias de generación formal bajo esta perspectiva requieren investigar sobre la integración de las herramientas de diseño (simulación de procesos) y fabricación digital con las de análisis estructural.

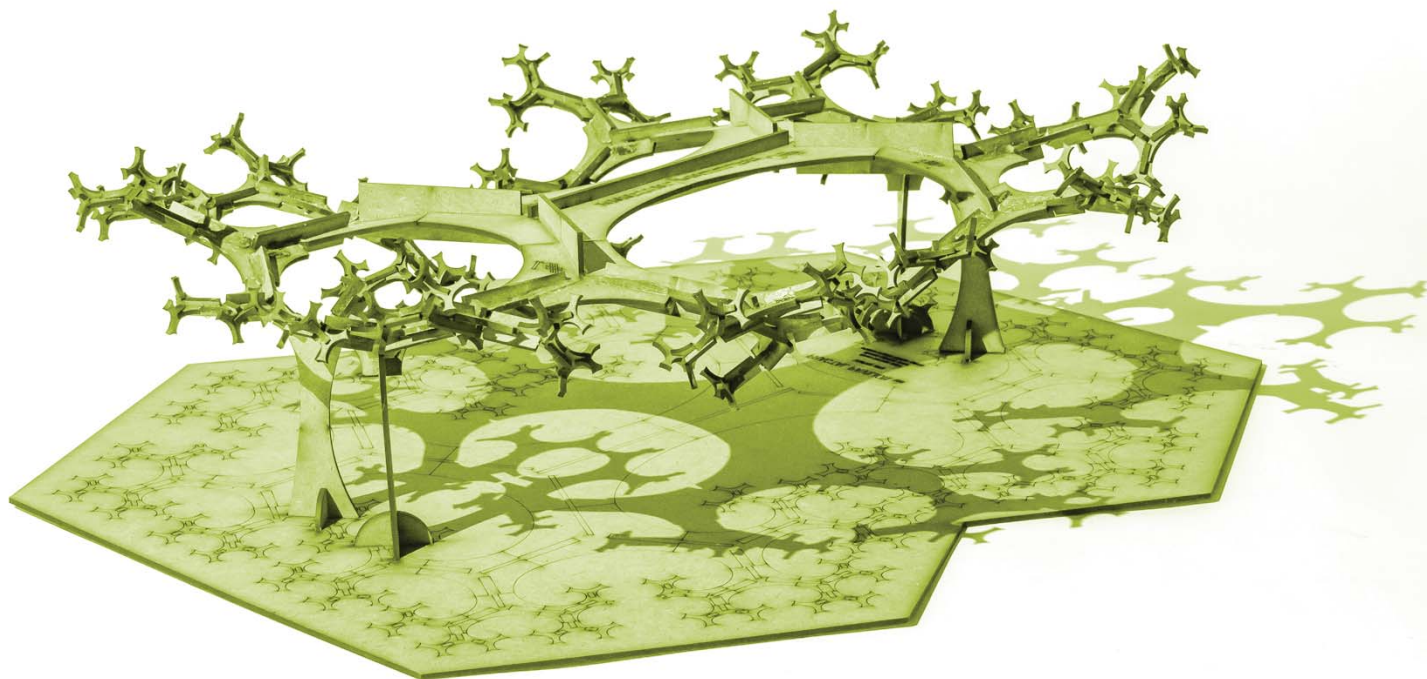
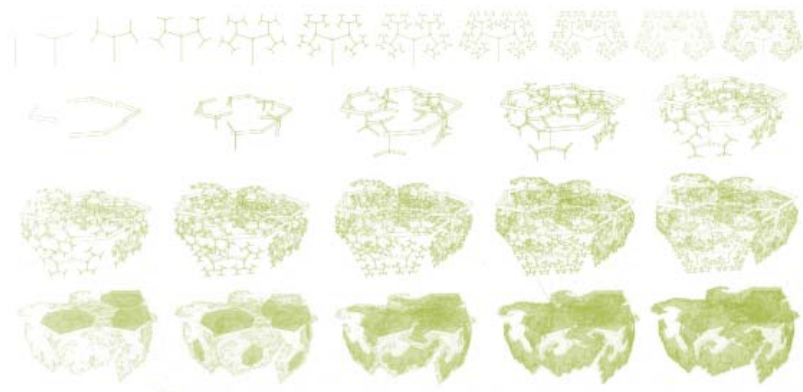
Este nuevo enfoque integrador denominado “*Nuevo Estructuralismo*” traspone el concepto de “*De-*

“Gaudí no inventa formas, las descubre”. Moneo, J. R. op. cit. Pag. 29

(15) Sirvan como ejemplo el curso de iniciación de Paul Klee en la Bauhaus y las exploraciones de F.Otto, B.M. Fuller o H. Isler.

(16) Rhinoscript o Grasshopper para Rhino, de McNeel, Generative Components (GC) para Microstation, de Bentley Systems, Digital Projects, variante arquitectónica de Catia, desarrollado por Gehry Technologies, o Solidworks de SolidWorks Corp, entre otros.

(17) Frazer, J. “The generation of virtual prototypes for performance optimization”. En: Oosterhuis, K., Feireiss L. The architecture co-laboratory: Game set and match II - On computer games, advanced geometries and digital technologies. Rotterdam: Episode Publishers, 2006.



Fractal Pavilion >

Fig. 33: Imagen del pabellón terminado. Fuente: <http://designandmake.aaschool.ac.uk/aa-summer-pavilions> Fig. 34: Evolución geométrica. Fuente: "Making pavilions", AA Publications. Londres 2011. Fig. 35: Modelo a escala. Trabajo de curso. Foto: A. Arévalo. fotowork.es.

Fig. 36: Proyecto Grotto. Fuente: arandalasch.com



sign of Engineering" por el de *"Re-Engineering of Design"* (18). La búsqueda de la integración de las diferentes etapas (diseño y definición geométrica, computación y fabricación) está siendo desarrollada ampliamente por grupos interdisciplinarios en las ingenierías más avanzadas (19).

En ámbitos académicos también se están llevando a cabo investigaciones en este sentido (20), cuyo trabajo se materializa, normalmente, a partir del desarrollo y producción de pabellones experimentales realizados, en su inmensa mayoría, en estructura de madera.

Los procesos de génesis de la forma estructural, en esta línea, se desarrollan en torno a tres enfoques, principalmente:

Geometrías evolutivas -adaptativas-.

Basadas en conceptos provenientes del campo de las matemáticas y la geometría (procesos de ramificación, fractales, patrones y teselaciones aperiódicas, voronoi, etc.) y de la biología (morfogénesis, desarrollos genéticos, etc.). Parten de la definición de elementos básicos y de reglas evolutivas que generan geometrías crecientes. Su simulación a través de algoritmos está encontrando un fructífero campo de aplicación en el ámbito del diseño generando *"espacios geométricos no euclidiano, sistemas cinéticos y dinámicos"* produciendo resultados no esperados por el diseñador (21).

(18) Rivka Oxman y Robert Oxman abogan por un cambio de paradigma en el que el "diseño de la ingeniera" estructural arquitectónica, habitualmente relegada a fases posteriores al diseño de la forma arquitectónica, pase a formar parte integral del proceso de formalización desde sus primeras etapas, convirtiéndose de este modo en una "ingeniería del diseño". Vid. Oxman, R.; Oxman, R. "The New Structuralism. Desing, Engineering and Architectural Technologies" en. "The New Structuralism. Desing, Engineering and Architectural Technologies" AD. Architectural Design N° 206. Julio/Agosto 2006. Pag. 14-23.

(19) En el año 2000 Cecil Balmond creó, dentro de Ove Arup & Partners, el Advanced Geometry Unit -AGU- (Departamento de Geometría Avanzada), con el fin de desarrollar formas y estructuras geométricamente complejas e integrar todas las etapas, desde el diseño a la fabricación.

El Fractal Pavilion, realizado en 2005 por los alumnos de la Architectural Association School of Architecture (22), bajo la tutela de Charles Walker y Martin Self, exploran la aplicación de geometrías fractales evolutivas a partir de algoritmos que multiplican y distribuyen espacialmente los elementos estructurales a partir de operaciones sencillas.

Aunque este procedimiento aun no ha dado frutos significativos en la escala de las estructuras de madera cabría esperar el desarrollo de propuestas interesantes, por ejemplo, en el campo de las mallas de barras generadas a partir de desarrollos poliédricos evolutivos, conceptualmente similares a los propuestos, por ejemplo, en el proyecto Grotto, realizado por los arquitectos Benjamin Aranda y Chris Lash (23), en colaboración con AGU.

Procesos constructivos.

Hacia la fabricación robotizada.

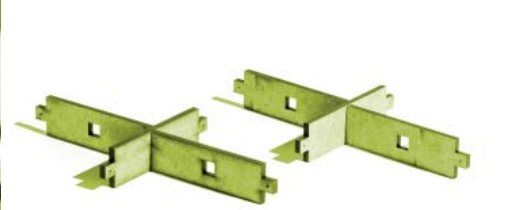
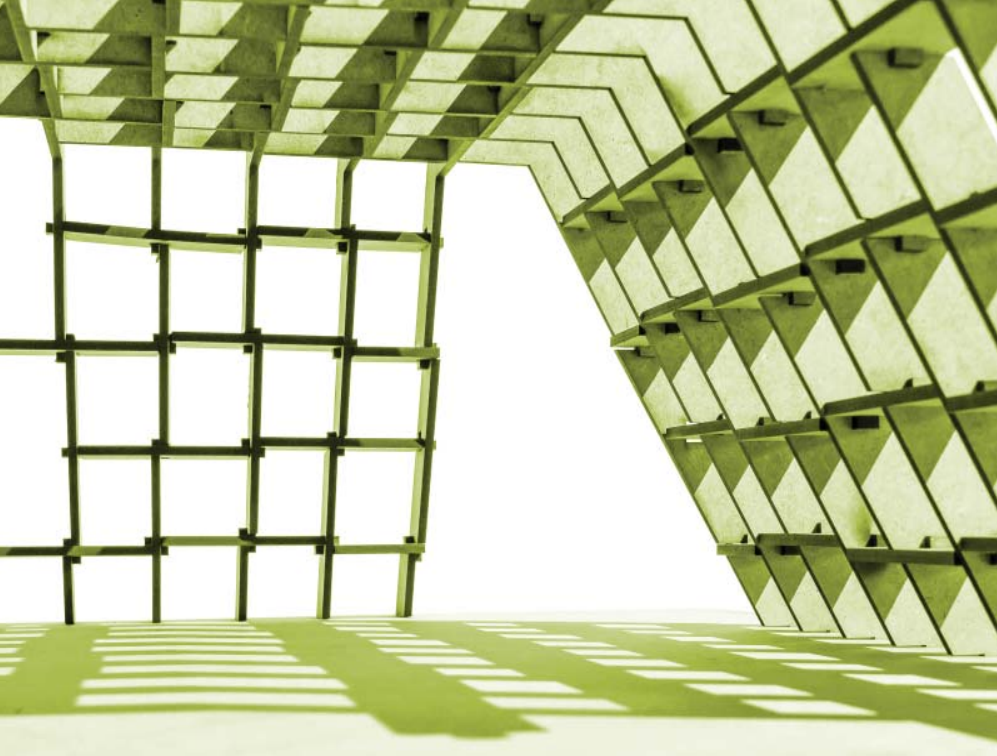
Cuando el proceso generativo se produce a partir de la definición de un proceso de montaje que incorpora la resolución del problema de la unión, la obra queda definida conceptualmente y de modo simultáneo en el detalle y en la globalidad. Tan solo queda concretar o establecer la lógica que regula el proceso de adición o definir la geometría final resultante a la que ha de adaptarse el proceso. El desarrollo de algoritmos permite definir el concepto constructivo inicial

(20) Destacan en este aspecto los grupos de los profesores F. Gramazio y M. Kohler (Arquitectura y fabricación digital de la ETH de Zurich) y A. Menges (Inst. de Diseño Computacional, de la Univ. de Stuttgart).

(21) KOLAREVIC, B. "Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing". New York, Ed. Branco Kolarevic, 2003.

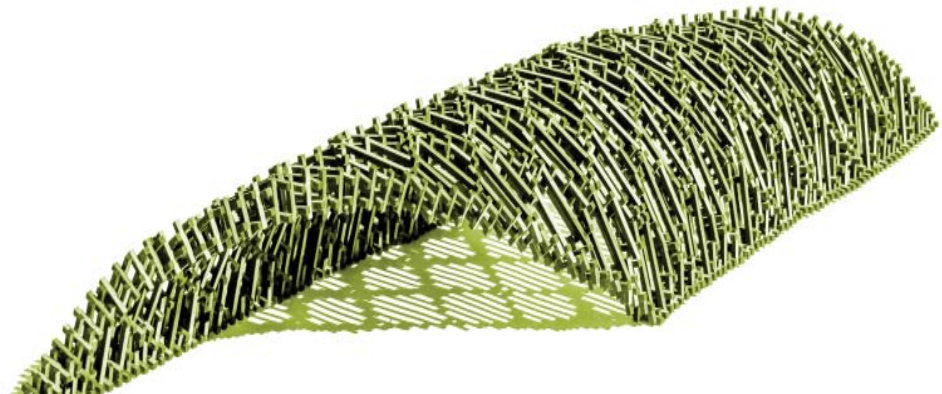
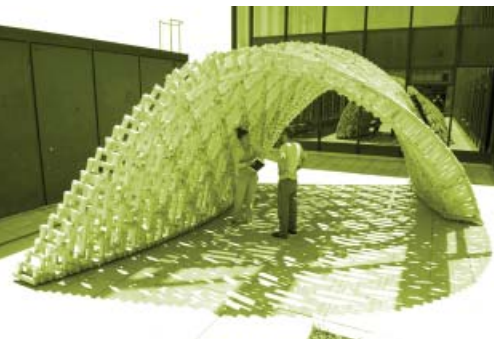
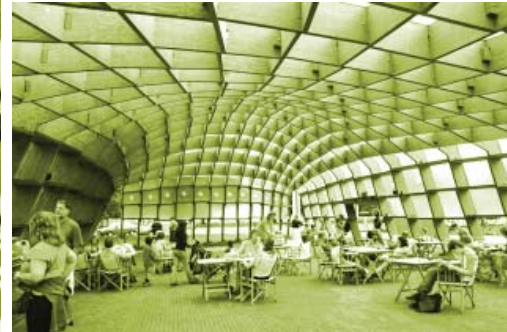
(22) Cada verano la AA promueve, con el patrocinio de la empresa FinForest -fabricante del tablero microlaminado Kerto-, la fabricación experimental de pabellones con la intención de explorar nuevas técnicas y usos para construcciones de madera.

(23) Los arquitectos Benjamin Aranda y Chris Lasch han centrado su trabajo en la investigación y el desarrollo de herramientas y algoritmos matemáticos y geométricos capaces de generar sistemas constructivos y estructurales. Su libro "Tooling" (Aranda, 2006) identifica siete de estas herramientas, analizando su potencial y mostrando aplicaciones concretas en determinados proyectos.



Serpentine Gallery 2005 >

Fig. 37 y 38: Modelo a escala de la estructura. Vista interior y detalle del sistema de unión. Trabajo de curso. Foto: A. Arévalo. fotowork.es. Fig. 39: Imagen interior de la obra acabada.



Pabellón secuencial >

Fig. 40 y 41: Montaje de la estructura por brazo robótico y estructura acabada. Fuente: <http://dfab.arch.ethz.ch>. Fig. 42: Modelo a escala de la estructura. Trabajo de curso. Foto: A. Arévalo. fotowork.es.

(incorporando las propiedades del material) y adaptarlo geométricamente a cada situación concreta.

El pabellón de la Serpentine Gallery de Álvaro Siza y Souto de Moura (2005) investiga sobre estos procesos. Partiendo de un módulo sencillo, basado en el concepto de estructura secuencial ideado por L. da Vinci y resolviendo la unión con una variante de la tradicional caja y espiga (24), generan una geometría compleja que da respuesta a los requerimientos arquitectónicos planteados de transparencia, tránsitos y relación con el entorno. Este enfoque permite desarrollar geometrías complejas a partir de conceptos sencillos mediante la adición de piezas rectas, relativamente pequeñas y manejables, mecanizadas mediante procesos de tecnología CNC (25). Pero el control del proceso puede llegar a ser prácticamente total si el montaje también es realizado mediante procedimientos digitales. Este es el campo de investigación de Gramazio & Kholer que proponen procesos de montaje a partir del uso de brazos robóticos que interpretan los algoritmos que definen el propio proceso de montaje.

El pabellón secuencial (2010) se construye como resultado de un curso en el que se investigó sobre el proceso aditivo de pequeñas piezas encoladas de madera (de sección constante) con fin estructural. La adaptación del concepto a una geometría de doble curvatura antifunicular otorga gran rigidez y eficacia al sistema. La definición de algoritmos permite obtener la longitud de cada una de las piezas, su posición relativa y un proceso de fabricación rápido y exacto con el uso de un brazo robotizado. En cursos posteriores (2013) se ha ampliado este concepto al de

(24) Sin el desarrollo del panel microlaminado Kerto Q, de la empresa FinnForest, la solución no hubiese sido posible debido a la concentración de tensiones que se producen en los apoyos de las piezas, debido a las entalladuras necesarias para realizar la espiga, y que generan tracciones perpendiculares a la fibra. El panel Kerto Q dispone un 20% de las chapas de madera en dirección perpendicular a la directriz para la absorción dichas tracciones.

(25) Nótese la diferencia de enfoque con las obras que utilizan piezas de gran complejidad geométrica y grandes escuadrías, como las ya mencionadas del Club de Golf Haesley Nine Bridges o del Centro Pompidou-

“agregaciones espaciales”, dando como resultado interesantes estructuras de geometría aparentemente aleatoria (26).

Procesos físicos y materiales. La necesidad de la forma. Hacia el diseño computacional.

El proceso habitual de diseño estructural desarrollado con herramientas digitales implica normalmente dos etapas diferenciadas. Una primera de definición geométrica y otra posterior de análisis estructural. Con este procedimiento ni las propiedades mecánicas del material ni las leyes físicas pueden formar parte del proceso de diseño.

Como alternativa a este planteamiento, el ICD (Instituto de Diseño Computacional, de la Universidad de Stuttgart) liderado por A. Menges está desarrollando propuestas estructurales en madera en las que sus propiedades elásticas y resistentes son encryptadas en el modelo de diseño, de modo que la geometría resultante es expresión del comportamiento estructural del material. Esta modelización digital a partir de las propiedades elásticas del material supone, según A. Menges, una verdadera evolución desde el diseño digital al realmente computacional (27).

Este es el caso del pabellón desarrollado por el ICD/ITKE en 2010. Una investigación sobre el empleo de láminas de tablero contrachapado de madera que extiende al ámbito digital las investigaciones realizadas por F.Otto sobre la flexión activa a partir de modelos físicos. Son ya numerosas las investigaciones en este sentido como las realizadas por Coda Office (Enrique

Metz.

(26) Es interesante destacar la distinción que hace Cecil Balmond entre aleatoriedad e informalidad. Mientras que la aleatoriedad no responde a ningún criterio u orden, la informalidad responde siempre a leyes generativas internas, tal y como ocurre en la naturaleza. Dichos órdenes responden a organizaciones no-lineales y no cartesianas que pueden simularse a partir de algoritmos.

(27) Menges, A. “Material resource fullness. Activating material. Information in computational design”. AD Material Computation. N° 216. 2012. Pag 35-43.

Agradecimientos

Este artículo no hubiese sido posible sin el esfuerzo y dedicación de los alumnos de la asignatura “Diseño Arquitectónico de Estructuras de Madera y Fabricación Digital -FabLab-” , impartida en la ETSA de Sevilla en el curso 2012-2013.

La extensión del presente artículo solo ha permitido presentar algunos de los trabajos realizados durante el curso. Sin embargo todos han contribuido de un modo u otro a extraer las conclusiones que aquí se presentan.

A todos ellos queremos trasladar nuestro más sincero agradecimiento y hacerlos partícipes del presente trabajo:

Fernández Iruzubieta, Javier; García Navarro, Alejandro José; Mora Bueno, Manuel/ López González, Carlota; Martínez Muñoz, Adrian Manuel; Olmedo Aguilar, José Manuel/ Castro Alba, Javier; Martínez Huelva, Amparo; Raposo González, Juan José/ Díaz Cumplido, María Araceli; Domínguez Blanco, Olmo; Elena Martin, Manuel Hugo/ Aguilera Eguino, Fernando; Álvarez Rodríguez, Ricardo Guillermo; Cabezón Barrero, Jesús; Álvarez Atienza, Abraham/ Gómez González, Carlos Luis; Quesada Amor, José Manuel; Rivero Blanco, Sergio; Sánchez Jiménez, Cristina/ Márquez Garfía, Encarna; Selfa Arjona, Alicia; Serrano Peinado, María Del Carmen; Simón Lobato, Irene/ Barrio López, Juan Carlos; Rodríguez Colubi Remartínez, Enrique; Ruiz García, David/ Ladrón De Guevara Vergara, Francisco; Martín Rizo, Joaquín; Martínez González, Lorenzo/ Cabeza De Vaca Marín, Rafael; Cordero González, Sebastián; González Vergara, Álvaro; Ramírez Fernández, Jesús/ Alfonso Ramírez, Isabel; Campos González, Francisco Manuel; Delgado Sánchez, Zulema Mª; López González, José Antonio/ Antequera Pavón, Víctor; González Cabrera, Laura; Lucio Rodríguez, Roberto Ángel/ Malo Morano, Santiago; Manuel De Villena Quijano, José Ignacio; Trujillo Fernández, Pedro/ Fernández Pino, Miguel Ángel; Marrodán Castro, Sara; Río Aguirado, Pablo Del; Ruiz Sánchez, Jaime/ Cantero Gordillo, Eloy; Díaz Fuentes, Carolina; Pérez Ortega, María/ Olmedo Gutiérrez, Javier; Quilón Rodríguez, Irene; Virues Mera, Ismael/ Cortes Camacho, José Manuel; Ortega Nieto, Luis Alberto; Vázquez Marques, María Del Carmen/ Chaves Moreno, Estefanía Amanda; Cruz García, Marta; Díaz Patillas, Diego Rubén; Pacheco Ruda, Guillermo/ Domínguez Díaz, Cristina; Marín Moreno, Marta; Otero Harana, Rocío; Ruiz Pereiro, María De La O/ Freytas García, María De Los Ángeles; Garcés Rubiales, Manuel David; Lagares Cáceres, Juan Carlos; Sevilla Monago, Julia/ Borrego Plata, Álvaro; Gallardo Nieto, Alfonso; García-Hidalgo Troyano, Cristina/ Acosta Bejarano, Mario; Farace Gentile, Marcelo; Pérez García, Marta; Rojo Campazas, Julio Miguel/ Chalyy , Román; Martín Loza-

no, Pablo; Palomo Méndez, Daniel/ Macías Mojón, Argimiro; Morales Cifuentes, Carmen; Quero Velasco, Teresa/ León Sánchez, Carlos; Sabariego Redondo, Ignacio Agustín; Velasco Ramírez, María/ Arrans Gallardo, Álvaro; Chávez Romero, Alfredo; Jiménez Molero, José Luis; Satué Falla, Ángel/ Dueñas García, Noelia; Guerrero Zamora, María Teresa; Soler Gómez, Juan Luis/ Casatejada Gil, María Pilar; López Sánchez, Alfredo; Maggi , Camila; Ramos Dávila, Francisco/ Benítez De La Rosa, Manuel; López-Cepero Algeciras, Mercedes; Ramos Ruiz, Mª Dolores.

Así mismo queremos agradecer la participación desinteresada como docentes a Antonio Sáseta Velázquez, Jaime de Miguel Rodríguez, Javier Al-darias Chinchilla y José Buzón González cuyas aportaciones han sido enormemente interesantes y productivas.

Bibliografía

A.A.V.V. Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña –IaaC-. “FabLab House. Proyecto de ejecución para la competición Solar Decathlon 2010”. Barcelona. Versión Septiembre 2010.

A.A.V.V. “Timber innovation”. A+U. Nº 490. 2011.

BALMOND, C; SMITH, J. “Informal”. Prestel. Munich, 2002.

BERNABEU A. “Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea. El trabajo de Cecil Balmond.”. Tesis doctoral. U.P.M. Madrid, 2007.

DEMPSEY, A.; OBUCHI, Y. “Nine problems in the form of a pavilion”. AA Publications. Architectural Association. Londres, 2010.

IWAMOTO, L. “Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques”. Princeton Architectural Press. New York, 2009.

KOLAREVIC, B. “Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing”. New York, Ed. Branco Kolarevic, 2003.

KOTNIK, T; WEINSTOCK, M. “ Material form and force”. AD Material Computation. Nº 216. Marzo/abril 2012.

LARA, A.; ROIG, A.; DOMINGUEZ, I. “Nueva generación en madera. Sostenibilidad y nuevas tecnologías en

estructuras arquitectónicas”. Catálogo de la exposición. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla. Sevilla, 2013.

LARA, A.; ROIG, A.; DOMINGUEZ, I. “Nueva generación en madera. Sostenibilidad y nuevas tecnologías en estructuras arquitectónicas”. Vídeo de la exposición. <http://vimeo.com/76645657>

MENGES, A. “Material resource fullness. Activating material. Information in computational design”. AD Material Computation, Nº 216. Marzo/abril 2012.

MENGES, A. “Megabytes de Madera. El Nuevo diseño computacional”. Architectura Viva, Más madera de la artesanía a la robotización. Nº 137. Madrid 2011.

MONEO, J.R. “Sobre el concepto de arbitrariedad en arquitectura”. Discurso de ingreso en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando de Madrid. Enero 2005. Disponible en <www.realacademiabellasartes-sanfernando.com/.../moneo_rafael-2005.pdf> Acceso: 10 octubre 2012.

NATTERER, J. y otros “Construir en bois”. Detail. Traducción francesa: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne, 2007.

OTTO, F. “Conversación con Juan María Songel”. G. Gili. Barcelona, 2008.

OXMAN, R.; OXMAN, R. “The New Structuralism. Design, Engineering and Architectural Technologies”. AD The New Structuralism. Design, Engineering and Architectural Technologies. Nº 206. Julio/Agosto 2006.

RODRÍGUEZ, M.A. “Diseño estructural en madera : una aproximación en imágenes al estado del arte europeo a finales del siglo XX”. AITIM. Madrid, 1999.

ROSS, P.; DOWNES, G.; LAWRENCE, A. “Timber in contemporary architecture: a designer's guide”. Trada Technology, 2009.

SCHEURER, F. “Materialising complexity”. AD The New Structuralism. Design, Engineering and Architectural Technologies. Nº 206. Julio/Agosto 2006.

SELF, M.; WALKER, C. “Making pavilions”. AA Publications. Architectural Association. Londres, 2011.

SONGEL, J. M. “Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart. Una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente”. Tesis doctoral inédita, U.P.V. Valencia, 2005.

TORROJA, E. “Razón y ser de los tipos estructurales”. 3ªEd. Madrid: CSIC; Ministerio de Fomento; CEDEX-CEHOPU; CICCIP. Madrid, 2007.

WILLMAN, J. “El ebanista digital. Hacia la fabricación robotizada”. Architectura Viva, Más madera. De la artesanía a la robotización. Nº 137. Madrid 2011.