



# MFD: DISEÑO MATERIAL INFORMADO POR FABRICACIÓN DIGITAL

MFD: Diseño material informado por fabricación digital

Fecha Recepción: 16 julio 2016

MFD: *Material-based Design Informed by Digital Fabrication*

Fecha Aceptación: 5 agosto 2016

## PALABRAS CLAVE

Procesos informados computacionalmente | tectónica digital | materialidad digital | diseño basado en desempeño | diseño generativo

## KEYWORDS

*Informed Computational Processes | Digital Tectonics | Digital Materiality | Performance Based Design | Generative Design*

## Rivka Oxman

Faculty of Architecture and Town Planning, Technion ITT

Haifa, Israel

[rivkao@tx.technion.ac.il](mailto:rivkao@tx.technion.ac.il)

### Resumen\_

El desarrollo reciente de las tecnologías de fabricación y manufactura digital está acentuando un cambio en los procesos de diseño. En este trabajo, formulamos un nuevo esquema conceptual llamado procesos MFD (Material-Fabricación-Diseño). Los procesos MFD se definen como *procesos computacionales que informan y realzan las relaciones tectónicas entre forma, estructura y material dentro de la lógica de las tecnologías de fabricación*. Al emprender un enfoque sistemático, los modelos MFD se identifican representando el conocimiento de un diseño digital innovador basado en lo material. Este trabajo explora, formula y explica el impacto de estos desarrollos sobre teorías, conocimiento y procesos de diseño. Demostramos, a través de un análisis comparativo de varios ejemplos escogidos de precedentes y estudios de casos, modelos emergentes de diseño, principios, procesos y técnicas.

### Abstract\_

Recent development of digital fabrication and materialization technologies is enhancing change within design processes. In this work we formulate a new conceptual schema termed Material-Fabrication-Design (MFD). MFD's are defined as *computational informing processes that enhance tectonic relationships between form, structure, and material within the logic of fabrication technologies*. By undertaking systematic approach, MFD models are identified representing knowledge of innovative digital material-based design. The work explores, formulates and explains the impact of these developments on theories, knowledge and processes of design. We demonstrate through comparative analysis of various selected representatives of precedents and case studies, emerging design models, principles, processes and techniques.

Modelo de Imaginary Beings impreso en 3D. Créditos: N. Oxman, C. Carter (MIT); J. Hicklin (Mathworks) y J. Weaver (Harvard). Patrocinado por Stratasys. Fotografía: Yoram Reshef.

## 1. INTRODUCCIÓN

Más allá de las primeras integraciones de CAD/CAM, la continua evolución de los medios de fabricación digital ha producido una nueva simbiosis entre tecnología y diseño. Esta simbiosis ha conducido ahora al surgimiento de amplios cambios en la aparición de la praxis material como un fenómeno dominante en las últimas dos décadas. La revolución del material digital ha entregado nuevas formas de capacidad de diseño, las que han transformado la cultura de esta disciplina en todos los variados campos del diseño. Esta evolución en el campo del proceso *Material-Fabricación-Diseño* (MFD) es resultado del rápido desarrollo de nuevos medios de fabricación, del crecimiento de la aceptación general de la materialidad digital como un factor importante del diseño y del ímpetu consiguiente dado a tecnologías y métodos nuevos.

La creciente convergencia de tecnologías de diseño y materialización está creando actualmente un intenso nivel de compromiso profesional, académico y de investigación con la *praxis material en el diseño*, con la consiguiente evolución de una variedad de prácticas de diseño relacionadas con los medios (R. Oxman & R. Oxman, 2010). Basado en los avances de la tecnología computacional, el diseño puede actualmente ser *informado* por los procesos de materialización. Los medios digitales extienden la relación entre generación de forma y producción material, y los diseñadores están comenzando a tomar decisiones relacionadas con la selección de materiales y métodos de producción *desde la etapa del diseño conceptual*. Dentro de las disciplinas del diseño, tales como el diseño en arquitectura y en ingeniería, estos desarrollos están generando un amplio giro teórico, tanto en procesos de diseño generativo como en métodos de materialización.

## 2. ANTECEDENTES

Gracias a un estudio sistemático del desarrollo cronológico de la relación entre tecnologías de manufactura y de fabricación (Kieran & Timberlake, 2004; Iwamoto, 2009) fue posible definir las primeras *relaciones* entre tecnologías de fabricación y de diseño. El efecto de este profundo cambio de influencia tecnológica dentro de las disciplinas del

diseño fue conocido como la *cultura de la fabricación* (Mori, 2002; Anderson, 2012). Hoy, el cambio actual está influyendo en el crecimiento de la investigación del diseño basado en lo material, tanto a nivel académico como profesional: R. Oxman & R. Oxman, 2014; Carpo, 2013; Dunn, 2012; Beorkrem, 2013; Sheil & Glynn, 2011; Gramazio, Kohler, Langenberg, & ETH-Zúrich, 2014. A través del análisis de trabajos experimentales pioneros estamos empezando a conceptualizar una serie de *modelos MFD* ejemplificados por notables casos de estudio.

La siguiente sección comienza a definir los conceptos y principios de tecnologías de diseño y materialización.

### 2.1 Prototipado rápido

Las tecnologías de *Prototipado rápido* (RP, por sus siglas en inglés) fueron definidas como un grupo de técnicas usadas para *fabricar rápidamente un modelo a escala, una de sus partes o un conjunto de partes* por medio de tecnologías de manufactura asistida por computador (CAM) usando datos de diseño asistido por computador (CAD). La idea de prototipar rápidamente modelos *durante el proceso de diseño* como una forma de retroalimentación fue la base inicial de la relación entre diseño y fabricación. El prototipado rápido por medio de tecnologías de fabricación también fue rápidamente reconocido como una tecnología potencialmente significativa para el diseño (Kieran & Timberlake, 2004).

### 2.2 Fab Labs: El surgimiento de los Laboratorios de Fabricación de Diseño

Actualmente, las técnicas de modelado digital refuerzan la conexión entre *los modelos digitales y físicos de diseño*, creando información que se traspaasa directamente como datos de control a tecnologías de fabricación digital, integrando el diseño, la fabricación y la manufactura en un proceso único (Sass & R. Oxman, 2006; Kolarevic & Malkawi, 2005; Kolarevic & Klinger, 2008). El rápido crecimiento de esta relación entre lo físico y lo material ha contribuido al auge del concepto de *Fab Lab*.

El laboratorio de fabricación, o *Fab Lab* (Gershenfeld, 2007), es un centro con múltiples herramientas de prototipado

rápido y fabricación. Los *Fab Labs* generalmente incluyen un conjunto de tecnologías para estrategias aditivas y sustractivas, tales como cortadoras láser, impresoras 3D y maquinaria CNC (control numérico computarizado) para cortar, perfilar y fresar materiales. Los *Fab Labs* también pueden incluir tecnologías robóticas para montar y operar dispositivos de fabricación.

Mediated Matter Group ha desarrollado un tipo especial de *Fab Lab* en el *MIT Media-Lab* (N. Oxman, Oritz, Gramazio, & Kohler, 2015), donde arquitectos, diseñadores y biólogos colaboran, desarrollando y probando herramientas innovadoras para apoyar los nuevos procesos de diseño y creación de productos a diferentes escalas, usando fabricación aditiva *top-down* y crecimiento biológico *bottom-up*. El *Lab* de Mediated Matter Group se ha convertido en un medio de exploración de las relaciones entre la fabricación digital y la fabricación biológica, permitiendo el diseño y la producción a la escala de la naturaleza.

### 2.3 El concepto de procesos informados computacionalmente

La comprensión del diseño como una síntesis de procesos de información explícitos y externalizados, tales como la presentación, la generación, el desempeño y la evaluación, ha sido explicado y formulado como un proceso computacional operativo de diseño digital (R. Oxman, 2006). La aparición de *procesos de diseño informados computacionalmente*, que combinan nuevos ambientes de modelado paramétrico, como *GenerativeComponents* y *Grasshopper*, lenguajes algorítmicos generativos, texto visual y posibilidades de codificación, también está comenzando a permitir la *integración de los procesos de materialización* en el diseño conceptual (R. Oxman, 2012).

### 2.4 El concepto de tectónica informada

Debido al surgimiento de los procesos informados computacionalmente que permiten la mediación entre *forma*, *estructura* y *propiedades materiales* en procesos de diseño, la tectónica nuevamente se convierte en un concepto trascendental y operativo en el diseño digital. Ahora las relaciones tectónicas pueden ser informadas y por lo tanto

mediatizadas por los medios digitales a través de todas las etapas de diseño, desde su concepción hasta su producción. La mediación informada del contenido tectónico de los diseños es un componente esencial del diseño basado en el material, lo que se define con el término *tectónica informada* (R. Oxman, 2012). Las diversas clases de tectónica informada se denotan por las relaciones características de forma, estructura y material en el diseño de fabricación. Son estas clases de tectónica informada en el diseño de fabricación las que constituyen la base para definir y clasificar los diversos *modelos de materialización del diseño*.

### 2.5 Modelos de materialización del diseño

La experimentación con materiales nuevos y principios de materialización se está integrando dentro de la lógica de los procesos emergentes de diseño digital y, por lo tanto, está enriqueciendo la integración de nuevas estrategias de diseño y producción (Gramazio, Kohler, & Oesterle, 2010; Schodek, Bechthold, Griggs, Kao, & Steinbur, 2004; N. Oxman, 2010, 2011; Menges, 2012; N. Oxman, Oritz, Gramazio, & Kohler, 2015). Para caracterizar los procesos y tipos de relaciones entre tecnologías de fabricación y diseño, se ha investigado la definición de los *modelos de materialización del diseño*. Estos son modelos de diseño en los que el potencial del diseño material y su fabricación es un factor importante en el concepto de diseño.

## 3. MFD: MATERIAL-FABRICACIÓN-DISEÑO

*Un proceso MFD se define como un proceso informado computacionalmente* que destaca las relaciones tectónicas entre forma, estructura y material dentro de la lógica de las tecnologías de fabricación y de robótica (N. Oxman, 2011; R. Oxman, 2012; Menges, 2012). La formulación de términos y las definiciones de conceptos y principios en MFD han sido extraídas de estudios teóricos y del análisis crítico de estudios de caso escogidos. Los ejemplos que se presentan más adelante demuestran diferentes modelos MFD (Figuras 1-4) que integran de diversas maneras los tres componentes de material, fabricación y diseño. Estos tres componentes de MFD se describen brevemente a continuación:



Figura 1: Estrategia de fabricación: "Seccionamiento estructural paramétrico" por cortadora láser. Metropol Parasol, Sevilla, España, diseñado por J. Mayer (2011). Arriba: Vista general. Abajo: Vista de la estructura de grilla paramétrica. Fuente: Jürgen Mayer. Fotografías: Nikkol Rot Holcim.

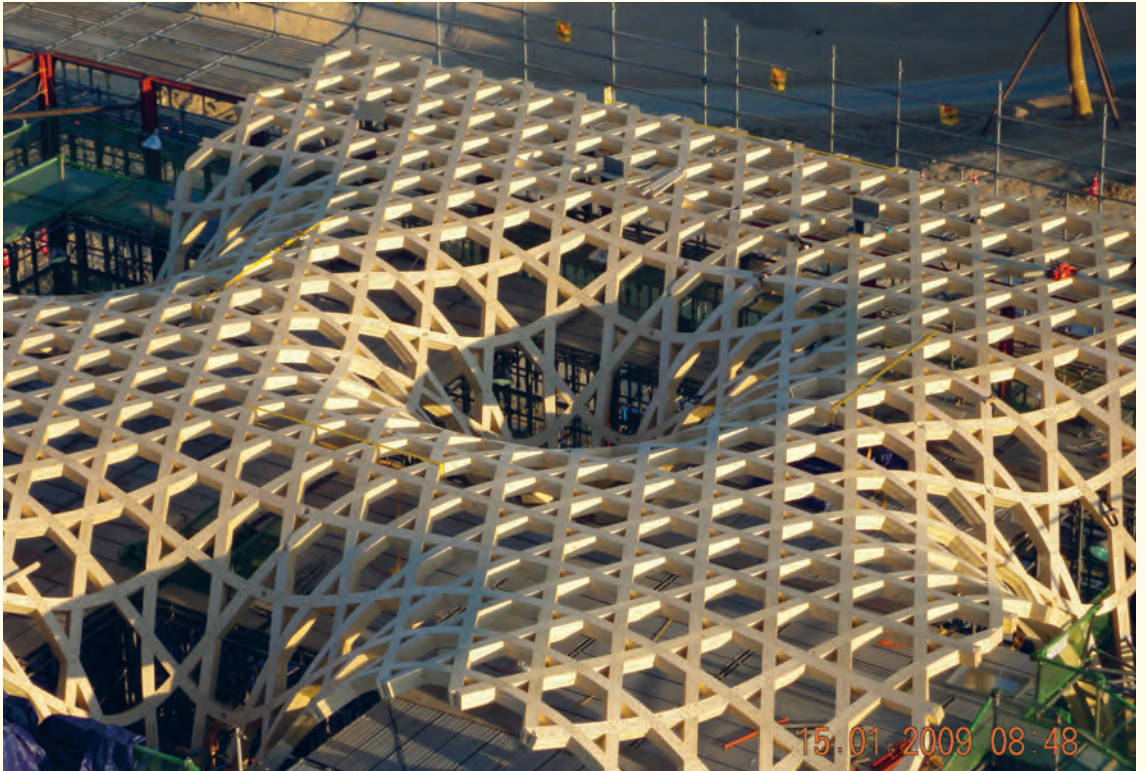


Figura 2: Estrategia de fabricación: "Diseño estructural compuesto" por CNC. Nine Bridges Golf Club House, Yeosu, Corea del Sur (2008), diseñado por Shigeru Ban y Designtoproduction. Arriba: Vista general de la estructura del techo. Abajo: Detalle del componente estructural fabricado con CNC. Fuente: Fabian Scheurer.

### 3.1 Material

La convergencia del diseño digital, los procesos de materialización y las tecnologías de fabricación están produciendo una expansión de la investigación y práctica del diseño material en la arquitectura, como también en campos más industriales y orientados a la fabricación, tales como el diseño industrial, el de moda y el de joyas.

El diseño material contemporáneo se originó en la extensión tecnológica de los modelos convencionales de diseño basados en materiales tradicionales bien conocidos (Addington & Schodek, 2005) como la madera, el acero, etc., y sus relaciones con la forma, la estructura y la construcción. El extenso uso de técnicas digitales en el diseño material se está convirtiendo en un modelo dominante de diseño en la práctica del diseño experimental (Barkow, 2010). El discurso actual sobre materiales incluye conceptos como materiales inteligentes, materiales receptivos, etc. En arquitectura, la experimentación material se refiere en gran parte al diseño del exterior de edificios y a los sistemas estructurales derivados de la fabricación (Shröpfer, 2011).

### 3.2 Fabricación material y sistemas materiales (en diferentes escalas)

El origen de las actuales tecnologías de fabricación puede rastrearse hasta la evolución de las tecnologías de computación asociadas con la automatización y la producción características de las etapas finales del diseño, así como en los primeros sistemas CAD/CAM (Schodek, Bechthold, Griggs, Kao, & Steinburg, 2004).

Debido al impacto que han tenido los procesos informados por computador en el diseño, es importante comprender el concepto de *sistema de materiales* y su relación con la fabricación más allá del uso tradicional del término "material". Este innovador concepto aprovecha la lógica y los principios de los sistemas de materiales físicos, naturales y digitales. Un sistema de materiales representa la lógica formal y la integración de las propiedades del material, su comportamiento estructural y sus relaciones con el ambiente, así como su impacto en los procesos de *form-finding* físicos y digitales. El diseño y la fabricación digital inspirados por la naturaleza originan un nuevo campo de investigación

llamado *ecología material*. Este nuevo campo de investigación, desarrollado por Neri Oxman, explora los procesos de generación de la forma de varios sistemas materiales como el tejido, el doblado y el laminado en micro y macro escalas.

### 3.3 Diseño basado en la fabricación (a escala arquitectónica)

Las formas y procesos de fabricación se han convertido en una fuente de generación de nuevos conceptos para el diseño arquitectónico (Gramazio & Kohler, 2008). No sólo diseñamos dentro del potencial de fabricación, también los edificios se diseñan frecuentemente *dentro de la lógica de diseño* de fabricación (Mayer, 2011; Scheurer, 2010).

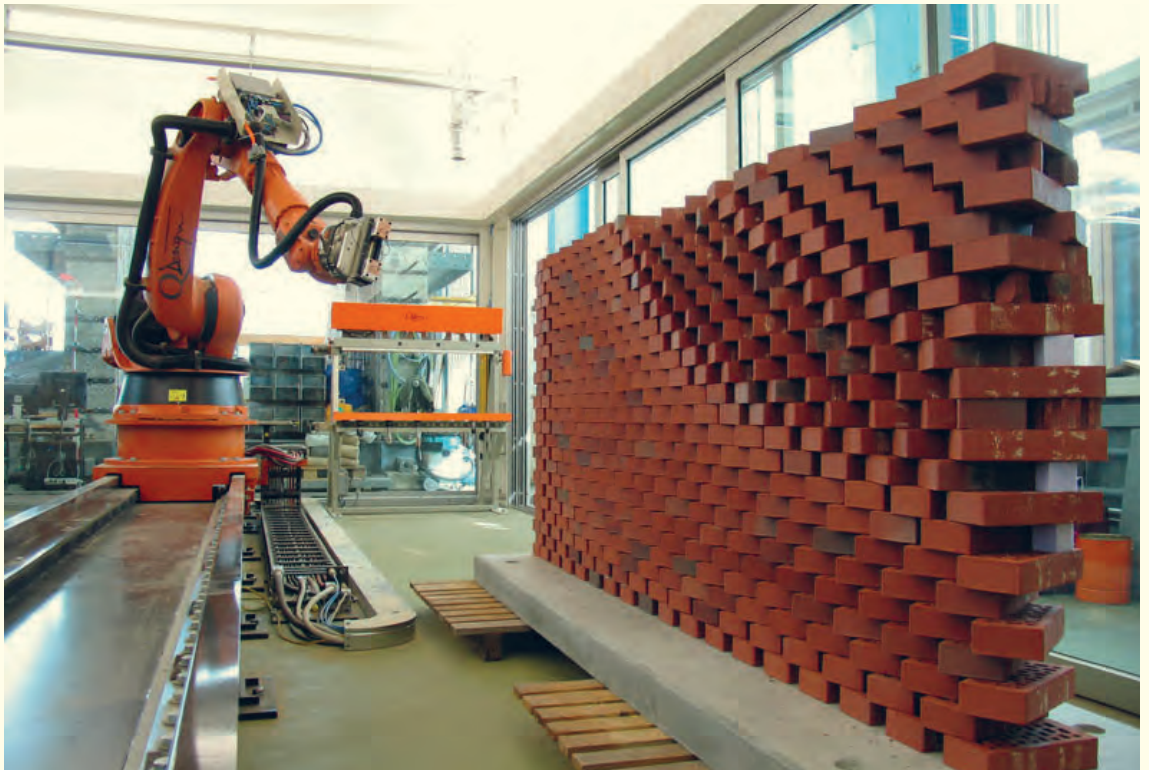
La fabricación de sistemas materiales refleja las relaciones de las propiedades de los materiales, su desempeño, su comportamiento y sus estrategias y técnicas de materialización. *El tipo de diseño basado en la fabricación de los sistemas materiales* es un concepto clave en el enfoque MFD. Para comprender los modelos MFD es necesario apreciar las relaciones deseadas entre el sistema material, las estrategias de desempeño y la técnica de fabricación de la tecnología escogida para cada modelo.

## 4. MODELOS MFD

### 4.1 Introducción y objetivos

El mundo del diseño MFD tiene aproximadamente veinte años. Dentro de ese breve período de la historia del diseño, el campo es rico en nuevas tecnologías y posee una abundante selección de importantes ejemplos de diseño experimental. A pesar de que se caracteriza por una fuerte presencia tecnológica, gran parte del trabajo goza de abundante pensamiento innovador y de calidad lírica en los diseños. Los modelos MFD representan una ola de cambio que está ejerciendo una influencia profunda en todos los campos de la disciplina del diseño.

El objetivo de este estudio preliminar es comenzar a revisar sistemáticamente la breve historia de este campo y definir los conceptos más importantes, problemas y recursos intelectuales. En esta sección presentamos una breve revisión



Arriba: Figura 3: Estrategia de fabricación: "Montajes estructurales de estructura espacial" por robot industrial. Pabellón de Madera ICD/ITKE (2010). Construcción de la estructura espacial toroidal. Fuente: A. Menges, Institute for Computational Design; J. Knippers, Institute of Building Structure and Structural Design; Universidad de Stuttgart.  
Abajo: Figura 4: Estrategia de fabricación: "Codificación de montajes materiales" por diseño robótico. Flight Assembled Architecture: La Aldea Vertical. Crédito: Gramazio Kohler Research, ETH Zürich.





Figura 5: Estrategia de fabricación: "Impresión con propiedades variables guiadas por mapeo de cargas de masas/ superficies complejas" por impresora 3D multi materiales.

Arriba: Prototipo de un diván (2008-2010). Crédito: Neri Oxman, en conjunto con Prof. W. Craig Carter (MIT), Museum of Science, Boston. Producción: Stratasys 3D, impreso con tecnología multi-material Stratasys de impresión 3D. Fotografía: Gentileza de Neri Oxman.

Abajo: Prototipo de una férula de muñeca (2008-2010). Crédito: Neri Oxman, en conjunto con Prof. W. Craig Carter (MIT), 3D Print, Museum of Science, Boston. Producción: Stratasys, impreso en 3D con tecnología multi-material 3D Stratasys. Fotografía: Mikey Siegel, gentileza de Neri Oxman.

de contenido selecto de la disciplina y presentamos brevemente ciertos conceptos y precedentes.

## 4.2 Clases de modelos MFD

Para poder comprender lo que podría ser considerado como "modelo" de orientación de diseño MFD, presentamos brevemente ciertos términos y conceptos de este enfoque.

### 4.2.1 Orden tectónico

*Orden tectónico* es la relación de influencia entre el diseño de la forma, la estructura y el material. Uno de los recientes desarrollos importantes en el orden tectónico ha sido la capacidad de avanzar en procesos de materialización hasta las primeras fases conceptuales del diseño. En el modelo tradicional de la materialización del diseño arquitectónico, los procesos de diseño frecuentemente siguen fases de conceptualización que pueden ser representadas de la siguiente manera:

De forma - a estructura - a material

Hoy, con el rápido desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación, la selección de los materiales y las técnicas de fabricación puede hacerse en una etapa temprana del diseño; el diseño de materialización y las tecnologías de fabricación pueden, en este caso, actuar como un aporte a la fase conceptual del diseño. Este orden tectónico puede ser representado de acuerdo al siguiente esquema:

De material - a estructura - a forma

En MFD hay generalmente una inversión del flujo de información en el orden tectónico del diseño, en el cual las técnicas de fabricación y sus efectos sobre el contenido formal y de comportamiento de los materiales se convierten en una parte dominante del contenido de conceptualización, creando así *una arquitectura de materialidad digital*.

### 4.2.2 Tecnologías y técnicas

Tecnologías innovadoras están permitiendo el diseño y la producción a nivel del producto y la construcción; esto incluye tecnologías de fabricación pioneras tales como cortadora láser, impresora 3D, *waterjet*, routers CNC y brazos

robóticos. Se sigue innovando rápidamente en estas tecnologías. Por ejemplo, experimentos de investigación recientes en el MIT han desarrollado nuevas técnicas de fabricación aditiva, demostrando cómo puede usarse la impresión 3D en el proceso de diseño, produciendo diseño de material homogéneo (cf. diseño de partes componentes) por medio de la manipulación de múltiples propiedades de los materiales, tal como ocurre en la naturaleza (N. Oxman, Ortiz, Gramazio, & Kohler, 2015).

## 5. ESTUDIO DE CASOS MFD

Generalmente se puede decir que la creciente prominencia y desempeño de las tecnologías de fabricación han convertido *el diseño de sistemas materiales* en un problema de diseño importante en la arquitectura, y uno que ha llegado a ser formativo en la generación de conceptos de diseño. En los estudios de casos que hemos escogido y presentado es posible observar que la creciente centralidad del diseño de sistemas materiales se ha convertido frecuentemente en la base para la definición del *partis* en gran parte de la arquitectura experimental, así como en una importante fuente de innovación en la arquitectura.

La siguiente muestra de principios y tipos de sistemas de materiales representa la lógica formal de varias clases de tipos formales que pueden caracterizarse por su material escogido y su comportamiento estructural. Comparamos a continuación procesos de la *forma a la fabricación* versus procesos de la *fabricación a la forma*.

El Metropol Parasol en Sevilla, España, diseñado por Jürgen Mayer (Figura 1) es una enorme estructura de rejilla, de forma libre, construida con madera. Aunque el origen del concepto arquitectónico no estaba basado en la tecnología de fabricación, la realización del diseño dependió totalmente del potencial de las tecnologías de fabricación para actuar como una solución de construcción.


De la misma manera, en el Golf Club de Shigeru Ban y Designtoproduction (Figura 2), también fabricado con madera, el origen del concepto arquitectónico no se encuentra necesariamente en el proceso de fabricación. Sin embargo, la elegancia, ligereza y complejidad de la forma

dependen totalmente del potencial de fabricación. Con respecto a la influencia de la fabricación en el diseño, podemos contrastar los diseños anteriores con el pabellón de Menges y Knippers en la Universidad de Stuttgart (Figura 3). En este caso, es la integración entre la lógica del diseño, el concepto estructural y la singular fabricación de elementos bidimensionales la que ha sido usada como concepto arquitectónico para crear una forma estructural que replica una tela tejida.

En el trabajo de Gramazio y Kohler (Figura 4), la codificación de la materialidad y el montaje digital usando brazos robóticos industriales y robots voladores (drones) ha sido el principal campo de investigación y la base de sus procesos de diseño.

Finalmente, hemos seleccionado el trabajo de Neri Oxman del MIT Media Lab (Figura 5) para presentarlo como un ejemplo de un nuevo mundo de las posibilidades del diseño y la riqueza de la arquitectura, que innova funcional y artísticamente dentro del potencial de una emergente *ecología material* fundada en base a *Mediated Matter*. Los ejemplos presentan un conjunto de diseños que resultan de una relación directa con la tecnología de fabricación, cuyo avance es uno de los objetivos importantes del proceso de desarrollo del diseño.

## 6. CONCLUSIONES: MATERIALIDAD DIGITAL: EL MUNDO DEL DISEÑO DE MFD

Los procesos MFD abren un campo de potencial amplio e innovador para la arquitectura y el diseño. Ahora estamos en el proceso de avanzar en nuestro trabajo con modelos MFD y creemos firmemente que, a medida que el campo se hace más prominente en la arquitectura y el diseño, el potencial para importantes contribuciones se ve muy prometedor. Parte de esta promesa para la arquitectura y el diseño proviene de la importante cantidad de contribuciones hechas en las dos últimas décadas al concepto de *materialidad digital* y a la definición y explicación del campo del *MFD* como un nuevo mundo de descubrimiento del diseño. 

### REFERENCIAS

- ADDINGTON, M., & SCHODEK, D. (2005). *Smart materials and technologies*. Amsterdam, Holanda: Elsevier.
- ANDERSON, C. (2012). *Makers: the New Industrial Revolution*. Nueva York, NY, EE.UU.: Crown Business.
- BARKOW, F. (2010). Fabricating design: A revolution of choice. En R. Oxman & R. Oxman (Eds.), *The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. Architectural Design Special Issue 80(4)* (págs. 94-101). Londres, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- BEORKREM, C. (2013). *Material Strategies in Digital Fabrication*. Londres, Inglaterra: Routledge.
- CARPO, M. (2013). *The digital turn in architecture 1992-2012*. Londres, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- DUNN, N. (2012). *Digital fabrication in architecture*. Londres, Inglaterra: Laurence King.
- GERSHENFELD, N. (2007). *Fab: the coming revolution on your desktop-from personal computers to personal fabrication*. Nueva York, NY, EE.UU.: Basic Books.
- GRAMAZIO, F., & KOHLER, M. (2008). *Digital materiality in architecture*. Baden, Suiza: Lars Müller.
- GRAMAZIO, F., KOHLER, M., & OESTERLE, S. (2010). Encoding material. En R. Oxman & R. Oxman (Eds.), *The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. Architectural Design Special Issue 80(4)* (págs. 108-115). Londres, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- GRAMAZIO, F., KOHLER, M., LANGENBERG, S., & ETH-ZÜRICH. (2014). *Fabricate: negotiating design & making*. Zürich, Suiza: Gta Verlag.
- IWAMOTO, L. (2009). *Digital fabrication: architectural and material techniques*. Nueva York, NY, USA: Princeton Architectural Press.
- KIERAN, S., & TIMBERLAKE, J. (2004). *Refabricating architecture: How manufacturing methodologies are poised to transform building construction*. Nueva York, NY, EE.UU.: McGraw-Hill.
- KOLAREVIC, B., & KLINGER, K. (2008). *Manufacturing Material Effects: Rethinking design and making in architecture*. Londres, Inglaterra: Routledge.
- KOLAREVIC, B., & MALKAWI, A. (2005). *Performative architecture: Beyond instrumentality*. Londres, Inglaterra: Routledge.
- MAYER, J. (2011). *Metropol-Parasol*. Ostfildern, Alemania: Hatje Cantz.
- MENGES, A. (2012). Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design. *Architectural Design*, 82(2), 14-21.
- MORI, T. (2002). *Immaterial/Ultramaterial*. Cambridge, MA, EE.UU.: Harvard Graduate School of Design.
- OXMAN, N. (2010). Structuring materiality: design fabrication of heterogeneous materials. En R. Oxman, & R. Oxman (Eds.), *The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. Architectural Design Special Issue 80(4)* (págs. 78-85). Londres, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- OXMAN, N. (2011). Variable property rapid prototyping. *Virtual and Physical Prototyping*, 6(1), 3-31.
- OXMAN, N., ORITZ, C., GRAMAZIO, F., & KOHLER, M. (2015). Material Ecology. *Computer-Aided Design*, 60, 1-2.

- OXMAN, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229-265.
- OXMAN, R. (2012). Informed tectonics in material-based design. *Design Studies*, 33(5), 427-455.
- OXMAN, R., & OXMAN, R. (2010). *The new structuralism: Design, engineering and architectural technologies. Architectural Design Special Issue 80(4)*. Londres, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- OXMAN, R., & OXMAN, R. (2014). *Theories of the digital in architecture*. Londres, Inglaterra: Routledge.
- SASS, L., & OXMAN, R. (2006). Materializing design: The implications of rapid prototyping in digital design. *Design Studies*, 27(3), 325-355.
- SCHEURER, F. (2010). Materialising complexity. En R. Oxman & R. Oxman (Eds.), *The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. Architectural Design Special Issue 80(4)* (págs. 86-93). Londres, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- SCHODEK, D., BECHTHOLD, M., GRIGGS, K., KAO, K. M., & STEINBURG, M. (2004). *Digital design and manufacturing: CAD-CAM applications in architecture and design*. Hoboken, NJ, EE.UU.: John Wiley and Sons.
- SHEIL, B., & GLYNN, R. (2011). *Fabricate: making digital architecture*. Toronto, Canadá: Riverside Architectural Press.
- SHRÖPFER, T. (2011). *Material design: Informing architecture by materiality*. Berna, Suiza: Birkhäuser.