

Materialidad Digital. Análisis de estrategias de Arquitectura Orientada al Desempeño transferibles al Diseño Resiliente

Digital Materiality. Analysis of Performance-Oriented Architecture strategies transferable to Resilient Design

Ma. Luciana Gronda

CONICET, UNL, Argentina
grondaluciana@hotmail.com

Mauro Chiarella

CONICET, UNL, Argentina
mchiarella@hotmail.com

Abstract

The general objective of the research is to contribute to the critical conceptualization of experimental architectural practices in the context of the production suggested by *Digital Materiality* from a global perspective. *Performance Oriented Architecture* is the capacity that material systems have for *Active, Responsive or Living Performance*. These three lines of action, analyzed with antecedents, suggest efficient forms of symbiosis with the environment, starting from the application of *Biomimetic* research methodologies. Strategic possibilities for implementation are identified where technology, interdisciplinary and with creativity, offers access to *Resilient Design* solutions to adapt to the consequences of a design subordinated to the needs of industrialization.

Keywords: Digital Materiality; Performance; Biomimetic Research; Resilient Design.

Introducción

Pensar en *Resilience Design* es dar un paso hacia la sustentabilidad como paradigma de diseño, pero este giro no da indicios de que se entienda lo imperativo de este cambio de dirección. Los valores del diseño tradicional caen en resultados aislados. Incluso los trabajos que toman en consideración la vida útil de los materiales, las propiedades reciclables, la energía utilizada, y otros factores ecológicos que permiten obtener certificaciones, a pesar de dar buenos resultados, están aún enmarcados en sistemas, patrones de conducta y modelos de desarrollo adaptados a las circunstancias del presente, pero no necesariamente del futuro. Llevará más de una generación ver esta transformación de manera tangible. (Fiorentino, 2012). El camino posible para soluciones inmediatas radica en adaptarse de manera *resiliente* e idear paralelamente soluciones de diseño que partan de una concepción compleja del problema de la sustentabilidad, teniendo en cuenta perspectivas a más largo plazo, con capacidad para revertir el paradigma moderno del material homogéneo, estable, inerte, estandarizado y sus modos de producción. El sector de la construcción genera un consumo desmedido de recursos energéticos, además de emitir gran cantidad de contaminantes a la atmósfera, al agua y al suelo en el proceso de extracción y fabricación; además de generar desechos inertes a lo largo del proceso constructivo, uso y/o derrumbe. Todo esto en un contexto de edificios con soluciones constructivas estáticas en fachadas, frente a factores ambientales cambiantes, lo cual genera un consumo energético excesivo, altas emisiones de CO₂, gases de efecto invernadero y provocando un acelerado cambio climático, entre otras cosas, alertan que quizás la arquitectura necesita ser *naturalizada*.

Este artículo presenta una serie de conceptos, enfoques alternativos y experimentaciones materiales, focalizadas en repensar las relaciones tradicionales entre el diseño arquitectónico, el entorno construido y el medio ambiente. Afrontar el compromiso en relación a esta problemática implica asumir que el desafío actual en arquitectura es orientar el diseño a la optimización de los recursos. Desde un *enfoque holístico* y una perspectiva teórico-metodológica, la *Arquitectura Orientada al Desempeño* en el contexto de la *Materialidad Digital*, requiere marcos metodológicos de otras disciplinas o esfuerzos interdisciplinarios (Hensel, 2012a, b, c; 2013).

Cada una de las tres grandes líneas de investigación, identificadas y discutidas, representa un aporte diferente en función de los plazos requeridos, la complejidad asumida y la especificidad de su alcance ulterior. Brindan el marco conceptual y metodológico desde donde operar con miras a la sustentabilidad como proceso complejo. En principio, la *Materia Activa* puede dar soluciones de rápida transferencia al *Resilience Design*. De manera subsiguiente, las otras dos capacidades materiales, identificadas como *Responsiva* o *Viva*, remiten a un enfoque emergente y progresivo y representan soluciones de diseño con resultados más lentos pero profundos.

Marcos conceptuales emergentes

El advenimiento de las nuevas tecnologías de fabricación y construcción siempre ha sido un catalizador para la innovación en diseño. Las decisiones relativas en torno a la adopción de determinada tecnología, en principio una implementación tecnológica-instrumental, ha ido adquiriendo, a nivel disciplinar, diferentes alcances en el transcurso de su *adopción* y *adaptación*. Los efectos de la digitalización en la

arquitectura configuran un intenso proceso de asimilación de sus lógicas propias (Carpo, 2012; Ortega, 2009, 2013). A partir de la implementación del diseño paramétrico y la fabricación (CAD / CAM) la arquitectura de la *era digital* amplía su alcance y experimenta un *Giro* decisivo hacia una nueva *condición material* que reconfigura los modos de hacer, pero también de concebir y usar *lo material* en arquitectura (A. Picon, 2006). Con el énfasis ahora puesto en el desempeño del material por sobre la apariencia y el proceso por sobre la representación.

En los procesos contenidos dentro de un *Enfoque Integral* (Lienhard et al., 2013), el material deviene *informado* y dinámico. El diseño paramétrico motiva el pensamiento asociativo con el fin de descubrir nuevos principios de organización y establecer nuevas relaciones con el entorno construido. Conjuntamente, la *predicción* puede basarse específicamente en la recuperación de la *información*. La amplificación digital de las estrategias empírico-numéricas del *form-finding*, para la concepción lógica de la forma compleja, con claros antecedentes en la historia disciplinar, permite a los arquitectos retomar ciertas lógicas de trabajo contenidas en su rol original. En este sentido, la *simulación* y *evaluación*, habilitadas por el cálculo numérico computacional de precisión inédita, habilitan nuevas aproximaciones integrales en relación al estudio del desempeño óptimo en sus dimensiones geométricas, estructurales y materiales. Finalmente, las tecnologías de producción digital, en un proceso de lógica continua, han evolucionado de tal manera que es posible incluso fabricar el material con características y propiedades amplificadas, diseñadas específicamente.

De elemento arquitectónico a *componentes generativos* que *emergen* de manera adaptativa dentro de un sistema iterativo (Araya, 2008). En consecuencia, los procesos de desarrollo forma-material se conciben como abiertos y dinámicos. Esto plantea un reto significativo en dos direcciones, en primer lugar, superar tanto el diseño digital *formalista* de carente enfoque material, como así también el concepto modernista de "*fidelidad de los materiales*", que persiste en la tradición del pensamiento en diseño y condiciona al material a su uso *pasivo*, con tipologías o disposiciones estructurales y espaciales predefinidas. El cambio en la concepción misma de la materia en arquitectura implica el paso de un estado estable e inmanente a una nueva conceptualización de la *materia activa, responsiva o viva*, autorizada por sus propias tendencias y capacidades, donde la forma remite ante todo a la *síntesis* de la eficiencia.

Materialidad Digital

Materialidad Digital es un oxímoron, una construcción conceptual supuestamente contradictoria y una figura retórica que reúne antinomia y complementariedad. Se presenta como una inversión al sentido común con significado incierto y provocador en una primera lectura, sugiriendo preguntas que incitan a una reflexión de mayor profundidad, en sus lecturas posteriores. Parte de una provocación reflexiva hacia cierta inercia de la tradicional cultura arquitectónica, estableciendo novedosos vínculos que amplían y enriquecen la relación entre la ideación, la tecnología, el entorno construido y el medio ambiente (en el sentido más amplio). Con las lógicas digitales el diseño logra emanciparse de la aplicación pasiva de sus paradigmas, fundamentalmente, la *condición material* se intensifica y el diseño es orientado a potenciar las

particularidades de los materiales experimentando en todas sus escalas y propiedades. Su potencial de transformación conceptual pretende construir cierta perspectiva histórica desde donde operar en el presente, para responder a las exigencias contemporáneas con conceptos, métodos y herramientas contemporáneas. Si bien la idea de *Materialidad Digital* no pretende iniciar un nuevo principio sobre el cual formalizar una nueva definición disciplinar, es necesario constituir un marco amplio de referencia con fuentes que den cuenta de los desplazamientos y las continuidades en los modos de comprender el cambio al que viene asistiendo la disciplina arquitectónica en las últimas décadas.

El concepto propuesto por Gramazio & Kohler (2008) refiere al complejo entretendido posible entre la programación computacional y la fabricación digital; los datos y la materia. El término es utilizado para describir una transformación emergente en las lógicas materiales en arquitectura, refiere fundamentalmente a los cambios en la condición material, sus modos de concebirla y de operar en ella.

La visión que Achim Menges sugiere en: *Material Síntesis* (2015) propone la *fusión* entre lo material y lo digital, como proceso de síntesis química. Los diseñadores están trabajando en relación directa con los materiales a nivel granular y en todas las escalas (nano, micro, molecular, macro molecular). Se comprometen con su gama completa de posibilidades y limitaciones. Estos desarrollos se encuentran en una etapa altamente experimental y los errores abundan, pero debe entenderse como mecanismo normal en los procesos de avance científico.

El interés de esta investigación radica en poder sumar recursos instrumentales que amplíen la capacidad de respuesta, en cuanto al ritmo de solución y re-descubrimiento de problemas, en relación a los nuevos modos de concebir y producir el mundo material desde el propio campo de la arquitectura. Teoría y práctica como actividades complementarias.

Performance o Arquitectura Orientada al Desempeño

Performance como concepto es acuñado en las décadas de 1940 y 1950 a partir de una serie de esfuerzos intelectuales que tuvieron amplias consecuencias, provocando un cambio de paradigma en las humanidades denominado como *Performative turn* (Hensel, 2012). La adopción en arquitectura, en sus inicios, refiere más a una legitimación filosófica-conceptual de la búsqueda formal que a un enfoque pragmático. El término *Performance*, junto a otros como: *Filogenesis, Morphogenesis y Emergence*, continuaba entonces alineado a cierto sesgo de especulación sobre el impacto de la tecnología y la informática en el proceso de diseño. Algunos de los primeros autores que comienzan a abordar el concepto de *Performance* desde la arquitectura como un nuevo paradigma de diseño son: Kolarevic, (2003); Kolarevic y Malkawi, (2005); Hensel y Menges, (2008). Branco Kolarevic señala que en arquitectura el *diseño basado en el desempeño* se desarrolla en formas indeterminadas, en contraste con la rigidez predeterminada. Advierte el hecho de que el concepto va mucho más allá de las dimensiones estéticas y funcionales.

Términos como "*performance-oriented design*" (diseño orientado al rendimiento), o "*performance-oriented architecture*" (arquitectura orientada al rendimiento) son propuestos como un *enfoque integrador* entre el diseño arquitectónico, el entorno construido y el medio ambiente (Hensel, 2013). Se destacan, además, las producciones de Sergio Araya (2011); Neri, Oxman (2010); Rivka, Oxman (2008; 2012), entre otros. Las actuales discusiones teóricas, en el campo del diseño computacional, reflejan que este *enfoque* persigue la optimización de medios y de recursos.

Neri Oxman sugiere que en el diseño de la forma optimizada (*performance*) operan tres grandes dimensiones: el material, la estructura y la geometría, las cuales informan el diseño. Sostiene que la separación institucionalizada entre forma, estructura y material, profundamente arraigada en la división metodológica entre modelado, análisis y fabricación, históricamente ha priorizado la forma por sobre el material y la estructura, dando lugar a toda una generación de tendencias formalistas en arquitectura. Consideraciones desde el dominio de la geometría, la materialidad, la fabricación, la lógica de montaje, el comportamiento y el medio ambiente (con algunas superposiciones) seuxtaponen para dirigir el proceso conocido como *form-finding*.

Cada autor construye su propia línea de investigación, pero todos comparten que una de las preocupaciones actuales de la arquitectura, como práctica material, es la forma en que los entornos construidos y naturales interactúan entre sí.

El enfoque del *Diseño Orientado al Desempeño* radica en la forma en que el rendimiento material se entiende e instrumentaliza para revertir el paradigma moderno de la revolución industrial, del material homogéneo, estático, inerte, estandarizado, y de composición uniforme, isotrópico, con propiedades idénticas o muy similares en todas sus direcciones, que ha condicionado al material en su uso pasivo, con tipologías y disposiciones espaciales y estructurales predefinidas, ancladas a los paradigmas de la mecánica clásica. Se basa en la simulación, el análisis y la evaluación a través del cálculo numérico computacional, ya sea para encontrar la forma óptima en función de los requerimientos (*Materia Activa*), o sus posibilidades de *comportamiento variable* en respuesta a estímulos extrínsecos (*Materia responsiva*), o directamente operar con organismos vivos (*Materia Viva*).

La naturaleza como fuente de inspiración. La investigación *Biomimética*: un diálogo entre las disciplinas

En este estado de asimilación de la *Materialidad Digital*, la materia como potencial *campo* de investigación experimental en diferentes escalas (nano, micro, molecular, macromolecular) amplía los horizontes de la propia esfera disciplinar, asumiendo el trabajo *trans* o *inter-disciplinar*. En la última década, las experimentaciones más radicales incorporan un complejo manejo de información asociada con algoritmos de precisión inédita para la optimización y métodos tomados de la programación informática avanzada para analizar e interpretar las complejas estrategias de la naturaleza y trasladarlas a la disciplina arquitectónica.

El hecho de que la naturaleza este especializada en producir las formas más eficientes, capaces de responder a necesidades concretas con un consumo mínimo de material y de energía es considerado como fundamento del diseño y se busca transferir al ámbito experimental de la arquitectura.

Conceptualizaciones que sustentan las experimentaciones actuales en arquitectura habían comenzado a aparecer en diversas metáforas particularmente tendientes a describir la dialéctica digital entre el script y las variaciones paramétricas. Actualmente retomadas de forma cada vez menos teórica-filosófica y más pragmática-tecnológica. Términos como: *Emergencia, Morfogénesis, Performance, Biomimesis, Bio-Inspiración, Arquitectura Genética, Material Ecology*.

A través de la *auto-organización* genéticamente controlada, los organismos vivos forman estructuras jerárquicamente organizadas y altamente diferenciadas. Paradójicamente, los términos *material* y *estructura*, categorías de diseño bien diferenciadas en arquitectura y construcción, se disipan en la naturaleza, y es casi imposible discernir entre ellos en el mundo de los organismos, desde la escala de la molécula a la de los seres vivos más grandes. En este sentido, las estructuras biológicas difieren fundamentalmente de la mayoría de las construcciones. Están hechos de una gran variedad de materiales y forman elementos individuales que se optimizan independientemente para funciones específicas. La biología proporciona orientación no sólo para el desarrollo de características y soluciones técnicas sino también para estrategias metodológicas. El diseño arquitectónico y la evolución biológica son procesos abiertos en los que surgen criterios de evaluación y objetivos de desarrollo y están sujetos a cambios constantes. Los organismos biológicos se adaptan a través de la evolución a través de la mutación, recombinación y selección mediante el desarrollo de soluciones multifuncionales y auto-adaptativas. (Knippers, Nickel, Speck, 2016). Si bien la Biomimética se utiliza a menudo como etiqueta en la arquitectura, todavía no representa una disciplina científica establecida y bien definida. Una razón puede ser la falta de metodologías resilientes evaluadas para la validación de la factibilidad sistémica. Una parte esencial de las posibilidades de innovación a partir de la biomimética se basa, por un lado, en la interacción entre la investigación básica en biología, por otro en las crecientes capacidades técnicas de la nanotecnología, la tecnología de micro sistemas, la optoelectrónica, las ciencias de los materiales y las tecnologías de procesamiento. Hay un largo camino desde la idea biológicamente inspirada a un producto comercializable. Un paso decisivo en este sentido es la creación de prototipos técnicos convincentes.

Casos de estudio

La selección de los casos para su análisis y discusión responden a soluciones *Bio-inspiradas* de *Arquitectura basada en Desempeño* inscritas todas en el contexto amplio de la *Materialidad Digital*. Organizadas en tres categorías analíticas: *Materia Activa, Responsiva* o *Viva*, cuya potencialidad radica en su capacidad para *optimizar* recursos materiales a partir de la *auto-organización* del material (*Materia Activa*); conseguir un significativo ahorro de energía, a partir de edificios que funcionen como organismos de adaptación dinámica en respuesta a los diferentes estímulos

externos, *auto-accionados* por el material (*Materia Responsiva*); y finalmente, edificios vivos que respiran, crecen, se auto-generan y auto-reparan, por tanto, arquitectura 100% reciclable y con un máximo ahorro energético en los procesos constructivos (*Materia Viva*).

Se presentan experimentaciones materiales consideradas capaces de vehiculizar, lo más claramente posible, cada una de las categorías analíticas propuestas. Cada línea de investigación, algunas más institucionalizadas que otras, presentan más de una propuesta y muchos otros referentes han quedado por fuera del análisis. En general, las propuestas más mediatizadas solo se mencionan haciendo exclusivamente hincapié en su potencialidad de transferencia al *Resilient Design*. En otros casos, y a riesgo de sesgar la mirada, se ha optado por presentar líneas que constituyen un trabajo de investigación sólido, en relación a investigaciones más comerciales u otras sumamente creativas pero individuales, con mayor libertad en relación a las políticas institucionales, pero de menor rigor cuantitativo.

Materia Activa

En arquitectura; geometría, estructura y material, siempre han estado intrínsecamente vinculadas. Sin embargo, su relación operacional en relación a los procesos de definición de la forma optimizada se ha reforzado drásticamente. La fabricación digital de componentes arquitectónicos complejos suscita la necesidad de avanzadas estrategias geométricas y conocimiento específico de las propiedades del material utilizado, a cambio, los potenciales del diseño paramétrico (de lógica matemático-algorítmica) y su capacidad de *informar* al material, parten de la necesidad de eficiencia en la producción de formas complejas.

Frei Otto funda en Berlín el IL (Instituto de Estructuras Ligeras; Institut für leichte Flächentragwerke), impartiendo una vocación multidisciplinar. El trabajo pionero que emprende es continuado desde la Universidad de Stuttgart, a través del programa: ITECH (Integrative Technologies and Architectural Design Research) llevado conjuntamente por Menges en el ICD (Instituto de Diseño Computacional) y Jan Knippers del ITKE (Instituto de Estructuras Construcción y Diseño Estructural). Ambos institutos trabajan de manera conjunta persiguiendo un enfoque multidisciplinario de investigación basada en una intensa colaboración con ingenieros estructurales, arquitectos, informáticos, científicos y biólogos materiales, para analizar e interpretar arquitectónicamente diferentes estructuras naturales. El resultado de estas investigaciones se traslada a la construcción de un pabellón anual montado por los propios alumnos.

En esta línea, tres Tesis Doctorales: Simón Poppinga, (2013), Julian Lienhard (2014) y Simón Schleicher (2016) se encuentran en la intersección del diseño arquitectónico, la ingeniería y la biología. Schleicher propone un enfoque transdisciplinario y holístico que investiga los principios subyacentes del movimiento de plantas y los recrea por medio de técnicas de simulación computacional. Varios mecanismos bio-inspirados son desarrollados y transferidos a sistemas de sombreado de fachadas adaptativas. El biólogo Poppinga, analiza las relaciones funcionales entre la forma y la estructura de las plantas. Mientras que el ingeniero estructural Lienhard

examina *Estructuras de flexión activa* a partir de las estrategias de *form-finding digital* para el uso de la deformación elástica como potencialidad en los sistemas estructurales estáticos o cinéticos, ofreciendo una alternativa al paradigma predominante de la mecánica de cuerpo rígido y exploran cómo los principios de la flexión en los movimientos de las plantas pueden ser entendidos, abstraídos y transferidos a nuevos procesos de diseño y fabricación arquitectónica. Los casos siguientes abordan cómo la deformación elástica de las plantas puede ser transferida a la arquitectura.

Achim Menges (2008), aplica la teoría de los sistemas de *auto-organización* al diseño estructural, el *form-finding* y la investigación sobre los materiales. *Performance* es utilizado por Menges como una *confluencia* entre "forma" y "rendimiento", es la cualidad que poseen los sistemas materiales para actuar de manera *activa* por deformación, para auto-organizarse y resistir nuevas fuerzas externas (cargas, por ejemplo). Lo que Lienhard (2014) denomina, en su tesis doctoral, como estructuras de plegado o flexión activa, *Bending active Structures*, para el uso de la deformación elástica como potencialidad en los sistemas estructurales estáticos o cinéticos, logradas a partir del *enfoque integral*. Estos planteamientos son inicialmente experimentados y analizados a partir de una serie de cuatro exploraciones de estructuras de *membrana* desarrolladas como instalaciones de exposición en diferentes lugares. Las estructuras de *membrana*, en relación a lo que ellos llamaban entonces *diseño morfogenético*, son de particular interés ya que cualquier morfología resultante está intrínsecamente relacionada con la geometría de su forma, las características del material y el proceso de formación mediante la pretensión.

El legado de Otto constituye el precedente de diseño paramétrico en su versión analógica de la actual técnica del *form finding digital*. Los estudios sobre el material y las técnicas experimentales y analíticas se realizan de antemano e *informan* al proceso de diseño. Las anteriores investigaciones que se realizaban a través de modelos físicos se trasladan a simulaciones computacionales de diseño paramétrico y desarrollo de algoritmos generativos (basados en la evolución genética); su respuesta a las variables parametrizadas es evaluada en tiempo real y permite operaciones comparativas en términos cualitativos para la búsqueda de optimización formal. La complejidad de los sistemas estructurales y los procedimientos *form-finding* requieren un análisis numérico preciso. El método se basa en la Simulación de elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés). Las rutinas de cálculo de elementos finitos (no lineales) han avanzado tanto últimamente que cada vez es más común integrarlos en el proceso de diseño. Finalmente, estos diseños digitales se materializan con técnicas de fabricación digital.

Un ejemplo que asume este enfoque de diseño integral en estructuras laminares de *flexión activa* es el *Pabellón de Investigación ICD / ITKE 2010*. El proyecto comenzó con pruebas de laboratorio intensivas para comprender el comportamiento del material y los límites estructurales del contrachapado. Los resultados de los experimentos físicos se integraron como restricciones de diseño paramétrico y se utilizaron para calibrar simulaciones de elementos finitos. La

sincronización de los estudios físicos y digitales garantizó que las técnicas de *form-finding*, proporcionaran una descripción precisa del comportamiento del material y, al mismo tiempo, retroalimenten la geometría digital con los datos del análisis de la estructura. Este proyecto fue un medio para recrear el proceso de curvado material, simulando la deformación de cada tira en un sistema interconectado y elásticamente pretensado (Lienhard et al., 2012).

Bend pavilion, también enmarcado en el ITKE, es un proyecto de: Riccardo La Magna, con asesoramiento y apoyo logístico de Simon Schleicher y Mei-yen Shipek, es un arco de varias capas que se extiende más de 5,20 m y tiene una altura de 3,50 m, prueba la viabilidad técnica de usar placas de flexión activa para estructuras con grandes carga, aumentando significativamente la rigidez de la forma mediante la interconexión de capas distantes entre sí. Digitalizando la geometría y subdividiéndola en un patrón de malla base, se realizó un análisis de elementos finitos en cada punto específico de la estructura, y así se determinó la distancia de desplazamiento de la segunda capa estructurante. Como la distancia entre las dos capas varía para reflejar el momento de flexión calculado a partir del análisis preliminar, el desplazamiento de las superficies cambia a lo largo del tramo del arco, reflejando el estado de tensión en las capas individuales, y la distancia entre ellas crece en las áreas críticas para aumentar la rigidez global del sistema.

Los pabellones *Fibrous structures* (Reichert et al., 2014), a diferencia de los casos anteriores cuyo montaje era del tipo artesanal, exploran el impacto de las nuevas tecnologías computacionales y robóticas. El caso de *Elytra Filament* es el resultado de cuatro años de investigación conjunta de arquitectura, ingeniería y biomimética. La estructura está inspirada en los principios ligeros de las estructuras fibrosas de las conchas de los escarabajos voladores conocidos como elytra. Los componentes son fabricados con robot *Kuka* programado en un proceso de construcción de cuatro meses en el Laboratorio de Construcción Computacional del ICD. Esta técnica involucra una novedosa forma de enrollar materiales compuestos. Un aspecto clave del proyecto fue transferir la morfología fibrosa del modelo biológico a materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio y carbono (que continúa la lógica desarrollada ya desde el ICD/ITKE Research Pavilion 2012), cuya anisotropía se integró desde el principio en los procesos de diseño y simulación computarizados. Las posibilidades tectónicas se orientan específicamente al desarrollo de una estructura de alto rendimiento, aprovechando al máximo las propiedades mecánicas. Mientras que la fibra de vidrio transparente, más barata y más débil se colocó para crear un espacio cerrado, las fibras de carbono, oscuras, se colocan específicamente para fortalecer el sistema global, actuando como componentes estructurales tejidos que optimizan el desempeño en las condiciones cambiantes de tensión evaluada, determinada a través de la simulación estructural y las pruebas físicas llevadas a cabo por adelantado por el ITKE. La estructura lograda es excepcionalmente ligera y resistente. (La Magna et al. 2014, Reichert et al. 2014).

Otro grupo de investigación de especial interés, enfocado en las tecnologías de fabricación digital e inspirado en los procesos de crecimiento de la naturaleza o de inspiración *bio-*

digital, es el Mediated Matter Group en el MIT Medi Lab (Instituto Tecnológico de Massachussets), dirigido por la arquitecta Neri Oxman, dentro de un ámbito científico-experimental que plantea trasladar las composiciones heterogéneas de los materiales naturales en escalas microscópicas a materiales altamente eficientes. Como proceso de *morfogénesis*, los fines de optimización conducen la forma. La potencialidad del diseño es conseguir mejor desempeño con recursos mínimos, a partir del estudio de las variaciones locales de las características del material, habilitado por el trabajo con tecnología VPR (*variable property rapid prototyping* o *Prototipado rápido de propiedades variables*). Esta línea experimenta programar la materia física a partir del acercamiento del diseño a la fabricación digital, fundamentalmente la fabricación aditiva por capas (Oxman, 2012).

Materia Responsiva

La potencialidad radica en su capacidad para *optimizar* recursos materiales y reducir la complejidad y el gasto en calefacción, refrigeración, ventilación o iluminación; y por lo tanto conseguir un ahorro de energía. Esta categoría concibe la *adaptabilidad* a partir de las propiedades intrínsecas del material, susceptibles y responsivas a partir de los estímulos externos. Estas posibilidades pueden aproximarnos a nuevos conceptos e instrumentos emergentes dentro de la disciplina, a una forma de abordaje que amplía y potencia los recursos, para pensar la *Materialidad Digital* en arquitectura. Permite concebir edificios, pieles o soluciones arquitectónicas *auto-accionados* por el material que harían uso eficiente de la energía ambiental o energía cero. A diferencia de las tecnologías vigentes de domótica incorporadas a la arquitectura que utilizan sistemas electromecánicos de control y requieren energía de la red para su funcionamiento. Investigaciones recientes están desarrollando tecnologías materiales y de fabricación que permiten diseñar y crear materiales y estructuras materiales inteligentes (*smart materials*) con el fin de desarrollar aplicaciones arquitectónicas con capacidad de respuesta a condiciones variables.

Michael Hensel y Defne Sunguroglu (Menges, 2015) investigan cómo el comportamiento variable de un material y su respuesta a estímulos extrínsecos pueden contribuir sustancialmente al *Diseño Orientado al Desempeño*. Presentan una definición más amplia e inclusiva de los llamados *materiales inteligentes*, con menos énfasis en lo nuevo, donde la clave es el reconocimiento pleno del potencial de comportamiento variable, incluso en los materiales de larga tradición constructiva. La madera, tiene la capacidad de absorber o ceder humedad en función del nivel de humedad ambiental, y es además, un material anisótropo, sus propiedades varían en función de la dirección de sus fibras. Las piñas, por ejemplo, debido a que están compuestas de material higroscópico poseen la capacidad de abrirse o cerrarse en respuesta a cambios en la humedad ambiental. Lo más interesante es su capacidad de respuesta o responsividad sin la necesidad de usar sensores ni software de monitoreo.

Steffen Reichert y Achim Menges han completado una serie de proyectos innovadores incluyendo la instalación *HigrosCope* para la colección permanente del Centro

Pompidou (2012), el pabellón para la colección permanente del Centro de FRAC en Orléans, Francia (2013).

Otro ejemplo significativo de activación adaptativa basada a partir del material, es la investigación experimental con paneles o placas bimetálicas llevada a cabo por Doris Sung de DOJSU Studio Architecture en Los Ángeles, 2012. Al trabajar con dos (o más) materiales que reaccionan a los cambios ambientales en diferentes dimensiones, las hojas laminadas de metal se expanden y contraen a un ritmo diferente cuando se las expone al calor, en este caso la luz solar directa. Al fijar un extremo de las hojas laminadas, las diferentes tasas de expansión térmica o el resultado de la contracción de deflexión, pueden ser explotados de diferentes maneras, dependiendo del rendimiento previsto de dichos conjuntos de material. Este tipo de activación material como respuesta a un estímulo es en realidad bastante antigua: la flexión inducida térmicamente en tiras bimetálicas se ha utilizado en los termostatos para producir un contacto electrónico "automático". Sin embargo, lo que hace que la obra de Sung sea novedosa es la escala de aplicación, que se ha desplazado de diez milímetros a centímetros. El pabellón se compone de miles de componentes bimetálicos cortados con láser, montados en más de 400 paneles que crean una estructura autoportante. El conjunto bimetálico utilizado por Sung en *Bloom* se basa en el vínculo molecular entre dos aleaciones a base de diferentes manganeso (no hay adhesivo). La componente bimetálica de los paneles es térmicamente muy sensible, con una respuesta casi en tiempo real cuando se expone al calor solar. Los componentes podrían abrir respiraderos para el escape de aire caliente o podría mover otros elementos en la posición adecuada para dar sombra a los espacios de la luz solar directa.

Otros investigadores están trabajando con materiales con memoria de forma, en los que la deformación se puede inducir (y recuperar) a través de los cambios de temperatura. David Benjamin experimentó desde el principio con las aleaciones con memoria de forma, y Nick Puckett ha utilizado diversos polímeros con memoria de forma para crear prototipos materiales de accionamiento de fachadas en edificios. En el prototipo *Living Glass*, Benjamín y Soo-in Yang de *The Living*, crearon en un molde, una membrana de silicona en la que las rendijas estaban llenas de *Flexinol*, un alambre de aleación con memoria de forma fabricada que se contrae cuando se aplica una corriente eléctrica a ella, y luego vuelve a su forma original cuando la corriente se corta (recuerda su forma). *Living Glass* registra la concentración de dióxido de carbono en el aire, y cuando se sobrepasa el nivel aceptable, el alambre *Flexinol* se activa para abrir las 'branquias' de silicona, lo que permite un suministro de aire fresco. Puckett experimentó con tiras cortadas en una hoja de polímero con memoria de forma que se doblan cuando se expone a la luz solar, creando así aberturas en la superficie; las tiras vuelven a su posición original cuando disminuye la incidencia solar, generando el cierre de las aberturas de la superficie.

Otro desarrollo es *Breathing Skins* inspirada en pieles orgánicas que ajustan su capacidad de controlar el flujo de sustancias entre el interior y el exterior a partir de una serie de músculos neumáticos que regulan la cantidad de luz incidente, la transparencia y el aire que pasa la piel respiratoria. El prototipo de exposición muestra como la tecnología *Breathing*

Skins funciona bajo condiciones reales, En cada metro cuadrado se controlan 140 *músculos* neumáticos y alrededor de 2800 de estos se integran en una fachada de 25 m² que permite regular el flujo de aire y temperatura en su transformación que relaciona los agentes internos y externos involucrados.

Estudiantes del IAAC crearon un sistema de refrigeración pasiva para edificios, *Hydroceramic*. El proyecto contempla los procesos termodinámicos en pieles arquitectónicas, y cómo estos pueden ser abordados de forma pasiva a partir de *hidrogel*, un material capaz de absorber y retener 500 veces su peso en agua. Químicamente, pueden ser polímeros insolubles de acrilato de hidroxietilo, acrilamida, óxido de polietileno, y otros. Funciona como un dispositivo de enfriamiento por evaporación que reduce la temperatura del aire del ambiente interior hasta cinco o seis grados. Su rendimiento es directamente proporcional al calor del viento, cuanto más caliente es el exterior, el interior responde disminuyendo su temperatura natural. El estudio incluye la creación de prototipos de construcción a medida, para probar el efecto del hidrogel y para establecer cuál es el mejor material para alojar la sustancia. Arcilla, aluminio y acrílico fueron probados, lo que ayudó a determinar que la naturaleza porosa de arcilla hace que sea el más eficaz. Los estudiantes creen que el proyecto puede ayudar a ahorrar hasta un 28% del consumo total de electricidad consumida por acondicionamientos tradicionales como el aire acondicionado y puede ser utilizado como una tecnología de construcción alternativa de bajo coste, ya que tanto la arcilla como el hidrogel son materiales baratos.

Materia Viva

Estas investigaciones proponen una arquitectura 'hecha con materiales que emergen, que crecen solos a merced de sistemas de autoorganización natural o digital'. Arquitectura genética digital, combina el trabajo con *ADN artificial* (software), elementos informáticos, herramientas cibernéticas para la producción automatizada de la arquitectura digitalmente diseñada; y por otro lado, el trabajo con *software natural* (ADN), elementos vivos, aplicando procesos genéticos reales a la arquitectura". Tanto el ADN como el software acaban siendo lo mismo, cadenas de información, naturales o artificiales, que determinan (el orden) las órdenes para un proceso de emergencia de la forma, de autoorganización y crecimiento autónomo". (Estévez, 2003). El programa de "*Arquitecturas Genéticas*" trabaja en la aplicación de la genética a la arquitectura para obtener elementos, materiales o espacios vivos. Por ejemplo, la creación genética de *plantas bioluminiscentes* para uso urbano y doméstico.

Se investiga sobre el control genético del crecimiento para conseguir que células vivas se conviertan en material constructivo "comandado" desde su diseño genético específico. El *Genetic Barcelona Project* (Estévez, 2005, 2007). O el *Pabellón genético de Barcelona*, para la Reforma genética blanda y comestible del Pabellón alemán de Barcelona de Mies van der Rohe: *Ceci n'est pas un pavillon*, presentado también en la exposición "*Bios 4: arte biotecnológico y ambiental*", CAAC Centro Andaluz de Arte Contemporáneo, Sevilla. Es un trabajo de investigación sobre el control genético del crecimiento celular de tejidos vivos como material constructivo. "Del casco blanco a la bata

blanca”; “Del microscopio electrónico a la estrategia digital en arquitectura”, son algunos de los títulos con los que Estévez manifiesta el cambio al que debe asistir la arquitectura.

Los ingenieros de *Arup* han desarrollado, con *Strategic Science Consult* (SSC) y *Colt International*, un prototipo de fachada foto-bio-reactiva llamado *SolarLeaf* que realmente posee *Materia Viva*, con algas que para reproducirse sólo necesitan agua, sol y dióxido de carbono. Los fotobiorreactores planos son muy eficientes y necesitan un mantenimiento mínimo. El proyecto terminó de ejecutarse en 2013 para ser presentado en el marco de la Exposición Internacional de Edificaciones, IBA. Los cuatro pisos de *BIQ House* en Hamburgo, Alemania, incluyen 129 paneles biorreactores planos orientados al sol de 2,5mts de altura por 0,7mts de ancho que sirven a la vez de persianas. Se tomaron algas de un afluyente del río Elba, cercano al edificio, para generar microalgas cultivadas en laboratorio (del tamaño de una bacteria). Una capa de microalgas se introduce entre dos láminas de vidrio que actúa como biorreactor y genera mediante un proceso bioquímico, biomasa y calor como recursos energéticos renovables. El efecto invernadero logra que las algas sumergidas en agua, crezcan y se reproduzcan rápidamente, generando así calor y biomasa. Aparte de ser un sistema de sombreado dinámico, propicia el aislamiento térmico y acústico. La biomasa, las algas cosechadas, se recogen como una pasta espesa para luego ser fermentada en una planta externa y generar biogás utilizado en la generación de electricidad. El calor que se genera en los paneles se envía a un centro de gestión de energía totalmente automatizado, es almacenado y se redistribuye para calentar el edificio y el agua. En verano, la mayor exposición solar hace que las microalgas se reproduzcan más, oscureciendo los paneles y proveyendo de mayor sombra a los hogares.

Sergio Araya, Ekaterina Zolotovskiy y Manuel Gidekel (2012), exploran nuevos modos de diseño y fabricación mediante la combinación de las tecnologías digitales con sistemas biológicos vivos. Diseñan una técnica de biofabricación bacteriana de nanocelulosa para estructuras tridimensionales anisotrópicas a gran escala, “o la posibilidad de cultivar su propia silla, una casa, tal vez una ciudad”. A partir del uso de bacterias en ambientes controlados, con el fin de inducir funciones biológicas específicas y procesos de producción material de componentes físicos para la arquitectura. El grupo de investigación retoma los trabajos de Asako Hirai, Masaki Tsuji, Fumitaka Horii centrados en el estudio de la *Acetobacter xylinus*, una bacteria que metaboliza la glucosa sintetizando celulosa químicamente pura, por lo que además los productos de celulosa siempre podrían degradarse de nuevo a fuentes de glucosa. El experimento demostró que las bacterias pueden sobrevivir en estado semi-inerte o letárgico en condiciones adversas, y que el crecimiento y la producción de material pueden reactivarse después de restaurar las condiciones. La *materia viva* podría además de bio-fabricarse y bio-degradarse podría bio-repararse de manera resiliente a condiciones extremas. Añadiendo medio fresco, se puede lograr una producción de material constante. El efecto de estratificación observado y producido podría ser análogo a un proceso similar de capa por capa de las actuales tecnologías de impresión en 3D, donde en este caso, la máquina de fabricación sería biológica en lugar de electromecánica y los materiales de entrada serían alimentados por el sistema en lugar de ser simplemente un insumo crudo procesado. A largo

plazo se podría modificar genéticamente las bacterias con el fin de insertar nuevas instrucciones genéticas que permitan activar o detener la producción de celulosa, en un proceso de material aditivo y un proceso material de sustracción, ambos programados o controlados a través de promotores químicos o físicos.

Neri Oxman, sus experimentaciones radicales en esta línea son bien conocidas, podemos mencionar, entre otros, la Serie *Wanderers* y el *Silk Pavilion*.

Conclusiones

La sustentabilidad es un problema de diseño que debe reconocer mejor la fuente de la crisis para idear acciones que re-direccionen la manera concebir y operar en el mundo material. El diseño será sustentable sólo si diseñamos primero “para la resiliencia” y luego “para la sustentabilidad”. Es una condición necesaria restaurar, reencaminar, reprogramar y hacer nuestros sistemas resistentes, no al cambio sino a las posibles anomalías y desbalances provocadas por el antropocentrismo. Para que el diseño pueda ser conductor de una transformación hacia un futuro sustentable debe tener la capacidad de afrontar la adversidad, prever y adaptarse a posibles problemas, como los límites extremos de uso de los recursos, vida útil, ahorro de energía y otras consideraciones. La planificación sustentable debe aplicarse en el largo plazo, siempre y cuando se generen primero las medidas necesarias en el presente para retomar la evolución natural –y aquí radica el carácter de urgente en las acciones a tomar– mientras se actúa *resilientemente* a los efectos de los errores cometidos en siglos anteriores. Es necesario, además de reflexionar con profundidad sobre el rol del diseño como disciplina, observar otros campos y ciencias que nos permitan nutrirnos y adquirir una visión holística de los problemas a resolver. Repensar y rediseñar imitando la *resiliencia* presente en los “diseños naturales, e incluir los aspectos medioambientales, sociales y económicos por igual. Una tarea compleja, pero las disciplinas de diseño se encuentran en un momento de desarrollo tecnológico especial para el cambio y la innovación. Si bien llevará más de una generación ver esta transformación de manera tangible, evaluar estrategias prácticas de diseño, acorde a los fundamentos de la *Bio-mimesis* y la *Arquitectura Orientada al Desempeño*, proporciona una plataforma desde donde repensar las relaciones entre el diseño arquitectónico, el entorno construido y el medio ambiente. Las posibilidades de cálculo numérico computacional de precisión inédita y las posibilidades de interacción, habilitadas por el modelado paramétrico, con plataformas virtuales (multidisciplinares) que informan y evalúan al modelo con datos de análisis específicos, en función de las variables a considerar, orientan el diseño a la optimización de los recursos. Modelado, simulación, evaluación y fabricación digital, contenidos como etapas de un *enfoque Integral*, genera modelos *informados*, orientados a la *optimización*, con capacidad de materializarse.

La *Materia Activa* permite pensar en edificios *auto-organizados* por el material brindando soluciones de bajo coste y montaje rápido y sencillo para situaciones adversas y de catástrofe. La *Materia Responsiva* propone edificios auto-accionados por el material a partir de activadores medioambientales y ofrece una solución muy prometedora en ahorro energético con miras a la sustentabilidad. En respuesta a los constantes cambios en el medio ambiente y para hacerle

frente a las cuestiones ambientales básicas, como la luz (radiación solar), la temperatura, la humedad relativa, el agua de lluvia, el viento, los ruidos y el dióxido de carbono (calidad del aire), que afectan significativamente las demandas de rendimiento y confort, y que pueden pensarse creativamente como activadores en diseño. Y finalmente, la *Materia Viva* especula con edificios auto-generados, auto-reparables y biodegradables, por tanto, arquitectura con un máximo ahorro energético en los procesos constructivos, de crecimiento natural y 100% reciclable, una perspectiva sustentable por antonomasia.

Referencias

- Araya, S. A. (2008). Diseño Generativo. En: Labarca, Claudio. *MARQ 04. Fabricación y Tecnología Digital*. Programa de Magister en Arquitectura. Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos. Pontificia Universidad Católica de Chile. (pp.17-22).
- Araya, S., Zolotovskiy, E., Gidekel, M. (2012, Septiembre). "Living Architecture: Micro Performances of Bio Fabrication". En ACHTEN, Henri; PAVLICEK, Jiri; HULIN, Jaroslav; MATEJDAN, Dana (eds.), *Digital Physicality - Proceedings of the 30th eCAADe Conference - Volume 2 / ISBN 978-9-4912070-3-7*.
- Carpó, Mario. (2012). *The Digital Turn in Architecture 1992-2012*. John Wiley&Sons Ltd.
- Estévez, A. T. (2003). Arquitecturas genéticas. En: Estévez A. et al., *Genetic Architectures / Arquitecturas genéticas*, Santa Fe (USA) / Barcelona: SITES Books / ESARQ-UIC, pp. 4-17.
- Estévez, A. T. (2005). Biomorph Architecture. In *Genetic architectures II: Digital tools and organic forms*, A. T. Estévez, K. Chu, E. Douglas, F. Roche, M. Weinstock et al., 18-81. Santa Fe (USA) / Barcelona: SITES Books / ESARQ-UIC.
- Florentino, Carlos. (2012). El diseño resiliente como conductor hacia el diseño sustentable. *BOLD Journal of Visual Communication Design*, Universidad Nacional de La Plata, Argentina. 1(1), 51-55 (2013), ISSN 2344-9853.
- Hensel, Michael Ulrich; Menges, Achim; Weinstock, Michael. (Eds.). (2004) *Emergence: Morphogenetic Design Strategies*. Ed. Helen Castle. AD. Vol 74. Wiley. UK. 128 págs.
- Hensel, Michael Ulrich; Menges, Achim; Weinstock, Michael; (Eds.). (2006). *Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*. AD. Architectural Design. Wiley. UK.
- Hensel, Michael Ulrich; Menges, Achim, (Eds.), (2008). *Versatility and Vicissitude. Performance in Morpho-Ecological Design*. AD. Wiley.
- Hensel M., Sunguroğlu Hensel D. (2012). *Performance-Oriented Architecture – Towards an Inclusive Approach to Architectural Design and the Built Environment*. AD Wiley: London.
- Hensel, M. (2012a). Sustainability from a Performance Oriented Architecture Perspective – Alternative Approaches to Questions regarding the Sustainability of the Built Environment. *Sustainable*
- Hensel, M. (2012b). "Performance-oriented Design as a Framework for Renovating Architectural Practice and Innovating Research by Design," in *Design Innovation for the Built Environment – Research by Design and the Renovation of Practice*, ed. Michael Hensel (London: Routledge), 121-143.
- Hensel, M. (2012c). "Performance-oriented Design from a Material Perspective: Domains of Agency and the Spatial and Material Organization Complex," in *Performatism – Form and Performance in Digital Architecture*, eds. Grobman, Y.J. and Neuman (London: Routledge), 43-48.
- Hensel, M. (2013). *Performance-oriented Architecture – Rethinking Architectural Design and the Built Environment* (London: AD Wiley).
- Knippers, J, Nickel, K. G., Speck, T. (Editors). (2016). *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction: Biological Design and Integrative Structures*. Springer XI, 408 p ISBN 978-3-319-46374-2 (eBook)
- Kohler, Matthias; Gramazio, Fabio. (2008) *Digital Materiality in Architecture*, Lars Müller Publishers.
- Kolarevic, Branko, (2003), 'Computing the Performative in Architecture', *Proceeding of the eCAADe 21conference*. Graz, Austria. p 195.
- Kolarevic, Branko, Malkawi, A., (Eds.), (2005). *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*. London, UK: Spon Press.
- La Magna, R., Waimer, F., Knippers, J. (2014): *Coreless Winding - A Novel Fabrication Approach for FRP Based Components In Building Construction*. *Proceedings of The 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2014*, Vancouver, Canada.
- Lienhard, J., Alpermann, H., Gengnagel, C., Knippers, J. (2013): *Active Bending, a Review on structures where bending is used as a self-formation process*. *International Journal of Space Structures Vol. 28 No. 3&4 2013*, p 187-196
- Lienhard, J., Schleicher, s., Knippers, J. (2012). "Bending-Active Structures – Research Pavilion ICD/ITKE. In *Proceedings of the International Symposium of the IABSE-IASS Symposium, Taller Longer Lighter*, Nethercot, D., Pellegrino, S. et al. (eds). London: Brintex Digital Publishing.
- Lienhard, J., Schleicher, s., Knippers, J. (2014). *Bio-inspired, Flexible Structures and Materials*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/265784344_Bio-inspired_Flexible_Structures_and_Materials [accessed Jul 18, 2017].
- Menges, Achim. (2015). *Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational*. John Wiley & Sons P&T, 42268. VitalBook file.
- Ortega, Luis. (2013). *Digitalization takes command. El impacto de las revoluciones de las tecnologías de la información y la comunicación en arquitectura*. Universitat Politècnica de Catalunya. Director: Jose Ignacio Ábalos. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona.
- Oxman, Neri. (2010) *Material-Based Design Computation*. Ph.D. thesis, MIT.
- Oxman, Neri. (2012). "Variable property rapid prototyping". En: *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 6, Nº.1, Londres, Taylor & Francis, Págs.3-31.
- Oxman, Rivka. (2008). "Performance-based Design: Current Practices and Research Issues. *International journal of architectural computing*", Londres. v. 08 n.3, 337 - 358. Doi: 10.1260/147807708784640090
- Oxman, Rivka. (2012). "Novel concepts in digital design". In.: GU, Ning Gu; WANG, Xiangyu (Ed.). *Computational Design Methods and Technologies: Applications in CAD, CAM and CAE Education*. Hershey: IGI Global (p. 18-33.).
- Picon, Antoine. (2006). "Arquitectura y virtualidad. Hacia una nueva condición material". *Revista Praxis 6*.
- Reichert, S., Schwinn, T., La Magna, R., Waimer, F., Knippers, J., Menges, A. (2014): *Fibrous structures: an integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles*. *Comput. Aided Des.* 52, 27–39
- Schleicher, Simón. (2016). *Bio-inspired Compliant Mechanisms for Architectural Design Transferring Bending and Folding Principles of Plant Leaves to Flexible Kinetic Structures*. Stuttgart (ITKE), Dr.-Ing. Director: Jan Knippers.