

# Nanofactura y Macrofactura, parataxis de la arquitectura paramétrica natural

Giustino Di Cunzolo

## Resumen

*Imaginen controlar la Arquitectura en todas las escalas de la naturaleza a través de un protocolo de diseño y fabricación que contemple nuevas estrategias de impresión 3D ampliadas hasta la nanoescala de la materia. No es ciencia ficción, algo lejano en el futuro; es una realidad que se consolida gestionando Nanofactura y Macrofactura en el mismo nivel formal/funcional: la parataxis. Estamos perjudicando nuestra arquitectura, aplicamos en lugar de generar nuevos paradigmas, y la nanotecnología es un ejemplo elocuente: se utiliza, en una dosis máxima alrededor del 15%, como ingrediente adicional y mejorador de algunas características de las construcciones y materiales. En cambio, la nanotecnología en arquitectura es más bien un problema de diseño: la interdependencia entre la estructura cristalina del material y la estructura mecánica de la construcción genera arquitecturas más resistentes, ligeras, ahorro de materia y energía en el proceso de producción e incorporación de funciones específicas en su forma.*

**Palabras claves:** Nanofactura, Parataxis, Fractales, Proceso de Parafactura, Modelo Paramétrico Natural.

## ¿La naturaleza pensará en números?

Razonando acerca de la naturaleza y su origen, quizá, fantaseemos de un dios que crea y manipula la materia, plasmando el mundo según sus caprichos. Pero, si comenzamos a investigar la "creación divina", bajo la

perspectiva de leyes y teoremas que el hombre mismo dedujo al observarla, estaremos dispuestos a admitir que este dios tiene una forma de comunicación numérica que el hombre ha simplemente codificado. En el siglo XIII, Fibonacci estaba buscando una ley matemática que describiría el crecimiento de una población de conejos<sup>1</sup>, descubriendo la sucesión áurea donde cada término tiene una relación de recurrencia con los dos anteriores (incluso se relacionan con los fractales). La sucesión describe las pautas con las cuales las plantas, las hojas y las flores se forman a partir de un tejido especializado, el meristema apical, delineando un modelo espaciotemporal nombrado filotaxis<sup>2</sup>, una geometría ordenadora que permite minimizar la superposición entre las hojas y maximizar la capacidad de la planta de capturar la luz. Así que, resulta fácil reconocer la presencia de estructuras y formas recurrentes basadas en la sección dorada, que ocurre tanto en la naturaleza como en la arquitectura. Ambas se construyen con principios geométrico-matemáticos similares<sup>3</sup> siguiendo las mismas leyes de la naturaleza, las leyes

1 Leonardo da Pisa, o Fibonacci, vivió cerca de Béjaïa (o Bujía), en Argelia, una importante ciudad exportadora de cera. Un reciente análisis matemático-histórico del período y de la región sugiere que los apicultores de Béjaïa y sus conocimientos sobre la reproducción de las abejas fueron de inspiración para la sucesión y no el modelo de reproducción de conejos (Scott, 2014).

2 Filotaxis, del latín phyllotaxis, término originado de las raíces griegas phyllon, "hoja" + taxis, "orden".

3 Ampliar cualquier parte de él, se obtiene una figura similar a la original. Esta característica a menudo se llama autosimilitud o autosemejanza y muchos ejemplos se producen en la naturaleza. Según el matemático Benoît Mandelbrot (1924-2010), la relación entre los fractales y la naturaleza es más profunda de lo que se cree.

de un dios matemático. Al respecto, Benoît Mandelbrot afirmó que los fractales tienen correspondencias con la estructura de la mente humana y esta familiaridad es un misterio que, cuanto más se profundiza, sigue aumentando. Entonces, ¿Dios pensará en números?

En 1954, Buckminster Fuller reinventa y populariza una idea que Walther Bauersfeld, ingeniero capo de las industrias ópticas, Carl Zeiss Jena, había tenido treinta años antes: la cúpula geodésica, una estructura con una extrema resistencia en relación con el peso general y de sus componentes.

En 1985, el químico inglés Harold Kroto descubre, ganando el Nobel, la molécula de C<sub>60</sub> que consta de 12 pentágonos y 20 hexágonos donde cada pico corresponde a un átomo de carbono y cada lado a un enlace covalente: por similitud formal y resistencia, en honor al arquitecto de las geodésicas, será llamada buckminsterfullereno.

En el macromundo se había anticipado lo que ya existía en la naturaleza, invisible a los ojos humanos sin la justa instrumentación. Sin embargo, los dos mundos, que se habían tocado de una manera tan profunda y radical, se distanciaron nuevamente siguiendo sus propias líneas de desarrollo. Y ¿Si los números son, en realidad, los dioses de la creación?

Richard P. Feynman, Nobel en física, en los años de transición desde la cúpula geodésica hasta el buckminsterfullereno, hizo un experimento mental elaborando la teoría del ratchet

browniano<sup>1</sup>: una primera máquina molecular (ensamblador) para elaborar operaciones a la escala nanométrica. Treinta años más tarde, Kim Eric Drexler, investigador del Institute for Molecular Manufacturing, retomando las ideas de Feynman, pone las bases para construir estas máquinas moleculares que pueden dirigir las reacciones químicas por el medio del posicionamiento de moléculas reactivas con precisión atómica. Esto es el umbral de la presente investigación, lo que Neal Stephenson (1995) define como la era del diamante, un período histórico en el que cada aspecto social estará contaminado por nanotecnologías<sup>2</sup>.

Desafortunadamente, en arquitectura, la nanotecnología se aplica como ingrediente adicional y mejorador de algunas características de las construcciones y materiales, como si su único propósito fuera lo de dopar la estructura de la arquitectura. Por eso, la presente investigación pretende retomar teóricamente y experimentalmente el hilo de esa

manifestada relación aleatoria, formal y funcional, entre la cúpula geodésica y la molécula de C<sub>60</sub>, explotando el potencial paradigmático de la nanoarquitectura. De hecho, hay un eslabón perdido que conecta lo infinitamente pequeño a lo infinitamente grande, un enlace codificado por geometría fractal que, como afirmaba Mandelbrot en una conferencia Ted en 2010, generan, de las leyes más simples, infinitas maravillas que se repiten indefinidamente<sup>3</sup>; leyes paramétricas que diseñan la morfología natural e inspiraron la arquitectura a través de geometrías inteligentes con caracterización natural: este ruta conduce, hoy en día, a las bioconstrucciones que examinan el diseño único de un componente animal o natural con el fin de utilizar los principios derivados de la naturaleza para regular la relación entre los datos geométricos y funcionales convirtiéndolos en algoritmos de producción paramétrica (Zolotovskiy, 2012).

Por lo cual, el uso de la nanotecnología se convierte en un problema de diseño (Elvin, 2006) y se refiere al proyecto, caracterización, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas a través del control de la forma a escala nanométrica (The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2005). La relación, que se observa y codifica, entre el diseño del material y de la forma<sup>4</sup> arquitectónica revela como direcciones de fuerzas y modalidades de transmisión de las tensiones, serialidad y agregación sobre una base modular, capacidad de absorber líquidos, transmitir calor y electricidad, siguen leyes semejantes entre las dos escalas:

3 "Bottomless wonders spring from simple rules which are repeated without end".

4 La forma, en el sentido buscado, está estrechamente relacionada con la función que el objeto debe realizar (en este caso, una función estructural). Por lo tanto, la suposición más correcta no es "forma y función", sino "forma es función".

se puede fabricar paraméricamente una macroestructura por el medio de materia nanoestructurada y, al revés, se puede estimular una transición desde la estructura cristalina de la materia hasta la estructura de la arquitectura. El proceso nos devolverá un modelo eficiente debido a la estrecha relación geométrica, intrínseca del sistema. Entonces, ¿Cuál sería el papel de los hombres frente a estos nuevos dioses?

Recientes estudios demuestran que los ingenieros físicos y químicos son los eficientes colaboradores de los nuevos dioses y, en breve, podrían hasta reemplazarlos: si miramos las fotos procesadas por sus microscopios podríamos pensar que las formas de sus nuevos materiales se inspiran en las formas hieráticas típicas de la arquitectura. Pero, la ilusión desvanece antes de la obvia capacidad geométrica de la naturaleza, que los ingenieros adaptan a sus necesidades. Y ¿El arquitecto que está haciendo al respecto?

Poco o nada.

En campo nanotecnológico-estructural todo se enfoca al uso del carbono, evidenciando una laguna de aplicación en la investigación de materiales con menor impacto ambiental. El Carbon Tower de Testa (en asociación con Arup) es el ejemplo, actual y futurista, de este retraso en comparación con otros sectores: el rascacielos es un sistema elitista que descarta, de antemano, la posibilidad que novedosas tecnologías sean utilizadas incluso en pequeñas comunidades locales, centrando, en cambio, su factibilidad en las megalópolis y exorbitantes costos de producción, a pesar de la esbeltez de las estructuras. Además, los nanotubos de carbono son peligrosos para la salud humana y medio ambiente, no de inmediato sino en perspectiva,

---

1 Este experimento mental se basa en lo diseñado por el matemático y físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), el demonio de Maxwell, sobre la posibilidad teórica de un dispositivo capaz de actuar a escala microscópica sobre partículas individuales para producir una violación macroscópica del segundo principio de la termodinámica. De esta manera, podría producir una variación de temperatura entre dos cuerpos sin gasto de energía. Al respecto, Maxwell comentó: "... si concebimos a un ser con una visión tan aguda que pueda seguir cada molécula en su movimiento, este ser, cuyos atributos son esencialmente tan finitos como el nuestro, podría hacer lo que nos es imposible".

2 De hecho, ProMéxico, en diciembre 2018, a través de su Unidad de Inteligencia de Negocios, ha lanzado un reporte donde, analizando diferentes fuentes a nivel global, define que las nanotecnologías son las bases para el desarrollo industrial del futuro, estimando un crecimiento anual promedio alrededor del 20% por cada línea de negocio, es decir, estima que por el 2030 los ingresos globales de los productos nanotecnológicos alcanzarán los 30,000 MMD (mil millones de dólares) multiplicando del 1000% los ingresos actuales.

dado que, si la demanda de materiales añadidos con nanotubos de carbono aumentará, el control de su eliminación y liberación en la naturaleza sería prácticamente imposible de gestionar y las implicaciones medioambientales podrían tener el mismo impacto que la edad del asbesto. Es fundamental investigar soluciones que impliquen el uso de materiales naturales; su modificación a nivel molecular podría extinguir el problema de la eliminación posterior de desechos, al final de la vida promedia de una arquitectura, proponiendo una solución ambientalmente aceptable y factible alrededor del mundo, empleando recursos locales que brinden ciertas características a la arquitectura de acuerdo con su uso, y que, con el tiempo, puedan lograr economías de escala.

Por ende, se necesita retomar una actitud técnica fundamentada en unas líneas teóricas, con base práctica, de la segunda mitad del siglo XX (en los años 40, Buckminster Fuller proyectaba un prototipo de vivienda, la Dymaxion House, basada en una estructura esférica inspirada en la campana de las medusas) y precisamente en las ideas del precursor de la nanoarquitectura, John MacLane Johansen: la arquitectura se reafirma usando sus propios términos, encontrando sus fuentes, determinantes, derivaciones y aspiraciones. Con este sentido, el arquitecto elimina continuamente actitudes, procedimientos, formas, terminologías y reglas preestablecidas en la búsqueda de una declaración nueva y nítida (Bedoni, 1983).

La arquitectura se analiza según el proceso, una palabra que implica la coexistencia de intención, plan, propósito, resultado, producto, tiempo y movimiento, así que "la forma no debe derivar de un proceso de diseño que no considere el propósito y el uso

esencial (Johansen, 2002), es decir, un proyecto basado en tres imperativos fundamentales: tecnológico, orgánico y psicosociológico. A partir de esta teorización, Johansen desarrolla la teoría de la concha-hábitat, esculturas de concreto en aerosol (sprayforms<sup>1</sup>), exasperando las dramáticas posibilidades del hormigón aplicado directamente a una estructura de acero mediante pistolas de gravedad; una tecnología avanzada de control directo, táctil y visual, del sistema constructivo.

Resulta a fin el experimento de la Endless House de Friedrich Kiesler (1950), donde la concepción elástico-espacial proporciona una respuesta correalista para un sistema arquitectónico constructivo basado en una interacción dinámica y continua entre las personas y su entorno natural y tecnológico. Asimismo, dominar la interacción dinámica entre nano y macroestructura es la guía de un camino de investigación basado, en posibilidades tecnológicas y conocimiento científico confiable, avanzado y en mutación continua. Con este sentido, Julian Voss-Andreae, artista y físico alemán, reproduce y reinventa, en la macroescala, los conceptos

---

1 Las Sprayforms son estructuras de concreto de cáscara delgada inspiradas en la naturaleza. Encargadas por la American Concrete Association como parte de una serie continua de proyectos de demostración, Johansen le recuerda como un esfuerzo por distanciarse de la caja moderna, además de experimentos sintomáticos de su espíritu de investigación insistente. Le Corbusier utilizó esta técnica en Ronchamp (1950-55) y fue probablemente la inspiración para que Johansen explorara las formas de los crustáceos. También es probable que Johansen estaba al tanto de las estructuras de cubierta delgada de Félix Candela y las estructuras de ferro-cemento de Pier Luigi Nervi. Sin embargo, el grupo de Archigram llegó a etiquetar las formas estomacales de Johansen como Bowellismo; "Para los chicos de Archigram", escribió Michael Webb, miembro de Archigram, "[Johansen] fue nuestro auténtico héroe estadounidense: cada proyecto sucesivo es un alejamiento radical no solo de la práctica convencional, sino también de su propia obra anterior".

de física molecular y cuántica<sup>2</sup>. De hecho, cada área del conocimiento es contaminada por lo que sucede en la nanodimensión. Entonces, ¿porque no hablamos de nanoarquitectura y/o arquitectura cuántica?

## **Manufactura vs Nanofactura**

La palabra manufactura se deriva de las palabras latinas manus (mano) y factus (hacer) y se traduce con hecho a mano. Esta palabra tiene siglos de antigüedad y describe los métodos manuales que se utilizaban cuando se acuñó la expresión.

La mayor parte de la manufactura moderna se lleva a cabo por medio de maquinaria automatizada y controlada por computadora que se supervisa manualmente. Se puede definir de dos maneras: tecnológica y económica, en el sentido tecnológico, la manufactura es la aplicación de procesos físicos y químicos para alterar la geometría, propiedades y apariencia del material.

Los procesos combinan máquinas, herramientas, energía y trabajo manual dentro de una secuencia de operaciones, llevando el material más cerca del estado final que se desea. En el sentido estrictamente económico, es la transformación de los materiales en artículos de valor mayor por medio de una o más operaciones

---

2 Julian Voss-Andreae (1970) comenzó su carrera como pintor y luego estudió física experimental, matemáticas y filosofía en la Universidad Libre de Berlín, la Universidad de Edimburgo y la Universidad de Viena. Aprendió la mecánica cuántica con el grupo de investigación de Anton Zeilinger, participando en un experimento que demostró el comportamiento cuántico de objetos más grandes hasta la fecha. En el año 2000 se mudó a Portland para estudiar bellas artes en la Escuela de Arte del Noroeste del Pacífico, donde se graduó en 2004. Sus trabajos están fuertemente influenciados por sus estudios científicos, como las "esculturas de proteínas" o "El Hombre Cuántico" (2006-2007), una escultura de acero que representa una metáfora del mundo intuitivo de la mecánica cuántica.

de procesamiento o ensamblado, por ejemplo: cambiando su forma o propiedades, o combinando materiales distintos alterados; es decir, el valor se adquiere por medio de las operaciones de manufactura ejecutadas en el material.

Este concepto operacional se podría trasladar a la manufactura directa de los átomos, la llamada nanotecnología<sup>1</sup>. Hoy en día, se ha difundido la práctica de la domesticación atómica, construyendo la arquitectura de la materia a través de maquinarias específicas (prótesis de segundo nivel) y en poco tiempo, podría ser factible a través del uso directo de las manos mediante prótesis tecnológicas de primer nivel: no tocaremos estos átomos con nuestras manos, pero podremos usar guantes y visores de nanorealidad para obtener un *factus* a la nanoescala.

La nanofabricación permite diseñar y forjar productos con uso de menos materia, bajos requerimientos de energía, mayor funcionalidad por unidad de espacio y accesibilidad a regiones vedadas para productos más grandes<sup>2</sup>. Aparte de eso, hay efectos físicos bastante significativos; uno de estos es que sus propiedades superficiales se vuelven mucho más importantes en relación con las propiedades de su volumen: explotando esta característica se pueden crear materiales con alta resistencia,

---

1 La nanotecnología no debe ser confundida con la microfabricación: productos y/o componentes cuyos tamaños se miden en micras ( $1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-3} \text{ mm} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$ ). De hecho, la nanotecnología se relaciona a la microtecnología, pero se refiere a dispositivos que se miden en nanómetros ( $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-3} \mu\text{m} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$ ).  
2 Productos más pequeños equivalen a precios más bajos, por el menor uso de material; sin embargo, el precio de un producto está influido por los costos de investigación, desarrollo, producción y distribución de los costos en el número de unidades vendidas. Las economías de escala, que dan por resultado productos de menor precio, aún no se logran por completo en las nanotecnologías, excepto casos limitados.

propiedades electrónicas, magnéticas y/u ópticas mejoradas, entre otras mejoras. Además, en la nanoescala, el comportamiento del material está influenciado por la mecánica cuántica en lugar de las propiedades del volumen. Aclarado esto, podemos delinear las tipologías de nanofabricación:

1. materiales nanoestructurados, que presentan una estructura controlada a la nanoescala, incluso si se aplican a la escala visible; en esencia, es un material de tipo tradicional modificado en su estructura químico-física después de la observación, prueba y caracterización de propiedades a la nanoescala;
2. materiales nanocompuestos, o materiales sólidos multifásicos donde una de las fases tiene una, dos o tres dimensiones menores de 100 nanómetros (nm), o estructuras que tienen distancias que repiten la nanoescala en las diferentes fases del material.

En el primer caso, estructurar el material significa actuar sobre la entera materia o la agregación secuencial y matemática de las moléculas, las relaciones proporcionales entre los componentes, de la escala nanométrica hasta lo visible. En el segundo caso, la estructuración se realiza en elementos individuales de la nanomateria que se dispersan en la matriz para revigorizarla. Lo que se describe debe ajustarse a un procedimiento analítico-experimental específico: observación de la estructura molecular con equipos especializados (SEM, TEM, resonancia magnética nuclear, AFM, sincrotrón), manipulación de la estructura de la materia a lo largo de las directrices deseadas, relacionar la nanoestructura con la funcionalidad deseada, así como la evolución de las características en el ciclo de vida (nanoindentación).

En definitiva, los procesos de nanofabricación

para materiales y estructuras se dividen en dos categorías básicas: 1) enfoques descendentes<sup>3</sup>, que adaptan las técnicas de microfabricación para los objetos con tamaños a nanoescala; 2) enfoques ascendentes<sup>4</sup>, en los que se manipulan y combinan átomos y moléculas en estructuras más grandes.

## **Nanofabricación: acontecimientos actuales**

En el campo de la experimentación de materiales nanoestructurados, se destaca la investigación del equipo de la Dra. Julia R. Greer: reducir la fragilidad y el peso de los materiales cerámicos y metálicos, aumentando su resistencia y ductilidad, desde el diseño, a la nanoescala, de estructuras arquitectónicas hieráticas (Greer, 2014). A partir del problema relativo al nexo deficitario e inverso entre alta resistencia/rigidez y fragilidad/sensibilidad a los defectos de los materiales cerámicos, se ha demostrado empíricamente la creación de un material a escala nanométrica al mismo tiempo ultraligero, fuerte, capaz de absorber energía y dúctil hasta el punto de recuperar su estado inicial después de un estrés por compresión igual al 50% de su tamaño.

De diferente alcance es el trabajo, como parte del proyecto PRIN 2008, de la Unidad de Investigación UR/1 (Università degli Studi di Palermo): crear materiales nanocompuestos potenciando la tierra cruda con refuerzos nanoestructurados, para mejorar su

---

3 Los enfoques descendentes implican el procesamiento de materiales en volúmenes y películas delgadas usando técnicas litográficas como las empleadas en la fabricación de circuitos integrados y microsistemas, además de otras técnicas de maquinado de precisión.

4 En los enfoques ascendentes, los materiales iniciales son átomos, moléculas e iones. Los procesos unen entre sí a la mayoría de estos bloques de construcción, en algunos casos uno por uno, para fabricar la entidad deseada.

desempeño fisicoquímico y mecánico. Como fases, se empleó la nanoarcilla discoidal (laponita), una arcilla sintética con alta área superficial. La preparación de este material se obtuvo de forma similar a la producción tradicional del adobe, con las precauciones necesarias con respecto a los tiempos de secado y dispersión de la fase, que al ser hidrófila se ha estabilizado con un porcentaje del 5%, una proporción que no mostró grietas por la rápida contracción del material (Scalisi, 2013).

Las hipótesis de esta investigación se compararon con el trabajo coordinado por John Ochsendorf, en el MIT, y las muestras fueron sometidas a pruebas de compresión y flexión, y se encontró que la mejor respuesta mecánica fue proporcionada por muestras ASN (arcilla, agua, arena y nanodiscos) en la medida de un aumento promedio del 235% de la resistencia a la compresión y del 605% a la flexión, además de mejoras en las características termo-físicas y acústicas. En el panorama se encuentran otras investigaciones que experimentan los efectos de la dispersión de nanopartículas de arcilla en materiales ecocompatibles, como los geopolímeros (Assaedi, 2015), obteniendo efectos análogos a los mencionados y confirmando la congruencia de la hipótesis esbozada en esta propuesta, directamente relacionada con el desarrollo de sistemas constructivos inspirados en la agregación molecular de la naturaleza.

### Nanofactura y macrofactura

La nanofactura es una cuestión de organización de la materia a escala invisible, construyendo la forma en que se agregan átomos y moléculas, reemplazando la naturaleza en su trabajo, a través de dos variables interdependientes: geometría y anisotropía. La geometría, desde

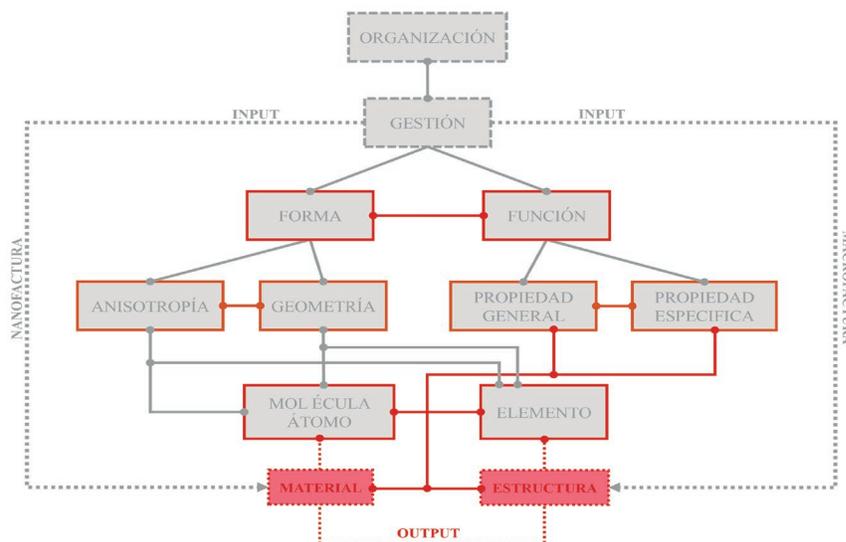


Figura 1. Esquema sistémico de la relación entre nanofactura y macrofactura [Autor: Giustino Di Cunzolo]

el punto de vista de la nanofactura (geometría molecular), se describe por las posiciones de los átomos en el espacio, mencionando la longitud de enlace de dos átomos unidos, ángulo de enlace de tres átomos conectados y ángulo de torsión de tres enlaces consecutivos, además de definir el movimiento de una manera cuántica: traslación, rotación (movimientos externos) y vibración (movimiento interno y armónico). Esto significa que los átomos oscilan en torno a su posición de equilibrio, incluso a la temperatura del cero absoluto, donde están en un estado vibracional basal y muestran movimiento mecánico cuántico de punto cero (a temperaturas mayores se excitan térmicamente, pero siempre oscilando alrededor de una geometría reconocible). Es decir, podemos medir la geometría molecular y las relaciones atómicas, obteniendo datos numéricos precisos.

La anisotropía es la propiedad general de la materia según la cual las propiedades específicas varían de acuerdo a la dirección de construcción de la materia: se percibe en los sólidos cristalinos, debido a sus estructuras atómicas y moleculares regulares. Se

habla de anisotropía cuando se produce cualquier cambio de escala de una estructura, como en un gráfico x-y, con factores distintos (o en dependencia de una función) en cada coordenada.

Las dos variables descritas son la base de la nanofactura. Las reglas y relaciones que las dominan no se toman en cuenta en los procesos de macrofactura. La forma, producto de las dos variables, genera diferentes funciones incluso para variaciones angulares y geométricas mínimas en la disposición de los átomos. Forma es función, el axioma fundamental de la teoría para codificar la relación paramétrica entre nanofactura y macrofactura: se logra analizando el proceso constructivo propio de la morfología de la materia natural, se derivan estos principios para trasladarlos a la macrofactura y regular la relación entre los datos formales y funcionales, convirtiéndolos en algoritmos de producción paramétrica.

Es un proceso bidireccional, que aplica la dualidad entre los enfoques descendentes y ascendentes en los procesos de nanofactura: de la macrofactura a la nanofactura o viceversa. La entrada principal del

sistema (figura 1) es la gestión que proporciona información en ambos procesos de producción; si por un lado tenemos geometría y anisotropía para organizar la forma, por el otro tendríamos propiedades generales y específicas para determinar la función. Cada caso específico puede necesitar un enfoque descendente o un enfoque ascendente; en ambos casos tendremos suficiente información en las salidas del sistema para alimentar y organizar el proceso de factura en espera de datos formales y/o funcionales.

El enfoque descendente procesa datos a la macroescala logrando una forma a la nanoescala; el enfoque ascendente procesa datos en el sentido contrario alcanzando propiedades especiales en la dimensión visible de la arquitectura. Honrando Johansen (2002): la arquitectura es estructura, es materia y estructura, es una arte de servicio que posee una expresión estética en la medida de cómo se construye y sirve.

### Una ruta pragmática

Avanzar hacia un nuevo paradigma de la arquitectura implica desarrollar adecuadamente todos los factores que inciden en la construcción de un nuevo producto arquitectónico, sobre todo en los casos de materiales emergentes.

Esto significa detectar los problemas relativos a los diferentes escenarios futuros y elaborar soluciones adecuadas en forma de productos tecnológicos concretos. El siguiente diagrama de línea de tiempo (figura 2) traza un camino esencial para explotar el potencial nanoarquitectónico. En el diagrama se detectan: el problema fundamental (Pr) de la investigación, el objetivo general (O), los escenarios predecibles (E1, E2, E3... En) y los productos relacionados (P1, P2, P3... Pn) para evitar que se detenga el proceso. El camino trazado no pretende ser exclusivo ni limitante, ya que estamos en un campo de la arquitectura sustancialmente inexplorado o casi virgen.

### De la biofabrica a la parafactura

Con una frecuencia cada vez mayor, la arquitectura se aproxima y cruza con la biología para resolver sus problemas. Aunque no es muy reciente, resulta sintomático el trabajo, desarrollado por el MIT, de la arquitecta y bióloga Katia Zolotovskiy (2012), definir la gestión de los procesos de bioconstrucciones<sup>1</sup>, separándolos en dos distintos métodos

<sup>1</sup> En la presente discusión, hablando de bioconstrucciones, se hace explícita referencia a los métodos de diseño y procesos que se inventan y desarrollan bajo la influencia de los sistemas biológicos.

de optimización, el diseño bioinspirado y la biofabricación. El término bioconstrucción, siendo de derivación equívoca, puede ser reemplazado por el neologismo biofactura que, más bien, sirve como marco conceptual para la experimentación con métodos de diseño y fabricación, utilizando sistemas biológicos ya sea indirectamente, como fuente de inspiración e información para el diseño (Polypterus project), o directamente, como producción de material para la fabricación (Xylinus project).

Del primero deducimos las dos funciones básicas del proceso de biofactura: codificación y transición; es decir como operar la codificación de un elemento, sea natural o artificial y como transferir los parámetros obtenidos en el sistema análogo: (1) análisis del sistema análogo para identificar los componentes principales y sus relaciones; (2) establecer la conexión entre los componentes del sistema y desempeño funcional, identificando y cuantificando los principales parámetros en juego; (3) diseño de una nueva aplicación con un rendimiento funcional similar (síntesis).

El segundo paso incluye la parametrización de la forma de la unidad, los ensamblajes paramétricos en superficies planas y las pruebas de flexión para cuantificar el comportamiento anisotrópico de los ensamblajes. El método antes mencionado es la guía fundamental del proceso paramétrico natural. Del segundo método se deducen los componentes esenciales de la fabricación, Zolotovskiy utiliza la microescala para fabricar objetos a la macroescala y aunque no sea la relación en la que se basa el presente estudio, este proyecto proporciona el marco teórico y práctico ya planteados por Kim Eric Drexler (1991) (1992) para fabricar productos en dos diferentes escalas dimensionales.

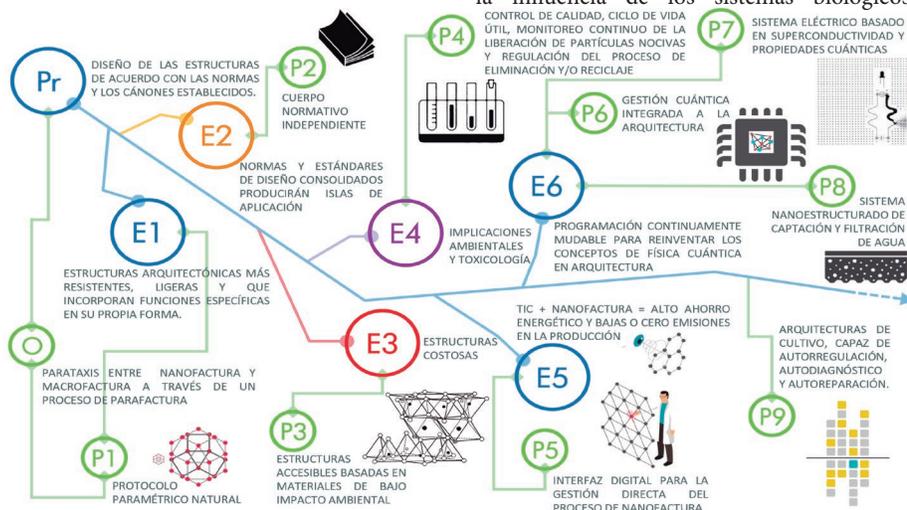


Figura 2. Línea de tiempo: escenarios y productos [Autor: Giustino Di Cunzolo]

A pesar de que esta fabricación sea desarrollada a través de sistemas vivos, se detectan por analogía los siguientes pasos del proceso: (1) iniciación del crecimiento del material; (2) definición de la configuración para el crecimiento como entorno paramétrico; (3) descripción de experimentos que controlen la forma generada mediante la modificación del entorno de crecimiento; (4) sugerencia de construcción conceptual de impresora 3d biológica para futuras investigaciones y desarrollos.

Zolotovskiy se detiene en un enfoque, por la mitad del proceso, prospectivo; a diferencia de la materia viva, y por analogía, en el campo de la materia inorgánica, como son los materiales de construcción, tenemos una ventaja, relativa al crecimiento de la materia, que es ejecutado a través de los procesos fractales de la naturaleza. Por eso, el termino biofabrica es suplantado por parafabrica<sup>1</sup>, que describe más rotundamente el marco conceptual de la presente investigación: se experimentará con métodos de diseño, proceso y fabricación que se

<sup>1</sup> El prefijo para-, es un extranjerismo derivado del griego παρά-, pará: 'al margen de', 'junto a' o 'contra' (ya hemos visto que el termino fabrica se refiere al hacer).

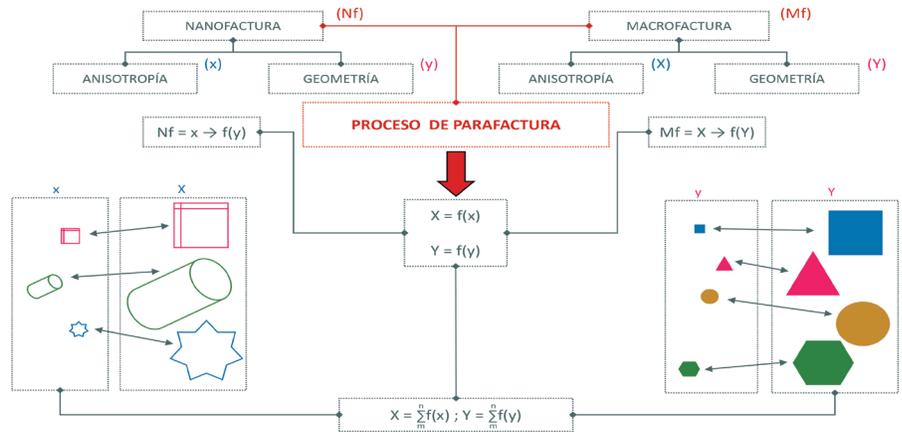


Figura 4. Proceso de parafabrica: algoritmo generativo básico [Autor: Giustino Di Cunzolo]

inventan y desarrollan bajo la influencia de los sistemas naturales en general. Con este sentido, la parafabrica se pone en antítesis con los métodos tradicionales de diseño y fabricación de la arquitectura, que siguen aplicando normas y cánones enraizados, congelando el progreso hacia nuevos modelos.

La definición del correcto proceso de parafabrica pasa por la definición de sus componentes básicos para el diseño de la materia en la doble escala. La codificación es la parte de la programación que procesa un código, es decir, el algoritmo de relación entre la nanofabrica y la macrofabrica. La transición, por otro lado, es la parte

de la programación que transfiere el código algorítmico a la escala relativa y opuesta a la de derivación del código generativo. Al abandonar el proceso de programación y diseño, se ingresa a la fase de fabricación de los productos en las escalas métricas relativas, pasando finalmente a la evaluación. Dependiendo de la respuesta, se confirmará el modelo paramétrico natural o viceversa, regresaremos al área de programación para mejorar el sistema (figura 3).

El proceso de parafabrica es el contenedor en el que intervienen las dos variables interdependientes, en las dos escalas (nano y macro), de la investigación: geometría y anisotropía. Son variables cuantitativas dependiendo de los factores que queramos condicionar en cada aplicación posible del modelo. Esta manipulación entrelazada sólo se logra mediante el uso de un algoritmo generativo, relacionado a las dos escalas, procesado mediante programación recursiva, iterativa y/o de crecimiento. La función factorial (o de suma) que se deriva es el núcleo para la codificación de la parataxis entre la nanofabrica y la macrofabrica. En el diagrama (figura 4) se empiezan a establecer las funciones básicas de cálculo del algoritmo generativo, aquellas a las que aplicaremos y experimentaremos

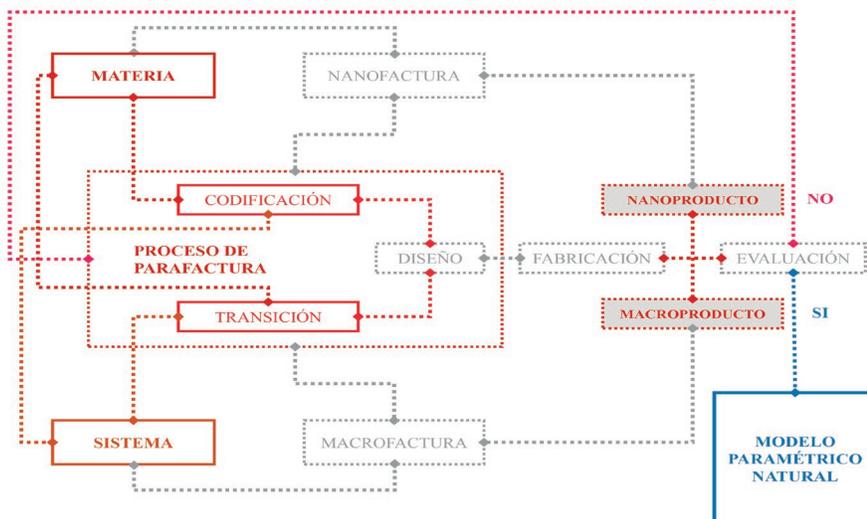


Figura 3. Modelo causal de aproximación al modelo paramétrico natural [Autor: Giustino Di Cunzolo]

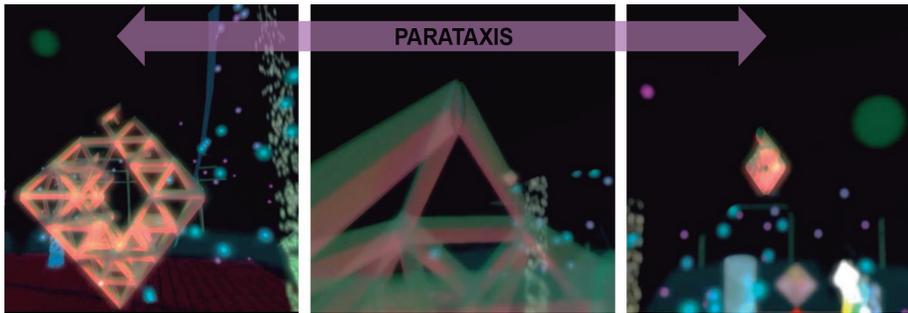


Figura 5. Experimento preliminar en espacio virtual [Autor: Giustino Di Cunzolo]

con las leyes paramétricas y fractales de la naturaleza, infiriéndolas con la nanofactura o macrofactura. La forma en que la geometría y la anisotropía se manipulan en la nanoescala devuelve propiedades particulares de la materia a la macroescala. Entonces, manipulando las variables interdependientes, condicionaremos la propiedad específica (variable dependiente) de la materia y del objeto en las dos escalas relativas (nano y macro).

La función asumida por cualquier forma, configurada según los procesos expuestos, será el principal indicador del efecto del proceso de parafactura en el producto elaborado.

## Diseño y fabricación

La fase experimental se basa en la hipótesis de fabricar un material cerámico, constituido e inspirado por nanopartículas de arcilla, de baja densidad y construido según el protocolo paramétrico natural, que devuelva un desempeño mecánico mejorado en comparación con

materiales tradicionales análogos. En primer lugar, se resolvió la relación geométrico-formal entre las dos escalas dentro de un espacio virtual controlado (figura 5).

Todo el experimento (figura 6) constará de seis fases, relacionadas entre ellas:

- Modelación matemática de las variables y de las restricciones del sistema por medio de programación lineal para maximizar el rendimiento mecánico y fisicoquímico del material y minimizar utilización de materia, tiempo de fabricación, densidad y costo;
- Diseño del producto en su geometría y su proceso de crecimiento desde la nanoescala hasta la macroescala en ambiente software específico para modelado paramétrico;
- Producción de maqueta en meso-escala a través de fabricación digital para evaluar su factibilidad y desempeño a la nanoescala;
- Evaluación simulada del material nanoestructurado a través de software de desempeño

- mecánico relacionado al proceso de nanofabricación digital;
- Nanofabricación digital a través de litografía de dos fotones (Nanoscribe);
- Evaluación del desempeño mecánico y fisicoquímico del material comparándolo con materiales tradicionales análogos y otros materiales nanoestructurados.

## Bibliografía

### Libros

- Askeland, D. R. Ciencia e Ingeniería de los materiales (3ª edición). México, Ed. ITP, 1998.
- Bedoni, F. S. L'architettura frantumata. John MacLane Johansen (Universale di architettura diretta da Bruno Zevi vol. 60/61). Bari, Ed. Dedalo, 1983.
- Delle Mura, C. & Simonato, E. Architettura e nanotecnologie. En Tecnologia delle costruzioni vol. 2. Padova, Ed. libreriauniversitaria.it, 2012.
- Drexler, K. E. & Peterson, C. & Pergamit, G. Unbounding the future: the nanotechnology revolution. New York, Ed. Morrow, 1991.
- Drexler, K. E. Nanosystems: molecular machinery, manufacturing and computation. En A Wiley-Interscience publication. New York, Ed. John Wiley & Sons Inc, 1992.
- Feynman, R. P. La legge fisica. En Universale scientifica Boringhieri vol. 13. Torino, Ed. Bollati Boringhieri, 1971.
- Feynman, R. P. Sei pezzi facili. En Piccola biblioteca Adelphi vol. 450. Milano, Ed. Adelphi, 2000.



6. Espacio experimental [Autor: Giustino Di Cunzolo]

- Feynman, R. P. Sei pezzi meno facili. En *Piccola biblioteca Adelphi* vol. 512. Milano, Ed. Adelphi, 2004.
- Feynman, R. P. Il senso delle cose. En *Piccola biblioteca Adelphi* vol. 414. Milano, Ed. Adelphi, 2012.
- Foladori, G. Nanotecnologías disruptivas. Implicaciones sociales de las nanotecnologías. En *América latina y el nuevo orden mundial, conocer para decidir*. Ciudad de México, Ed. Miguel Ángel Porrúa, 2006.
- Groover, M. P. *Fundamentals of modern manufacturing. Materials, processes and Systems* (4ª edición). Hoboken, Ed. John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- Johansens, J. M. *Nanoarchitecture: a new species of architecture*. New York, Ed. Princeton Architectural Press, 2002.
- Leydecker, S. *Nano materials: in architecture, interior architecture and design*. Berlin, Ed. Springer Science & Business Media, 2008.
- The Royal Society & The Royal Academy of Engineering. *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*, 2005.
- Scalisi, F. *Nanotecnologie in edilizia. Innovazione tecnologica e nuovi materiali per le costruzioni*. En *Progettazione tecniche & materiali* vol. 58. Rimini, Ed. Maggioli, 2010.
- Schwarz, J. A. & Contescu, C. I. & Putyera, K. *Dekker encyclopedia of nanoscience and nanotechnology* (vol. 1 – 5). New York, Ed. Marcel Dekker Inc, 2004.
- Sposito, A. *Nanotecnologie e nanomateriali per l'architettura*. Napoli, Ed. Luciano, 2009.
- Sposito, A. & Scalisi, F. & Sposito, C. *Terracuda e nanotecnologie. Tradizione, innovazione, sostenibilità*. En *Esempi di architettura* vol. 22. Roma, Ed. Aracne, 2013.
- Stephenson, N. *Diamond age. L'era del diamante*. Milano, Ed. Shake, 1997.
- Tesis
- Burneo, X. E. V. *Desafíos en el presente y futuro de las tecnologías digitales. Lo generativo un paradigma en el diseño arquitectónico* (Tesis de Doctorado). UNAM, Ciudad de México, 2017.
- Cortés, D. L. M. *Biomimética. Relaciones invisibles en la naturaleza* (Tesis de Maestría). UNAM, Ciudad de México, 2018.
- Grigas, A. *The Fibonacci Sequence - Its History, Significance and Manifestations in Nature* (Tesis Senior en Honors Program). Liberty University, Virginia, 2013.
- Laez, F. J. R. *Cálculo de la dimensión fractal de la corteza cerebral e interfaz sustancia gris-blanca del cerebro humano mediante técnicas tridimensionales* (Tesis de Maestría). UNAM, Ciudad de México, 2015.
- Leone, M. F. *Innovazione tecnologica e materiali avanzati. Alte prestazioni ed eco-efficienza: nanotecnologie per l'evoluzione dei materiali cementizi* (Tesis de Doctorado). UNINA, Napoli, 2008.
- Ocampo, E. R. *Nuevos materiales y sistemas constructivos. Nanotecnología y biomimetismo en la arquitectura* (Tesis de Maestría). UNAM, Ciudad de México, 1999.
- Zolotovskiy, K. *Bioconstructs - Methods for bio-inspired and bio-fabricated design* (Tesis de Maestría). MIT, Massachusetts, 2012.
- Artículos
- Assaedi, H., Shaikh, F. U. A. & Low, I. M. *Effect of nano-clay on mechanical and thermal properties of geopolymer*. En *Journal of Asian Ceramic Societies*, 4 (2016), 19-28, 2015.
- De Giovanni, G. *Le nanotecnologie per l'architettura, Terracuda e nanotecnologie. Tradizione, innovazione, sostenibilità*. En *Esempi di architettura*, 22, 75-87, 2013.
- El Mundo de la Nanotecnología *Situación y Prospectiva en México*, UIN, ProMéxico. En: <http://www.ethic.com.mx/docs/estudios/El-mundo-nanotecnologia-Situacion-prospectiva-Mexico.pdf>. 2018. Último acceso: 12 de agosto de 2019.
- Eloy, C. *Leonardo's rule, self-similarity and wind-induced stresses in trees*. En *Physical Review Letters*, 107 (25), 1-5, 2011.
- Eloy, C., Fournier, M. & Lacoite, A. (2017). *Wind loads and competition for light sculpt trees into self-similar structure*. En *Nature Communications*, 8 (1014), 1-12, 2017
- Elvin, G. *NanoBioBuilding: nanotechnology, biotechnology, and the future of building*. En *Proceedings of 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction*, 2006.
- Greer, J. L., Jacobsen, A. J. & Valdevit, L. *Protocols for the optimal design of multi-functional cellular structures: from hypersonics to micro-architected materials*. En *Journal of American Ceramic Society*, Valdevit et al., 1-20, 2011.
- Greer, J. L., Meza, L. R. & Greer, F. *Fabrication and deformation of three-dimensional hollow ceramic nanostructures*. En *Nature materials*, 12, 893-898, 2013.
- Greer, J. L. & Meza, L. R. *Mechanical characterization of hollow ceramic nanolattices*. En *J Mater Sci*, 49, 2496-2508, 2014.
- Greer, J. L., Meza, L. R. & Das, S. *Strong, lightweight, and recoverable three-dimensional ceramic nanolattices*. En *Science*, 345 (6202), 1322-1326, 2014.
- Greer, J. L., Meza, L. R. & Zelhofer, A. J. *Resilient 3D hierarchical architected metamaterials*. En *PNAS*, 112 (37), 11502-11507, 2015.
- Greer, J. L., Vyatskikh, A. & Kudo, A. *Additive manufacturing of 3D nano-architected metals*. En *Nature Communications*, 9 (593), 1-8, 2018.
- Hernández, S. M. & Solache de la Torre, S. C. *Applications of nanocomposites in architecture and construction*. En *Contexto*, 11 (14), 63-75, 2017.
- Ocampo, E. R. *Nanotecnología aplicada a la arquitectura*. En *Revista Electrónica Nova Scientia*, 3 (5), 179-193, 2010.
- Scott, T.C. & Marketos, P. *On the origin of the Fibonacci Sequence*. En *MacTutor History of Mathematics*, 1-46, 2014.