

DE PIXEL A VOXEL. ARQUITECTURA ENTRE IDENTIDAD LÍQUIDA E IMAGEN FÍSICA

FROM PIXEL TO VOXEL. ARCHITECTURE BETWEEN LIQUID IDENTITY AND PHYSICAL IMAGE

Emanuela Lanzara

doi: 10.4995/ega.2019.11259

La actividad de investigación dedicada a la gestión y comunicación de formas arquitectónicas complejas favorece al *voxel*, *volumetric pixel* (*picture element*), como principal herramienta tecnológica que caracteriza la producción física y virtual de la segunda era digital. El proceso de voxelización distorsiona y fragmenta la imagen fluida y abstracta de la arquitectura líquida que caracteriza la primera era digital. Desde la arquitectura calculada a la construida, el proceso de voxelización manipula la imagen del proyecto para encontrar una solución tecnológicamente más accesible. Las imágenes de los experimentos artísticos y arquitectónicos más recientes, resultado de herramientas digitales generativas y computacionales consolidadas, testifican un enfoque de diseño caracterizado por un tecnicismo avanzado. Por lo tanto, esta comunicación nos invita a reflexionar sobre el impacto visual de la necesidad actual de inmediatez resolutiva y optimización económica constructiva, expresiones de la sociedad contemporánea, que son determinantes en la figuración del concepto de complejidad arquitectónica.

PALABRAS CLAVE: VOXEL. IMPRESIÓN 3D. INNOVACIÓN. SOCIEDAD

The technological approach of the second digital era promotes voxel, volumetric pixel (picture element) as the most suitable tool for the management and communication of complex architectural shapes. The process of voxelisation disturbs and fragments the fluid and abstract image of the liquid architecture characterizing the first digital age. From figured to built architecture, this process manipulates architectural image looking for an optimized technological solution. The most recent artistic and architectural experiments, produced by generative and computational digital tools, testify a technically advanced design approach. Therefore, the goal of this contribution is to reflect about the visual impact that visual immediacy and economic-constructive optimization, both as expression of contemporary society, determines on the representation of architectural complexity.

KEYWORDS: VOXEL. 3D PRINTING. INNOVATION. SOCIETY

1. Noiz, Dune city for WIRED, 2014 (en la portada)
2. Nox, The three graces, 2008. La comparación entre las imágenes 1 y 2 muestra el contraste entre arquitectura líquida y voxelización (enfoque racionalista)
3. Kurokawa, K., Nakagin Capsule Tower, 1972. La torre, un raro ejemplo de arquitectura construida por el movimiento metabólico japonés posterior a la Segunda Guerra Mundial, es el primer ejemplo en el mundo de la aplicación en serie de cápsulas de alojamiento modular
4. Kurokawa, K., Toshiba-IHI, Expo 1970, Osaka
5. Wenger, H.& P., Swiss Pavilion, Expo 1970, Osaka



2

1. Noiz, Dune city for WIRED, 2014 (on the cover)
2. Nox, The three graces, 2008. The comparison between images 1 and 2 shows the contrast between liquid architecture and voxelization (rationalist approach)
3. Kurokawa, K., Nakagin Capsule Tower, 1972. The tower, a rare example of architecture built by the Japanese Metabolist Movement after the Second World War, is the first example in the world of mass construction and assembly of modular housing capsules
4. Kurokawa, K., Toshiba-IHI, Expo 1970, Osaka
5. Wenger, H.& P., Swiss Pavilion, Expo 1970, Osaka

La imagen de la complejidad: una nueva voluntad de forma

'The first digital turn in architecture changed our ways of making; the second changes our ways of thinking'.

Esta reflexión de Mario Carpo (2017) introduce la poética romántica y tecnicista que describe el perfil de la segunda era digital. El propósito de esta contribución es demostrar la tesis de que el uso de *voxels*, partículas volumétricas agregadas, está transformando la imagen de la forma arquitectónica compleja en beneficio de una fabricación optimizada.

Los *voxels*, portadores o codificadores de información, consisten en módulos digitales inteligentes.

Las actividades de investigación multidisciplinar favorecen el uso de esta tecnología digital, desarrollada para la gestión de imágenes virtuales complejas, para el procesamiento optimizado de objetos físicos.

El diseñador francés Nicholas Ghesquière, director creativo de la Maison Louis Vuitton, durante una entrevista dedicada a la colaboración con el holding japonés Square Enix, empresa que fusiona el mundo de los videojuegos y la alta moda, hace una afirmación



3

The image of complexity: a new will to form

'The first digital turn in architecture changed our ways of making; the second changes our ways of thinking'.

Mario Carpo (2017) introduces the romantic-technical poetics that outlines the profile of the second digital era. The goal of this contribution is to demonstrate the thesis that the use of voxels, aggregatable volumetric particles, is transforming the image of complex architectural shape to benefit of greater feasibility. Voxels are vectors or encoders of information, therefore intelligent digital modules. Multidisciplinary research activities encourage the use of this digital technology specially developed for the management of complex virtual images to create physical objects.

French designer Nicholas Ghesquière, creative director of Louis Vuitton Maison, collaborating with the Japanese holding company Square Enix established to merge the videogame and high fashion sectors, makes a particularly stimulating statement for any sector that uses the image as a communication tool: 'How do you create an image that goes beyond the classic principles of photography and design?'. (Mc Carthy. C., 2016)

Moving the same thought to the built environment, the constant evolution that affects the Virtual - Augmented - Mixed Reality sector allows to travel through the digital reconstructions of existing places that have inspired the computer game developers for the realization of their products 1.

Therefore, the management of virtual images



4



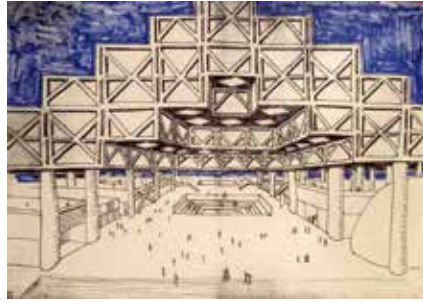
5



6. Archigram, Oasis Project, 1968
 7. Y. Friedman, Entry Proposal visualization for La Défense Paris competition, 1980
 8. A. Tedeschi, Cloudbridge, 2013
 9. dbt, Smartbrick project, 2017/18
 10. Transfiguración de la forma arquitectónica: desde sistema primitivo hasta complejo. Desde una simple primitiva es posible pasar a un sistema complejo conservando la misma lógica distributiva desde la envoltura (sistema de los agujeros) a la tipología arquitectónica (edificio de la corte) A la izquierda: la columna muestra una secuencia, temporal y geométrica, de arquitecturas "icono" de diferentes épocas: antigua, moderna y contemporánea. (de abajo hacia arriba: l'Anfiteatro Flavio o Colosseo_Roma, 72 d. C.; il Palazzo della Civiltà italiana o Colosseo quadrato_Roma, 1937; la Casa del Fascio_Como, 1936; il Selfridge Department Store_Birmingham, 2003; il Bulbous shaped stadium_Borisov, 2014); en el centro: la figura muestra la transformación cíclica iterativa que une una forma primitiva / de referencia - Voxel (racionalización de la forma inicial) - forma compleja - voxelización / simplificación de la complejidad - forma compleja, etc.; abajo: diagrama lógico - funcional del proceso algorítmico iterativo de división y subdivisión de una primitiva. De configuración sólida a *wireframe*. (Figura y procesamiento conceptual del autor)



6



7



8



9

influences the physical image of complex digital experiments also in the field of built Architecture and Design.

To demonstrate this thesis it is necessary to take a step back in time.

The first digital era has chosen the curve as the main design tool and it has generated shapes whose spatiality is predominantly delineated by curved and continuous surfaces. This approach has left an indelible mark on the figuration of contemporary architecture. Therefore, the first digital age is defined by a narcissistic architecture and committed to the spectacularization of its own image.

For this reason it is different from the intelligent architecture produced by the second digital age.

It is a soft, hazy nucleus, the core of a socio-cultural reactor that has triggered a series of reactions in which different disciplinary sectors act together to synthesize more concrete and conscious outcomes: in a single word, an implicit source of innovation from which to generate important advances in different research fields.

However, thanks to the continuous 'recourse to human things' (Vico, 1744), architecture and product design are pushing towards the visual communication of 'how it works' and not 'how it appears' (Viola, 2011).

The fascination of the most architectural design recent experiments does not lie in the exploration and communication of abstract shapes but in the mechanisms between the

particularmente estimulante para cualquier sector que utiliza la imagen como medio de comunicación: '¿Cómo creas una imagen que va más allá de los principios clásicos de la fotografía y el diseño?'. (McCarthy, C., 2016)

De moda a entorno construido, la evolución constante del sector de realidad virtual, mixta y aumentada nos permite viajar a través de reconstrucciones digitales de lugares existentes donde los desarrolladores de juegos de computadora se han inspirado para hacer sus productos 1.

6. Archigram, Oasis Project, 1968
 7. Y. Friedman, Entry Proposal visualization for La Défense Paris competition, 1980
 8. A. Tedeschi, Cloudbridge, 2013
 9. dbt, Smartbrick project, 2017-18
 10. Transfiguration of the architectural form: from primitive to complex system. From a primitive to a complex system preserving the same distributive logic from the envelope (openings system) to the architectural typology (court building). On the left: the images shows a temporal and geometric sequence of "icon" architectures from different eras: ancient, modern and contemporary. From the bottom to the top: Anfiteatro Flavio o Colosseo, Rome, 72 d. C.; Palazzo della Civiltà italiana or Colosseo quadrato, Rome, 1937; Casa del Fascio, Como, 1936; the Selfridge Department Store, Birmingham, 2003; Bulbous shaped stadium, Borisov, 2014. In the center, the figure shows the cyclic iterative transformation of a starting primitive: Primitive - Voxel (rationalization of the initial shape) - complex shape - voxelization / simplification of complexity - complex shape, etc.; Below: logical-functional diagram of the iterative algorithmic subdivision process of a primitive. From full volume to wireframe configuration. (Figure and logical processing by the author)

Por tanto, es evidente cómo la gestión de imágenes virtuales puede influir en la construcción de la imagen física de experimentos digitales complejos también en el campo de la arquitectura y el *design*.

Para demostrar esta tesis es necesario dar un paso atrás en el tiempo.

La primera era digital ha elegido la curva como el principal instrumento de dibujo y proyecto arquitectónico, generando formas cuya espacialidad parece estar delineada sobre todo por superficies curvas y continuas, dejando una marca indeleble en la figuración de la arquitectura contemporánea.

Por tanto, es posible hablar de una arquitectura narcisista, comprometida con la espectacularización de su imagen y por esta razón diferente de la arquitectura inteligente producida por la segunda era digital.

Este enfoque representa un núcleo suave y nebuloso, un reactor sociocultural que ha desencadenado una serie de reacciones en las que diferentes sectores disciplinarios reaccionan para sintetizar resultados más concretos y cons-





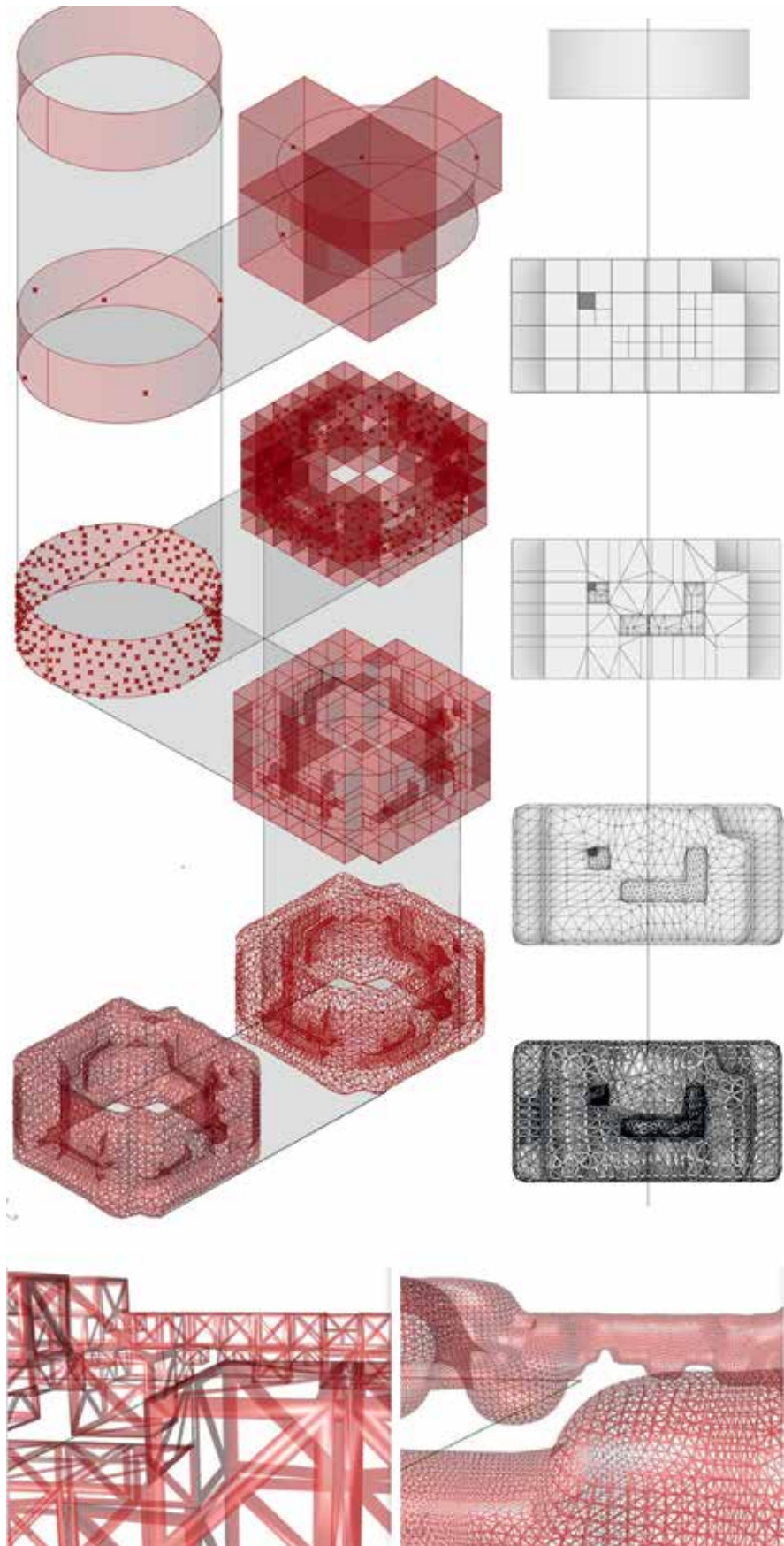
parts that make up the entire system. The computing power of the new tools and the technical poetics of the second digital age have progressively generated a phenomenon of mass digital standardization. The optimisation processes have always been inspired by the principle of modularity. Therefore, they have progressively led to an evident process of continuity fragmentation: an extremely technical physical image, composed of the repetition of modular particles sometimes totally indifferent to the support, overlaps with a complex and intangible image.

In *Liquid Modernity*, Zygmunt Bauman (2002) compares the concept of 'modernity' and 'post-modernity' respectively to the 'solid' and 'liquid' state of society (Fig. 1). Therefore, the post-modern space of the first digital era appears uncertain, unconsciously dominated by the mutability and frenzy of the social dynamics in which it develops. On the contrary in *The Second Digital Turn. Design beyond Intelligence*, Mario Carpo (2017) speaks about an architecture and a design that derive from a new professional consciousness linked to the use of new digital tools, 'no longer tools to create, but tools to think'.

Therefore, recent experiments in architecture and product design lead us to reflect on a new 'will – to – form' (Riegler, 1901) directly linked to the current socio-cultural scenario. To support this thesis, Mario Cobuzzi (2012) proposes some interesting reflections elaborated by E. Panofsky. Within his essay *The concept of Kunstwollen* (1920), Panofsky makes a stimulating distinction between 'Kunstwollen' and 'Intention'.

'The concept of artistic will [Kunstwollen] is mainly applied to the global artistic phenomena and creations of an entire epoch, a people or a personality, while the term "artistic intention" is generally used rather to characterize the individual artwork.'

Therefore, the current digital tools aim to standardize complexity by generating a new *Kunstwollen* that materializes in a progressive cancellation of the single formal episode in favor of valid and functioning methodologies aimed at simplifying and optimizing object manufacturing. Architecture is a phenomenon that reflects the culture and identity of its society.





11. Transformación / transfiguración: de modelo sólido / poliédrico (primitiva) a modelo *wireframe* (voxelización). La transformación de la imagen arquitectónica depende del proceso iterativo de discretización de la forma (división) y de la subdivisión y minimización (vaciado/*wireframe*) de los módulos agregados. La agregación determina un cambio perceptivo en la espacialidad independientemente de la forma arquitectónica inicial. Para la ejecución del experimento se utilizó el componente *OcTree* de *Grasshopper* (plug-in del software *Rhino 3D*, *Mc Neel*). (Figura y procesamiento conceptual del autor)

11. Transformation / transfiguration: from starting primitive (reference surface) to wireframe model (voxellization). The architectural image transformation derives from the iterative process of the shape discretization (division) and from the subdivision and minimization of the aggregated modular elements (empty element / wireframe). The aggregation changes the perception of spatiality regardless of the initial architectural shape. The component *OcTree* of *Grasshopper* (plug-in of *Rhino 3D*, *Mc Neel*) allows this experimentation. (Figure and logical processing by the author)

cientes: sintéticamente, una fuente implacable de innovación para generar avances importantes en diferentes campos de investigación.

Sin embargo, a través de la imparable ‘apelación de las cosas humanas’ (Vico, 1744), la arquitectura y el mundo del *product design* están empujando hacia la comunicación visual de ‘cómo funciona’ y no de ‘cómo se ve’ (Viola, 2011).

La fascinación de los experimentos de *architectural design* más recientes no reside en la exploración y comunicación de formas abstractas, sino en el funcionamiento de los mecanismos entre las partes que conforman todo el sistema.

El poder de cálculo sin precedentes de las nuevas herramientas de trabajo y la poética técnica de la segunda era digital han generado progresivamente un fenómeno de estandarización digital masiva.

Los procesos de optimización, que siempre se han inspirado en el principio de modularidad, han conducido progresivamente a un proceso evidente de fragmentación de la continuidad: una imagen física extremadamente técnica se superpone a una imagen compleja e intangible, compuesta por la repetición de partículas modulares a veces totalmente indiferente al soporte que discretizan.

En *Modernidad líquida*, Zygmunt Bauman (2002) compara el concepto de ‘modernidad’ y ‘posmodernidad’ respectivamente con el estado ‘sólido’ y ‘líquido’ de la sociedad (Fig. 1).

El espacio posmoderno, hijo de la primera era digital, parece incierto y inconsciente, dominado por la mutabilidad y el frenesí de la dinámica social que lo anima.

De lo contrario, in *The Second Digital Turn. Design beyond Intelligence*, Mario Carpo (2017) habla de arquitectura y *design* que son el resultado de una nueva conciencia profesional relacionada con el uso de nuevas herramientas digitales, ‘no más herramientas para crear, sino herramientas para pensar’.

Recientes experimentos de arquitectura y *design* nos llevan a reflexionar sobre una nueva ‘voluntad de forma’ (Riegl, 1901), manifestación de la escena sociocultural actual que la genera.

En apoyo de esta tesis, Mario Cobuzzi (2012) propone algunas reflexiones interesantes elaboradas por E. Panofsky que, dentro del ensayo *El concepto de Kunstwollen* (1920), hace una distinción estimulante entre los conceptos de ‘*Kunstwollen*’ y de ‘Intención’:

‘El concepto de voluntad artística [*Kunstwollen*] se aplica principalmente a los fenómenos artísticos globales, a las creaciones de toda una era, a un pueblo o a una personalidad en general, al contrario, el término “intención artística” se usa más bien para caracterizar la única obra de arte’.

Si pensamos que las herramientas digitales actuales apuntan a optimizar y estandarizar la complejidad, se demuestra que nos estamos ante una nueva *Kunstwo-*

Therefore, after an unbridled aesthetic and figurative experimentation, the current search for modularity responds above all to a growing need for economic and constructive optimization.

‘Digital has created a paradigm shift for architecture: the key to modernity lies in the production of identical copies’. (Carpo, 2011) Current digital design and manufacturing experiments choose voxel as a modular particle to simplify the manufacturing and construction processes of architecture: the complex shape becomes a virtual and physical field of simpler modules aggregation. Complex systems are structured on random, unpredictable mechanisms.

The new digital tools allow to approach complexity regardless of its identity using standard elements (*escamotages*) to approach a problem that time to time has a different configuration.

In this sense, can we talk about shape denial? The voxelization extreme solutions sometimes appear technically indifferent to the geometric nature of the spatial configurations of which they are called to build a new image in the name of feasibility.

From *pixel* to *voxel*: between image and function

During the gradual transition between the first and the second digital eras the search for technological solutions to optimise manufacturing processes has steadily taken root in the panorama of digital applications. (Carpo, 2017)

The new calculation tools to manage big data allow to optimize the design, calculation and manufacturing processes: the human mind evidently tends to convert complexity into more manageable geometries.

Before the spread of digital tools, architects used points and curves, objects without volume, to manage complexity in architecture. In the same way, the voxel, a volumetric element, allows to manage in an alternative



way a given basic geometry.

If we consider a point cloud with specific spatial and physical characteristics, the voxel represents a single volume built on each of these geometric points and at the same time, a container of the physical properties of the object.

In a virtual environment, this spatial system optimizes the display, rendering or animation of complex three-dimensional models: a voxelized model is digitally lighter than the correspondent Mesh or Nurbs modeling results. (Majercik et al., 2018)

Thus, technology is strongly contributing to digitize real world by transfiguring the image of physical space with the virtual one, and *viceversa*.

Therefore, the voxel can be transformed from a digital particle into a physical element and it becomes the bridge between the virtual and the real world.

Transfiguration of complexity. A new rationalism?

The shape discretization can affect the perception of the original design image. The aggregation of standard modules recalls the principles of 20th century rationalist poetics (Argan, 1970).

According to the socio-cultural analysis advanced by Carpo (2017), the current design practice recalls the logical processes of science and technology.

As rationalist architecture arises from the social and economic reality of the second industrial revolution, so the architectural experiments of the second digital age represent the direct product of the third industrial revolution.

About the use of voxels in architecture, the Nakagin Capsule Tower (Fig. 2), designed in 1972 by Kisho Kurokawa in the Ginza district in Tokyo, Japan, realizes the metabolism ideas (Figs. 4, and 5) on exchangeability and recyclability as a sustainable architecture prototype (Kurokawa, 2016).

The architecture – capsule design, its residential use and its inclusion in a mega-modular structure express the contemporary with other architectural works dating back to the 1960s, in particular the experiments of Superstudio, Archigram or Yona Friedman (Figs. 6 and 7).

llen que se materializa en la cancelación progresiva del episodio formal expresivo único en favor de metodologías siempre válidas y funcionante, destinadas a simplificar y optimizar la realización del objeto.

La arquitectura es un fenómeno que refleja la cultura y la identidad de la sociedad que la genera: por tanto, después de una fase desenfadada de experimentación estética-figurativa, la investigación actual sobre modularidad responde ante todo a una creciente necesidad de optimización económica-constructiva.

‘Lo digital ha creado un cambio de paradigma para la arquitectura: la clave de la modernidad reside en la producción de copias idénticas’. (Carpo, 2011)

Experimentos recientes de dibujo y fabricación digital eligen el *voxel* como una partícula modular capaz de simplificar los procesos de fabricación y construcción de la arquitectura: la forma compleja se convierte en un campo virtual y físico de agregación de módulos más simples.

Los sistemas complejos están estructurados en mecanismos aleatorios, impredecibles. Las nuevas herramientas digitales nos permiten abordar la complejidad utilizando elementos estándar, que podríamos definir como escamotajes capaces de abordar un problema que, por su naturaleza, se configura de forma diferente caso por caso.

En este sentido, ¿podemos hablar de negación de forma?

Las soluciones actuales, si consideramos las formas de voxelización más extremas, a veces pueden parecer técnicamente indiferentes a la naturaleza geométrica de las configuraciones espaciales iniciales.

12. I cube, 2013. La instalación, diseñada por un grupo de investigación coordinado por el prof. Ken Yokogawa, de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Nihon, puede considerarse uno de los primeros experimentos de voxelización geométrica de la forma

13. Noiz architects, ITRI Voxel Scape, 2014, Nantou, Taiwán, China. La instalación está inspirada en el paisaje montañoso de Nantou y trabaja en la integración entre la tecnología digital y la cultura local

14. A. Andrasek, B. Juricic´ Cloud Drawing, 2018, Bienal de Venecia. La instalación integra la imagen de los datos meteorológicos del sitio en la estructura mediante el desarrollo de la definición de una nueva solución tectónica alternativa

15. Brian. W. Brush y Steinberg Architects, Voxels Cloud, 2107, San Jose, California, Estados Unidos. El sistema de iluminación diseñado para delinear el horizonte de Pierce, una nube dinámica de voxels formada por una serie de leds RGB, se adapta perfectamente al perfil del edificio que lo alberga, configurándose como un medio volumétrico de transformación espacial y experiencial

16. Ai Build en colaboración con Arup Engineers, Daedalus Pavilion, 2016. La instalación ha sido diseñada para la NVIDIA's GPU Technology Conference (Ámsterdam). El objetivo principal de este experimento es aumentar la velocidad y la precisión de la impresión 3D a gran escala

12. I cube, 2013. The installation, designed by a research group coordinated by prof. Ken Yokogawa of the Universidad de Ciencia y Tecnología de Nihon, can be considered one of the first voxelization experiments

13. Noiz architects, ITRI Voxel Scape, 2014, Nantou, Taiwán, China. The installation is inspired by the mountainous landscape of Nantou and it works on the integration between digital technology and local culture

14. A. Andrasek, B. Juricic´, Cloud Drawing, 2018, Biennial of Venice. The installation integrates the site meteorological data into the structure to look for an alternative tectonic solution

15. Brian. W. Brush y Steinberg Architects, Voxels Cloud, 2107, San Jose, California, USA. The lighting system designed to outline the Pierce skyline, a dynamic voxels cloud composed of a series of RGB leds, perfectly follows the building profile and it allows a spatial and experiential transformation

16. Ai Build, in collaboration with Arup Engineers, Daedalus Pavilion, 2016. The installation is designed for the NVIDIA's GPU Technology Conference (Ámsterdam). The main goal of this experiment is to increase the speed and accuracy of 3D printing on the large architectural scale



12



14



13



15



16

De píxel a voxel: imagen y función.

Desde la primera hasta la segunda era digital, la investigación sobre las soluciones tecnológicas capaces de optimizar los procesos de fabricación se ha consolidado en el panorama de las aplicaciones digitales. (Carpo, 2017)

Las nuevas aplicaciones de cálculo, dirigidas a la gestión de *big data*, permiten optimizar los procesos de proyecto, cálculo y fabricación, y está claro que la mente humana siempre ha tendido a convertir la

complejidad en formas geométricas más manejables.

Desde un punto de vista gráfico, antes de la difusión de herramientas digitales, los arquitectos utilizaron puntos y curvas, objetos sin volumen, para gestionar la complejidad de la arquitectura.

Asimismo, el *voxel*, elemento volumétrico, permite una gestión alternativa de una geometría básica.

Si consideramos un cuerpo digital, una nube de puntos con características físicas y espaciales específicas, el *voxel* representa un volumen construido en cada uno de

The geometrical-compositional characteristics, the design logic and the socioeconomic ambition make these architectural episodes as the possible ancestors of the most recent technological experiments.

Innovation as image: the impact on Architecture and Design

The surprising possibility of exploiting the voxel as a modular information vector is realized in different experimental products that interpret and translate the transformation process, or transfiguration, of the shape image (Figs. 8 and 9).



17. Design Computation Lab (DCL), Bartlett School of Architecture, Voxel chair 1.0, 2017, Londres. La silla se inspiró en la famosa silla Panton diseñada por Verner Panton en 1960 y producido por Vitra

Therefore, from theory to practice, the goal is to reflect on the voxelization processes effects in the Architecture and Design fields (Figs. 10 and 11).

Analyzing the voxelization process from a mainly iconic point of view it is possible to distinguish between applications based on the simple decomposition of the shape into volumes and experiments that fully exploit the vehicular function of the voxel.

To support this analysis, the selected case studies demonstrate a growing technological specialization of the basic module used to discretize and reconstruct the architectural design shapes (Figs. 12 - 19).

Biomimetics, a discipline that elaborates and theorizes the application of the rules of nature as a source of inspiration for

17. Design Computation Lab (DCL), Bartlett School of Architecture, Voxel chair 1.0, 2017, London. The piece is inspired by the famous Panton chair designed by Verner Panton in 1960 and produced by Vitra

estos puntos geométricos y, al mismo tiempo, un contenedor de las propiedades físicas del objeto.

En un entorno virtual, este sistema espacial optimiza la visualización, la representación o la animación de modelos tridimensionales complejos: un modelo digital discretizado en *voxels* es de hecho digitalmente más ligero que los resultados de las técnicas de modelado *mesh* o *NURBS* (Majercik et al., 2018).

Es evidente que la tecnología está contribuyendo fuertemente a la digitalización del mundo real, trans-

figurando la imagen del espacio físico con el virtual, y viceversa.

Por tanto, es plausible pensar que el *voxel*, desde partícula digital se puede transformar en un elemento físico, convirtiéndose así en el puente que permite el paso directo entre el mundo virtual y el real.

Transfiguración de la complejidad. ¿Un nuevo racionalismo?

La modalidad de discretización de la forma puede condicionar la percepción de la imagen original del proyecto. El recurso a la agregación de módulos estándar tiende a recordar los principios de la poesía racionalista del siglo xx (Argan, 1970).

Alineado con el análisis sociocultural avanzado por Carpo (2017), la práctica actual del proyecto arquitectónico recuerda los procesos lógicos de la ciencia y la tecnología. Como la arquitectura racionalista surgió de la necesidad de adherir a la realidad social y económica que resultó en la segunda revolución industrial, los experimentos arquitectónicos de la segunda era digital son el producto directo de la tercera revolución industrial.

La Nakagin Capsule Tower (Fig. 2), proyectada en 1972 por Kisho Kurokawa en el distrito de Ginza, en Tokio, Japón, nos hace darnos cuenta de las ideas de metabolismo (Figs. 4 y 5), intercambiabilidad, reciclabilidad como prototipo de arquitectura sostenible (Kurokawa, 2016).

La conformación de la arquitectura-cápsula, su uso residencial y su inclusión en una estructura megamodular expresan la contemporaneidad con otros proyectos arquitectónicos que datan de los años '60, en particular con los experimentos utópicos caracterizados por





el uso de materiales, formas simples, espacios accesibles y flexibles de los grupos Superstudio, Archigram o Yona Friedman (Figs. 6 y 7).

Las características geométricas y compositivas, la lógica del proyecto y la ambición socioeconómica hacen estos episodios arquitectónicos los posibles antepasados de los experimentos tecnológicos más recientes que son objeto de este estudio.

Innovación como imagen: el impacto en la arquitectura y el design

La sorprendente posibilidad de explotar el *voxel* como un vector de información modular se materializa en varios productos experimentales que interpretan y traducen el proceso de transformación de la imagen, o transfiguración, de la forma (Figs. 8 y 9).

Por tanto, de la teoría a la práctica, el objetivo de la investigación es reflexionar sobre los efectos de los procesos de voxelización en los campos de Arquitectura y *Design* (Figs. 10 y 11).

Al analizar el fenómeno de la voxelización desde un punto de vista predominantemente icónico, es posible distinguir entre aplicaciones basadas en la descomposición de la forma en volúmenes simples y experimentos que explotan la función vehicular del *voxel*.

En apoyo de este análisis, las imágenes de los casos de estudio seleccionados demuestran una especificación tecnológica creciente del módulo básico utilizado para discretizar y recomponer las arquitecturas diseñadas (Figs. 12 - 19).

La biomimética, disciplina que elabora y teoriza la aplicación de las reglas de la naturaleza como

fuente de inspiración para la mejora de las actividades y tecnologías humanas (Pagani, Chiesa y Tulliani, 2013), representa un campo fértil en el que experimentar el uso de la lógica *voxel* para generar vectores físicos dirigidos a la optimización de procesos constructivos.

Este proceso, denominado '*data physicalization*' (Jansen, 2015) o '*physical visualization*' (Jansen, Dragicevic y Fekete, 2013), transforma una serie de datos técnico-científicos en elementos tangibles.

Los *voxels* se utilizan ampliamente en el campo médico-científico para la visualización volumétrica de datos provenientes de tomografía computarizada (TC) o imágenes de resonancia magnética (RM).

La manipulación de estos datos está dirigida al reconocimiento y la extrapolación de patrones tridimensionales a partir de imágenes en 2D o segmentos en 3D derivados de una gran variedad de dominios geométricos disponibles.

El objetivo principal es reconocer aquellos patrones capaces de desencadenar un proceso generativo-paramétrico de cuadrículas de base sobre las cuales modelar la composición de las partículas volumétricas.

De esta manera, es posible desarrollar un *know-how* técnico específico basado en el uso de bibliotecas generativas para el manejo de datos 3D de *input / output* utilizables para diseñar estructuras geométricas 2.

Los investigadores que analizan la composición del tejido óseo han creado algoritmos especiales para generar estructuras celulares tridimensionales: el resultado de este experimento es la abstracción de una microestructura geométrica obtenida de la estructura del hueso trabecular (Singanamalla, 2017).

the improvement of human activities and technologies (Pagani, Chiesa and Tulliani, 2013), represents a fertile field to experiment the use of voxel logic to generate physical vectors aimed to optimize manufacturing processes.

This process, defined '*data physicalization*' (Jansen, 2015) or '*physical visualization*' (Jansen, Dragicevic ad Fekete, 2013), allows to transform a series of technical and scientific data into tangible elements. Voxels are widely used in the medical-scientific field for the volumetric visualization of data coming from computerized tomography (CT) or magnetic resonance (RM).

The manipulation of these data is aimed on the recognition and extrapolation of three-dimensional patterns starting from 2D images or from 3D segments deriving from a large variety of available geometric domains. The main goal is to recognize the patterns that trigger a parametric-generative process of basic grids to model the volumetric particles composition to develop a specific technical know-how based on the use of real generative libraries for the management of 3D input / output data for geometric-design goals 2.

Looking at the composition of bone tissue the researchers created special algorithms to generate three-dimensional cellular structures: the result of this experiment is the abstraction of a geometric microstructure obtained from the trabecular bone structure (Singanamalla, 2017). Figure 19 shows one of the recent results about the experimentation of this process.

Conclusions and future goals

The most recent cases study show that structural optimization represents the main goal of new efficient and economically accessible manufacturing and construction methods.

In the field of 3D printing techniques, current optimization processes aim to minimize material waste according to performing and aesthetic reasons (Keating, 2017).

The performance of a light structure strictly depends on the optimal distribution of the material chosen to manufacture a specific architectural element (Bletzinger y Ramm, 2001).



The future goal of this critical and applicative analysis is to experiment the action of several external agents to configure a structurally performing modular element (Papageorge, 2018) and, at the same time, in relation to other external natural or induced parameters. The computational and algorithmic design allows the simulation of external actions to define the possible geometric transformations of a generic starting shape (Dobrovski, 2015).

Figure 20 shows a series of experiments using some of the *noise algorithms* of 3D modeling, rendering and animation software *Cinema 4D (Maxon Computer GmbH)* 3.

This software allows to choose different types of disturbance fields: each of them corresponds to a specific voxelization of the starting geometric primitive (Fig. 21).

These different inputs are geometrically translated into flat textures or chromatic gradients (in yellow and red), break down the primitive and transform it into a three-dimensional aggregation of voxels. The geometric configuration of the modular elements that compose the sequence of images coincides with the three-dimensional representation of the perturbations produced by different acoustic effects on the points of the cube primitive.

The resolution of the physical images deriving from the different voxelization processes depends on the size of the voxels that compose the different perturbing fields configurations: these values can be modified by the user.

In conclusion, the future research goals are the performance and structural analysis of the parametric configurations deriving from this approach. The results can be used to experiment medium-scale architectural elements or as aggregated optimized modular elements. The second case requires the study of distribution solutions that allow the spatial aggregation of the different modular elements in order to compose a continuous structural and technological system.

The main goal is to experiment and implement the discretization techniques aimed at the fabrication of complex shapes, verifying the advantages and criticalities of the reference geometries, 3D printing, acoustic, structural and aesthetic performances. ■

La figura 19 muestra uno de los resultados recientes de este proceso.

Conclusiones y objetivos futuros

Los casos mencionados muestran que la optimización estructural y de los materiales representan los principales objetivos de la investigación dedicada a la implementación o experimentación de técnicas de fabricación eficientes y económicamente accesibles.

En particular, como parte de las técnicas de fabricación aditiva, los procesos de optimización actualmente probados apuntan a minimizar el desperdicio de material dictando exactamente la cantidad y la distribución para asegurar un rendimiento y una estética optimizadas (Keating, 2017).

En resumen, el rendimiento de una estructura liviana depende estrictamente de la distribución óptima del material elegido para la fabricación de un elemento arquitectónico específico (Bletzinger y Ramm, 2001).

El objetivo futuro de este análisis crítico es experimentar la configuración de un módulo performante desde el punto de vista estructural (Papageorge, 2018) y, al mismo tiempo, en relación con otros parámetros externos, naturales o inducidos, como la acústica, la luz o el calor.

Las herramientas CAD tradicionales permiten el diseño de volúmenes a los que se aplica un material homogéneo en la fase de modelado.

El *design* computacional y algorítmico permite la simulación de acciones externas capaces de delinear las posibles configuraciones geométricas que una forma de inicio genérica puede asumir (Dobrovski, 2015).

18. J. Kittanen (Sistema 3D), So Good sofá, 2015. La estructura, impresa en una sola pieza, está inspirada en la geometría de telarañas y capullos de gusanos de seda. El mide 1,5 m de largo y está hecho de resina

19. ACTLAB, (Departamento ABC del Politécnico de Milán), Trabecular Pavilion, 2017

La estructura es realizada en colaboración con ITKE - Universidad de Stuttgart, Filoalfa y WASP. El objetivo del experimento es probar el comportamiento de las estructuras ligeras y resistentes a través de una distribución optimizada del material, un biopolímero de alta resistencia

18. J. Kittanen (Sistema 3D), So Good sofá, 2015.

The structure is inspired by the geometry of the silkworms cobwebs and cocoons. It measures 1.5 m in length and is made of resin

19. ACTLAB, (ABC Department, Politecnico of Milan), Trabecular Pavilion, 2017.

The structure is realized in collaboration with ITKE - Stuttgart University, Filoalfa and WASP.

The goal of the experiment is to test the behavior of light and resistant structures through an optimized distribution of the material, a high resistance biopolymer

La figura 20 muestra una secuencia de imágenes relacionadas con un experimento digital realizado utilizando el algoritmo de ruido *Sema* del software de modelado, animación y renderizado 3D *Cinema 4D (Maxon Computer GmbH)* 3.

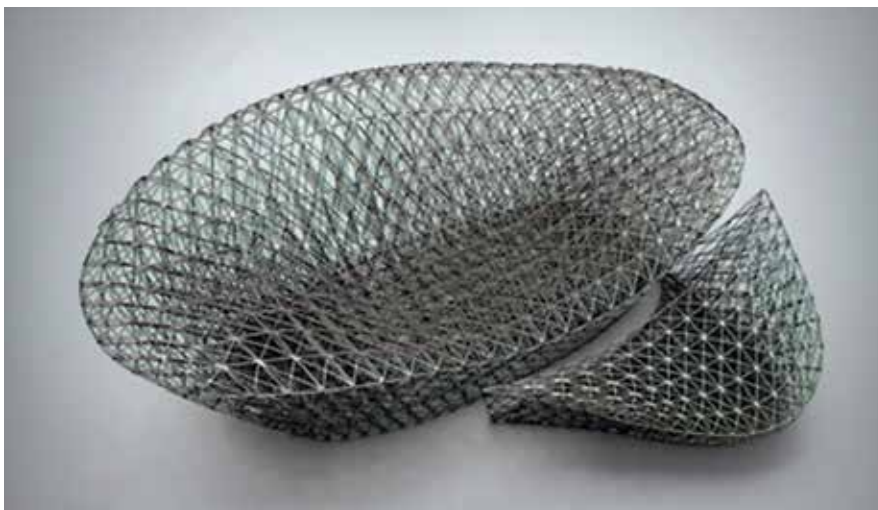
El software le permite elegir diferentes tipos de campos: a cada uno de ellos corresponderá una voxelización específica de la primitiva original (Fig. 21).

Los diferentes tipos de perturbaciones, geométricamente traducidas en forma de *texture* de curvas, gradientes cromáticos o cuadrículas planas (en amarillo y rojo), descomponen la primitiva transformándola en una agregación tridimensional de *voxels*.

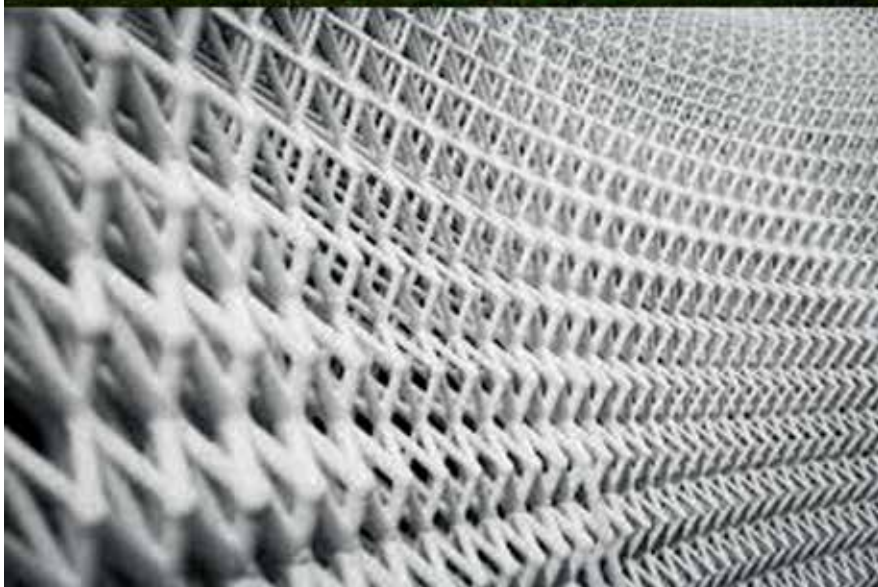
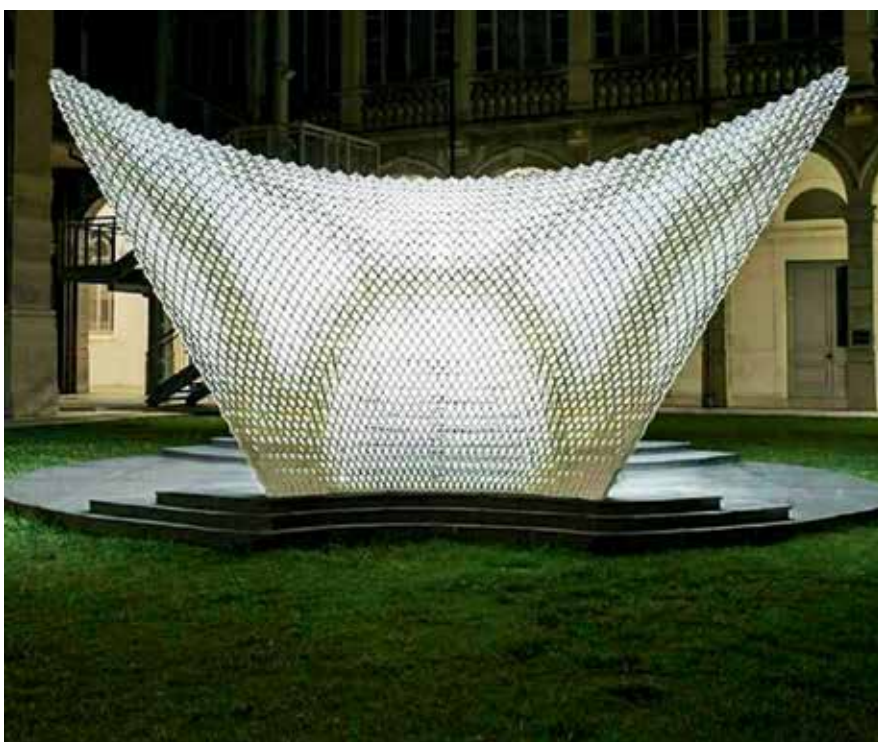
Las posibles tipologías agregativas a través de las cuales es posible transformar el objeto de inicio coinciden con la representación tridimensional de la acción mecánica perturbadora en los puntos que discretizan la primitiva geométrica inicial.

Por tanto, el sistema puede ser asimilado a una nube de puntos perturbables en función de una fuerza de actuación externa.

La resolución de la imagen física de los sistemas agregados dependerá del tamaño de los voxels que



18



19

Notes

- 1 / The Post Internazionale (TPI) (2016) *I luoghi più famosi dei videogiochi nel mondo reale. Un viaggio virtuale nelle ambientazioni più celebri dei videogames che hanno fatto la storia* [online]. TPI News. Available from: <https://www.tpi.it/2016/05/11/luoghi-famosi-videogiochi-mondo-reale/> [Accessed 06 December 2018]
- 2 / AAG 2018 (2018) *Workshop 6: Deep Form Finding* [online]. AAG 2018. Available from: <http://www.architecturalgeometry.org/aag18/workshop-6-deep-form-finding/> [Accessed 06 December 2018].
- 3/ Tran Phuc, M. (2018) *Cinema 4D. 3D NOISE PALETTE*. [online]. Behance. Available from: <https://www.behance.net/gallery/23596889/Cinema-4D-Noise-Palette> [Accessed 06 December 2018].

References

- ARGAN, G.C. (1970) *L'arte moderna 1770/1970*. Firenze: Sansoni.
- BAUMAN, Z. (2002) *Modernità liquida*. Roma - Bari: Laterza.
- BLETZINGER, K. U., RAMM, E. (2001) Structural Optimization and form finding of light weight structures. *Computers & Structures*. [Online] volume 79 (22). Deepdyve. Available from: <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/structural-optimization-and-form-finding-of-light-weight-structures-29rSYNJMx9> [Accessed 06 December 2018].
- CARPO, M. (2011) *The Alphabet and the Algorithm*. Mit Press.
- CARPO, M. (2017) *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*. Mit Press.
- COBUZZI, M. (2012) *Il Kunstwollen secondo Panofsky*. [Online] Kunst. Appunti di storia dell'arte. Available from: <http://appuntidistoriadellarte.blogspot.com/2012/10/il-kunstwollen-secondo-panofsky.html> [Accessed 06 December 2018].
- DOUBROVSKI, E.L., TSAI, E.Y., DIKOVSKY, D., GERAEDTS, J.M.P., HERR, H. and OXMAN, N. (2015) Voxel-based Fabrication through Material Property Mapping: a Design Method for Bitmap Printing. *Computer-Aided Design*. [Online]. Elsevier, Volume 60, pp. 3-13. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.05.010> [Accessed 06 December 2018].
- JANSEN, Y., DRAGICEVIC, P. and FEKETE, J.-D. (2013) Evaluating the efficiency of physical visualizations. In: *Proceedings of the 2013 Annual Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2013)*, Paris, France. ACM, pp.2593-2602.
- JANSEN, Y., DRADICEVIC, P., ISEBERG, P., ALEXANDER, J., KARNIK, A., KILDAL, J., SUBRAMANIAN S. and HORNBAEK, K. (2015) Opportunities and challenges for data physicalization. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, (CHI)*, New York, NY, United States. Available from: <https://hal.inria.fr/hal-01120152/document> [Accessed 06 December 2018].
- KEATING, S., LELAND, J., CAI, L., and OXMAN, N. (2017) Towards Site-Specific and Self-Sufficient Robotic Fabrication on Architectural Scales. *Science Robotics*. [Online]. Volume 2, Issue 5. DOI: 10.1126/scirobotics.aam8986 [Accessed 06 December 2018].
- KUROKAWA, K. (2016) *Nakagin Capsule Tower in Tokyo* / Kisho Kurokawa + ArchEyes [Online]

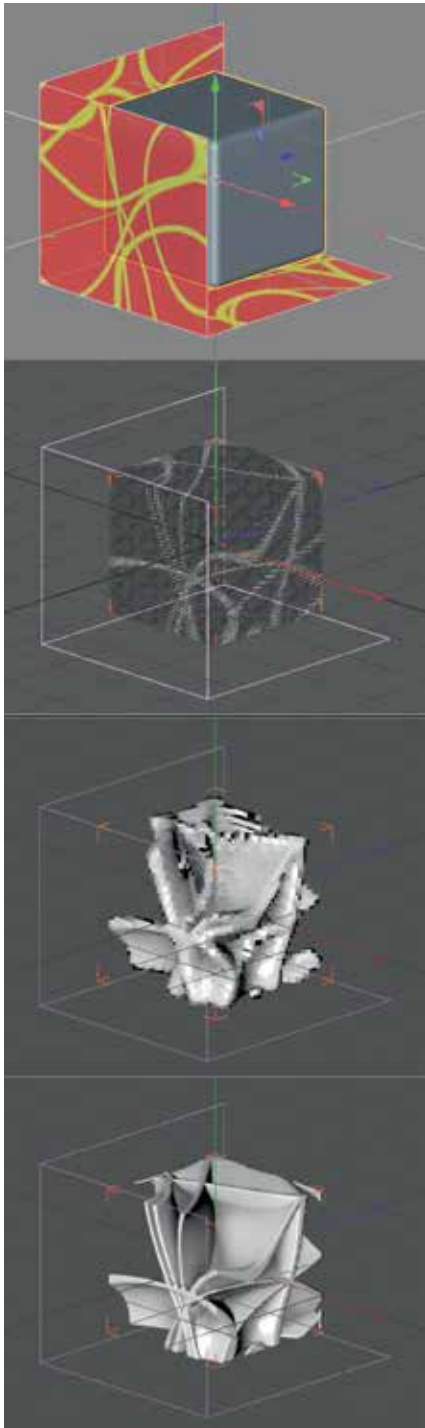


20. Voxelización de una primitiva geométrica. El experimento digital se realizó utilizando el *noise algorithm Sema* del software *Cinema 4D* (Maxon Computer GmbH). (Figura del autor)

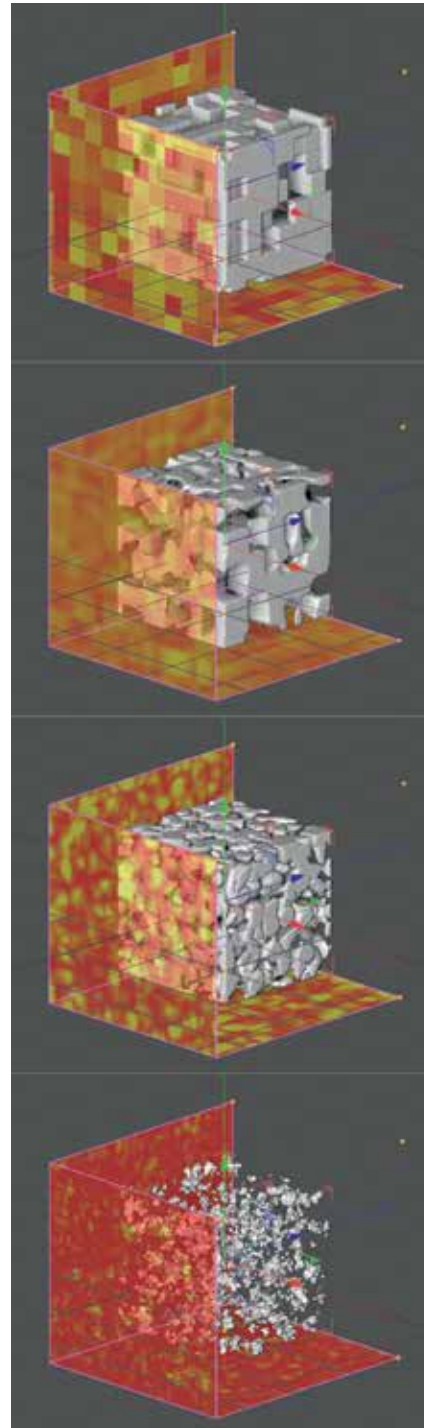
21. Voxelización de una primitiva geométrica. El experimento digital se realizó utilizando los *noise algorithm Cell, Dents, Box, Buya* del software *Cinema 4D* (Maxon GmbH). (Figura del autor)

20. Voxellization of a geometric primitive. The digital experiment uses the *noise algorithm Sema* of the software *Cinema 4D* (Maxon Computer GmbH). (Figure by the author)

21. Voxellization of a geometric primitive. The digital experiment uses the *noise algorithms Cell, Dents, Box, Buya* of the software *Cinema 4D* (Maxon GmbH). (Figure by the author)



conforman la nueva configuración y de la escala de las texturas que traducen gráficamente cada una de las perturbaciones disponibles: estos valores pueden ser modificados por el usuario.



En conclusión, los objetivos futuros de esta investigación son la selección y el análisis estructural de las configuraciones paramétricas derivadas de la experimentación de este enfoque.

Los resultados pueden considerarse como productos finales potencialmente verificables en la escala arquitectónica media y como unidades modulares que pueden agregarse.

El segundo caso requiere la investigación de soluciones de distribución que permitan la agregación espacial de los diferentes módulos en distintas direcciones para derivar un sistema estructural y tecnológico continuo.

El objetivo principal es experimentar y implementar las técnicas de discretización dirigidas a la producción de formas complejas, verificando las ventajas y criticidades en términos de aproximación de geometrías de referencia, impresión 3D, funcional, estructural y estética. ■

Notas

1 / The Post Internazionale (TPI) (2016) *I luoghi più famosi dei videogiochi nel mondo reale. Un viaggio virtuale nelle ambientazioni più celebri dei videogames che hanno fatto la storia* [online]. TPI News. Available from: <https://www.tpi.it/2016/05/11/luoghi-famosi-videogiochi-mondo-reale/> [Accessed 06 December 2018]

2 / AAG 2018 (2018) *Workshop 6: Deep Form Finding* [online]. AAG 2018. Available from: <http://www.architecturalgeometry.org/aag18/workshop-6-deep-form-finding/> [Accessed 06 December 2018].

3 / Tran Phuc, M. (2018) *Cinema 4D. 3D NOISE PALETTE*. [online]. Behance. Available from: <https://www.behance.net/gallery/23596889/Cinema-4D-Noise-Palette> [Accessed 06 December 2018].

Referencias

- ARGAN, G.C. (1970) *L'arte moderna 1770/1970*. Firenze: Sansoni.
- BAUMAN, Z. (2002) *Modernità liquida*. Roma - Bari: Laterza.
- BLETZINGER, K. U., RAMM, E. (2001) Structural Optimization and form finding of light weight structures. *Computers & Structures*. [Online] volume 79 (22). Deepdyve.



- Available from: <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/structural-optimization-and-form-finding-of-light-weight-structures-29-rSYNJmX9> [Accessed 06 December 2018].
- CARPO, M. (2011) *The Alphabet and the Algorithm*. Mit Press.
 - CARPO, M. (2017) *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*. Mit Press.
 - COBUZZI, M. (2012) *Il Kunstwollen secondo Panofsky*. [Online] Kunst. Appunti di storia dell'arte. Available from: <http://appuntidistoriadellarte.blogspot.com/2012/10/il-kunstwollen-secondo-panofsky.html> [Accessed 06 December 2018].
 - DOUBROVSKI, E.L., TSAI, E.Y., DIKOVSKY, D., GERAEDTS, J.M.P., HERR, H. y OXMAN, N. (2015) Voxel-based Fabrication through Material Property Mapping: a Design Method for Bitmap Printing. *Computer-Aided Design*. [Online]. Elsevier, Volume 60, pp. 3-13. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.05.010> [Accessed 06 December 2018].
 - JANSEN, Y., DRAGICEVIC, P. y FEKETE, J.-D. (2013) Evaluating the efficiency of physical visualizations. In: *Proceedings of the 2013 Annual Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2013), Paris, France*. ACM, pp.2593-2602.
 - JANSEN, Y., DRADICEVIC, P., ISENBERG, P., ALEXANDER, J., KARNIK, A., KILDAL, J., SUBRAMANIAN S. y HORNBAEK, K. (2015) Opportunities and challenges for data physicalization. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, (CHI), New York, NY, United States*. Available from: <https://hal.inria.fr/hal-01120152/document> [Accessed 06 December 2018].
 - KEATING, S., LELAND, J., CAI, L., y OXMAN, N. (2017) Towards Site-Specific and Self-Sufficient Robotic Fabrication on Architectural Scales. *Science Robotics*. [Online]. Volume 2, Issue 5. DOI: 10.1126/scirobotics.aam8986 [Accessed 06 December 2018].
 - KUROKAWA, K. (2016) *Nakagin Capsule Tower in Tokyo / Kisho Kurokawa + ArchEyes* [Online] ArchEyes. Available from: <http://archeyes.com/nakagin-capsule-tower-kisho-kurokawa/> [Accessed 06 December 2018].
 - MAJERICIK, A., CRASSIN, C., SHIRLEY P., y MCGUIRE, M. (2018) A Ray-Box Intersection Algorithm and Efficient Dynamic Voxel Rendering. *Journal of Computer Graphics Techniques*. [Online] Vol. 7, No. 3. Available from: <http://www.jcgt.org/published/0007/03/04/paper-lowres.pdf> [Accessed 06 December 2018].
 - MC CARTHY, C. (2016) *La moda nei videogame ispira lo stile del mondo reale*. [Online] IQ. Available from: <https://iq.intel.it/la-moda-nei-videogame-ispira-lo-stile-del-mondo-reale/> [Accessed 06 December 2018].
 - PAGANI, R., CHIESA, G. y TULLIANI, J. M. (2013) *Biomimetica e Architettura. Come la natura domina la tecnologia*. Milano: Franco Angeli Edizioni.
 - PANOFSKY, E. (1920) *Il concetto di Kunstwollen*.
 - PAPAGEORGE, A. (2018) *Free Form 3D Printing. A Sustainable, Efficient Construction Alternative* [online]. Thesis of Master of Architecture, Victoria University of Wellington. Isuu. Available from: https://issuu.com/armanopapageorge/docs/thesis_final [Accessed 06 December 2018].
 - RIEGL, A. (1901) *Die spätromische Kunstindustrie nach den Funden in Oesterreich-Ungarn*. I. Vienna: Teil.
 - SINGANAMALLA, A., 2017-18. *Design of Trabecular structure using voxel – based model*. [online]. Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Master of Science in Design and Engineering. Available from: <http://www.politesi.polimi.it/handle/10589/142261> [Accessed 06 December 2018].
 - VICO, G. (1744) *Principi di Scienza nuova*. Libro quinto [Online]. Available from: http://www.ispf-lab.cnr.it/2015_101.pdf [Viewed 06 November 2018].
 - VIOLA, E., 2011. *Tra contesto e implicitezza per una pragmatica filosofica* [online]. Ph.D. Thesis, Università Ca' Foscari, ciclo 23°. Available from: <https://docplayer.it/2247510-Tra-contesto-e-implicitezza-per-una-pragmatica-filosofica.html> [Accessed 06 December 2018].
 - ArchEyes. Available from: <http://archeyes.com/nakagin-capsule-tower-kisho-kurokawa/> [Accessed 06 December 2018].
 - MAJERICIK, A., CRASSIN, C., SHIRLEY and P., MCGUIRE, M. (2018) A Ray-Box Intersection Algorithm and Efficient Dynamic Voxel Rendering. *Journal of Computer Graphics Techniques*. [Online] Vol. 7, No. 3. Available from: <http://www.jcgt.org/published/0007/03/04/paper-lowres.pdf> [Accessed 06 December 2018].
 - MC CARTHY, C. (2016) *La moda nei videogame ispira lo stile del mondo reale*. [Online] IQ. Available from: <https://iq.intel.it/la-moda-nei-videogame-ispira-lo-stile-del-mondo-reale/> [Accessed 06 December 2018].
 - PAGANI, R., CHIESA, G. and TULLIANI, J. M. (2013) *Biomimetica e Architettura. Come la natura domina la tecnologia*. Milano: Franco Angeli Edizioni.
 - PANOFSKY, E. (1920) *Il concetto di Kunstwollen*.
 - PAPAGEORGE, A. (2018) *Free Form 3D Printing. A Sustainable, Efficient Construction Alternative* [online]. Thesis of Master of Architecture, Victoria University of Wellington. Isuu. Available from: https://issuu.com/armanopapageorge/docs/thesis_final [Accessed 06 December 2018].
 - RIEGL, A. (1901) *Die spätromische Kunstindustrie nach den Funden in Oesterreich-Ungarn*. I. Vienna: Teil.
 - SINGANAMALLA, A., 2017-18. *Design of Trabecular structure using voxel – based model*. [online]. Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Master of Science in Design and Engineering. Available from: <http://www.politesi.polimi.it/handle/10589/142261> [Accessed 06 December 2018].
 - VICO, G. (1744) *Principi di Scienza nuova*. Libro quinto [Online]. Available from: http://www.ispf-lab.cnr.it/2015_101.pdf [Viewed 06 November 2018].
 - VIOLA, E., 2011. *Tra contesto e implicitezza per una pragmatica filosofica* [online]. Ph.D. Thesis, Università Ca' Foscari, ciclo 23°. Available from: <https://docplayer.it/2247510-Tra-contesto-e-implicitezza-per-una-pragmatica-filosofica.html> [Accessed 06 December 2018].

Procedencia de las ilustraciones

1. <https://noizarchitects.com/archives/works/dune-city>
2. <https://www.designboom.com/architecture/the-three-graces-by-nox-lars-spuybroek/>
3. <http://viajesarquitectura.blogspot.com/2017/08/nakagin-capsule-tower-uno-de-los.html>
8. http://www.arturotedeschi.com/wordpress/?page_id=6191
9. <http://dbt.arch.ethz.ch/course/smartbrick/>
12. <https://www.detail-online.com/blog-article/cubism-question-cube-by-ken-yokogawa-24914/>
13. <https://noizarchitects.com/archives/works/itri-public-art-voxel-scape>
14. <https://www.archdaily.com/895711/cloud-pergola-the-croatian-pavilion-at-the-2018-venice-biennale/>
15. <https://www.codaworx.com/project/voxel-cloud-sares-regis>
16. <https://www.prlog.org/12590866-daedalus-pavilion-by-ai-build.jpg>
17. <https://www.dezeen.com/2017/05/17/robot-made-voxel-chair-new-software-bartlett-researchers-design-furniture-technology-chairs-robots/>
18. <https://www.dezeen.com/2015/06/02/janne-kyttanen-3d-printed-sofa-so-good-minimal-mesh-spider-web-cocoons/>
19. <https://deskgram.net/explore/tags/TrabeculaePavilion>

Origin of the illustrations

1. <https://noizarchitects.com/archives/works/dune-city>
2. <https://www.designboom.com/architecture/the-three-graces-by-nox-lars-spuybroek/>
3. <http://viajesarquitectura.blogspot.com/2017/08/nakagin-capsule-tower-uno-de-los.html>
8. http://www.arturotedeschi.com/wordpress/?page_id=6191
9. <http://dbt.arch.ethz.ch/course/smartbrick/>
12. <https://www.detail-online.com/blog-article/cubism-question-cube-by-ken-yokogawa-24914/>
13. <https://noizarchitects.com/archives/works/itri-public-art-voxel-scape>
14. <https://www.archdaily.com/895711/cloud-pergola-the-croatian-pavilion-at-the-2018-venice-biennale/>
15. <https://www.codaworx.com/project/voxel-cloud-sares-regis>
16. <https://www.prlog.org/12590866-daedalus-pavilion-by-ai-build.jpg>
17. <https://www.dezeen.com/2017/05/17/robot-made-voxel-chair-new-software-bartlett-researchers-design-furniture-technology-chairs-robots/>
18. <https://www.dezeen.com/2015/06/02/janne-kyttanen-3d-printed-sofa-so-good-minimal-mesh-spider-web-cocoons/>
19. <https://deskgram.net/explore/tags/TrabeculaePavilion>