

***Geometrías complejas y producción arquitectónica***

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO  
Maestría en Diseño Arquitectónico y Urbano



***Geometrías complejas y producción arquitectónica***

Procesos de diseño en entornos paramétricos. Fabricación digital de envolventes ligeras,  
alternativas de producción local.

MDAU – FAUD – UNC

***Javier López***

Directora: Dra. Miriam Liborio

Ciudad de Córdoba 2021



*Dedicatoria*

A la familia, gracias

Por el sacrificio de Tere y Flaco, mis padres, por la riqueza espiritual de mis hijos, Facundo y Tomás; y a mi compañera de toda la vida, por su amor y comprensión, Mariana.

### *Agradecimientos*

Va un agradecimiento a todas las personas que de manera directa o indirecta han contribuido a la elaboración de mi tesis, por sus consejos y críticas constructivas, por su aliento y fe en mi persona. A mi directora Dra. Arq. Miriam Liborio, por su claro apoyo conceptual y actitud positiva; al conjunto de la Cátedra Construcciones 3 A de la FAUD-UNC donde nos nutrimos e intentamos superarnos desde los conceptos, en particular a la Profesora Titular Esp. Arq. C. Susana Guzzetti con quien compartimos claustros desde hace ya un tiempo; y a todos esos profesionales con los cuales compartí el ejercicio y que de una u otra manera, dejaron enseñanzas de la práctica arquitectónica, que me fueron forjando en el oficio.

### *Derechos de autor*

La consulta y difusión de esta tesis ha sido autorizada por el autor únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de. No se autoriza la presentación de su contenido en un medio de comunicación de formato analógico o digital, sin previa autorización del autor. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

## INDICE GENERAL

	Pag.
<i>Resumen</i> .....	7
<i>Abstract</i> .....	7
<i>Prefacio</i> .....	7
<b>Capítulo 1 - Hacia una Arquitectura digital</b>	
1. Aspectos generales y antecedentes .....	11
1.1 Aspectos generales .....	11
1.1.1 Justificación	
1.1.2 Problema	
1.1.3 Preguntas de investigación	
1.1.4 Hipótesis	
1.1.5 Objetivos	
1.1.5.1 Objetivo general	
1.1.5.2 Objetivos específicos	
1.1.6 Tipo de investigación	
1.1.7 Marco metodológico	
1.2 Antecedentes .....	15
1.2.1 Estado del arte	
1.3 Cierre del capítulo .....	24
<b>Capítulo 2 - Argumentos de la fabricación digital</b>	
2. Introducción .....	26
2.1 Geometría .....	26
2.1.1 Origen e interrelación disciplinar	
2.1.2 La geometría como instrumento de diseño	
2.1.3 Matemáticas de la geometría	
2.1.4 Dominio de las formas	
2.2 Complejidad .....	40
2.2.1 El paradigma de la complejidad en la arquitectura	
2.2.2 Azar, caos y metafísica	
2.2.3 Mimesis digital	
2.2.4 Generativo e indefinido	
2.3 Producción .....	56
2.3.1 Industria digital en arquitectura	
2.3.2 Eficiencia como presupuesto de diseño	
2.3.3 Tecnologías y modos constructivos factibles	
2.4 Contexto arquitectónico .....	66
2.4.1 Moderno centrismo	
2.4.2 Hibridez programática	
2.4.3 Industria 4.0	
2.5 Cierre del capítulo .....	73
<b>Capítulo 3 - Tecnología digital para envolventes ligeras</b>	
3. Diseño de envolventes ligeras .....	76
3.1 Definición de envolventes ligeras .....	78
3.1.1 Consideraciones generales	
3.1.2 Elementos constitutivos	

3.2	Tipificación de envolventes ligeras .....	81
3.2.1	Forma .....	
3.2.2	Partición .....	
3.2.3	Material predominante .....	
3.2.4	Modo de producción .....	
3.3	Cierre del capítulo .....	93

#### **Capítulo 4 - Ensayo proyectual**

4.	Diseño y abstracción de la idea. Metadiseño .....	96
4.1	Definición y aplicación del software de diseño .....	96
4.1.1	Definición de software paramétrico .....	
4.1.2	Rhinoceros, Grasshopper y plug-ins .....	
4.2	Idea general. Diseño (forma) / materialidad (construcción) / tecnología (fabricación).....	99
4.2.1	Estrategia de diseño. Proceso .....	
4.2.2	Premisas morfológicas .....	
4.2.3	Premisas técnicas .....	
4.3	Diseño de algoritmos generativos en respuesta a la idea (Definiciones).....	101
4.4	Representación y exploración de los resultados .....	102
4.5	Desarrollo tecno constructivo. Estrategias posibles de fabricación y secuencia de producción .....	110
4.5.1	Capas. Definiciones de Grasshopper .....	
4.5.2	Elección de materiales .....	
4.5.3	Proceso de fabricación. Maquinado y producción .....	
4.5.4	Gráficos. Detalles .....	
4.6	Cierre del capítulo .....	123

#### **Capítulo 5 - Conclusiones**

5.	Recapitulación .....	125
5.1	Síntesis conceptual .....	125
5.2	Ensayo proyectual. Reflexiones .....	126
5.3	Verificación de los objetivos .....	128
5.4	Consideraciones finales .....	129

	<b>Bibliografía y referencias .....</b>	<b>131</b>
--	---	------------

### *Resumen*

Los últimos setenta años, han estado caracterizados por profundos avances tecnológicos, hoy finalizando la segunda década del tercer milenio, nos encontramos frente lo que muchos denominan revolución 4.0. Nuestras vidas están cada vez más organizadas alrededor de entornos digitales y la arquitectura en ese sentido, no es ajena a esta situación. La informática que en un principio permitió acelerar y mejorar los procesos de documentación de proyecto, con el tiempo y gracias a las mejoras en el procesamiento de volúmenes de datos, ha dejado de ser un mero instrumento de mediación entre la idea, el proyecto y la obra, para pasar a ser una herramienta dentro del proceso de diseño, que irrumpe en una escena dominada básicamente por geometrías euclidianas, permitiendo crear un escenario donde otras geometrías emergen de manera dinámica y compleja.

La posibilidad informática de manejar y relacionar una gran cantidad de datos, nos permite no solo controlar la generación de este tipo geometrías, sino que su posterior producción a través de la fabricación digital. Esta posibilidad es básicamente soportada por extensas combinaciones de parámetros que a través de algoritmos operan de una manera que, sin tecnología digital, sería imposible de llevar a cabo. El análisis de los diferentes métodos de fabricación digital en relación con la materialidad de las envolventes ligeras, será lo que nos permitirá adoptar el modo constructivo más apropiado para cada situación.

### *Abstract*

The last decades have been characterized by profound technological advances, today ending the 2nd decade of the 3rd millennium, we are facing what many call revolution 4.0. Our lives are increasingly organized around digital environments and architecture in that sense is not alien to this situation. The computer science that in the beginning allowed to accelerate and improve the documentation processes of the project, with time and thanks to the improvements in the processing of data volumes, has stopped being a mere mediating instrument between the idea, the project and the work, to become a tool within the design process, which breaks into a scene dominated basically by Euclidean geometries, allowing to create a scenario where new geometries emerge in a dynamic and complex way.

The ability to manage and relate a large amount of data, allows us not only to control the generation of this type of geometry, but also its subsequent production through digital manufacturing. This possibility is basically supported by extensive combinations of parameters that through algorithms operate in a way that, without digital technology, would be impossible to carry out. The analysis of the different digital fabrication methods in relation to the materiality of the tessellated envelopes will be what will allow us to adopt the most appropriate constructive mode for each situation.

### *Prefacio*

La geometría es un componente fundamental dentro del proceso de evolución tecnológica desarrollado por la humanidad. Ésta le ha posibilitado abordar infinidad de problemas pertenecientes a diferentes campos disciplinares y permanece inmanente en nuestro universo diario, en todo lo que nos rodea. Experimentamos permanentemente conexiones empáticas con organizaciones geométricas, aun sin reconocer a priori cuales son los códigos que definen dicha disposición, pero sabiendo que existe. Acordamos cánones, estilos y órdenes a lo largo de la historia, los establecimos e internalizamos, reconocemos patrones, reglas, secuencias, que nos

permiten operar en forma natural e inconsciente sobre lo que consideramos bello, atractivo y armónico.

Existe una estrecha relación entre geometría y naturaleza, estando el concepto de belleza siempre latente, un vínculo que ha sido establecido desde la antigüedad; un panal de abejas, las ramas de un árbol, la constitución de una roca caliza, poseen un orden, un código, un patrón, que subyace y que organiza las partes en un todo, muchas veces de manera muy compleja, pero al mismo tiempo muy eficaz (ver fig. 1).

*Al mirar con más atención, la complejidad es, efectivamente, el tejido de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinaciones, azares, que constituyen nuestro mundo fenoménico. Así es que la complejidad se presenta con los rasgos inquietantes de lo enredado, de lo inextricable, del desorden, la ambigüedad, la incertidumbre... (Morín, 1990:17)*

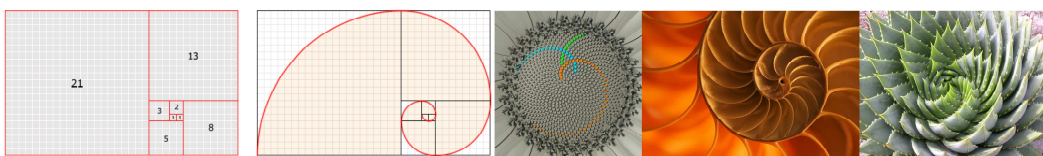


Fig. 1 [Composición geométrica natural explicada a través de la serie de Fibonacci]. Fuente: 1ra, 2da y 3ra imagen <http://bit.ly/2YF1bvT>; 4ta imagen <https://bit.ly/3pDh4N5>; y última imagen <https://bit.ly/2NMDfSG>.

La geometría ha llegado a un punto en su *continuum* evolutivo, que ligada a la tecnología se permite “imitar” dicha complejidad y esto es posible específicamente gracias al progreso informático, que soporta esta operación de mimesis con la naturaleza, reproduciendo una visión científica de lo *natural* a través de lo *digital* y en cierto modo, permitiéndonos tener el control de lo, que hasta hace un tiempo, era incontrollable.

Para la arquitectura, la geometría es una disciplina de conocimiento y creatividad, un soporte y una aliada. Ha generado una interrelación que la ha tornado como una de sus herramientas predilecta, es la que permanece omnipresente desde la ideación a la producción. Y precisamente es dentro de este ámbito productivo, conocido como industrias AEC<sup>1</sup>, donde está ocurriendo una transformación de manera rápida y progresiva, incorporando tecnología digital en sus procesos productivos.

El recambio tecnológico de dichos procesos, iniciado en la década del '60, es posibilitado a partir del desarrollo de ordenadores, permitiendo a arquitectos, diseñadores, ingenieros y constructores, desarrollar nuevos métodos, sistemas, materiales y posibilidades de relación, estableciendo otros parámetros y expandiendo el horizonte de posibilidades de la industria.

Esta transformación enfrenta un panorama expectante con un horizonte vasto por descubrir, frente a lo que llamamos *Industria 4.0* o *Cuarta revolución* industrial, un escenario que brinda oportunidades para la producción arquitectónica que, a través de la manipulación geométrica basada en potentes cálculos matemáticos (modelado paramétrico) y simulación gráfica, permite idealizar formas complejas, pero controlables, reproducibles y lo más importante, materializables.

<sup>1</sup> Acrónimo en inglés, utilizado para englobar *Arquitectura, Ingeniería y Construcción*.

Esto vuelve intensamente atractivo el panorama frente a las posibilidades de diseño, tanto por su valor estético como pragmático, e involucra un cambio de mentalidad y una forma diferente de abordar procesos industriales integrales.

Hoy las AEC se nutren del conocimiento de aquellas industrias pioneras dentro de los procesos CAD/CAM<sup>2</sup>, como lo fueron la aeroespacial, la automotriz y la militar incorporando todo el conocimiento y evolución alcanzado en materia de herramientas tales como el CNC<sup>3</sup>, el corte láser, los brazos robotizados, etc., para luego, mediante la utilización de software específico, incorporar un concepto cada vez más familiar dentro del diseño arquitectónico, la *fabricación digital*.

*Un cambio de mentalidad Implica incorporar el concepto de pensamiento computacional, (J. Wing, 2006) que es aquel que resuelve problemas, diseña sistemas y comprende el comportamiento humano, haciendo uso de los conceptos fundamentales de la informática, como por ejemplo formular problemas de forma que sus soluciones pueden ser representadas como secuencias de instrucciones y algoritmos, permitiéndonos razonar sobre los sistemas y procesos tanto naturales como artificiales.*

Frente a este panorama, el presente trabajo busca explorar procesos proyectuales en entornos paramétricos, como una forma creativa y eficiente de adoptar modos constructivos alternativos, en los cuales, la manufacturación de materiales y componentes a través de herramientas digitales, sean incorporados en las lógicas de proyectación. Dicho proceso exploratorio, está circunscripto a la producción de componentes constructivos para envolventes ligeras, según las posibilidades tecnológicas e industriales del medio local, Córdoba, Argentina, y así contribuir al conocimiento de la fabricación digital en el campo de la producción arquitectónica.

---

<sup>2</sup> Acrónimos en inglés para Diseño Asistido por Computadora / Fabricación Asistida por Computadora.

<sup>3</sup> Acrónimo para Control Numérico Computarizado.

# *C*apítulo **1** - *H*acia una arquitectura digital



## **Capítulo 1 – Hacia una arquitectura digital**

### **1. Aspectos generales y antecedentes**

En este capítulo, desarrollamos aquellos conceptos que conforman el *corpus* del presente trabajo de investigación. El porqué de la necesidad de implementar sistemas digitales en el ámbito de la producción arquitectónica, cuáles son los objetivos que se buscan al implementar dichos sistemas en un contexto productivo en particular y a través de qué tipo y con qué método, se llevara adelante el desarrollo de la investigación. Por último se hará una revisión de los antecedentes que nos llevan a sintetizar conceptualmente el tema.

#### **1.1. Aspectos generales**

##### **1.1.1. Justificación**

La introducción de herramientas digitales en el campo de las AEC permitiría maximizar los recursos a través de un mayor control sobre las operaciones de manufacturación de los elementos constructivos a diseñar, no solo en términos de aceleración de los procesos productivos que estas conllevan, sino también en un mejor aprovechamiento de la materia prima a utilizar, en virtud del dominio de exactas geometrías, lo que posibilitaría minimizar los desperdicios. En ese sentido la ciudad de Córdoba posee una matriz industrial de larga tradición y en constante evolución, lo que facilitaría enlazar este soporte productivo con estas lógicas de producción, ampliando las posibilidades de modos constructivos dentro de las AEC.

##### **1.1.2. Problema**

El contexto actual de producción arquitectónica en el medio local, no está experimentando el uso de herramientas digitales, estas siguen circunscriptas a otras áreas de producción. Entender cómo afrontar procesos digitales integrales para la fabricación de envolventes complejas (diseño + producción), como una forma de asimilar los procesos propios de transformación socioeconómica, en donde la disciplina construye los estilos propios de cada época.

*El desarrollo del conocimiento científico es inseparable de una tecnología, a su vez unida a una sociedad, y a una civilización. La producción de nuevos medios de observación o de experimentación transforma sin cesar las condiciones del conocimiento. (Morín, 1984)*

##### **1.1.3. Preguntas de investigación**

- ¿El conocimiento profundo de geometrías complejas permite realizar un uso más eficiente de los recursos materiales?
- ¿El uso de nuevas herramientas de diseño, implica nuevas lógicas de pensamiento?
- ¿Cómo se introducen estas lógicas en los desarrollos proyectuales de nuestros profesionales?
- ¿Cómo impacta la adopción de nuevas herramientas tecnológicas en los procesos de producción de las AEC?

#### 1.1.4. Hipótesis

La introducción de herramientas digitales en los procesos de diseño facilitan el manejo de geometrías complejas a partir del uso de algoritmos y el control de parámetros. Por otro lado, la posibilidad de que estas geometrías sean realizables a través de diferentes métodos de fabricación digital adaptados a las propiedades de manufacturación de cada material, vislumbra un escenario productivo radicalmente distinto a las lógicas de producción arquitectónica tradicional usadas actualmente en nuestro medio. Ambos aspectos pueden resolver de manera simple problemas complejos, que, de ser realizados de manera analógica, serían muy laboriosos.

#### 1.1.5. Objetivos

##### Objetivo general

Aportar al saber disciplinar argumentos que posibiliten estrechar los vínculos entre el ámbito académico, el investigativo y los sectores de producción digital.

##### 1.1.5.1 Objetivos específicos

- Identificar las experiencias existentes con relación a procesos digitales integrales (diseño + producción).
- Determinar las diferentes herramientas de diseño paramétrico orientadas al desarrollo de formas complejas.
- Realizar un ensayo proyectual, orientado a la fabricación digital de elementos para envolventes ligeras, considerando la relación intrínseca entre forma, materia y tecnología.
- Crear las definiciones necesarias (algoritmos), para generar la forma diseñada en estrecha relación con el tipo de material utilizado y el modo de fabricación digital adoptado.
- Distinguir las diferentes fases implicadas en los procesos de fabricación digital integrales, según el tipo de producción a realizar.

#### 1.1.6. Tipo de investigación

La presente investigación adopta un modelo cualitativo de tipo constructivista, que obtiene el conocimiento a través del aprendizaje cognitivo de operación-observación, mediante el desarrollo de un proceso de diseño de carácter exploratorio, flexible y propositivo.

*El enfoque constructivista explica el proceso de aprendizaje cómo resultado de una construcción activa de las ideas o conceptos basados en conocimientos presentes y pasados. Así, desde esta mirada, el conocimiento no es el resultado de una mera copia de la realidad preexistente, sino de un proceso dinámico interactivo a través del cual la información externa, es interpretada y reinterpretada por la mente que va construyendo progresivamente modelos explicativos cada vez más complejos y potentes. Gómez y Coll, (1994:1)*

### 1.1.7. Marco metodológico

La instancia medular del desarrollo del presente trabajo se encuentra en el *ensayo proyectual digital integral*, no obstante, previo a adentrarnos en el diseño, se realizará un análisis bibliográfico que nos permitirá establecer cuál es el Estado del Arte en lo relativo a geometrías complejas y sus posibilidades de fabricación digital. Para ello se identificarán las posibilidades de geometrización, los softwares posibilitantes, los diferentes materiales mecanizables y el herramental idóneo para cada uno de ellos. Finalmente, y luego de los resultados obtenidos en el proceso de diseño, se evalúan las posibles alternativas de materialización de envolventes ligeras.

Según lo antes dicho podemos diferenciar tres etapas en las cuales se divide esta investigación; la primera es la toma de datos y rastreo de antecedentes de todo lo relativo a geometrías complejas y los procesos de generación, elección y de producción de formas. La segunda, identificamos las diferentes técnicas de fabricación digital, su origen, los diferentes procedimientos posibles de adoptar y su funcionamiento.

Analizamos su uso en industrias ajenas a las AEC y la posterior adopción de parte de nuestra disciplina como herramienta de diseño y posibilitante de expresión arquitectónica. Así también, se hará un reconocimiento e interpretación del medio local en lo que respecta al soporte herramental que este posee, lo cual nos permitirá establecer cuáles son las posibilidades que este brinda para producir elementos fabricados digitalmente y que puedan ser de usados regularmente en nuestro medio. Una vez realizada esta etapa, se justifica la adopción del software a utilizar (*Rhinoceros + Grasshoper*), a través de ponderar sus cualidades respecto de otros similares en el mercado, se profundiza en su conocimiento y manejo, el cual será utilizado como herramienta fundamental para explorar estrategias de diseño.

La tercera y última etapa corresponde al desarrollo de un proceso de diseño en un entorno paramétrico, que busca integrar de forma natural la manipulación de geometrías complejas, a través de la programación gráfica, con la adopción de materiales específicos que nos permitan resolver dichas geometrías en envolventes ligeras. Este proceso, a través de ponderar diferentes alternativas de resolución de un mismo problema, define las posibilidades de producción, seleccionando el método más acorde, en relación al tipo de fabricación digital y al material seleccionado. Estas pautas permitirán hacer más plausible el vínculo entre tecnologías digitales y el campo de las AEC, expande el horizonte de manufacturación de elementos constructivos y acrecienta el desarrollo en términos de investigación y tecnología no convencional aplicada.

El aspecto más importante en esta investigación es el proceso experimentado a través del uso de herramientas paramétricas, y no el conocimiento en sí mismo de dichas herramientas. El aprendizaje no resulta del desarrollo, el aprendizaje es, el desarrollo, el cual deberá nutrirse no solo de los aciertos, sino también de los errores, desaciertos y contradicciones que deberán explorarse y discutirse (fig. 2).



Fig. 2 [Triángulo virtuoso I+D]. Fuente: elaboración propia.

*La exploración es un procedimiento flexible mediante el cual el especialista se traslada de una a otra línea de investigación, adopta nuevos puntos de observación a medida que su estudio progresa, se desplaza en nuevas direcciones hasta entonces impensadas y modifica su criterio sobre lo que son datos pertinentes, conforme va quedando más Información y una mayor comprensión. Blumer (1982:30).*

## 1.2. Antecedentes

### 1.2.1. Estado del arte

*“Históricamente los Arquitectos han dibujado lo que podían construir y han construido lo que podían dibujar” William J. Mitchell*

La revolución industrial de comienzos del siglo XX supuso la era de la seriación, a través de la industrialización de los procesos de producción, se obtenía una reducción de los costos de fabricación, permitiendo un mayor acceso a los bienes, de parte de la creciente clase media.

La fabricación en masa, proceso de producción heredado del Fordismo, plantea un modelo productivo que desarrolla objetos sin variaciones, rigurosamente idénticos, pensados bajo una estricta geometría euclidiana, todos aquellos proyectos que se desarrollaran fuera de esta lógica, generaban mayores costes de producción y por ende quedaban circunscriptos a menores sectores de la sociedad (fig. 3).

A finales del mismo siglo y en el ámbito de la producción arquitectónica, se evidencia una incipiente ruptura de la hegemonía de la geometría euclidiana y da comienzo al desarrollo de objetos soportados por *otras* geometrías, que si bien eran conocidas y estudiadas empíricamente, la *aritmización* de las mismas, permitió la reproducción material unívoca y repetitiva de formas concebidas con geometrías *no-euclidianas*, *generativas*, *fractálicas*, *procesaes*, *paramétricas*, etc. (fig. 4).



Fig. 3 [Ejemplos de líneas de montaje en el Fordismo], Fuente: izq. <http://bit.ly/39EFSyx> ; centro <http://bit.ly/2MOnOsA> ; y der. <http://bit.ly/2L9Q2hf> .



Fig. 4 [Líneas de montaje en la industria 4.0 y su disminución de la fuerza de trabajo], Fuente: izq. <http://bit.ly/3rdJmOw> ; centro <http://bit.ly/2MI6XYA> y der. <http://bit.ly/3ao3jvc> .

Previo a este proceso, la arquitectura estaba sumida en un modelo productivo basado en el módulo, instrumento promovido por el Movimiento Moderno que instaba a reproducir una arquitectura universalista vinculada al estándar *mecanicista*<sup>4</sup>. Las lógicas productivas de otras disciplinas, en donde la interrelación de los objetos con elementos propios de la naturaleza como el aire y el agua, aerodinámica y dinámica de fluidos propias de la industria aeroespacial y naval, impulsaron la búsqueda de métodos y procesos constructivos de formas no-euclidianos que permitieran llevar adelante la resolución de superficies fluidas y continuas, propias de esas industrias.

Cabe mencionar que hasta el siglo XVII, por ejemplo, no existía una definición geométrica previa que permitiera construir este tipo de superficies, como los monocascos de las embarcaciones, ya que estas eran resueltas gracias a una sucesión de cuadernas<sup>5</sup>, que definían la geometría final. A partir de ese entonces, en Inglaterra, se comienza a emplear la definición geométrica previa a la fabricación (fig. 6).

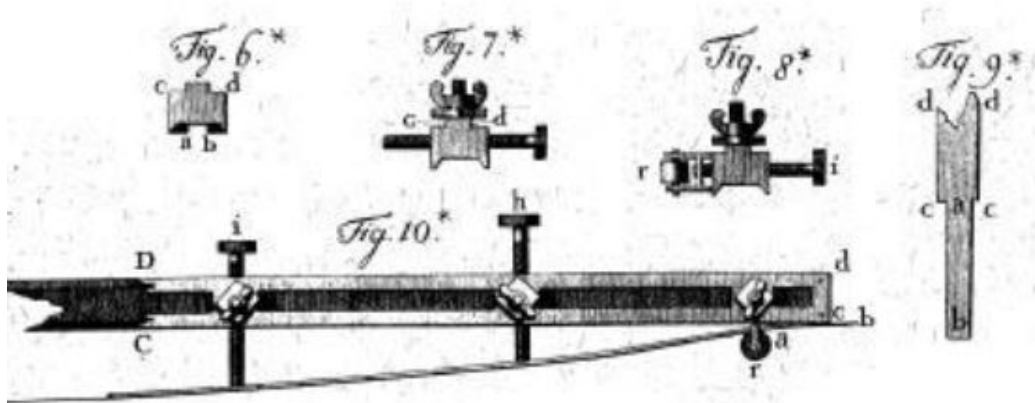


Fig. 5 [Instrumento del S. XVIII para generar curvas de grandes radios], Fuente: "The Shipbuilding connection" H. Nowacki (1752).

Recien en 1944, se produce un acontecimiento valioso para la definición digital de geometrías para su fabricación, el ingeniero Roy A. Liming escribe *Analytical Geometry with Application to Aircraft* luego de trabajar para la North American Aviation (NAA) durante la segunda guerra mundial. En dicha publicación se utiliza por primera vez técnicas computacionales para generar las formas no lineales de los monocascos de los aviones, compuestas por curvas directrices de forma cónica, algo ya conocido y empleado en este tipo de construcciones (fig. 6).

<sup>4</sup> El mecanicismo es un modelo filosófico y biológico que explica los fenómenos naturales por medio de la física. Desde Descartes, el mecanicismo se define también como la teoría en donde la estructura y el funcionamiento de la naturaleza es comparable al de una máquina. Este modelo se apoyaba fundamentalmente en el principio de *causalidad*, por el que se consideraban regidos todos los fenómenos que describe la física clásica. Su única finalidad es la eficacia y único el artilugio motivador es el sistema de premios y castigos, en donde todo vínculo entre personas queda reducido a una relación de roles.

<sup>5</sup> Las cuadernas son cada una de las costillas de madera u otro material por las que están formadas los barcos, recorriéndolo de babor a estribor y estructurando el casco del navío. De popa a proa se sitúan las carlingas que junto a las cuadernas constituyen el *costillar* del buque.

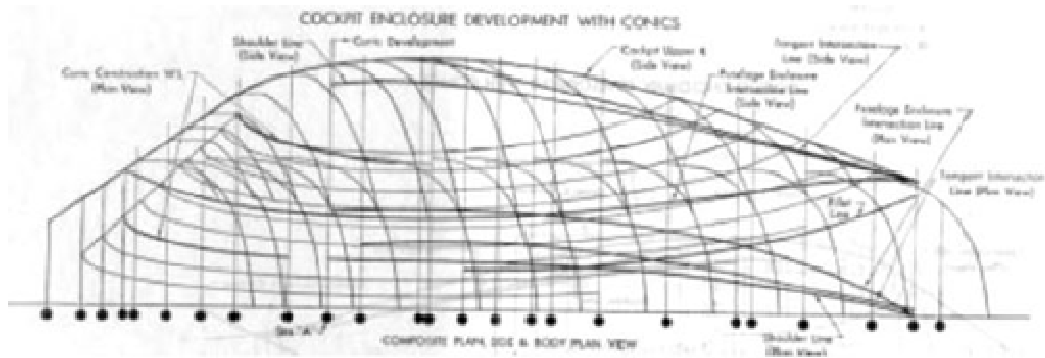


Fig 6 [Plano de curvas cónicas de la cabina de un avión caza de la 2da. Guerra mundial], Fuente: Analytical Geometry with Application to Aircraft, Roy A. Liming (1944).

Lo que Liming hace es identificar la ventaja en productividad y precisión que aportaba la definición de esas curvas por los algoritmos que las definen, en lugar de por curvas trazadas en planos (como las cuaderñas) que sirven de base para su reproducción posterior<sup>6</sup>. Por su parte, en 1950 Pierre E. Bézier<sup>7</sup> genera una fórmula algebraica para reproducir gráfica y matemáticamente una curva *Spline*<sup>8</sup>. En 1962 publica su estudio matemático, desarrollando su uso de manera intensiva en la fábrica de automóviles Renault. Las curvas de Bézier se usan ampliamente en los gráficos generados por ordenador para modelado de curvas suaves y lo más importante es, que a través de su definición matemática es posible exportar informáticamente los algoritmos para su fabricación (fig 7).

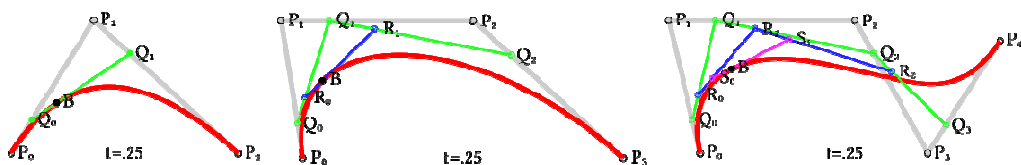


Fig. 7 [Curvas Bézier cuadráticas de 3, 4 y 5 puntos], Fuente: Wikipedia.

Paralelamente en 1959, la empresa Citroën contratará a Paul de Casteljaou<sup>9</sup> para solucionar problemas en la transferencia de información entre las curvas analógicas y

<sup>6</sup> El libro *Geometría analítica practica aplicada en aviones*, es un trabajo que desarrolla un sistema práctico de técnicas de cálculo analítico para uso directo en las industrias aeronáutica, automotriz y marina. El estudio se basa en dejar de lado el "diseño a ojo" y elaborar fórmulas matemáticas que permitieran trazar con precisión curvas de segundo grado (lofting cónico). Los ejemplos utilizados en el libro se basan en el desarrollo del caza norteamericano P-51 Mustang. Lamentablemente Liming estuvo "fuera de tiempo", ya que todos sus cálculos fueron hechos sin computadoras, que de existir, hubiera posibilitado una profundización aún mayor de sus estudios.

<sup>7</sup> Pierre Étienne Bézier, (1910-1999), ingeniero, creador de las llamadas curvas y superficies de *Bézier*. En la actualidad se usan de manera habitual en la mayoría de los programas de diseño gráfico y de diseño CAD. Durante su estadia en Renault entre 1933 y 1975, desarrolló un sistema de diseño asistido por ordenador denominado UNISURF CAD, patentado en 1968.

<sup>8</sup> La teoría fundacional de los splines fue desarrollada en la década de 1940 por el matemático estadounidense de origen rumano Isaac Jacob Schoenberg (1903-1990). El término spline hace referencia a una amplia clase de funciones que son utilizadas en aplicaciones que requieren la interpolación de datos, o un suavizado de curvas. Los splines son utilizados para trabajar tanto en una, como en varias dimensiones. La simplicidad de la representación y la facilidad de cómputo de las splines las hacen idóneas para la representación de curvas en informática.

<sup>9</sup> El Francés Paul de Casteljaou, 1930, es un físico y matemático francés que desarrolló un algoritmo para evaluar cálculos en una cierta familia de curvas, que luego sería formalizado y popularizado por el ingeniero Pierre Bézier. El

la información digitalizada en las computadoras. Este matemático centra sus investigaciones en la formulación matemática de una curva que en lugar de estar definida por puntos inscriptos en ella, se *parametriza*<sup>10</sup> por unos polígonos de control próximos al trazado. El resultado que obtiene Casteljau es similar al de Bezier, pero a través de otro camino matemático y ambos cálculos geométricos, serían la base conceptual para el sistema CAD/CAM llamado UNISURF que desarrolla la empresa automotriz Renault. Este influirá también el desarrollo de un sistema paralelo en la empresa aeronáutica Dassault denominado EVE y que con el tiempo evolucionará hasta el conocido CATIA.

La tecnología CAD/CAM es lo que hace posible la fabricación digital y lo interesante del caso es que estas tecnologías surgen de manera independiente y luego con la llegada del ordenador personal en los '80, se fusionan.

El CAM comenzó tras la segunda guerra mundial. En 1947, John T. Parsons<sup>11</sup> en colaboración con la empresa de armamento estadounidense y el MIT, presentó la primera máquina de control numérico NC para la mecanización de procesos automáticos y repetitivos de piezas idénticas para bombarderos y helicópteros. Este aparato controlado por motor es patentado por Parsons y supone la base de las máquinas CNC (fig. 9). Unos años después, en 1952 presentaría la *Hitrotel*, una fresadora de 3 ejes para fabricar repetitivamente piezas metálicas de armamento. Por su parte el Dr. Patrick Hanratty<sup>12</sup> concebía en 1957 el primer software CAM llamado *Pronto*, el cual desarrolla trabajando para General Electric, y más tarde en 1964 desarrollaría para la empresa General Motors, *DAC-I*, un software que ya permitía dibujar modelos en

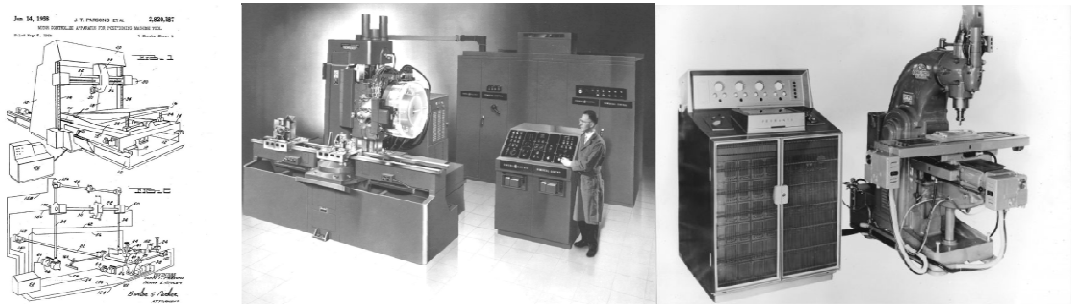


Fig. 9 izq. [Primera patente NC Parsons], Fuente: <http://bit.ly/36xtlpo> ; centro [NC en la feria Machine Tool Show 1955], Fuente: <https://bit.ly/2LfvKD6> ; y der. [Primer NC Europeo], Fuente: <http://bit.ly/3pIOEB2> .

algoritmo de De Casteljau es ampliamente utilizado, con algunas modificaciones, ya que es el método más robusto y numéricamente estable para evaluar polinomios.

<sup>10</sup> Parámetro es una constante o una variable que aparece en una expresión matemática y cuyos distintos valores dan lugar a distintos casos en un problema. La palabra paramétrico está definida como un adjetivo que significa, del parámetro o relacionado con él. El parametricismo es un sistema que expresa una función atendiendo a la forma de los distintos parámetros que lo componen, así, es un proceso formado por familias de parámetros que interactúan entre ellos con el fin de llegar a un resultado final. Al ser parámetros que pueden ser cambiados durante el proceso, no solo obtenemos resultado final, sino que tenemos acceso prácticamente instantáneo a todo el conjunto de posibles resultados que la variabilidad de cualquiera de los parámetros.

<sup>11</sup> John Thoren Parsons (1913-2007) fue un ingeniero estadounidense inventor del sistema de control numérico (CN), predecesor del control numérico computarizado actual (CNC). Para la SME (Asociación de PYMES de EEUU), Parsons fue la persona cuya conceptualización del control numérico marcó el comienzo de la 2da revolución industrial.

<sup>12</sup> Patrick J. Hanratty es un científico informático estadounidense y empresario que se conoce como el "Padre del CAD/CAM", su trabajo se ha centrado en el desarrollo de paquetes informáticos para esta actividad. Los analistas de la industria piensan que "el 70 por ciento de todos los sistemas CAD/CAM mecánicos 3-D disponibles en la actualidad tienen sus raíces en el código original de Hanratty"



axonometría, mover y rotar volúmenes, pero sus geometrías aún no puede reproducir curvas cónicas.

El CAD surgió en 1962 con el *sketchpad* de Ivan Sutherland<sup>13</sup>. Este invento consistía en un lápiz que dibujaba gráficos en una pantalla donde quedaban digitalizados, permitiendo borrar, guardar, e incluso hacer zoom. En esta instancia solo se entendía como una herramienta de representación gráfica avanzada, sin conexión alguna con la producción o manufacturación (fig. 9).



Fig. 9 [Sutherland y su Sketchpad, primer sistema de comunicación hombre-máquina], Fuente: izq. <https://bit.ly/3pEhztT>; centro <http://bbc.in/3pFUnl2>; y der. <http://bit.ly/3rbqne7>.

El alto costo de estas nuevas tecnologías hacía que solo algunas compañías de aviación o automóviles desarrollaran en los 60' estos softwares, que hacían posible la parametrización algorítmica de las formas libres denominadas *nurbs*<sup>14</sup>, dando lugar a una producción de bajo coste de elementos "personalizados" y de geometrías tan complejas como el diseño lo requiera (fig. 10). Esto indujo, por ejemplo, a que empresas como la Boeing, buscaran procesos enteramente realizados bajo un entorno digital, así fue que el diseño y fabricación del modelo 777, fue realizado íntegramente sin papel.

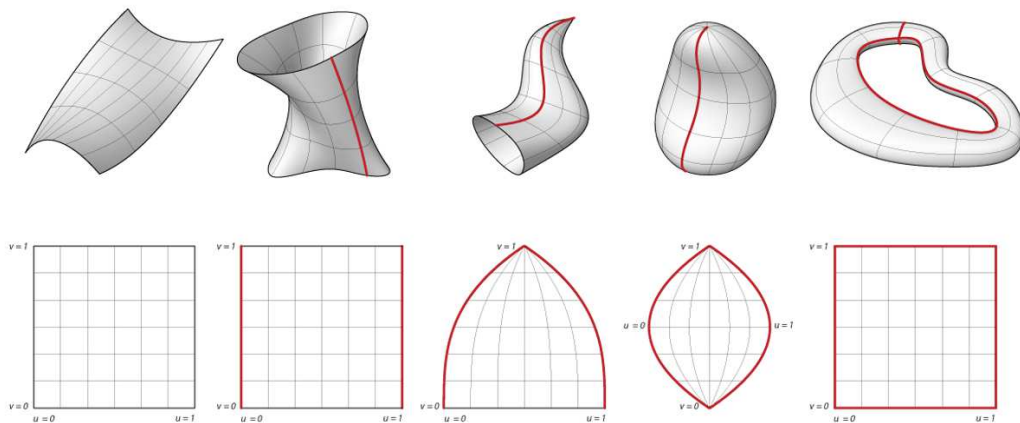


Fig. 10 [Deformación de superficies en base a NURBS], Fuente: <https://bitfab.io/es/blog/formatos-impresion-3d/>.

<sup>13</sup>Ivan Edward Sutherland es programador informático y profesor estadounidense. Este investigador informático es considerado el creador de los gráficos por computadora. Con su tesis de doctorado desarrollado en los laboratorios del MIT el primer sistema gráfico CAD llamado "Sketchpad" o bloc de bocetos. Sutherland ha contribuido con numerosas ideas al estudio de los gráficos de la computadora y de la interacción con esta, introdujo conceptos tales como el modelado tridimensional, simulación visual, diseño automatizado (CAD) y realidad virtual.

<sup>14</sup>Es el acrónimo inglés de *non-uniform rational B-spline* (B-splines racionales no uniformes) para denominar un modelo matemático muy utilizado en la computación gráfica para generar y representar curvas y superficies.

En los años 70' con el uso comercial masivo de este tipo de software, la empresa de aviación francesa Dassault desarrolla DRAPO, el primer programa CAD/CAM, que posteriormente en los 80' se comienza a generalizar en el resto de las actividades industriales de empresas tales como, Mercedes-Benz, Nissan, Toyota, Lockheed, McDonnell-Douglas, entre otras. Esta masificación del CAD/CAM genero una fuerte competencia entre empresas, lo que permitió una permanente evolución tecnológica. Por su parte, en los 60', dentro de nuestra disciplina se evidenciaba que la era electrónica repercutiría indefectiblemente en el diseño de nuestros edificios, estas industrias pioneras nombradas anteriormente, estaban usando el poder computacional de la informática para calcular superficies deformadas y complejas simulaciones de trayectorias de vuelo, lo cual interesó a los arquitectos, ya que ampliaba el universo formal por fuera de las geometrías euclidianas. La arquitectura regida por parámetros tiene sus precursores que la estudiaron de manera análoga, sin ayuda de la informática, entre los cuales se destacan por sus trabajos, Pier Luigi Nervi, Buckminster Fuller, Antoni Gaudí y Frei Otto. Gaudí no era muy afecto al dibujo, y generalmente utilizaba un proceso de exploración de formas muy diferente al tradicional. La iglesia de la Sagrada Familia es inspiracional para el campo de la fabricación digital, la manera en la cual desarrolló el proyecto es a través de la creación de modelos físicos realizados en obra, utilizando curvas catenarias paramétricas y paraboloides hiperbólicos paramétricos, mediante un modelo de cadenas colgantes (fig. 11).



Fig. 11 izq. [Maqueta funicular de Gaudí para la Sagrada Familia e interior de la Sagrada Familia], Fuente: <http://bit.ly/3oIXnSp>.

Al estar sujetas las cadenas al techo su propio peso, y a veces un peso extra adherido, crearía una curva catenaria, que, según la ley de Hooke, se encontraría siempre en tracción pura, al invertir el modelo, y mantener la curva, el resultado sería un elemento que se encuentra siempre en compresión pura, al cambiar ciertos parámetros en el modelo, los resultados variarían de forma acorde (Makert & Alves, 2016). Mediante la utilización de modelos físicos de formas complejas, sin contar con las herramientas digitales de la actualidad, Gaudí creó una obra de gran complejidad, reafirmando el concepto de parametría, el cual se nutre del proceso de encontrar la forma, más que la forma en sí. Por su parte Frei Otto, estudia las formas complejas a través de la superficie mínima derivada de membranas de jabón y caminos mínimos encontrados a través de lana sumergida en líquido, él llama a esta mecánica de diseño con modelos, *Form-finding*, un nombre que al igual que Gaudí, pone en primer plano la naturaleza exploratoria del modelado paramétrico. En el capítulo siguiente,

volveremos sobre estos autores para profundizar sobre los inicios de las formas complejas (fig. 12).

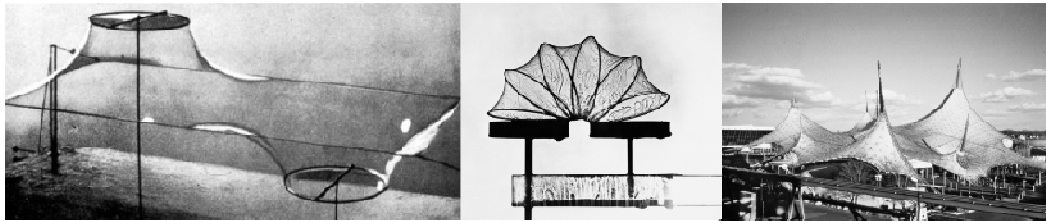


Fig. 12 izq. y centro [Frei Otto experimenta con la tensión superficial del jabón]; der. [Pabellón Alemán de la Expo '67], Fuente: izq. <http://bit.ly/3cw8mwg>, centro y der. <http://bit.ly/3jdlxm6>.

Si bien la arquitectura lleva casi cuarenta años utilizando el CAD como herramienta digital, lo cual facilitó la producción gráfica de manera eficiente y de fácil edición, esta tecnología no se veía reflejada en el diseño, solo había mutado la forma de confeccionar la documentación de obra. Recién en los '90 la arquitectura empieza a transformar sus procesos de diseño y construcción, con la tecnología digital como herramienta de desarrollo, nace lo que se conoce *file-to-factory*.

Esta transformación en la manera de diseñar y construir a través de procesos de producción controlados digitalmente se manifiesta claramente en los edificios de Frank Gehry. En el *Walt Disney Concert Hall*, desarrollado entre 1988 y 2003, los muros exteriores curvos deben ser de piedra, y se realiza una gran maqueta en 1990 para poder usar el brazo digitalizador y después pasarlo a CATIA. Este modelo en CAD se utilizaría en Italia para trabajar con maquinaria industrial CNC (CAM) en las canteras, donde se fresarían los muros en piedra. Los elevados costes y la dificultad del proceso paralizaron las obras y recién fueron retomadas en 1999 (fig. 13). Otros ejemplos son,

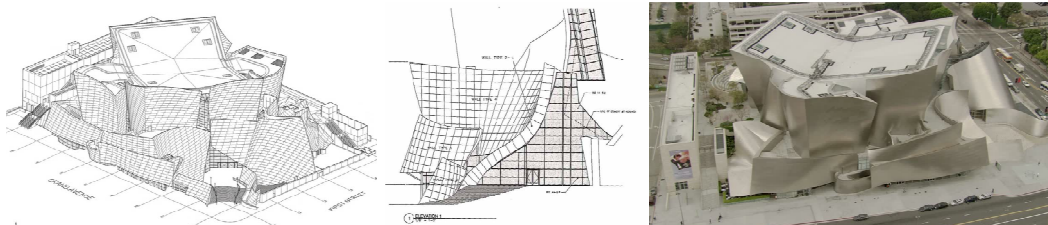


Fig. 13 [Walt Disney Concert Hall, 2003], Fuente: izq. <http://bit.ly/36wHqRO>, centro <http://bit.ly/3jarHUV> y der. <http://bit.ly/3pLihSq>.

el *Fish* de Barcelona de 1992, el primer ejemplo de una construcción realizada sin necesidad de planos que el arquitecto usa a modo de entrenamiento formal y tecnológico, el *Nationale Nederlanden* de Praga en 1996, el *Museo Guggenheim de Bilbao* en 1997 y las *torres Zollhof de Dusseldorf* en 2000, antes de reanudar el proyecto del Walt Disney Concert Hall.

Al final de la década de los 90, el arquitecto Bernhard Franken, realiza dos pabellones para BMW que muestran las posibilidades de estas nuevas tecnologías, en uno de ellos realiza una simulación digital de la fusión de dos pompas y descompone su fabricación en la estructura de aluminio por un lado y el acristalamiento por el otro, usando una cortadora de plasma y una fresadora de moldes, con la primera fábrica la estructura y con la segunda termoforma los paneles acrílicos curvos (fig. 14). En el caso de la

arquitectura de geometría compleja, que normalmente supone la diferenciación entre estructura y envolvente, estas tecnologías permiten el diseño y fabricación de un sistema constructivo avanzado, alejado del detalle único y perfecto del movimiento moderno y más cercano al desarrollo de una familia de componentes que utilizan unas reglas y parámetros de agrupación, para cubrir la superficie en su totalidad y de la forma más limpia posible (Mouzhan Majidi, 2013).

Como vimos anteriormente, la fusión y masificación de las tecnologías CAD-CAM se da en los 70' con la aparición de los ordenadores y el lenguaje de control numérico desarrollado por el MIT y reconocido como protocolo universal. La fabricación digital nace de la fusión de las CAD/CAM, que junto con el abaratamiento del software y el hardware de maquinaria CNC, surgen tecnologías que posibilitan productos "individuales", con el bajo costo de la producción seriada.

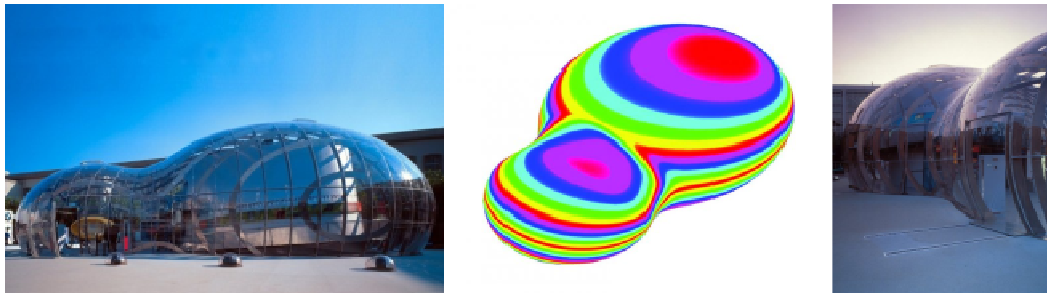


Fig. 14 [Pabellón Bubble BMW Group, Franken Architekten, 1999], Fuente: <http://bit.ly/3cxRvt1>.

Esta horizontalización del conocimiento da lugar a que diferentes investigadores y profesionales de distintos lugares del planeta, estén desarrollando nuevos procesos que involucran la fabricación digital. El punto de partida de estos laboratorios de fabricación, más conocidos como *Fab-Lab*, se origina a partir del curso impartido por Neil Gershenfeld<sup>15</sup> en 1998 en el MIT, llamado *How to make (almost) anything*. Gershenfeld sostiene que hubo dos revoluciones digitales en los últimos cincuenta años, comunicación y computación, que nos han conducido a una productividad sin precedentes, han generado una enorme riqueza y han alterado fundamentalmente la vida cotidiana. Pero estas revoluciones dejaron atrás a mucha gente, hoy en día la mitad del planeta no está conectada a Internet, la desigualdad va en aumento y surgen a diario problemas relacionados con la privacidad, la seguridad y la civildad. Por otro lado prevé una tercera y mayor revolución digital en la fabricación o sea el ámbito productivo específicamente, que va más allá de la impresión 3D y fabricantes aficionados, se trata de la convergencia del mundo digital y el mundo físico, una visión para un futuro radicalmente transformado por la fabricación digital que nos lleva desde los Fab-Lab de la comunidad académico científica, hasta la fabricación personal que permitirá a cualquiera crear casi cualquier cosa (fig. 15). La aceleración de las capacidades de fabricación digital podría permitir a las comunidades locales ser autosuficientes y ayudaría a la sostenibilidad global, pero también podría reforzar la desigualdad existente y crear divisiones *Fab* entre diferentes sociedades según su capacidad tecnológica.

---

<sup>15</sup> Neil Gershenfeld es profesor estadounidense y director del Centro de Bits y Átomos del MIT. Sus estudios de investigación se centran principalmente en estudios interdisciplinarios relacionados con la física y la informática, en campos como la computación cuántica, la nanotecnología y la fabricación personal. En su libro *Designing Reality* busca establecer pautas de equilibrio social frente a un mundo que irreductiblemente va hacia una hiper tecnologización.



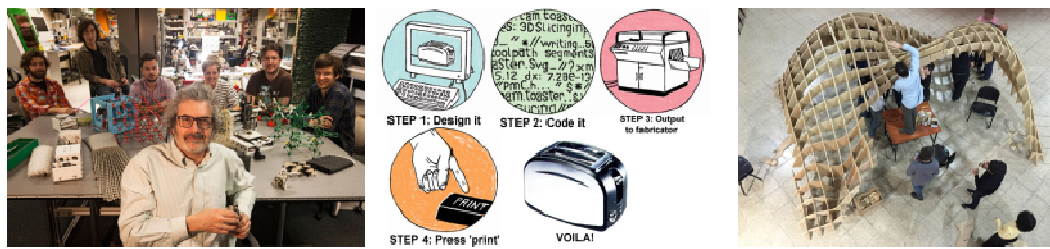


Fig. 15 [Gershenfeld en el MIT, concepto de fabricación digital y estudiantes en acción en un FabLab], Fuente: izq. <https://bit.ly/3re8JzF>, centro <http://bit.ly/2YCzy4h> y der. <http://bit.ly/3oLEzlv>.

Actualmente los Fab-Lab se realizan en diversos lugares con distintas realidades tecnológicas, como India, Costa Rica, Noruega, Ghana, Colombia, Chile; estos laboratorios, por lo general, cuentan con maquinaria de prototipado rápido y la mayoría de los resultados obtenidos en ellos, no son considerados como un emprendimiento comercial.

Por su parte, la arquitectura, influenciada por las ciencias de la complejidad (fractales, dinámicas no lineales, caos y sistemas auto-organizados, etc), ve cuestionada su especificidad, adoptando teorías y conocimiento de diversos campos, llevando a la disciplina a profundizar sobre diferentes formas de concebir, interpretar, visualizar y materializar la forma arquitectónica.

Un ejemplo de ello son las investigaciones llevadas a cabo por el arquitecto Greg Lynn<sup>16</sup>, quien en 1999 se convirtió en el principal teórico y diseñador en usar el ordenador para generar lo que denomino arquitectura *blob* y arquitectura *folding*. En su libro *Animate Form* (1999) estudió la historia de la geometría y establece las directrices para definir un estilo arquitectónico, el cual se podría generar mediante el cálculo de sistemas genéticos y códigos, aunque sólo sea virtualmente en el ordenador (fig. 16).

El sistema productivo actual tiene costos condicionados al transporte, con la fabricación digital no necesariamente dependeríamos de ello, se trata de acercar el diseño a la producción, lo que acarrea mayor eficiencia. Significa diseñar, producir y montar en un mismo lugar, además de enriquecer los procesos dada la posibilidad de la prueba y error constante (Buswell et al., 2008).

En definitiva el diseño paramétrico junto a la fabricación digital son técnicas de control que abarcan desde lo local a lo global, en la que la complejidad, el azar y el caos aparente se consiguen mediante la repetición de reglas más sencillas y se trabaja sobre el proceso creativo en vez de sobre los resultados. Estos procesos implican un cambio de mentalidad, dejando a un lado las búsquedas formales basadas en imaginarios pre existentes, para concentrarnos en las multiplicidad de acciones que operan de manera simultánea y que a través de la manipulación de estas, tendremos un diseño

<sup>16</sup> Greg Lynn (1964) es dueño de la oficina de Greg Lynn FORM, Prof. de Arquitectura en la Universidad de Artes Aplicadas de Viena y profesor de estudio en la Escuela de Artes y Arquitectura de la UCLA. Fue el ganador del León de Oro en la Bienal de Arquitectura de Venecia 2008. En 2010 la firma de Lynn fue nombrada Fellow por United States Artists. Fue uno de los primeros en explorar el uso de la tecnología digital para el diseño y la construcción de edificios. Lynn trabaja con formas irregulares y biomorfas que, gracias al diseño asistido y el cálculo, permiten la generación de su expresión arquitectónica, utiliza las geometrías topológicas para curvar, torcer, deformar y diferenciar las estructuras, en un proceso de diseño dinámico que persigue entender las edificaciones como entes dinámicos, fluidos, en continuo proceso de cambio y de transformación hasta su concreción física final.

flexible y adaptativo a las circunstancias, cualidades que permiten brindar, no una sola solución sino una serie de posibles soluciones.



Fig. 16 [Greg Lynn: Bob Wall, Embryological house y Room vehicule], Fuente: Studio Greg Lynn <http://bit.ly/3oHpUYK>.

### 1.3. Cierre del capítulo

El avance de los medios tecnológicos permite que herramientas de diseño como los softwares de modelado en tres dimensiones, vinculados a herramientas de fabricación digital, nos permitan afrontar procesos de diseño, de una manera integral, desde la ideación hasta su producción.

La posibilidad de procesar grandes volúmenes de información que implica la reproducción de formas complejas, es uno de los pilares fundamentales en el desarrollo de la fabricación digital. Desde las primeras experiencias en los laboratorios de fabricación digital, ya sea con trabajos conceptuales a escala o en la producción de pequeños pabellones, hasta la producción de objetos arquitectónicos mediante este modo constructivo, el componente digital (Hardware + software) y su constante evolución, son los posibilitantes de estos logros. El impacto que genera en los ámbitos disciplinares, no es menor, no solo desde la incorporación y uso de herramientas digitales en los procesos de diseño, sino también, las lógicas de como concebir dichos procesos. El pensamiento computacional tanto como, la importancia del proceso en sí mismo, más que el resultado final, nutren de nuevos elementos la labor de todo diseñador. Es imperante desde los ámbitos educativos de nuestro medio, reconocer estas herramientas, evaluar su función y ponerlas en práctica dentro de los métodos de enseñanza/aprendizaje. No solo es el modo futuro de producir arquitectura, para lo cual nuestros profesionales deben de estar preparados, sino que también ya es parte del repertorio de técnicas utilizadas en otras latitudes, no muy diferente a nuestra realidad socioeconómica y educativa.

Por último, la actividad profesional ha tomado nota de estos avances y busca incorporar, aunque sea desde el lenguaje arquitectónico, nuevas morfologías no euclidianas, muchas veces replicando formas sin un soporte genuino en el desarrollo, pero buscando escapar de la uniformidad de las formas ortogonales. Paulatinamente, estas prácticas dejaron de ser un mero objetivo final formal, para transformarse en métodos de diseño, basados en tecnologías CAD-CAM.

# *C*apítulo **2** – *A*rgumentos de la fabricación digital

## Capítulo 2 – Argumentos de la fabricación digital

### 2. Introducción

En el presente capítulo se desarrollan los temas que sustentan e influyen el contenido de este trabajo. Sucintamente se abordan tópicos que directa e indirectamente abonan el sustrato teórico de la investigación. En ese sentido, *Geometría, Complejidad, Producción y Contexto*, son los ejes desde donde ensayar conceptos que nutran el trabajo de investigación. Si bien estos temas son muy extensos e inabarcables, una mirada sesgada desde lo tecnológico, posibilita una comprensión integral de los mismos, brindando un marco referencial a la investigación.

#### 2.1. Geometría

##### 2.1.1. Origen e interrelación disciplinar

*“La geometría es conocimiento de lo que siempre existe”*  
Platón (380 AC), La República

La geometría es una de las ciencias más antiguas, es una ciencia de rigor, sometida a la matemática y si bien su invención le es adjudicada a los egipcios, previamente los babilónicos con la invención de la rueda, crearon el grado sexagesimal, dividiendo a la circunferencia en 360°, el mismo número que la cantidad de días que tenía el año babilónico. Los egipcios desarrollaron la geometría en virtud de desentrañar problemas de orden económico y de manera totalmente empírica. Los ciclos productivos y la economía rural que giraban en torno al Nilo, que como todos los años inundaba las propiedades, obligó a los agrimensores<sup>17</sup> a buscar fórmulas y relaciones, es decir algoritmos, en donde se calculaban volúmenes, áreas y longitudes, permitiendo establecer nuevamente los límites de los campos.

Este tipo de geometría empírica, que floreció en el antiguo Egipto, Sumeria y Babilonia, fue refinado y sistematizado por los griegos, estos a través de la lógica Aristotélica formalizaron diferentes axiomas. Estos axiomas sentaron las bases de la geometría científica al demostrar a través de sus teoremas, que las diversas leyes arbitrarias e inconexas de la geometría empírica, se pueden deducir como conclusiones lógicas de un número limitado de axiomas. La geometría demostrativa de los griegos, que se ocupaba de polígonos y círculos y de sus correspondientes figuras tridimensionales, fue mostrada rigurosamente por el matemático griego Euclides<sup>18</sup>, en su libro *Los*

---

<sup>17</sup> El primer documento conocido acerca de la propiedad de tierras es “el registro de terrenos egipcios”, creado alrededor del año 3.000 a.C, el cual se muestra a los propietarios de tierras y su correspondiente ubicación. Gracias a Heródoto de Halicarnaso (historiador y geógrafo griego 484-425 a. C.), se conoce que en el antiguo Egipto trabajaban unos técnicos llamados “estiradores de cuerdas”, los que utilizaban cuerdas de longitudes conocidas con las que se encargaban de replantear los límites de las propiedades. Las herramientas de agrimensura que eran usadas en el antiguo Egipto eran simples, una plomada, una varilla de codo para mediciones cortas y una cuerda de calibración de 100 codos para mediciones largas.

<sup>18</sup> Euclides (325-265 a. C.) fue un matemático y geómetra griego, se le conoce como “el padre de la geometría”. Su obra *Elementos* es una de las producciones científicas más conocidas del mundo y era una recopilación del conocimiento académico impartido hasta ese entonces. En ella se presenta de manera formal, partiendo únicamente de cinco postulados, el estudio de las propiedades de líneas y planos, círculos y esferas, triángulos y conos, etc.; es decir, de las formas regulares. Algunos autores crearon geometrías nuevas basándose en invalidar o



*elementos*, estructurado bajo un modelo axiomático-deductivo, elabora las definiciones que construye toda la geometría y la aritmética conocidas y que perdurará como única verdad geométrica hasta comienzos del siglo XIX (fig. 17).

En el renacimiento, la necesidad de representación lleva a ciertos artistas, como *Pacioli, Durero, Alberti y della Francesca* entre otros, a estudiar propiedades



Fig. 17 [Los elementos de Euclides] .Fuente: <http://bit.ly/2YCCq9Z>.

geométricas que permitan plasmar la realidad; la perspectiva y la sección dan nacimiento a la *geometría proyectiva*. Los estudios de perspectiva de estos artistas, hicieron obsoleta la óptica euclidiana en el arte pictórico y renovaron la geometría. Por el contrario durante los siglos XVIII y XIX los nuevos avances técnicos de las matemáticas y de la física matemática sustituyeron naturalmente a la teoría de las proporciones y a la geometría clásica, renovando y consolidando la unión entre arte y ciencia, lo que permitió que ambas se vieran favorecidas. Esto se manifiesta claramente en la edad moderna, cuando gracias a Descartes surge *la geometría analítica*. Un estudio publicado como apéndice al *Discurso del Método*<sup>19</sup>, trae consigo una nueva forma de entender la geometría, un método algebraico que sustituye al sintético, de manera axiomática y estudia los objetos geométricos representados en el espacio con ecuaciones polinómicas.

Cabe recordar que históricamente, arte y ciencia padecían de un divorcio academicista de difícil sostén conceptual, en donde la geometría era vista como una disciplina científica de corte rígido, poco ligado a lo artístico.

Con la invención de la *geometría descriptiva*, Gaspard Monge<sup>20</sup> desarrolla su sistema diédrico que permite la representación de objetos tridimensionales sobre una superficie bidimensional y que llevó a la geometría de principios del siglo XIX a

sustituir el axioma de las paralelas, dando origen a las "geometrías no euclidianas". Dichas geometrías tienen como característica principal que al cambiar el axioma de las paralelas los ángulos de un triángulo ya no suman 180°.

<sup>19</sup> El *Discurso del método* (1637), cuyo título completo es *Discurso del método para conducir bien la propia razón y buscar la verdad en las ciencias (Discours de la méthode pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les sciences)* es la principal obra escrita por René Descartes y una obra fundamental de la filosofía occidental con implicaciones para el desarrollo de la filosofía y de la ciencia. Se publicó de forma anónima en Leiden, Holanda, y constaba de tres ensayos: *Dióptrica, Meteoros y Geometría*. <https://bit.ly/3B6vNpk>

<sup>20</sup> Gaspard Monge, (1746-1818), fue un matemático francés, inventor de la geometría descriptiva. <https://bit.ly/3a6XFOE>

expandirse globalmente, gracias en gran parte al desarrollo de algunos procesos que masificaron el consumo de bibliografía, como ser, la máquina de fabricar papel, el perfeccionamiento de la estereotipia, la litografía y la verdadera revolución industrial de la imprenta, como lo fue la máquina de impresión plano-cilíndrica accionada por vapor, desarrollada por el alemán Friedrich Koenig.

Esta expansión del conocimiento de la disciplina derivó en un sin número de geometrías aplicadas, tornándose una ciencia diversificada, compleja y mutante, que de una u otra manera acompaña el desarrollo cultural y tecnológico.

El comienzo de estas derivas podría definirse con el descubrimiento de las formas *no euclidianas*, Carl F. Gauss<sup>21</sup>, fue el primero en expresar con claridad una geometría distinta a la de Euclides (fig. 18), el desarrollo de sus teoremas fundamentales no fueron publicados en un principio por temor a la crítica del mundo matemático de aquella época, debido a la reacción que generaría este nuevo concepto de parte de las concepciones filosóficas imperantes, el *Kantismo*. Su creador, Immanuel Kant<sup>22</sup>, sostenía que la doctrina de la geometría Euclidiana es inherente a la naturaleza del mundo físico, mientras Platón decía que *solo Dios hacia geometría*, Kant afirmaba que *Dios hace geometría de acuerdo a los elementos de Euclides*.

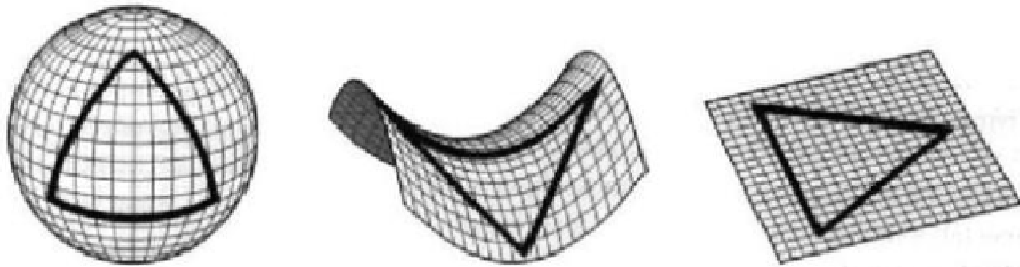


Fig. 18 [Gauss, curvatura positiva, curvatura negativa (no euclidiano) y curvatura cero (euclidiano)], Fuente: <http://bit.ly/2O1YoIP>.

Al día de hoy, dada su permanente transformación y estudio científico, la geometría comprende diferentes modos de ser abordada como herramienta resolutoria, desde la euclidiana, proyectiva y descriptiva, hasta la cinemática, diferencial, intrínseca, topológica, fractal, generativa, biomimética, etc.

Pero ¿qué otra cosa es la geometría sino es la construcción matemática del espacio bi y tridimensional?, dicho de otra manera, la geometría es una representación de cálculos matemáticos que se establece a partir de relaciones del todo con sus partes y viceversa, a cálculos simples, formas simples.

Le Corbusier (1923:16) escribía, *los cubos, los conos, las esferas, los cilindros o las pirámides son las grandes formas primarias que la luz revela bien; la imagen de ellas es clara y tangible, sin ambigüedad. Por esta razón son formas bellas, las más bellas. Todo el mundo está de acuerdo con esto: el niño, el salvaje y el metafísico. Es la condición esencial de las artes plásticas.*

<sup>21</sup> Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855) fue un matemático, astrónomo, geodesta y físico alemán que contribuyó significativamente en muchos campos, incluida la teoría de números, el análisis matemático, la geometría diferencial, la estadística, el álgebra, la geodesia, el magnetismo y la óptica. Considerado uno de los matemáticos que más influencia ha tenido en la historia. <https://bit.ly/3it1kuk>

<sup>22</sup> Immanuel Kant (1724-1804) fue un filósofo prusiano de la Ilustración. Fue el primero y más importante representante del criticismo y precursor del idealismo alemán. Es considerado como uno de los pensadores más influyentes de la Europa moderna y de la filosofía universal. Entre sus escritos más destacados se encuentra *la Crítica de la razón pura (Kritik der reinen Vernunft)*, calificada generalmente como un punto de inflexión en la historia de la filosofía. <https://bit.ly/3FrMVbQ>

El pensamiento de que toda obra humana posee un orden geométrico, deviene del razonamiento de que toda figuración geométrica es factible gracias al intelecto humano, en el siglo I a. C., Vitruvio<sup>23</sup> narra que, Aristipo<sup>24</sup> tras una tempestad que lo deja en las playas de Rodas, advierte figuras geométricas en las cavernas, ante las cuales exclama a sus acompañantes, *ánimo, amigos míos, nada temáis, pues aquí descubro pisadas de hombres.*

Evidentemente la Geometría es herramienta esencial de la arquitectura, se hace difícil concebir un proceso de diseño sin una geometría subyacente que define tanto como se percibe, como también su lógica constructiva, pasando de lo inmaterial a lo material.

Hasta mediados del siglo pasado, la arquitectura echaba mano a un elenco típico de elementos geométricos para diseñar, líneas, planos, prismas, cilindros, esferas, sólidos platónicos, etc.; salvo raras excepciones, esta vivía encorsetada dentro del *international style* y condicionada por lógicas de producción de posguerra.

La adopción de herramientas informáticas en nuestro campo a partir de la segunda mitad del siglo pasado posibilitó, en un principio, mejores representaciones, posteriormente permitió abordar formas de geometría compleja y hoy presupone una revolución tecnológica con reproducción material de dichas geometrías.

Lo interesante de este escenario, mas allá de la revisión de ciertos paradigmas de producción, es que la comunicación con los sistemas informáticos resultan cada vez más accesibles en términos de comprensión y práctica, no solo porque los programadores diseñan software con curvas de aprendizajes cada vez más elevadas, sino porque también estamos cada vez más familiarizados con lo digital y la mayoría de los programas que utilizamos. La mayoría de los software, y no solo los de diseño, poseen lógicas de funcionamiento similares permitiendo interactuar con ellos de manera fluida, utilizando geometrías de una complejidad que resultaría casi imposible de realizar de manera análoga, inclusive sin conocer el álgebra de los algoritmos ni las lógicas que permiten su construcción.

La geometría es la responsable en gran medida, de posibilitar los procesos que van desde la elaboración del proyecto hasta la materialización de la obra, sería difícil concebir arquitectura sin geometría.

### 2.1.2. La geometría como instrumento de diseño

En la antigüedad las relaciones numéricas y formas geométricas representaban la estructura armónica del cosmos, el Arte por consecuencia, debía expresar ese orden matemático a través de cánones precisos. En el Renacimiento, el cuerpo humano como creación natural, reflejaba esas proporciones, como así también las relaciones entre los planetas o la armonía musical y por lo tanto, la obra de arquitectura, debía ser proyectada en base a proporciones y relaciones matemáticas armónicas.

En ese sentido, la geometría ha facilitado el conocimiento necesario para la construcción de objetos y ha permitido desarrollar la creatividad de los diseñadores de manera precisa, reproducible y comunicable. Mantiene con el diseño una relación

---

<sup>23</sup> Marco Vitruvio Polión (80-70 / 15 a. C.) fue un arquitecto, escritor, ingeniero y tratadista romano del siglo I a. C. Es el autor del tratado más antiguo sobre arquitectura que se conserva y el único de la Antigüedad clásica, *De Architectura*, redactado en 10 libros, la obra trata sobre órdenes, materiales, técnicas decorativas, construcción, tipos de edificios, hidráulica, colores, mecánica y gnomónica. <https://bit.ly/3l6EgL8>

<sup>24</sup> Aristipo (435-350 a. C.) fue un filósofo griego fundador de la escuela cirenaica que identificaba el bien con el placer. <https://bit.ly/3l7CG43>

milenaria y es un instrumento metódico que aporta medidas, proporciones, transformaciones, simetrías, modularidad, repeticiones; todos conceptos que forman parte del instrumental básico del diseño.

La presencia de la geometría en el ámbito del diseño supera al mero desarrollo de un lenguaje determinado o una imagen<sup>25</sup>, resultando fundamental su utilización en algunos aspectos de relevancia dentro de los procesos creativos, más precisamente en la posible materialidad de lo que se está proyectando, en donde las relaciones entre los diferentes materiales, las posibilidades formales de estos y su aplicación, requiere de un sustento conceptual verificable a través de la geometría.

La arquitectura desde su origen disciplinar, se encuentra abrevada por un cúmulo de conocimientos que pertenecen a diferentes disciplinas, tornándola una profesión de carácter holístico, en donde el diseño arquitectónico no se reduce a la creatividad geométrica, sino que debe conjugar esta, con las consideraciones ergonómicas, económicas, perceptivas, el lugar, el clima, la temporalidad, etc. Esta característica disciplinar hace de la arquitectura una profesión en constante proceso de mutabilidad y adaptabilidad frente a los diferentes periodos históricos.

Antes del uso masivo de dispositivos digitales, todo proceso de diseño que incluyera formas complejas, ya sean cónicas, regladas o de doble curvatura, se desarrollaba de manera analógica, en muchos casos con modelos a escala<sup>26</sup>, que iban tras la búsqueda de una optimización del material, en pos de la eficiencia estructural.

En ese sentido, la geometría como herramienta de diseño, fue transformando su utilidad y diversificando su uso a lo largo de la historia ya que, gracias a una profunda tecnificación, se convierte en una *herramienta proyectual*, para dejar de ser solo una *herramienta de representación*, lo que permite a los diseñadores desarrollar procesos integrales, que van de la *ideación* del objeto, a la *producción* del objeto.

Uno de los aspectos más relevantes que transforman al diseño arquitectónico, sucede cuando el CAD se incorpora a estos procesos, utilizando el modelado tridimensional como instrumento activo, capaz de procesar operaciones matemáticas complejas, que son imposibles de realizar analógicamente.

Cálculo, geometría y simulación, nos permiten expandir el universo morfológico, un universo que, como disciplina arquitectónica, se encontraba inmerso en un contexto dominado por las formas diédricas y que a partir de la adopción de herramientas digitales explora un mundo que derriba paradigmas, no solo en términos de proceso de diseño, sino también de producción.

Como decíamos con anterioridad, en un principio el uso digital de la geometría se encontraba circunscripto a la mera representación gráfica y documentación para el intercambio de información técnica, dada la capacidad de contener, comunicar y usar

---

<sup>25</sup>La posibilidad de utilizar el concepto de lenguaje aplicado a un sistema gráfico (o representación geométrica) es relativamente reciente. Toda la semiología europea se opuso a considerar lenguaje a cualquier otro sistema no relacionado estrictamente con el mal llamado lenguaje "natural" o verbal. Sin embargo, actualmente, teóricos como Juan A. Magarinos de Morentin (sobre el particular puede verse "Analítica de la imagen visual", 1997) se oponen a utilizar palabras provenientes de la lingüística como gramática o texto aplicadas a lo visual. Aun concordando plenamente con lo razonable de la propuesta prefiero el uso metafórico de estos términos antes que el vacío terminológico consecuente. Los desarrollos teóricos en el campo del diseño en general están tan atrasados respecto de la lingüística, que se justifica correr algunos riesgos con tal de poder sistematizar y contrastar la validez de ciertas comparaciones. Claudio F. Guerri, "Representar la ciudad. Modos de simulación en los lenguajes gráficos" (1997)

<sup>26</sup>Hubo varios arquitectos que utilizaron modelos análogos a escala que les permitiera aproximarse a la mejor forma posible desde el punto de vista de la eficiencia de las mismas en términos estructurales. Entre ellos tenemos a Gaudí con sus catenarias, Frei Otto y las pompas de jabón y Buckminster Fuller con el desarrollo evolutivo del tetraedro en estructura geodésica. Ver punto 1.2.1 Estado del arte, del presente trabajo.

dicha información, trae consigo una serie de mejoras sobre los métodos tradicionales, incrementando la capacidad productiva.

La geometría es fundamentalmente información que puede ser contenida en los datos, ordenados en cadenas de bits, que se puede transformar, borrar, corregir y copiar; y no difieren en gran manera de un número, por lo que los elementos geométricos son descritos como las relaciones entre estos y las fórmulas necesarias para su representación, dentro de un sistema de coordenadas espacial.

De esta manera, la tecnología digital formaba parte de la etapa final de un proceso lineal, para representar, documentar y comunicar y no era tenida en cuenta en las fases tempranas de los procesos de diseño, como una herramienta de optimización y evaluación del proyecto.

Estos modos de representación ligados a la producción arquitectónica dan un vuelco importante con la llegada de la computadora personal, la masificación del ordenador como herramienta proyectual en la arquitectura, junto al desarrollo de sistemas informáticos y de programas dirigidos a asistir al proceso de diseño, favorecen este escenario de renovación de la geometría, como insumo disciplinar.

Estas técnicas de representación, además de su utilidad indudable, han posibilitado al diseñador disponer de geometrías complejas sin el necesario conocimiento y manejo de sus leyes de formación, y además, cambia la concepción de lo que geoméricamente veníamos acostumbrados a utilizar. De un elenco típico de elementos geométricos al que se echaba mano para diseñar como, líneas, planos, prismas, cilindros, esferas, etc.; a un repertorio mucho más diversificado, como ser, Nurbs, mallas, operaciones booleanas, generativas, fractales, etc., conceptos con los cuales no necesariamente estamos familiarizados, pero que al conocer su origen y sus lógicas de reproducción, podemos disponer de ellas como potentes herramientas de diseño (fig. 19).

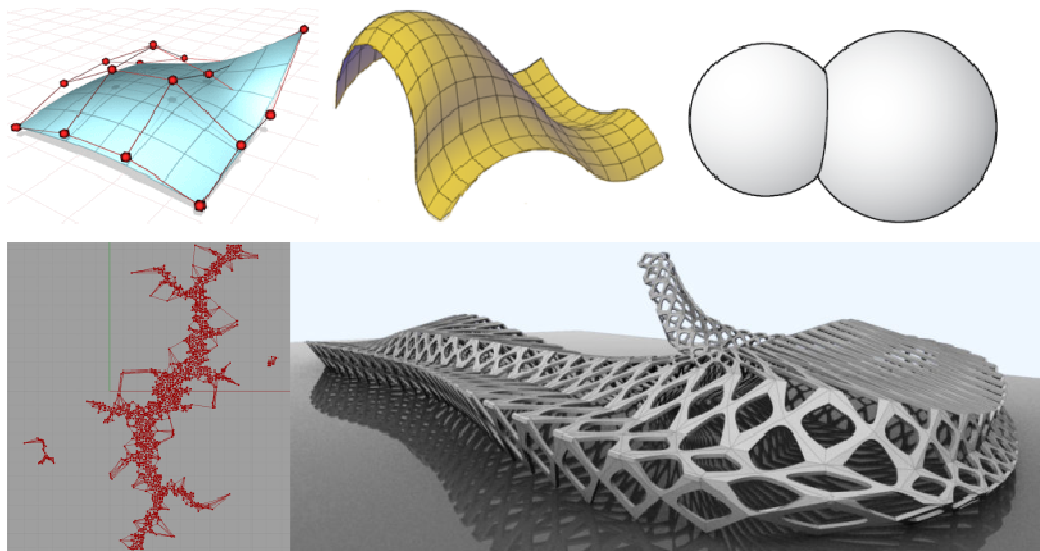


Fig. 19 [Nurbs, mallas, booleanas, fractales y generativas], Fuente: arriba izq. <http://autode.sk/39EASd5>, arriba centro <http://autode.sk/3cG4CbL>, arriba izq. <http://bit.ly/3pULNp3>, abajo izq. <http://bit.ly/2Lcve8J>.

Esto requirió un lapso de adaptación por parte de los diseñadores, que al utilizar gráficos tridimensionales, reconocen el beneficio de estos y que, a diferencia de los dibujos bidimensionales usados, los modelos proporcionan un nuevo método para

estudiar y pre visualizar los diseños, lo que permite evaluar diferentes alternativas por medio de la simulación. En síntesis, la virtud del dibujo asistido no radica en la documentación, sino en amplificar las experiencias de los procesos proyectuales de diseño a través del uso de herramientas de generación y transformación de la geometría de la forma arquitectónica.

Al incorporar herramientas digitales de diseño, surge una contraposición a los modelos de procesos proyectuales tradicionales, definidos fundamentalmente por la búsqueda formal a través de la manipulación abstracta de objetos, nos lleva a reformular nuestra disciplina, desde la teoría y como reordenar los tradicionales procesos de diseño.

Esta reformulación se debería sustentar en una conceptualización de dichos procesos, entendiéndolos como no-lineales y cognitivamente orgánicos. Basados en este paradigma, las dinámicas de los procesos de formulación, evaluación y reformulación reemplazan un proceso de diseño lineal aferrado a la evolución morfológica de un objeto determinado.

Esta visión permite explorar de una forma más profunda la introducción de las computadoras en el proceso de diseño, que llevan a cambiar el aspecto cognitivo del diseño y la enseñanza de este, en el cual se deben plantear las bases teóricas, ontológicas y terminológicas relativas al uso de herramientas digitales y sus implicaciones y que alcances ha tenido, tiene y tendrá su uso, no solo en el cómo representamos la arquitectura sino en el cómo la hacemos. (Frazer, 2009).

Como vimos, la geometría sustancia a la arquitectura desde dos aspectos diferentes pero complementarios, en donde por un lado se torna herramienta indispensable para representar y comunicar y por otro se vuelve parte indisociable del proceso proyectual. Es la disciplina la que nos permite transitar desde la inmaterialidad de la idea o la representación de la realidad, como una imagen de lo que será a través de la percepción y el pensamiento, hasta la determinación de una forma, que se hará realidad tangible y material.

### 2.1.3. Matemáticas de la geometría

*“Peso cero, lapso infinito”* Le Ricolais

El título del presente apartado es engañoso, es obvio que la geometría no posee una matemática, sino que esta *per se* es una rama de la misma, pero en general, consideramos matemáticas a los números y geometría a los gráficos.

Si quisiéramos ser precisos en realidad deberíamos estar hablando de aritmética y álgebra de la geometría, y en función de la complejidad, tendríamos que hablar de análisis matemático. La rutina y naturalidad con la que usamos formas geométricas como entidades que generan valor en sí mismas nos alejan paulatinamente del soporte matemático científico que sostiene a las mismas a través del álgebra y la aritmética.

Desde el origen de su producción cultural, el ser humano ha establecido permanentemente acuerdos sociales de lo que es bello y armónico, ya sea a través de las operaciones de mimesis tan recurrentes en la historia, como también en la relación directa que este establece entre, lo ameno de las formas y las proporciones de su cuerpo. No obstante, toda forma provenga de donde provenga e independientemente de su grado de complejidad, está legitimada por la aritmética. Formas simples, cálculos simples; formas complejas, cálculos complejos.

Ahora bien, el conocimiento de las formulaciones matemáticas que hay detrás de las formas, muchas veces es desconocido y se actúa mas bien por intuición, que por un

razonamiento matemático analítico, es decir nos basamos más en lo que interpretamos como proporción en función de cuan formado este nuestro ojo, más que en un argumento algebraico que dota de proporcionalidad de manera axiomática, a través de cánones como el número áureo o la sucesión de Fibonacci.

La primera relación o proporción que se entendió por bella o armónica, fue la que conocemos como número FI ( $\varphi$ )<sup>27</sup>, este número surge de la intención de dividir un segmento en dos partes desiguales ( $a+b=l$ ) de la forma más armónica posible, y esto se logra cuando la relación entre la longitud total y el segmento mayor es igual a la relación entre el segmento mayor y el menor, y esto se expresa matemáticamente como:

$$\frac{a+b}{a} = \frac{a}{b} ; a^2 = a \cdot b + b^2 ; a^2 - ab - b^2 = 0 ;$$

lo que nos lleva a una ecuación de segundo grado;

$$a = \frac{b \pm \sqrt{b^2 + 4b^2}}{2} = \frac{b \pm b\sqrt{5}}{2} = \left[ \frac{1 \pm \sqrt{5}}{2} \right] b ;$$

tomando el valor positivo de la raíz, obtenemos;

$$\varphi = \frac{a}{b} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} ;$$

llegamos al número de oro, que es un número irracional y cuyo valor es:  $\varphi = 1,618033989.....$

Este simple cociente entre las longitudes de dos segmentos ha despertado el interés y la curiosidad de filósofos, geómetras, matemáticos, pintores, arquitectos y escultores estableciendo una dualidad arte / matemática, una dualidad que para los hombres formados de la antigüedad no era tal, ya que estos no establecían diferencia alguna entre el área de ciencias y el área de humanidades. El *número de oro* es algo más de un simple cociente de longitudes, en su valor matemático lleva asociado un concepto estético, el canon de la belleza, de la proporción perfecta. Se encuentra muy ligado al pentágono<sup>28</sup> regular tanto el convexo como el estrellado, esta figura era el distintivo de los pitagóricos, los cuales se sentían fascinados por las propiedades de los números e hicieron importantes descubrimientos de estos aplicados a la música. Por ejemplo, descubrieron que al hacer vibrar una cuerda cuya longitud fuera proporcional a ciertos números enteros, notaron que se producían unos sonidos melódicos, por lo tanto, existían ciertas longitudes expresadas en forma de números, asociadas a la armonía de los sonidos.

El número de oro no sólo aparece en las obras de arte, sino también en la naturaleza, por ejemplo, las líneas que definen la espiral del caracol marino Nautilus, esta reglada por una sucesión cuadrática del número de oro. Los huevos de gallina son óvalos que pueden inscribirse en rectángulos de oro, es decir, la altura y la anchura del huevo siguen la razón áurea.

<sup>27</sup> Este número recibe su nombre del escultor Fidias (5 a. C), autor del friso y del frontis del Partenón, fue quien lo utilizó ampliamente por sus propiedades, en su destacada obra artística.

<sup>28</sup> El pentágono tiene un rol fundamental en las estructuras de organización natural ya que combinado con el hexágono genera formas con eficiencia estructural, como el domo hexapenta, la molécula gigante del carbono 60 y los radiolarios. De más esta decir que los griegos no habían conseguido ese grado de conocimiento, pero si sabían que la relación entre las apotemas (distancia perpendicular desde el centro de un polígono una de sus caras) entre un hexágono y un pentágono adyacentes, con la misma longitud de sus lados, está definida por el número de oro.



Leonardo de Pisa, más conocido por Fibonacci (hijo de Bonaccio), a pesar de ser un matemático brillante con una importante obra en su haber, es conocido principalmente por una cuestión aparentemente trivial, una sucesión de números enteros en la que cada término es igual a la suma de los dos anteriores:  
1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55,....

La sucesión fue presentada en su libro Liber Abaci (1202) no obstante, muchas de sus propiedades fueron descubiertas por Édouard Lucas, quien la bautizó con la denominación que se la conoce hoy. Esta sucesión es uno de los temas más sorprendentes de la matemática, posee una amplísima variedad de aplicaciones, como por ejemplo, la generación de algoritmos para el cálculo de máximos y mínimos de funciones complicadas cuya derivada es difícil de obtener, o en poesía, ciertas obras de Virgilio y otros poetas de su época se sirvieron deliberadamente de la sucesión de Fibonacci en sus composiciones, así también el número de rutas que recorre una abeja cuando se desplaza por las celdillas de un panal son términos de la sucesión de Fibonacci.

Lo interesante es que esta sucesión se emparenta con el número de oro, ya que, si tomamos cada término de la sucesión y lo dividimos por el anterior, los cocientes que obtendremos convergen a hacia el valor 1,618033989....

El número áureo también establece relaciones con la figura humana, los clásicos interesados por los cánones de la belleza, hacían referencia, a que la distancia del ombligo al suelo es justamente la razón áurea de su altura, como así también en la mano humana, la distancia entre las falanges, están en la razón áurea de la longitud del dedo (fig. 20).

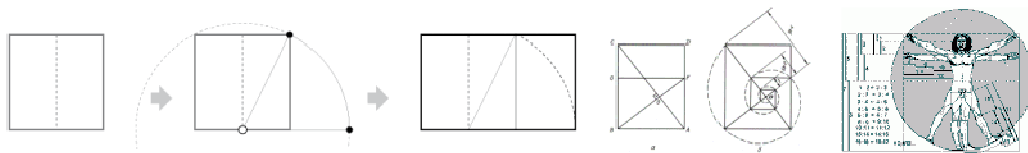


Fig. 20 [Construcción de la proporción áurea, su relación con la serie de Fibonacci y el cuerpo humano], Fuente: izq. <http://bit.ly/3j8NX1H>, centro <https://bit.ly/3j9vfXH> y der. <http://bit.ly/3reifGZ>.

Resulta difícil hablar de formulaciones matemáticas si uno no está específicamente formado en ellas, y si bien los softwares de modelado tridimensional nos permiten tomar ciertos atajos respecto a esta ignorancia, el máximo conocimiento de las lógicas de construcción de las formulaciones matemáticas posibilitantes de la forma y su geometría, redundara en un mayor control del proceso de elaboración de estas. En ese sentido resulta interesante destacar el trabajo de George Robert Le Ricolais<sup>29</sup>, el cual centra su búsqueda en desafiar las nociones unánimemente aceptadas de forma y espacio. Sus investigaciones se enfocaban en descubrir aproximaciones matemáticas a las geometrías con el fin de pulir las consideraciones subjetivas de la forma, eliminando lo circunstancial y accesorio. La forma no es una idea ligada a la percepción sensorial de la realidad, sino más bien Le Ricolais desconfía de la verdad de las imágenes y a menudo solía repetir un refrán oriental que dice *las cosas mismas mienten, y también sus imágenes*.

<sup>29</sup> Robert Le Ricolais (1894-1977), ingeniero francés considerado como uno de los creadores del principio de estructura espacial, de lógica matemática y observación de la naturaleza. Ricolais pensaba que el arte de la estructura consistía en "donde colocar los agujeros".



Para él, la intervención en el soporte de lo natural a través de la forma construida requiere entender los mecanismos secretos de la naturaleza, pero no como una operación de mimesis, sino más bien para un profundo entendimiento de ésta. Le Ricolais habla de naturaleza y de topología<sup>30</sup> desde una óptica compleja, una interpretación de la idea de estructura totalmente armonizada con el devenir del paradigma de la geometría y la complejidad. Acepta la idea de Gauss, a quien llama el primer gran arquitecto de las matemáticas, de que la forma es una entidad puramente matemática, con propiedades intrínsecas, y por lo tanto la realidad se moldea a sí misma de acuerdo a puras abstracciones matemáticas. Uno de los aspectos que más interesaban a Le Ricolais eran las estructuras internas de los huesos, una malla tridimensional de gran complejidad formal, cuya geometría se revelaba ante cualquier cálculo, debido al gran número de barras por nudo y a su gran variabilidad. La naturaleza siempre optimiza recursos buscando ser lo más eficiente posible, se dice que es “haragana” y en el caso de las estructuras óseas, la disposición de huecos de diferente forma y distribución, tiene por objetivo encontrar la máxima resistencia con el mínimo peso, y por tanto con el consiguiente gasto mínimo de energía (fig. 21).

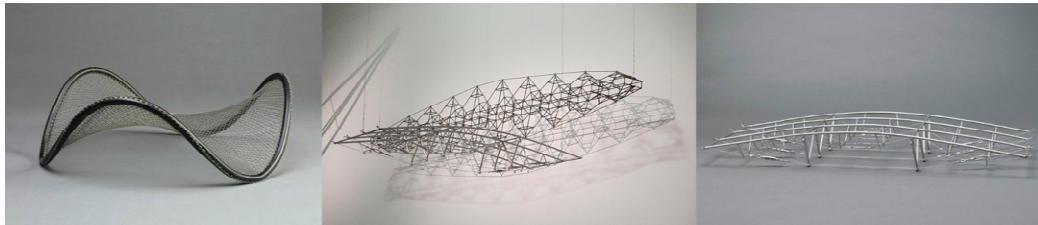


Fig. 21 [Modelos estructurales de Le Ricolais], Fuente: <http://bit.ly/2Lb14oQ>.

El ejemplo de Le Ricolais es válido desde una visión científicista de la matemática como herramienta de análisis de dilucidación de comportamientos y fenómenos naturales, pero desde una visión más orientada a la producción artística, podemos citar como referencia de aplicación estética de los números, a Dalí, quien llevó a cabo en sus obras un extraordinario desarrollo de las matemáticas. Como los maestros clásicos, aplica el conocimiento científico al equilibrio de las composiciones, en especial, gracias a los consejos del matemático húngaro Matila Ghyka<sup>31</sup>, hizo uso de la relación áurea. Es el caso del cuadro “Semitaza gigante volante, con anexo inexplicable de cinco metros de longitud” (1945) donde una espiral áurea controla toda la composición. Si bien la geometría desde sus comienzos fue una disciplina más bien empirista, a través de la teorización axiomática y formal termina develando el soporte científico de la experiencia. Los avances tecnológicos han posibilitado la velocidad y exactitud de cálculo, lo cual posibilita la realización de cualquier forma imaginable, de hecho se considera una disciplina agotada en términos de lo que queda por dilucidar del mundo geométrico conocido, pero no obstante la geometría tiene la capacidad aun de denotar un universo inabarcable, puede como por ejemplo, argumentarnos el

<sup>30</sup>La *topología* es la rama de las matemáticas dedicada al estudio de aquellas propiedades de los cuerpos geométricos que permanecen inalteradas por transformaciones continuas. Es una disciplina que estudia las propiedades de los espacios topológicos y las funciones continuas. La topología se interesa por conceptos como proximidad, número de agujeros, tipo de consistencia, etc. En arquitectura hace referencia a la fluidez espacial, continuidad de superficies y formas curvilíneas.

<sup>31</sup>El príncipe Matila Costiesco Ghyka (1881-1965), fue un poeta, novelista, ingeniero eléctrico, matemático, historiador, militar, abogado y diplomático rumano. Tuvo una gran predilección por la relación aurea, dedicándole gran parte de sus escritos a la misma.

descubrimiento de procesos de organización natural a escala molecular hasta ahora no precisados, como son los casos del *fullereno* y del *escutoide*<sup>32</sup> (fig. 22).

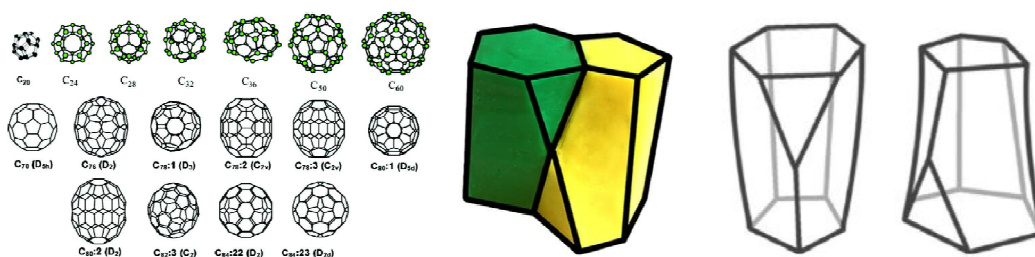


Fig. 22 [Variantes del fullereno y conformación del escutoide], Fuente: izq. <http://bit.ly/3oH06fn>, centro y der. <https://go.nature.com/3tfJJKh>.

#### 2.1.4. Dominio de las formas

La revolución digital ha introducido en nuestra disciplina nuevas herramientas y modos de desarrollar un proceso de diseño cuya geometría sea de complejidad. Dentro de estas nuevas herramientas digitales esta lo que se denomina *programación gráfica de algoritmos*<sup>33</sup> para el modelado 3D, lo que demanda una nueva conceptualización del universo del conocimiento en el diseño. En ese sentido, es válido reconocer el concepto de *pensamiento matemático* y el de *pensamiento computacional*, ambos están ligados a reproducir una estructura cognoscitiva ligada a un orden mecanicista, en donde la eficiencia de recursos, la sistematización productiva y la importancia del proceso tanto como el resultado son las características fundamentales de dichos conceptos.

El pensamiento matemático consiste en la sistematización y la contextualización del conocimiento de las matemáticas, este tipo de pensamiento se desarrolla a partir de conocer el origen y la evolución de los conceptos y las herramientas que pertenecen al ámbito matemático. Al desarrollar este pensamiento, el sujeto alcanza una formación matemática más completa que le permite contar con un cuerpo de conocimientos importante que le será de utilidad para llegar a los resultados.

El pensamiento matemático, por lo tanto, incluye conocer cómo se ha ido formando un concepto o técnica, de esta manera, la persona conoce sus dificultades inherentes y descubre como explotar su uso de forma adecuada. A su vez incluye el estudio de conceptos, técnicas y algoritmos vigentes en cada momento histórico, como así

<sup>32</sup>Un *fullereno* es una molécula compuesta por carbono que puede adoptar una forma geométrica que recuerda a una esfera, un elipsoide, un tubo (llamado nanotubo) o un anillo. Los fullerenos son similares al grafito, compuesto de hojas de anillos hexagonales enlazadas, pero conteniendo anillos pentagonales y a veces heptagonales, lo que impide que la hoja sea plana. Son la tercera forma molecular estable conocida de carbono, tras el grafito y el diamante. Fueron descubiertos en recién 1985 por H. Kroto, R. Curl y R. Smalley, lo que les valió el Premio Nobel de Química en 1996, y su nombre se debe en honor a B. Fuller, por la semejanza de su estructura con la de la estructura geodésica. Más recientemente, investigadores del Departamento de Biología Celular de la Universidad de Sevilla y el Instituto de Biomedicina de Sevilla (IBiS) han descubierto que las células epiteliales toman una forma geométrica que nunca antes se había descrito y que se solían representar como un prisma o pirámides truncadas. Fueron llamadas *escutoide* y tiene la ventaja de, al adoptar esta forma, otorgarle mayor estabilidad y eficiencia energética para la construcción de tejidos.

<sup>33</sup>Se define por algoritmo al conjunto ordenado de operaciones sistemáticas que permite hacer un cálculo y hallar la solución de un tipo de problema. La programación visual permite la creación de algoritmos que automaticen acciones sin tener que escribir códigos, a través de una interfaz amigable, se vinculan componentes, estableciendo relaciones y fórmulas matemáticas entre ellos.

también evaluar los logros y descubrimientos de la antigüedad, hasta el conocimiento actual. Está íntimamente relacionado con la capacidad de pensar y trabajar en términos numéricos empleando el razonamiento lógico, lo cual permite a su vez trascender el ámbito matemático y comprender conceptos de otra naturaleza, permitiendo al cerebro convertir los cálculos, las hipótesis, las cuantificaciones y las proposiciones, en un recurso natural. Este tipo de pensamiento es factible de ser desarrollado por cualquier persona y el principal requerimiento para ello es el estímulo o entrenamiento constante.

Por su parte el pensamiento computacional es algo más reciente y hace referencia al proceso por el cual un individuo, a través de habilidades propias de la computación y otros tipos de pensamiento como el crítico y el lateral, logra hacerles frente a problemas de distinta índole. El término tiene su origen las ideas de Seymour Papert<sup>34</sup>, pero es Jeanette Wing<sup>35</sup> quien lo desarrolla. El pensamiento computacional incluye habilidades tales como modelar y descomponer un problema, procesar datos, crear algoritmos y generalizarlos. Se utiliza para resolver de forma algorítmica problemas de distintas disciplinas incluyendo las matemáticas, las ciencias biológicas y las humanidades. Este concepto involucra la resolución de problemas, el diseño de sistemas y el entendimiento del comportamiento humano, aplicando para ello conceptos estructurales de la computación.

Este concepto surge en el año 2006 cuando Wing publicó el artículo *Computational thinking* en el que defendía que esta nueva competencia debería ser incluida en la formación de todos los niños y niñas, ya que representa un ingrediente vital del aprendizaje de la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas. Para Wing la esencia del pensamiento computacional es pensar como lo haría un científico informático cuando nos enfrentamos a un problema.

Ambos conceptos, el pensamiento matemático y el computacional, implica asimilar estructuras subyacentes dentro de nuestro proceso de diseño, un proceso que estará caracterizado por su fácil mutabilidad, permeabilidad conceptual y regulado por parámetros. Si esto lo aplicamos a la resolución de la forma, encontraremos que la forma más que un fin es una consecuencia. En ese sentido, sobre la forma, Villamil Villar<sup>36</sup> expresa que *“La forma es un dominio incuestionable de la disciplina del diseño, por tanto el análisis, la crítica, la construcción y la reconstrucción conceptual y práctica*

---

<sup>34</sup>Seymour Papert (1928-2016) fue un matemático pionero de la inteligencia artificial, inventor del lenguaje de programación Logo en 1968. Es considerado como destacado científico computacional, matemático y educador. Consideraba que uso de las computadoras podía cambiar las maneras de aprendizaje. En los 60', la gente se burló cuando planteaba que los PC, máquinas que recién estaban en desarrollo, podían ser útiles para mejorar el aprendizaje y la creatividad de los niños, más aún, planteaba la idea de un computador personal de bajo costo para cada alumno, lo cual era una utopía para la época. Papert trabajó con el psicólogo educativo Jean Piaget en la Universidad de Ginebra y fue invitado a unirse al Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), donde junto a M. Minsky fundó el Instituto de Inteligencia Artificial.

<sup>35</sup>Jeannette Marie Wing (1956) es una teórica informática e ingeniera estadounidense. Es directora de Avaneessians del Instituto de Ciencias de Datos de la Universidad de Columbia, donde también es profesora de informática. Hasta junio de 2017 fue vicepresidenta corporativa de Microsoft Research. Wing es promotora del pensamiento computacional, que en palabras de Wing, sería *“Cuando uso el término pensamiento computacional, mi interpretación de las palabras “problema” y “solución” es amplia y, en particular, no me refiero sólo a problemas bien definidos matemáticamente, cuyas soluciones son completamente analizable (por ejemplo, una prueba, un algoritmo, o un programa), sino también a problemas del mundo real cuya solución pueda estar en la forma de grandes y complejos sistemas de software. Por lo tanto, el pensamiento computacional se superpone con el pensamiento lógico y con el pensamiento sistémico: incluye pensamiento algorítmico y pensamiento paralelo, que a su vez participan de otras formas de pensamiento, como por ejemplo el razonamiento por composición, la coincidencia de patrones, el pensamiento procedimental y el pensamiento recursivo”*.

<sup>36</sup>*“De la abstracción geométrica a la morfogénesis digital: Metaforma: dominio del diseño en el desarrollo de productos”* Tesis Doctoral, Madrid, 2018.

*en torno a ella, hacen parte de una dinámica propia de las profesiones liberales como lo es el diseño. Las discusiones sobre si la forma sigue la función, sigue el material o si ésta es copia de la naturaleza, son discusiones que sirven como soporte argumentativo del dominio de conocimiento en diseño y hará parte de su discurso epistemológico de manera permanente entre tanto exista una actividad intelectual a su alrededor y existan cambios en el entorno creativo, productivo y tecnológico.”*

La influencia digital a través del CAD en el ámbito arquitectónico, empieza a tener otra preponderancia dentro del proceso de diseño gracias a la evolución del software que paso de ser una mera herramienta de representación, a una herramienta de modelado basada en la programación visual. El control de estas herramientas posibilita el dominio y creación de formas radicalmente distintas, teniendo como principales recursos operativos al parámetro y la topología. Esta iteración entre ambos posibilita que un sinnúmero de factores actúe de manera conjunta, abordando el diseño desde el proceso en sí mismo, más que en la resolución final. Esta manera de aproximarse al diseño de una manera abstracta y conceptual, soportada por densos cálculos matemáticos que viabilizan lo complejo de manera exacta, la denominamos *diseño paramétrico*. Estos cálculos matemáticos son de carácter activo y visual (a través de iconografías y no de números) en donde las ecuaciones y teoremas sirven como medios para convertirse en estrategias de diseño (Woodbury, 2010).

Los procesos de diseño son comúnmente iterativos por medio de etapas de retroceso, refinamiento y rediseño (feed back), para lo cual comúnmente es utilizado software de modelado 3D, pero los modelos son construidos de manera estática y difíciles de modificar requiriendo mucho tiempo y esfuerzo, máxime cuando las geometrías son de forma libre. El uso de la geometría asociativa y paramétrica torna más eficiente la manipulación de formas, pero requiere un cambio fundamental en el pensamiento proyectual, entendiendo a éste como una lógica sistemática para codificar nuestras intenciones de diseño.

Este recurso tecnológico ha significado la rotura de las restricciones geométricas y ha permitido abordar la complejidad de las formas, aumentando exponencialmente las posibilidades de experimentación y exploración.

En ese sentido resulta estimulante referenciar desde la experimentación y exploración topológica, el trabajo de Greg Lynn, el ensayo sobre *"Curvilinealidad Arquitectónica. Lo plegado, lo flexible y lo supletorio"* (1993) es uno de los primeros ejemplos del nuevo enfoque topológico de diseño que se aleja de la "lógica de conflicto y contradicción" deconstructivista entonces dominante, para desarrollar una "lógica más fluida de conectividad" que se manifiesta por superficies continuas, altamente curvilíneas.

Aquello que define a la arquitectura topológica es su salida de la geometría euclidiana (y su representación de volúmenes discretos en el espacio cartesiano) y el uso extensivo de geometrías topológicas tipo "láminas de goma" de curvas y superficies continuas, matemáticamente descritas como NURBS. En el espacio topológico, la geometría no está representada por las ecuaciones implícitas, sino por funciones paramétricas que describen una serie de posibilidades (Piegl y Sierpe 1997).

La forma de una curva o superficie NURBS se controla mediante la manipulación de la ubicación de puntos de control, los pesos y los nudos. Las NURBS hacen las formas heterogéneas, aún coherentes del espacio topológico computacionalmente posible. Al cambiar la ubicación de los puntos de control, los pesos, y los nudos, se puede producir cualquier número de curvas y superficies diferentes.

Dentro de las NURBS, están las denominadas superficies isomórficas, como los *Blobs o metaballs*, los cuales son objetos amorfos construidos como ensamblajes compuestos de objetos paramétricos mutuamente infligidos, con fuerzas internas de masa y

atracción. Los campos de ejercicio o regiones de influencia, pueden ser aditivos o sustractivos. La geometría se construye mediante el cálculo de una superficie en la cual el campo del compuesto tiene la misma intensidad (de allí el nombre). Las superficies isomórficas abren otro universo formal, donde las formas pueden sufrir variaciones dando lugar a nuevas posibilidades. Los objetos interactúan entre sí en lugar de solo ocupar el espacio, se conectan a través de la lógica, donde el todo está siempre abierto a la variación, donde se añaden nuevos blobs (campos de influencia) o se hacen nuevas relaciones, creando nuevas posibilidades. El límite de la superficie del todo se desplaza o se mueve conforme a la variación en ubicación o intensidad por parte de los campos de influencia. De ese modo, los objetos comienzan a operar dentro de una dinámica en lugar de una geografía estática (fig. 23).

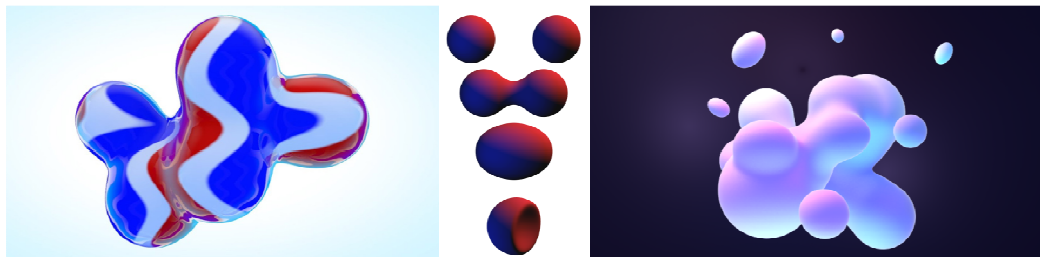


Fig. 23 [Metaballs], Fuente: izq. <http://bit.ly/2MwBwR8>, centro <http://bit.ly/2LbP9EL> y der. <http://bit.ly/2LbTNTe>.

## 2.2. Complejidad

*Esse est percipi. Ser es ser percibido.* George Berkeley (1710)

### 2.2.1. El paradigma de la complejidad en la arquitectura

Es difícil entender los diferentes eventos naturales y culturales sin asumirlos como hechos complejos. Durante los últimos sesenta años la complejidad ha ido entrelazando conceptos científicos que venían discurriendo por andariveles muy precisos e individuales. La realidad es compleja, las relaciones entre las cosas son complejas, existen ciencias que estudian estos fenómenos y paradigmas que sustentan estos procesos. Morín nos ayuda a interpretar el concepto a través de una reorganización teórica basada en siete principios que nos permite detectar los vínculos y lazos que relacionan al hombre, la naturaleza, la sociedad y la cultura. Estos son, el *principio sistémico u organizacional* bajo el que se relaciona el conocimiento de las partes con el conocimiento del todo; el *principio holístico* que incide en que las partes están dentro del todo y el todo está en cada parte; el *principio retroactivo* que refleja cómo una causa actúa sobre un efecto y, a su vez, éste sobre la causa; el *principio recursivo* que supera la noción de regulación al incluir el de auto-producción y auto-organización; el *principio de autonomía y dependencia* en el que expresa la autonomía de los seres humanos pero, a la vez, su dependencia del medio; el *principio dialógico* que integra lo antagónico como complementario y finalmente el *principio de la reintroducción del sujeto* que introduce la incertidumbre en la elaboración del conocimiento al poner de relieve que todo conocimiento es una construcción de la mente<sup>37</sup>.

La apropiación de las ciencias de la complejidad de parte de la arquitectura, más precisamente a través del binomio conceptual geometría y complejidad, surge durante la década de los 60. Fue en ese período caracterizado por su efervescencia contracultural, donde la ciencia desarrolla una serie de investigaciones concernientes a fenómenos con multiplicidad de interacciones y relaciones entre diferentes teorías, las que en su momento sirvieron de argumento y posibilitaron a nuestra disciplina, incorporar el concepto de complejidad a su discurso.

No obstante, es a finales del siglo XX, en los 90', cuando surgen una serie de contracorrientes que, gracias a la popularización del ordenador y al carácter recurrentemente mimético de los arquitectos, logran destacarse dentro de un escenario arquitectónico que hasta el momento era dominado por el modernismo y el posmodernismo<sup>38</sup>. Estas corrientes a través del lenguaje empleado y la utilización de criterios tales como el organicismo, la diversidad, el eclecticismo, la ecología, etc., logran establecer conexiones entre arquitectura y complejidad.

---

<sup>37</sup>El Parisino Edgar Morín (1929), presenta a través de su obra un escenario en donde el contrapunto simple/complejo genera una explicación para ambos conceptos. Con acento en la subjetividad como imperativo necesario para reconocerse y reconocer las relaciones con los demás, con la naturaleza y con la vida.

<sup>38</sup>En su Tesis Doctoral, Carlos A. Grillo (2005) nos dice sobre la arquitectura de los 90' *"La arquitectura, tras una década de deconstructivismo, retoma la analogía con la naturaleza, esta vez con la visión científica de una naturaleza pautada por la complejidad, con un retorno a las formas orgánicas, onduladas, o más bien, a lo informe"* y completa *"esta arquitectura de la complejidad allí presentada opera una mimesis predominantemente representativa, estableciendo metáforas formales de la complejidad; también, en algunos casos, se incorporan algunos atributos de la complejidad científica en el proceso de proyecto, pero siempre dejando evidenciar la complejidad en la forma arquitectónica. A parte de la fuerza mediática de las formas complejas con que se concretizan, sus principales artífices abogan en la complejidad explícita su correlación con una nueva visión de mundo, contrapuesta a los principales valores de la modernidad"*.

La geometría, como herramienta fundamental, ha acompañado estas corrientes arquitectónicas permitiendo trasladar conceptos de otros campos de la ciencia y desarrollando modelos capaces de imitar, como por ejemplo la evolución de los organismos vivos, a través de estructuras compositivas complejas.

La geometría aparece aquí como sustento de la forma, en donde desde una perspectiva histórica, podemos relacionar diferentes maneras de concebir el mundo a través de esta, así geometrías euclidianas y geometrías complejas se asocian a los paradigmas de simplicidad y complejidad (Morín, 2007).

Hoy esa geometría ya no está sujeta a la posibilidad manual, análoga, sino que las invenciones computacionales, han posibilitado realizar la tarea manual de manera digital con un tamaño de información que no tiene límites, generando conectividades nuevas y desarrollando capacidades más profundas, donde el valor principal no radica en la obtención de una forma, sino en el proceso en sí de creación de la misma que permite ser reacondicionado a gusto en cualquier instancia del proceso mismo. En definitiva, dejamos de diseñar formas para pasar a diseñar procesos con resultados polivalentes, por lo que el carácter experimental toma protagonismo y el resultado goza de cierta imprevisibilidad.

Este tipo de procesos vuelve a confluir en los caminos de la naturaleza donde lo indeterminado es irreductible y las variaciones, probabilidades y desviaciones son las verdaderas herramientas que terminan conformando nuestra realidad, una realidad en donde lo complejo se caracteriza por poseer más información, que la que cada parte del sistema posee independientemente.

Dentro del diseño arquitectónico y urbano, la complejidad será una referencia fundamental como contraposición al pensamiento simplificador y mecanicista del Movimiento Moderno. Ya en los años 60', de manera incipiente, autores como Jacobs o Alexander<sup>39</sup>, recurrían a dicho paradigma para contraponerse al manifiesto modernista de la Carta de Atenas. El lenguaje arquitectónico complejo, a través de las herramientas digitales, ha permitido establecer nuevas teorías sobre las cuales fundamentar procesos de diseño no-lineales y a su vez tomar una postura que implique concebir, tanto a la arquitectura como al urbanismo, como problemas complejos.

### 2.2.2. Caos, azar y metafísica

*El azar no es más que la medida de la ignorancia del hombre. Poincaré (1903)*

Las formas subyacentes de la realidad parecieran, según varios autores ya nombrados, estar íntimamente relacionadas con las matemáticas y más precisamente con la geometría. Estas formas que rigen nuestra realidad, empiezan a encontrar argumentos que le dan entidad científica, moldeando un nuevo escenario arquitectónico, que poco

---

<sup>39</sup> Tanto la canadiense nacida en EEUU, Jane Butzner Jacobs (1916-2006) como el arquitecto austriaco Christopher Alexander (1936) fueron férreos opositores a los preceptos del Movimiento Moderno. Jacobs, ejerció el activismo sociopolítico desde las teorías urbanísticas, autodidacta sin formación específica, genero el debate, llamando a defender la vida barrial tradicional, amenazada por los mega proyectos urbanísticos, que en pos de la rentabilidad económica, "despersonalizaban" lugares, fenómeno que hoy denominamos *gentrificación*. Por su parte, Alexander, reivindica el saber popular por sobre el científico, donde los usuarios del espacio arquitectónico saben más que los profesionales respecto al espacio que ellos mismos necesitan. Esta postura totalmente opuesta la academicista del movimiento moderno, se refleja en sus obras que pretenden ser un modo de poner a la arquitectura al alcance de personas sin formación, donde cada miembro o grupo humano pueda construir su propia vivienda o conjunto habitable sin necesidad de arquitectos, donde estos, únicamente actuarían como una ayuda para la construcción.

a poco se aparta del hegemónico movimiento moderno. En ese sentido el concepto de complejidad es tomado como sustento de dicho escenario y es usado como argumento teórico por algunos arquitectos de finales de los años noventa del siglo pasado.

Las ciencias de la complejidad es un espectro del conocimiento con una dinámica de desarrollo constante, de allí emergen teorías y sub-teorías interrelacionadas que son claves dentro del conocimiento actual, como por ejemplo los conceptos de caos, azar, imprevisibilidad, indeterminismo, no-linealidad, auto organización, emergencia y auto semejanza. Para Morín (2004) estos principios conforman ese *tejido de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinaciones, azares, que constituyen nuestro mundo fenoménico*.

A partir del desarrollo de estas teorías, el *determinismo*<sup>40</sup> como visión científica, muestra un giro que desestabiliza los principales paradigmas que hasta ese momento sostenían la ciencia, básicamente a través del contrapunto que se estableció entre la Teoría de la Relatividad y la Física Cuántica.

Esta nueva visión científica permitió establecer una multiplicidad de relaciones entre las más variadas áreas del conocimiento, conformando un universo teórico multidisciplinar. Cuando a mediados del 1600, Isaac Newton descubrió las ecuaciones diferenciales, las leyes de movimiento y la gravitación general, sentó las bases de lo que hoy conocemos como dinámica, una rama de la física que estudia los cambios de estado físico de los cuerpos. Es dentro de este campo donde se desarrolla el concepto de *caos* o catástrofe, en donde los físicos y matemáticos estudian una serie de fenómenos tales, como por ejemplo el comportamiento de tres cuerpos celestes en interacción gravitatoria. Henri Poincaré<sup>41</sup>, explica este fenómeno, en su trabajo *Science et Méthode* (1908), a través del desarrollo de sistemas matemáticos no-lineales, concibiendo la primera configuración matemática del caos. En el mismo, el matemático plantea que, *una pequeña causa, que apenas percibimos, determina un gran efecto que no pasa desapercibido, y entonces decimos que el efecto se debe al azar. Si pudiéramos conocer con exactitud las leyes de la naturaleza y la situación del universo en el instante inicial, podríamos predecir exactamente la situación del mismo universo en un instante posterior*. Pero, incluso en el caso de que las leyes naturales no tuviesen secretos, sólo podríamos conocer las condiciones iniciales de modo aproximado. Si eso nos permitiese predecir la situación posterior con el mismo grado de aproximación, no haría falta más, diríamos que el fenómeno se predijo y que está regido por las leyes. Pero no siempre sucede así, puede ocurrir que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales produzcan diferencias muy grandes en el fenómeno último y que un pequeño error en las primeras se convertiría en uno enorme en el último. Esto hace imposible la predicción y tenemos un fenómeno fortuito.

---

<sup>40</sup> Doctrina filosófica que sostiene que todo acontecimiento físico, incluyendo el pensamiento y acciones humanas, está causalmente determinado por la irrompible cadena causa-consecuencia y, por tanto, el estado actual "determina" en algún sentido el futuro. Existen diferentes formulaciones de determinismo, que se diferencian en los detalles de sus afirmaciones. Por otro lado, también existe una diferencia importante entre la determinación y la predictibilidad de los hechos. La determinación implica exclusivamente la ausencia de *azar* en la cadena causa-efecto que da lugar a un suceso concreto. La predictibilidad es un hecho potencial derivado de la determinación certera de los sucesos, pero exige que se conozcan las condiciones iniciales (o de cualquier punto) de la cadena de causalidad.

<sup>41</sup> El francés Jules Henri Poincaré (1854-1912), más conocido como Henri Poincaré, fue un prestigioso polímata: matemático, físico, científico teórico y filósofo de la ciencia. Poincaré es descrito a menudo como el último universalista capaz de entender y contribuir en todos los ámbitos de la disciplina matemática. En 1894 estableció el grupo fundamental de un espacio topológico. Realizó numerosos aportes en diferentes campos de la matemática aplicada, tales como Mecánica celeste, Mecánica de fluidos, Óptica, Electricidad, telegrafía, capilaridad, elasticidad, termodinámica, teoría potencial, mecánica cuántica, teoría de la Relatividad y cosmología. <https://bit.ly/2YqmULx>



El segundo hito importante en la evolución de la Teoría del Caos se dio setenta años después, con el trabajo sobre previsiones meteorológicas del matemático del MIT Edward Lorenz<sup>42</sup>. Lorenz logro desarrollar, gracias a la aparición de los primeros computadores, simulaciones que requerían extensos cálculos y en 1963 publica un trabajo matemático, que en base a datos atmosféricos, llega a la conclusión de que el caos, aparentemente imprevisible, era en ciertos aspectos, determinable.

Podemos decir que caos o catástrofe son variaciones mínimas en la naturaleza, que por una acción iterativa o de retroalimentación entre variables que conservan una relación no-lineal, conducen a un punto crítico o punto de transformación.

En sistemas gobernados por ecuaciones lineales, pequeños cambios producen pequeños efectos, mientras que los grandes efectos se obtienen por la suma de muchos cambios pequeños.

Por el contrario, en sistemas gobernados por ecuaciones no-lineales, como lo son la mayor parte de los sistemas naturales y sociales, un pequeño cambio en una variable, al iterarse o repetirse, conduce a un efecto desproporcionado en otras variables y luego de un cierto tiempo, finaliza en algún tipo de deformación, transformación o colapso (Grillo, 2005).

Metafóricamente Lorenz describe esta no-linealidad en su artículo *Predictability: Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set of a tornado in Texas* (1979), en lo que se conoce como el *efecto mariposa*, el cual reza que la posibilidad de que un acontecimiento pequeño e insignificante como el movimiento del aire por el aleteo del de las alas de una mariposa en un continente, pudiera llegar a interferir un tiempo después en el sistema de tempestades en otro continente.

La no-linealidad matemática entendida como la retroalimentación de variables y la presencia de bifurcaciones, hacen que los sistemas caóticos sean caracterizados por tres factores fundamentales: desproporcionalidad entre causa y efecto, una posible ocurrencia de saltos o discontinuidades y lo más importante, una gran imprevisibilidad, principalmente a medio y largo plazo. La no-linealidad bien se puede definir en oposición a la linealidad; en un proceso de comportamiento lineal el sistema se modifica de manera previsible, proporcional a la interferencia a que fue sometido;

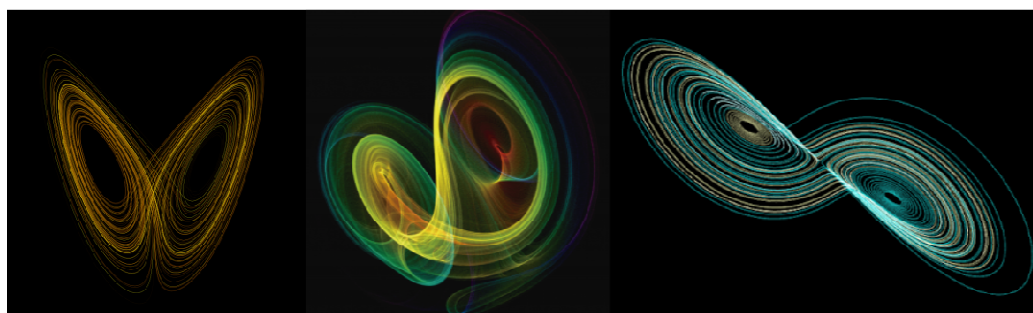


Fig. 24 [Diferentes representaciones del atractor de Lorenz], Fuente: izq. <http://bit.ly/3rhzJyo>, centro <http://bit.ly/3oJvObG> y der. <http://bit.ly/3tIALuZ>.

<sup>42</sup> Edward Norton Lorenz (1917- 2008) fue un matemático y meteorólogo estadounidense. Desarrolló ideas innovadoras sobre la rotación de los fluidos y realizó importantes contribuciones que ayudaron a comprender las dinámicas atmosféricas y las predicciones climatológicas. Fue pionero en el desarrollo de la teoría del caos y acuñó el término efecto mariposa. De acuerdo con Lorenz los sistemas caóticos pueden poseer estados de equilibrio, es decir un estado de equilibrio es el que permanece sin cambios con el paso del tiempo. Lorenz se dedicó a explorar las matemáticas subyacentes y publicó sus conclusiones en un trabajo titulado *Flujo determinista no periódico* en el que describió un sistema relativamente simple de ecuaciones, que dieron lugar a un patrón de la complejidad infinita, llamado *atractor de Lorenz*. <https://bit.ly/3BbG7fT>

hay proporcionalidad y determinismo. En tanto que en los procesos lineales hay un cambio sólo cuantitativo, en los no-lineales hay un cambio cualitativo en el sistema (Grillo, 2005).

Imprevisibilidad, bifurcaciones y sensibilidad a las condiciones iniciales, son aspectos que caracterizan a un proceso no-lineal como lo es un sistema caótico, por lo tanto no se puede predecir su evolución, lo único a nuestro alcance es apelar a la estadística o al registro como una forma de comprender la realidad (fig. 24).

De esta manera podemos hablar de *caos determinista*, el cual da lugar a trayectorias asociadas a la evolución temporal de forma muy irregular y aparentemente azarosa que sin embargo son totalmente deterministas, a diferencia del azar genuino. La irregularidad de las trayectorias está asociada a la imposibilidad práctica de predecir la evolución futura del sistema, aunque esta evolución sea totalmente determinista.

Por su parte, Ilya Prigogine<sup>43</sup> define un sistema caótico-determinista como todo sistema dinámico o termodinámico, en el que mínimas variaciones en sus condiciones iniciales, pueden determinar máximas variaciones en sus efectos o estados finales. La evolución de dichos sistemas está regida por ecuaciones matemáticas deterministas, es decir, ecuaciones en las cuales no figuran variables azarosas pero, no obstante, no es posible predecir el comportamiento del sistema más allá de cierto umbral temporal denominado *horizonte temporal de predictibilidad*.

Por último un sorprendente hallazgo vino de la mano de Mitchell Feigenbaum<sup>44</sup>, quien descubrió que hay un conjunto de leyes universales concretas que diferencian la transición entre el comportamiento regular y el caos, por tanto, es posible que dos sistemas evolucionen hacia un comportamiento caótico igual. Esto que se dio a llamar como *Ley de la Universalidad* y está representado por el número 4,6692016090 (con infinitos decimales más). En matemáticas, algunos mapas con un único parámetro lineal exhiben aparentemente un comportamiento aleatorio, cuando este se encuentra dentro una región, a medida que el parámetro se acerca hacia esta región, el mapa sufre una bifurcación a valores precisos del parámetro. En la primera bifurcación hay un punto estable, después una oscilación entre dos valores, después entre cuatro valores y así sucesivamente. Feigenbaum descubrió que la proporción de la diferencia entre los valores en que estos sucesivos períodos de bifurcación se producen, tiende a un valor constante, aproximadamente al valor antes mencionado.

La Universalidad expresa una ley natural de los sistemas en su paso del orden al caos, es traducible matemáticamente, validando el comportamiento de los sistemas caóticos dinámicos, dando una respuesta a lo que hasta ese entonces se creía que eran caprichos de la naturaleza.

El azar, por otro lado, es una manera de definir nuestras limitaciones e ignorancia que solo existiría como concepto matemático y en tal caso, sería más adecuado hablar de

---

<sup>43</sup> Ilya Prigogine (1917-2003) fue un físico, químico, sistémico y catedrático universitario de origen ruso, nacionalizado belga. En el año 1977 obtiene el Premio Nobel de Química por sus investigaciones teóricas sobre la expansión de la termodinámica clásica, en el estudio de los procesos irreversibles que lo llevaron a crear en 1967, el concepto de *estructuras disipativas*. Especialista en termodinámica, Prigogine se basa en estudios matemáticos teóricos y sus teorías son aplicadas a diferentes campos: astronomía, cosmología, bioquímica, química biológica, orgánica e inorgánica, física, biofísica, biología, neurofisiología, hidrodinámica, entre otras. Conocido también por formular el *teorema de la mínima producción de entropía*. <https://bit.ly/3FdS4E1>

<sup>44</sup> Mitchell Jay Feigenbaum (1944-2019) fue un matemático y físico estadounidense cuyos estudios pioneros en teoría del caos llevó al descubrimiento de los *números de Feigenbaum*. Desarrollo su investigación sobre la turbulencia en los fluidos en el Laboratorio Nacional Los Álamos, Nuevo México, trabajo que lo llevo a estudiar mapas caóticos. Desarrollo su investigación usando pequeños ordenadores HP-65, dando los primeros pasos hacia el entendimiento del comportamiento aparentemente "aleatorio" de los de sistemas caóticos. <https://bit.ly/3mrBzM2>

aleatoriedad pues el azar se define en relación al flujo de las causas y los efectos, es decir, en relación con los sucesos y en el mundo atemporal de las matemáticas, no hay sucesos propiamente dichos.

Durante siglos la fórmula Newtoniana que se manifiesta en un espacio Euclideo, nos ha llevado hacia el determinismo y a excluir el azar y la casualidad. La revisión de parte de Einstein de estos conceptos a través de la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, no hace otra cosa que aplicar las reglas de la filosofía natural, establecidas por las leyes de gravedad.

Dentro de la mecánica cuántica, no se puede hablar del estado preciso de los objetos naturales, su formulación implica la imposibilidad de conocer esto y solo llegaremos a conocer distribuciones de probabilidad de los valores, no obstante, la mecánica cuántica no deja de lado el determinismo, aunque hablemos de amplitudes de probabilidad, es factible establecer las ecuaciones necesarias y así determinarlo en el tiempo.

Tradicionalmente la ciencia ha buscado relacionar efecto con causa, para esta, causas simples provocan efectos simples y causas complejas producen efectos complejos. La complejidad de las causas puede alcanzar cotas tan altas, que la conexión con los efectos se pierda y esa pérdida o desconocimiento, se denomina azar. Muchos fenómenos de la física y la química que se consideraban azarosos, en realidad son caóticos.

El azar es comparable a un Dios omnisciente, que con su mente abarcadora no solo del pasado y el presente, sino también del futuro, todos los sucesos estarían predeterminados y por ende serían conocidos de antemano<sup>45</sup>. Dicho de otra manera, el mundo, si obedeciera las leyes de Newton, sería completamente determinista. Con Newton y su mecánica, la filosofía natural se hace física y la búsqueda de causas últimas se convierte en filosofía o metafísica. Al igual que Bacon<sup>46</sup>, que divide la filosofía natural en dos partes, por un lado, la física, que inquiere sobre las causas materiales y eficientes y por el otro la metafísica, que examina las causas formales y finales, se pregunta por los últimos fundamentos del mundo y de todo lo existente. El objetivo de la metafísica es lograr una comprensión teórica del mundo y de los principios últimos generales más elementales de lo que hay, porque tiene como fin conocer la verdad más profunda de las cosas, por qué son lo que son y, aún más, por qué son.

En ese sentido, desde la antigüedad, existió un profundo interés en formas que se consideran que incorporan dentro de sus relaciones intrínsecas, tanto matemáticas

---

<sup>45</sup> A veces, para expresar una idea, los físicos han imaginado un ser con capacidades sobrehumanas pero no sobrenaturales, es decir, capacidades superiores a la de cualquier persona pero que no violan ninguna ley fundamental de la Naturaleza. A estos seres se les suele llamar demonios, a pesar de que no tienen ninguna mala intención. El primer demonio de renombre es el *demonio de Laplace*, primera articulación publicada de *determinismo causal* por Pierre-Simon Laplace en 1814. Según Laplace, si alguien (el Demonio) supiera la ubicación precisa y momento de cada átomo en el universo, sus valores pasados y futuros para cualquier tiempo dado serían deducibles de esos datos; podrían ser calculados de las leyes de mecánica clásica. La ciencia moderna nos ha proporcionado dos salidas a semejante panorama. La primera es la Mecánica Cuántica, que admite la presencia del azar en la Naturaleza. La segunda es la teoría del caos, que demuestra que, aunque las ecuaciones de Newton determinen el futuro, es imposible resolverlas con precisión. Sin embargo, estas dos salidas no están aún muy claras. El papel del azar dentro de la Mecánica Cuántica es un problema no resuelto del todo y tampoco hay acuerdo que el caos suprima el determinismo que subyace en las ecuaciones de Newton.

<sup>46</sup> Francis Bacon (1561-1626) fue un célebre filósofo, político, abogado y escritor inglés, padre del empirismo filosófico y científico. Desarrolló en su *De dignitate et augmentis scientiarum* (De la dignificación y progreso de la ciencia) una teoría empírica del conocimiento y precisó las reglas del método científico experimental en su *Novum organum*, lo que hizo de él uno de los pioneros del pensamiento científico moderno. Asimismo, introdujo el género del ensayo en Inglaterra. <https://bit.ly/2YpHTvF>

como geométricas, una verdad universal. En el mundo natural, ya sea a través de su micro escala o macro escala, podían reconocerse unidades inequívocas que materializaban el mismo y que, en definitiva, estas representaban las leyes básicas del universo regidas por deidades.

Al estudiar estas unidades, se cree que podemos obtener el entendimiento del origen del todo y así descubrir la verdad sagrada. Estas unidades o patrones originados en la creación misma, eran aplicables a todos los campos, como la música, las matemáticas, la astronomía, la cosmología, etc. y permitían explicar el funcionamiento de los mismos. El constante afán mimético del ser humano, llevo a utilizar estas unidades descubiertas en su mundo material, sus obras debían estar dotadas de una armonía de proporciones y características sagradas especiales, dando origen a lo que vulgarmente se conoce como *geometrías sagradas*.

En la cultura griega ya Platón pensaba que *Dios geometriza continuamente*, en el Timeo (360 a. C.) afirmaba que ciertas relaciones numéricas y formas geométricas encarnaban la verdad absoluta de la estructura armónica y ordenada del Cosmos. A través de sus sólidos platónicos, desarrolla este concepto, en donde la intervención ordenadora del dios artífice, da lugar al surgimiento de los elementos de la materia, que luego toman forma, proporción y número. Los elementos son concebidos como cuerpos simples, con superficies compuestas de triángulos, y según el Timeo, al fuego le corresponde la primera figura, el tetraedro, el octaedro corresponde al aire, el icosaedro corresponde al agua y el cubo es la forma geométrica de las partículas de tierra.

Para expresar ese orden basado en la verdad eterna de los números y las relaciones espaciales, las formas debían derivarse de determinadas relaciones numéricas a partir de patrones exactos, tanto aritméticos, como geométricos.

La verdad eterna de los números y sus relaciones, así como la cosmogonía, daban lugar a geometrías exactas, siendo esta la encargada de dar respuesta a lo trascendental, a lo místico, a lo espiritual y lo religioso, es la representación de un mundo en perfecta armonía universal.

Muchos de estos cánones fueron tomados para crear espacios y estructuras religiosas, apelando al uso sistemático de relaciones y proporciones, reforzando aún más el carácter sagrado de sus geometrías.

En el primer milenio había en diferentes culturas, ciertas religiones que concebían, de que había una verdad central que gobernaba el mundo natural y que la idealización formal de dicha verdad, otorgaría beneficios espirituales para todos los fieles.

Un ejemplo para destacar se da en el siglo séptimo, con la llegada del islam, donde se manifiesta una geometría sagrada interpretada en términos matemáticos, que alentaba la búsqueda y la reflexión sobre el concepto de perfección.

Los patrones geométricos han sido el recurso utilizado por muchas religiones, incluyendo el número de oro y la serie de Fibonacci, donde es fácil apreciar como dichos patrones buscan producir en los fieles el efecto de trascendencia y contemplación, en una búsqueda por elevar el espíritu.

Pitágoras investigó las armonías y los intervalos dentro de la música, descubriendo relaciones numéricas que concuerdan con patrones discernibles. El trabajo adicional sobre cuerpos astronómicos lo persuadió a proponer que había un patrón numérico subyacente en el cosmos, en cierto sentido, una geometría sagrada.

Aun hoy se sigue manteniendo la idea que expresa la creencia en la existencia de leyes objetivas que regulan la belleza, así como la necesidad de construir un orden que evite el temor de dirigirnos hacia el caos.

Para Kepler<sup>47</sup>, quién había titulado una de sus obras, *Harmonices mundi* (1619), el universo contenía las huellas del Dios creador dejadas intencionalmente para que nosotros las descubramos. Con una mentalidad neo pitagórica afirmaba, (...) *Dios mismo era demasiado bueno para permanecer ocioso y empezó a jugar al juego de los signos, dejando marcada su semejanza en el mundo; por eso, me atrevo a pensar que la naturaleza entera y el maravilloso firmamento están simbolizados en el mundo de la geometría.*

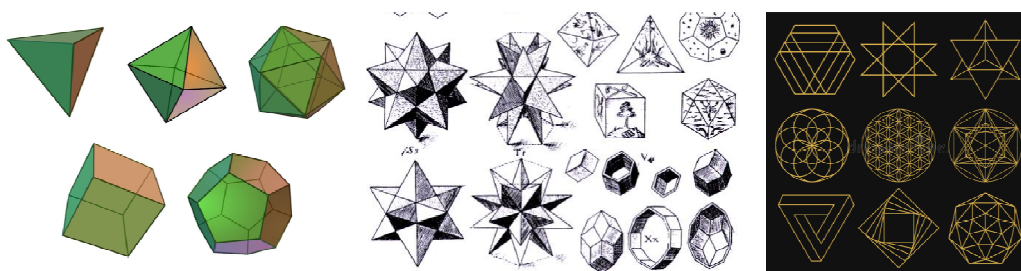


Fig. 25 [Sólidos platónicos, variaciones de Kepler y símbolos sagrados], Fuente: izq. <http://bit.ly/3tov2o0>, centro <https://bit.ly/2YRpmFn> y der. <https://bit.ly/3cBcew8>.

Algo similar ocurre en los setenta, cuando Mandelbrot<sup>48</sup> estudia la geometría fractal, desarrollándose como una disciplina que interpreta los objetos que se encuentran en la naturaleza, interesándose por cuestiones que nunca antes habían preocupado a los científicos, como los patrones por los que se rigen las formas naturales. Al estudiarlos o contemplarlos, se puede obtener un entendimiento de los orígenes del universo y así aproximarnos a una verdad sagrada.

Mandelbrot sostuvo que los fractales, en muchos aspectos, son más naturales, y por tanto mejor comprendidos intuitivamente por el hombre, que los objetos basados en la geometría euclidiana, que han sido suavizados artificialmente.

*Las nubes no son esferas, las montañas no son conos, las costas no son círculos, y las cortezas de los árboles no son lisas, ni los relámpagos viajan en una línea recta*<sup>49</sup>.

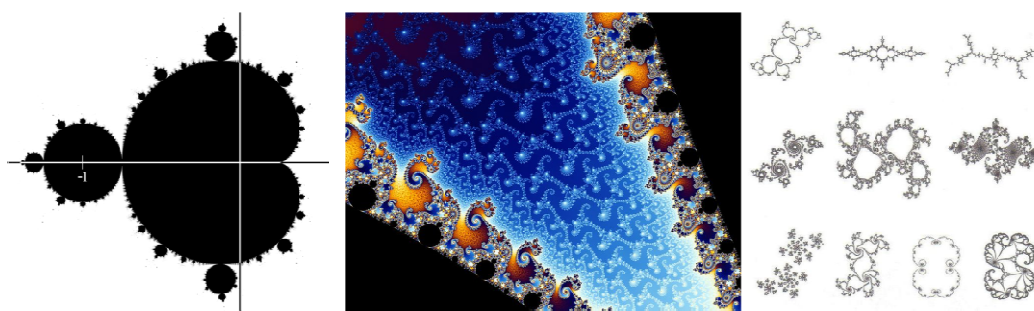


Fig. 26 [Conjunto de Mandelbrot y algunas variantes], Fuente: izq. <http://bit.ly/36vqYrt>, centro <http://bit.ly/3tIKt0j> y der. <http://bit.ly/3oFt4w1>.

<sup>47</sup> Johannes Kepler (1571-1630), figura clave en la revolución científica, fue un astrónomo y matemático alemán; conocido fundamentalmente por sus leyes sobre el movimiento de los planetas en su órbita alrededor del Sol. <https://bit.ly/3DqW5nd>

<sup>48</sup> Benoît Mandelbrot (1924-2010) fue un matemático polaco nacionalizado francés y estadounidense conocido por sus trabajos sobre los fractales. Principal responsable del auge de este campo de las matemáticas desde el inicio de los años setenta, fue pionero al utilizar el ordenador para trazar los más conocidos ejemplos de geometría fractal: el conjunto de Mandelbrot y los conjuntos de Julia. <https://bit.ly/3BnyPFG>

<sup>49</sup> Mandelbrot, de su libro *Introduction to The Fractal Geometry of Nature* (1982).

La principal característica de la geometría fractal reside en lo que se denomina *auto semejanza*, donde cada una de sus partes, en diferentes escalas, es semejante (no iguales) al conjunto total. Así podemos decir que el objeto se *auto reproduce* de manera infinitamente grande y de manera infinitamente pequeña (fig. 26). Este concepto de *la parte es el todo y el todo está en cada parte*, ya se manifestaba en el principio Hermético de la Analogía y el segundo principio del Kybalión<sup>50</sup>. Los fractales expresan conceptualmente la belleza que subyace en el caos aparente de la naturaleza, dándole a esta un marco de entendimiento, un orden que permita su explicación y por lo tanto aproximarnos un poco más a su conocimiento.

### 2.2.3. Mimesis digital

El vínculo que han establecido algunos diseñadores a lo largo del tiempo entre arquitectura y naturaleza, más que nada en relación a su aspecto formal, persiste aún y encuentra en la tecnología digital una herramienta que profundiza este concepto, trayéndolo nuevamente a una escena arquitectónica bastante monótona.

Al mismo tiempo, como mencionábamos con anterioridad, el acercamiento de nuestra disciplina a las ciencias de la complejidad, hacen más evidente la irrupción de nuevos lenguajes. Desde la antigua Grecia y hasta después del Renacimiento, el concepto de belleza estuvo fuertemente relacionado con el de proporción, orden, ritmo y simetría, conceptos que podemos verificar en la mayoría de las formas conocidas en la naturaleza, siendo el cuerpo humano, desde una visión antropocéntrica, la encarnación del universo, que en una parte, representa al todo.

En la Antigüedad la representación mimética es de carácter figurativo y simbólico, que luego de atravesar un Medioevo sumido por el dogma cristiano, resurge en el Renacimiento desde una mirada ampliada por el conocimiento científico aportándole a los órdenes de los lenguajes preexistentes, el rigor técnico de los tratados de arquitectura. Previo al siglo XX, podemos hablar de mimesis desde la postura del funcionalismo biológico de Labrouste, Viollet-Le-Duc y Gaudí, o posteriormente desde el racionalismo orgánico de Sullivan y Wright. No fue entonces hasta los 90', después de ese ataque neurótico y explosivo que fue el deconstructivismo, donde algunos arquitectos y teóricos toman los argumentos de las ciencias de la complejidad, para reinsertar, en un principio, una mimesis de connotación puramente estética y ávida de protagonismo.

No obstante, para que ello pudiera ocurrir, fueron necesarios varios estudios matemáticos previos, que permitieran dar argumentos a las formas encontradas en la naturaleza; la geometría no encontraba aún los caminos para salir de ese universo euclidiano y determinista en el que estaba sumida, no podía dar respuesta a ese cosmos que parecía erigirse de manera informal e impredecible, pero de inexplicable belleza y que por sobre todas las cosas, era difícil de encuadrar en los modelos geométricos hasta entonces conocidos.

Con la teoría de los fractales, contemporánea a las investigaciones que se venían realizando sobre el caos y el azar, Mandelbrot logra aproximarse a la explicación geométrica del porqué de ciertas conformaciones naturales y al mismo tiempo reproducir y modelizar la mayoría de las formas, dinámicas y caóticas, de los sistemas

---

<sup>50</sup> El *Kybalión* (o *Los siete principios del Hermetismo*) es un documento de 1908 que resume las enseñanzas del hermetismo. Su autoría se atribuye a un grupo anónimo de personas autodenominadas Los Tres Iniciados, aunque las bases del hermetismo se atribuyen a un alquimista místico y deidad de algunas logias ocultistas llamado Hermes Trismegisto.



naturales. Pero si bien Mandelbrot fue quien bautizo con este nombre a estas configuraciones geométricas, las mismas ya tenían estudios previos un siglo antes y de hecho un ejemplo de fractal se le debe a Apolonio de Perge<sup>51</sup>, quien aproximadamente en el 200 a.C., propuso y resolvió el problema de hallar las circunferencias tangentes a tres circunferencias dadas, conocido como *problema de Apolonio*. Si las tres circunferencias dadas son tangentes entre ellas, el problema tiene dos soluciones, que se corresponden a las circunferencias inscrita y la circunferencia circunscrita respectivamente. Si resolvemos el problema de Apolonio para encontrar la circunferencia inscrita de forma repetida, se pueden llenar los huecos que quedan entre las circunferencias tangentes tan finamente como queramos, formando así el *tamiz de Apolonio*, también conocido *empaquetado apoloniano*. Este tamiz es un fractal con una dimensión de Hausdorff<sup>52</sup> desconocida, pero de la que se sabe que es alrededor de 1.3057 y que es mayor que la de una curva regular o rectificable ( $d = 1$ ) pero más pequeña que la de un plano ( $d = 2$ ). A pesar de su denominación, fue el matemático alemán Gottfried Leibniz<sup>53</sup> quien describe por primera vez el tamiz de Apolonio ya en el siglo XVII (fig. 27).

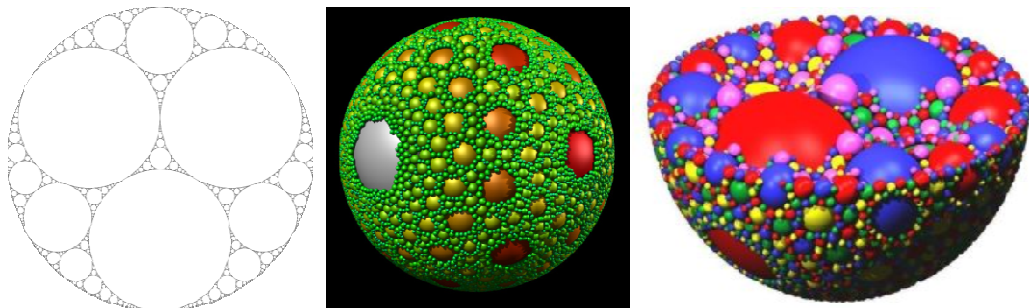


Fig. 27 [Empaquetado apoloniano bi y tridimensional], Fuente: izq. <http://bit.ly/3rehARU>, centro <http://bit.ly/3pEBQf4> y der. <https://bit.ly/3tkWsv0>.

A los estudios de Poincaré sobre la teoría del caos, para muchos el precursor de los fractales, se le suman las investigaciones de Karl Weierstrass<sup>54</sup>, quien en 1872 desarrollo la función que lleva su nombre, cuyo gráfico es una curva no rectificable de dimensión fractal superior a 1, la cual es continua pero no diferenciable en ningún

<sup>51</sup> Apolonio de Perge (262-190 a. C.), fue un geómetra griego famoso por su obra *Sobre las secciones cónicas*. Conocido como “El Gran geómetra” fue quien dio el nombre de elipse, parábola e hipérbola, a las figuras que conocemos. También se le atribuye la hipótesis de las órbitas excéntricas o teoría de los epiciclos para intentar explicar el movimiento aparente de los planetas y de la velocidad variable de la Luna.

<sup>52</sup> Una analogía interesante a la hora de comprender el significado de la dimensión de Hausdorff podría resultar del análisis de una de las estructuras más complejas y misteriosas conocidas por la ciencia, el ADN. Y en relación a este, es inevitable preguntarse, ¿cómo es posible que una estructura tan pequeña pueda albergar absolutamente toda la información del ser vivo al que pertenece?, ¿Cómo es posible que toda la información que describe el objeto más complejo del universo, nosotros, pueda quedar codificado en su totalidad en tan ínfima porción de materia? El grado de empaquetamiento y condensación del ADN es asombroso, por ejemplo, el cromosoma humano más pequeño tiene un grado de empaquetamiento que es igual a  $\times 7000$ , es decir, condensado 7000 veces.

<sup>53</sup> Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), fue un filósofo, matemático, lógico, teólogo, jurista, bibliotecario y político alemán. Fue uno de los grandes pensadores de los siglos XVII y XVIII, y se le reconoce como el *último genio universal*, esto es, la última persona que pudo formarse suficientemente en todos los campos del conocimiento; después ya solo hubo especialistas.

<sup>54</sup> Karl Theodor Wilhelm Weierstrass (1815-1897) fue un matemático alemán que se suele citar como el *padre del análisis moderno*. Weierstrass dio las definiciones de *continuidad*, *límite* y *derivada de una función*, que se siguen usando hoy en día.

punto; más tarde en 1904, Helge von Koch<sup>55</sup> definió una curva con propiedades similares a la de Weierstrass, el copo de nieve de Koch y en 1915, Waclaw Sierpinski<sup>56</sup> construyó su triángulo y, un año después, su alfombra (fig. 28). Estas últimas son ejemplos con propiedades similares pero con un argumento más geométrico que aritmético, donde los gráficos podían construirse partiendo de una figura inicial, a la que se aplicaban una serie de construcciones geométricas sencillas.

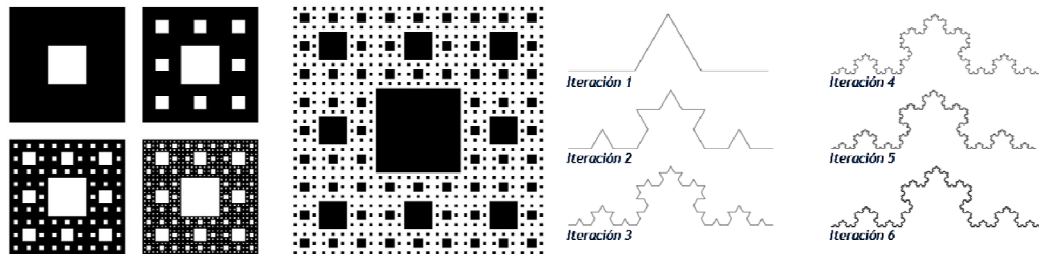


Fig. 28 [Alfombra de Sierpinsky y copo de nieve de Koch], Fuente: izq. <http://bit.ly/3cxDICI>, y der. <http://bit.ly/36CQc8b>.

Las ideas de Poincaré sobre el caos fueron profundizadas más tarde, alrededor 1918, por dos matemáticos, también franceses, Gastón Juliá<sup>57</sup> y Pierre Fatou<sup>58</sup>, que explicaron cómo a partir de cualquier función compleja se puede fabricar, por medio de una sucesión definida por inducción, un conjunto cuya frontera es imposible de *dibujar a pulso* por ser de longitud infinita, entre otras propiedades. Otro estudio de neto corte fractal es el de los vórtices dentro de vórtices en el estudio de la turbulencia caótica de Lorenz en los 60', aquí los fractales logran representar geoméricamente a los atractores extraños, ampliando fragmentos de la estructura de los mismos, podemos observar una subestructura de varios niveles en la que se repiten continuamente los mismos patrones. Este último conto con la posibilidad de la informática, que al igual que Mandelbrot, aprovecho esta ventaja tecnológica por sobre sus predecesores y en 1974, junto a la compañía IBM y la Universidad de Yale, impulsan numerosos experimentos con computadoras, facilitando la resolución de esta dimensión fraccionaria (de ahí su nombre) que se encuentra a medio camino entre la línea y la superficie. El matemático, a raíz de su libro publicado en 1975, *Les Objets Fractal: Forme, Hasard et Dimension*, relata que el mismo, surge de la convocatoria a una conferencia en París: *Uno de los acontecimientos más importantes de mi vida sucedió en 1973, cuando me invitaron a dar una conferencia en el Collège de France, en París. Estaba sometido a*

<sup>55</sup> Niels Fabian Helge von Koch (1870-1924) fue un matemático sueco, cuyo nombre se ha asignado a una famosa curva fractal llamada curva *Copo de nieve de Koch*, una de las primeras curvas fractales en ser descritas. Describió la curva en un artículo de 1904 titulado *Acerca de una curva continua que no posee tangentes y obtenida por los métodos de la geometría elemental*.

<sup>56</sup> Waclaw Franciszek Sierpiński (1882-1969) fue un matemático polaco. con notables aportaciones a la *teoría de conjuntos, la teoría de números, la topología y la teoría de funciones*. Estudió la teoría de la curva que describe un camino cerrado que contiene todos los puntos interiores de un cuadrado. Tres conocidos fractales llevan su nombre: el triángulo de Sierpinski, la alfombra de Sierpinski y la curva de Sierpinski.

<sup>57</sup> Gaston Maurice Julia (1893-de 1978) fue un matemático francés, precursor en el estudio de los fractales. Fue el primero en estudiar el tema y en explicar cómo a partir de cualquier función compleja se puede fabricar, por medio de una sucesión definida por inducción, un conjunto cuya frontera es imposible de dibujar a pulso por ser de longitud infinita, entre otras propiedades.

<sup>58</sup> Pierre Joseph Louis Fatou (1878-1929) fue un matemático y astrónomo francés que trabajó en el campo de la dinámica compleja. Fatou estudió procesos iterativos de los números complejos, que más tarde gracias al auxilio de los ordenadores, Mandelbrot generó la representación gráfica de dichos procesos.



*una presión extraordinaria, porque solamente tenía una hora para explicar lo que había estado haciendo durante los veinte años que habían pasado desde que había abandonado Francia. Trabajé muy duro, y creo que no lo hice tan mal y luego escribí un libro sobre ello y necesitaba un título para el libro. Había hecho un trabajo que podía describir y explicar, pero no tenía título. Así que me puse a buscar una palabra bonita de raíz latina para designarlo y cogí un diccionario de latín de mi hijo que había en casa y me puse a buscar 'fractura', 'fracción', etcétera, y me percaté de que todas esas palabras proceden del adjetivo latino 'fractus, fracta, fractum' que hacían referencia a aquello en lo que se convierte una piedra al lanzarla: piezas irregulares. ¡Eureka! Ahí estaba el término que necesitaba. Además, es una palabra que funcionaba muy bien en francés y en inglés. Y así fue como el libro que carecía de título pasó a llamarse 'Les objets fractals'.*

Los fractales estaban dando un argumento explicativo a los sistemas dinámicos caóticos, donde se describen formas aparentemente muy complejas a partir de la repetición recursiva de fórmulas sumamente simples. La iteración indefinida de estas fórmulas, permite rellenar el plano bidimensional, sin ser línea, sin ser plano, sino en una situación intermedia indefinida, con dimensiones no enteras (1,5 dimensiones, 1,3 dimensiones, etc.), esta fragmentación nos acerca a la aparente estructura desordenada de la naturaleza, tanto en la micro escala como en la macro escala, permite ordenar el caos con un orden geométrico, reproducible y mimético. Paralelamente a Mandelbrot, el trabajo del biólogo, artista y naturalista alemán Ernst von Haeckel<sup>59</sup>, es una referencia en el estudio de las formas geométricas de la naturaleza (fig. 29). Los gráficos de Haeckel recrean sus observaciones sobre las estructuras naturales, y posibilitaron la inspiración de arquitectos e ingenieros tales como Fuller o Le Ricolais, sobre todo en relación al análisis de los organismos microscópicos llamados Radiolarios. En el caso de Fuller, las investigaciones que llevo a cabo en el ámbito universitario, estuvieron referidas a la geometría estructural. El estudio de los volúmenes lo lleva a centrar su trabajo en dos figuras correspondientes al grupo de los sólidos platónicos, el tetraedro y la esfera, la primera por ser la figura más estable y resistente a la compresión, y la segunda por tener la relación más alta entre volumen contenido y superficie. Al unir 20 tetraedros consigue un icosaedro, que

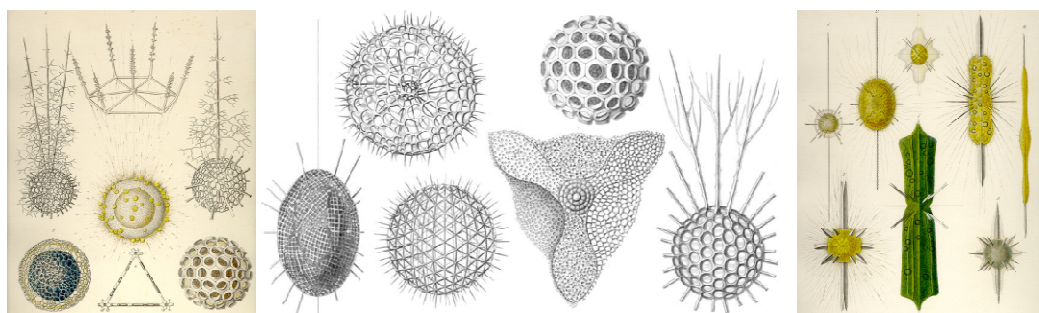


Fig. 29 [Radiolarios, Von Haeckel], Fuente: izq. <http://bit.ly/3jj1PGz>, centro <https://bit.ly/3apKOGQ> y der. <https://bit.ly/3pVDIWB>.

<sup>59</sup> Ernst Heinrich Philip August Haeckel (1834-1919), fue un naturalista y filósofo alemán que popularizó el trabajo de Charles Darwin en Alemania. Fue un ferviente evolucionista, un gran defensor de la idea de selección natural, pero que ignoraba el papel del azar en la teoría darwinista. Sostenía que la evolución estaba dirigida hacia una complejización progresiva que tendría al hombre como meta última. Haeckel produjo en torno a mil grabados sobre la base de sus bocetos y acuarelas. Es considerado como uno de los grandes ilustradores del mundo natural del siglo XIX.

al trincar sus puntas se aproxima a un volumen esférico, consiguiendo la mejor relación entre volumen, contenido y resistencia, este volumen fue denominado por el arquitecto como estructuras geodésicas y representan un ejemplo de eficiencia estructural. Lo interesante del caso, es que en la naturaleza ya se encuentran estructuras geodésicas, un ejemplo de ello es la molécula del Carbono 60. Por su parte Le Ricolais, que al igual que Fuller, estaba interesado en las formas estructurales que observaba en la naturaleza como las burbujas de jabón o las conchas marinas, en su mente especulaba con el peso cero y tramo infinito, acuñando la frase *el arte de la estructura es donde poner los agujeros*.

Esta inspiración surgida de analogías biológicas, se centraba en la práctica de la observación, síntesis y aplicación de las estrategias que utiliza la naturaleza, para dar solución a los problemas de diseño. Este posicionamiento mimético de algunos diseñadores, les permitió valerse de conceptos propios de las ciencias biológicas y



Fig. 30 [Cubo de agua, Beijing], Fuente: <https://bit.ly/3jbgHXA>, [Pompas de jabón], Fuente: <http://bit.ly/2O3HVE0>, [Proyecto Edén, Inglaterra], Fuente: <http://bit.ly/36DImLG> y [Huevos de anfibios], Fuente: <http://bit.ly/3pLPL38>.

trasladarlos directamente al diseño y hoy, gracias a las diferentes técnicas de fabricación, ser convertidas también en un hecho concreto.

Este tipo de trabajos asociados a procesos biológicos, ha sido denominado *Biomimética*, donde la geometría de raíz matemática, los modelos de comportamiento geométrico y su relación con la capacidad evolutiva de los organismos vivos, proponen una arquitectura que persiste en su actitud mimética.

La complejidad intrínseca en el volumen de información relacionado con los sistemas dinámicos no lineales, ha permitido regenerar la visión que el ser humano tiene de la naturaleza misma, en la medida que su conocimiento aumenta y se reproduce, el mismo transmuta, necesita de herramientas que exceden a la naturaleza biológica del hombre.

La tecnología, veloz y cambiante, pregona una suerte de omnipotencia respecto a de lo que somos capaces de realizar y en ese sentido la tecnología digital, posibilita un refinamiento en nuestras habilidades para reproducir y auto reproducirnos, como si fuera el uroboros<sup>60</sup>, en una búsqueda constante de jugar a ser Dios.

---

<sup>60</sup> El uróboros es un concepto empleado en diversas culturas a lo largo de al menos los últimos 3.000 años. Por lo general está representado por un dragón con su cola en la boca, devorándose a sí mismo. Representa la naturaleza cíclica de las cosas, el eterno retorno y otros conceptos percibidos como ciclos que comienzan de nuevo en cuanto concluyen (véase el mito de Sísifo). En un sentido más general simboliza el tiempo y la continuidad de la vida. Se usa como representación del renacimiento de las cosas que nunca desaparecen, solo cambian eternamente.

#### 2.2.4. Generativo e indefinido

Como ya vimos, la teoría del Caos o de la dinámica caótica constituye ya una rama especial de la Ciencia, que a su vez establece implicancias de tipo estético y metafísico. Bajo este concepto toda la belleza polimórfica de la naturaleza, proviene de procedimientos muy simples, aunque no lineales. Un ejemplo gráfico de esto sería las complejas formas adoptadas por los cristales de nieve, una simple molécula de agua, que al congelarse adopta infinitas formas, auto replicándose pero sin repetirse, nunca un cristal es igual a otro. En arquitectura, las formas de un objeto arquitectónico, nutren un amplio universo teórico sobre el porqué de dichas formas o mejor dicho, que soporte geométrico define las mismas.

En ese sentido, la evolución investigativa de la geometría, ha permitido elaborar modelos de comportamiento geométrico que son capaces de emular las características evolutivas de los seres vivos, dando lugar a lenguajes de geometrías no euclidianas y de un claro carácter mimético.

Dentro del campo de las ciencias evolutivas, existe un trabajo de referencia ineludible llamado, *On Growth and Form*, de D'Arcy Wentworth Thompson<sup>61</sup>, la tesis del investigador por demás original para su época (1917), centraba su estudio en revalorizar el papel de la física y de la mecánica en la determinación de la forma y la estructura de los organismos vivos.

El trabajo de Thompson describe la relación entre crecimiento y forma de los seres vivos, describiendo su morfología en términos de matemática pura.

El libro describe una extensa variedad de estudios morfológicos, donde registra las leyes que gobiernan la dimensión de los organismos y su crecimiento, la estática y la dinámica de la configuración en células y tejidos incluyendo los fenómenos del empaquetado geométrico, las membranas bajo tensión, las simetrías y división de células; así como la ingeniería y los esqueletos geodésicos en organismos simples. Esta visión particular del investigador, es de gran utilidad dentro de diversos campos científicos, tales como biofísica, neurociencia, cibernética, etc., que a través de relacionar organismos vivos con las disciplinas que integran la física y la matemática, logra establecer un vínculo entre forma y fenómenos mecánicos (fig. 31).

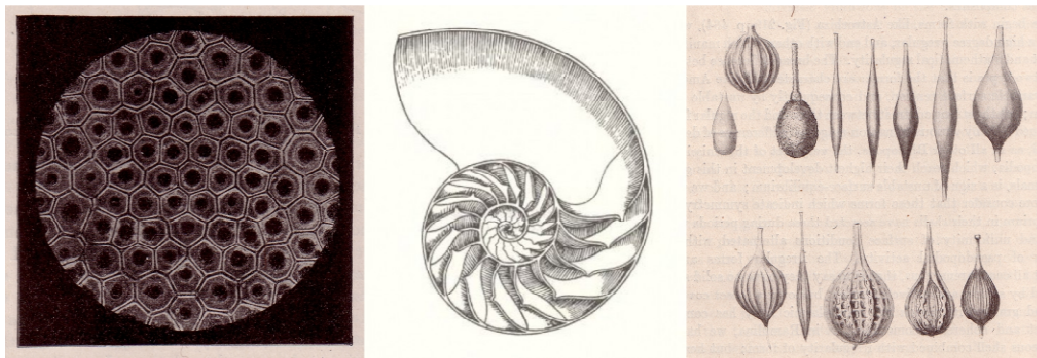


Fig. 31 [Gráficos del biólogo D'Arcy Thompson], Fuente: izq. y der. <http://bit.ly/36EaD4E>, centro <http://bit.ly/3oGbok5>.

<sup>61</sup>D'Arcy Wentworth Thompson Gamgee (1860-1948) fue un biólogo y matemático escocés, autor del libro *On Growth and Form*, publicado en 1917, un trabajo influyente a través de las décadas, el cual le valió a Thompson el título de "el primer biomatemático". La tesis central de *On Growth and Form* es que los biólogos de aquellos días estaban sobrevalorando el papel de la evolución y, por el contrario, infravalorando las matemáticas como herramienta para estudiar el papel de la física y de la mecánica en la determinación de la forma y la estructura de los organismos vivos. Esta obra ha fascinado y estimulado a varias generaciones de biólogos, arquitectos matemáticos, artistas y, por supuesto, a quienes trabajan en las fronteras entre estas disciplinas.

Para explicar esto, desarrolla el concepto poco ortodoxo llamado *principio de similitud*, donde afirma que el término magnitud y dirección está íntimamente ligado a la idea de crecimiento, de manera que ciertas formas específicas están relacionadas con algunos fenómenos de magnitud en el espacio o de extensión de un cuerpo en diferentes dimensiones del espacio. Así, mientras crecer en longitud y crecer en volumen forman parte de un mismo proceso, el crecimiento en volumen y por tanto en peso es mucho mayor que el crecimiento en longitud.

Por otro lado nota que los seres vivos, en relación a su tamaño, no necesariamente tienen un gasto metabólico proporcional, o sea una relación no lineal entre tamaño y calor, o que pequeños animales son mucho más rápidos que otros mucho más grandes, en relación a la capacidad de generar potencia por unidad de peso; en definitiva Thompson da a entender que otras consideraciones deben ser tomadas en cuenta, tal como la eficiencia energética de los organismos y las transformaciones evolutivas y que por lo tanto, curiosamente, estos sistemas responden a parámetros matemáticos.

Desde esta mirada que aporta Thompson al desarrollo evolutivo, podemos comprender las fuerzas que actúan sobre la configuración de las formas naturales, hacerlo a través de un fundamento matemático que permite explicar la dinámica de transformación de las mismas. Toda forma desarrollada o en desarrollo representa en sí misma, un diagrama de fuerzas, resultado de la simultaneidad entre la acción de la fuerza interna de cohesión intermolecular y de la fuerza externa debida a la gravedad, que produce la fricción del objeto o porción de materia, respecto a aquello con lo que entra en contacto en sus movimientos.

Esta lectura de la dinámica de las formas, ha servido de inspiración para formular conceptos vinculados a la teoría de la arquitectura, como los desarrollados por Greg Lynn, que reflota la idea de Thompson respecto a que las fuerzas externas son responsables de la configuración de un objeto, en este caso, arquitectónico, donde las mismas con su dinámica, curvan, pliegan y doblegan dicho objeto, moldeándolo de manera cambiante.

Al igual que Lynn, Enric Miralles<sup>62</sup> también toma los conceptos de la teoría de las transformaciones de Thompson, más precisamente en lo que respecta al concepto de deformación como geometría aproximada, desde una base empírica sin el soporte del cálculo. En sus obras junto a Carme Pinos<sup>63</sup>, expone un lenguaje desinhibido, con una manifiesta estructura configurativa, donde las piezas que la componen, resultan de la intuición interpretativa respecto a donde se concentran y se libran las fuerzas que pujan la forma, modelando estructura y envolvente (fig. 32).

La obra de Thompson arroja luz sobre la interpretación de las formas complejas desde la dinámica en relación al tiempo, como fenómeno evolutivo, donde algunos arquitectos han echado mano a ella como sustento teórico, no solo del lenguaje resultante, sino también de los procesos de diseño adoptados, donde la indeterminación y lo experimental son rasgos claramente distintivos.

---

<sup>62</sup> Enric Miralles Moya (1955-2000) fue un arquitecto Barcelonés, que ha caracterizado sus obras por el equilibrio entre una estética fragmentada y convulsa y el respeto por la tradición del lugar, a través de crear una tensión visual que va cambiando según el ángulo de observación, donde la luz y las sombras son protagonistas. En su corta vida, recibió numerosos premios y fue profesor invitado en numerosas escuelas de arquitectura y de diseño. <https://bit.ly/3ox23yz>

<sup>63</sup> Carme Pinos (1954) es una arquitecta y profesora universitaria española. Fue socia de Enric Miralles hasta que formalizo su propio estudio. Ha impartido clases en la Kunstakademie de Düsseldorf, la Columbia University de Nueva York o la Harvard University. <https://bit.ly/3mpUdE9>



En ese sentido los algoritmos generativos son una herramienta que permite indagar estos aspectos, donde la mutabilidad, indeterminación y sistemas de flujos, son insumos de diseño que asociados, como ya hemos visto, al pensamiento computacional, nutren el proceso de diseño, un proceso que es más valorado que el resultado en sí.

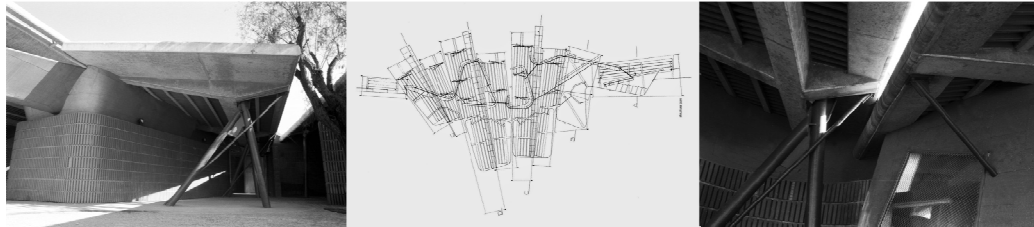


Fig. 32 [Obra Tiro con arco, Miralles & Pinós], Fuente: izq. y der. <http://bit.ly/3oQP4J>, centro <https://bit.ly/3pLd10I>.

El diseño generativo tiene su raíz en los *algoritmos genéticos*, estos fueron desarrollados por John Holland<sup>64</sup>, quien a través del uso de operaciones modeladas de acuerdo al principio de “reproducción y supervivencia del más apto”, postulado por Charles Darwin en 1859, generó un procedimiento matemático que imita los criterios de selección y supervivencia de las especies más fuertes que se encuentran en la naturaleza. Básicamente lo que Holland hace, es establecer variables iniciales que permiten la construcción de lo que se conoce como *padres*; del intercambio genético entre estos, se obtienen los *hijos* o *soluciones primarias*, una serie de proto-soluciones, en donde sus resultados son todavía elementales y poco fiables.

Luego la combinación genética entre los *hijos*, da lugar a las sucesivas generaciones, con la salvedad de que para que el sistema tenga éxito, a cada nueva combinación entre *hijos* será necesario aplicarle una mutación, que será el resultado de cada nueva combinación de individuos, dando como consecuencia una nueva descendencia, o *posibles soluciones* al problema planteado, que pasarán a formar parte de las siguientes generaciones.

De esta manera es posible, frente a un problema, generar un proceso automático de *posibles soluciones*, bajo un proceso de búsqueda de valores óptimos de acuerdo con la codificación previa del algoritmo genético utilizado. Esto elimina complicados cálculos y tareas repetitivas, operando en forma simultánea con diversas soluciones al mismo tiempo. La utilización de *códigos genéticos* en el campo del diseño nos permite generar un gran número de estructuras complejas, evaluando alternativas, a medida que el proceso se desarrolla. Los datos que forman el código aportan la información necesaria para configurar aspectos no solo morfológicos, sino también optimización del volumen, aspectos climatológicos, confort, etc.

Esta es una de las principales características de estos procesos, la posibilidad de sopesar diferentes variantes de manera simultánea, desde un pensamiento multilateral y en una actitud *multitasking*, que de no ser por el soporte digital, la misma sería imposible<sup>65</sup>. Así, visto desde nuestra disciplina, el código genético

<sup>64</sup> Dr. John Henry Holland (1929-2015) fue un pionero en sistemas complejos y ciencia no lineal. También es conocido como el padre del Algoritmo genético. Profesor de Filosofía, de Ingeniería Eléctrica y de Ciencias de la computación en la Universidad de Michigan. Autor de numerosos libros sobre Sistemas complejos adaptativos. <https://bit.ly/3BcifJ6>

<sup>65</sup> La multilateralidad hace referencia al desarrollo de múltiples habilidades que el ser humano puede realizar de forma simultánea.

representa el *todo* conformado por sus *partes*, las cuales poseen información que se transmite entre los diferentes niveles o períodos del proceso, entendiendo al *todo* como algo superador a la suma de sus *partes*.

Este proceso, no es necesariamente un proceso automático, por ende determinista, sino que por el contrario, la manipulación del código dentro del metadiseño<sup>66</sup> permitirá crear estrategias de indeterminación controlada, desde donde surjan formas no esperadas dentro de un rango de previsibilidad.

Si hacemos una breve reseña de la manera en que venimos desarrollando nuestros procesos de diseño, nos encontraremos con que estos, surgen de procesos lineales en respuesta un canon preexistente que, con su proporción y trasfondo mimético, generalmente son de carácter racional, formal, estático, con riguroso orden y lógica. El canon es el instrumental que el arquitecto posee para diseñar y ha sido utilizado desde la Antigüedad hasta nuestros días, es lo que permite a través de un elenco formal y un conjunto de reglas, generar formas y que a través de la transformación recursiva de las mismas, obtenemos el resultado deseado. Este proceso creativo está concebido como un sistema formal, que aun en nuestros días persiste como método de diseño, representante de la tradición racionalista del *box* y del *form follows function*.

No obstante, el estudio de la complejidad y de los sistemas dinámicos ha renovado el interés por el estudio de los sistemas adaptativos, la genética y la creación automática de la forma, como fundamentos de una nueva manera de llevar adelante los procesos proyectuales y superar los esquemas del paradigma de la Modernidad.

### 2.3. Producción

*La tecnología verdaderamente exitosa se vuelve invisible.* Mensvoort (2014)

#### 2.3.1. Industria digital en arquitectura

Las nuevas morfologías emergentes producto de la era digital, necesitan una adaptación de los materiales tradicionales como así también una reinterpretación de la técnica que posibilita el uso de los mismos. Por otro lado, pensar tecnologías que se incorporen dentro de un proceso de manera natural, es el camino más obvio, pero también más incierto, ya que toda tecnología necesita su tiempo de “adaptación” al y con el contexto.

Resulta interesante reflexionar respecto del impacto que hacen las tecnologías en el comportamiento humano y como éstas, a lo largo de la historia, van naturalizándose. El ensayo publicado en 2014 por el filósofo y artista Koert van Mensvoort<sup>67</sup>, *Pirámide de Tecnología*, sugiere una pirámide de transformación de tecnología a naturaleza en 7 pasos, inspirada en la *Jerarquía de necesidades* de Maslow (Maslow, 1943), que

---

<sup>66</sup> El metadiseño consiste en un sistema de redes relacionadas que hacen que un objeto actualmente este sin diseño. El metadiseño utiliza moldes o plantillas para su ejecución, las cuales deben ser flexibles y variables, existe una variabilidad matemática, donde la información es clave, para poder llegar a una forma única o final.

<sup>67</sup> Koert van Mensvoort (Países Bajos, 1974), doctor en filosofía y maestro en ciencias especializado en gráficos computacionales, por la Universidad Técnica de Eindhoven (UTE) y maestro en bellas artes por el instituto Sandberg en Ámsterdam. Mensvoort es un artista, filósofo y científico conocido por desarrollar el concepto filosófico *Next Nature* (Próxima naturaleza). Desde 2003, es jefe del *Next Nature Lab* en el departamento de diseño industrial de la UTE, y es el director y fundador de a *Next Natur Foundation*, una Think tank con base en Ámsterdam, Países Bajos. En 2014 publicó su ensayo de la pirámide tecnológica, *Pyramid of Technology: How Technology Becomes Nature in Seven Steps*, Technische Universiteit Eindhoven. <https://bit.ly/3D8o5LS>

describe los requisitos humanos como la nutrición, el refugio, la seguridad y el amor en las etapas posteriores. Mensvoort, mira en retrospectiva para analizar el proceso que sufre la tecnología hasta que esta se invisibiliza y se naturaliza. Al entender la tecnología como algo que supera lo establecido, el autor asegura que "(...) *tenemos una definición tácita de tecnología como " algo inventado después de que naciste " o " algo que aún no funciona (...)"*, pero en realidad eso solo demuestra nuestra limitada percepción del concepto de tecnología y que "(...) *solo cuando comenzamos a reflexionar sobre la tecnología nos damos cuenta de que, además de los últimos dispositivos electrónicos, la tecnología también implica vivienda, carreteras, automóviles, ruedas, ropa, dinero, escritura, agricultura y relojes.*

*Al igual que el pez que no sabe que está mojado, estamos sumergidos por la tecnología, pero somos relativamente ajenos a su omnipresencia. Cuando se trata de cambios tecnológicos, somos los sonámbulos en el mejor de los casos, nos movemos de un dispositivo a otro, percibiendo nuestro entorno paso a paso, pero sin una visión clara o un marco sobre cómo hacer frente a las tecnologías emergentes y hacia dónde nos llevarán".*

Los siete niveles de naturalización de la tecnología que se enuncian en el ensayo son, *visualización, operacional, aplicado, aceptado, vital, invisible y naturalizado*, donde el primero se encuentra en la base de la pirámide y el último en la cúspide.

En esta secuencia, es necesario que se cumplan los niveles inferiores para acceder a los niveles superiores, de manera que toda tecnología experimenta un proceso de acostumbramiento social, que con el tiempo se pierde dentro de un sinnúmero de necesidades diarias. En una breve descripción podemos decir que los 7 niveles se van transformando de la siguiente manera; el nivel de inicio, en la base de la pirámide está el nivel de *visualización*, lo que los arquitectos llamaríamos ideación o caja negra, un estadio donde predominan el campo de los sueños y las visiones, un lugar de donde indefectiblemente surgen las innovaciones tecnológicas; en el siguiente nivel más bajo se encuentra el *operacional* en donde la idea se transforma en un prototipo operativo o prueba de concepto, el cual aún no ha entrado en uso ni aceptado, un ejemplo de esto son tecnologías probadas en laboratorio tales como, la computadora cuántica, la electricidad inalámbrica y los microbios diseñados que convierten los desechos de las plantas en petróleo. Este es un nivel donde la investigación es el principal recurso, donde muchas innovaciones pugnan por emerger y no todas logran ser aplicadas y aceptadas, por lo tanto, no generan valor en la cadena productiva (fig. 33).

El hecho de que un producto salga del laboratorio y entre en la sociedad, lo sitúa en el nivel de *aplicado*, una etapa entre la invención y la aplicación donde numerosas tecnologías quedan estancadas e incluso caen de nivel. Son varias las razones por la cual una tecnología no logra salir de este nivel, pueden ser por razones económicas (como las células fotovoltaicas), de principios (como la energía nuclear), por contexto (como el auto eléctrico, no solo por su limitada autonomía, sino también por el lobby ejercido por las compañías petroleras); en definitiva, el éxito dependerá de su competencia dentro del entorno existente.

El cuarto nivel corresponde al *aceptado*, en él se encuentran las tecnologías ampliamente esparcidas en nuestro entorno; autos, celulares, GPS, etc., son algunas de las tantas que alcanzaron un estado de reproducción, estandarización y familiaridad, que su papel sociocultural es de gran importancia. En este nivel las tecnologías son parte de nuestra vida diaria, pero aún no son un estilo de vida. Tan pronto como una tecnología se convierte en una parte obligatoria de nuestras vidas, se eleva al siguiente nivel.

El siguiente nivel es el *vital*, están tan inmersas en nuestras vidas que son una parte importante, cuando carecemos de ellas, nos sentimos incompletos y en algunos casos podría ser desestabilizante para nuestros modos de vida actual, como por ejemplo si faltaran los desagües sanitarios, la red de agua o los antibióticos. Estas tecnologías son primarias, esenciales e indiscutibles.

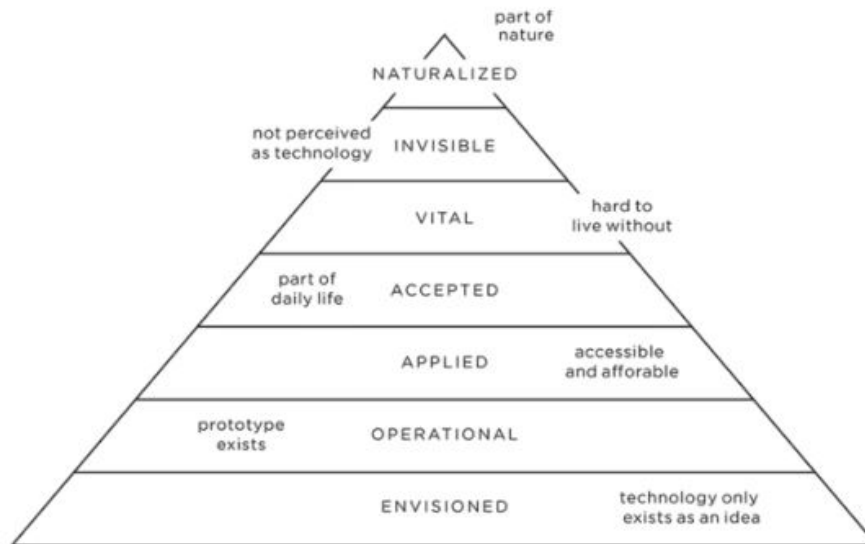


Fig. 33 [Pyramid of technology, Van Mensvoort, 2014], Fuente: <http://bit.ly/3pXuIKM>.

El anteúltimo paso que da una tecnología, la sitúa en el nivel *invisible*, esta se encuentra tan inmersa en el entramado de la vida cotidiana, que se nos dificulta reconocerla (Weisser, 1991). La escritura da cuenta de ello, una representación simbólica del lenguaje, hablado es una TIC antigua omnipresente. La tecnología de la escritura es tan exitosa que ni siquiera la reconocemos como tal y lo mismo ocurre con el dinero, la ropa y la agricultura.

El último nivel que puede alcanzar una tecnología es el *naturalizado*. Sin embargo, al igual que con la pirámide original de Maslow, esta cumbre rara vez se alcanza. La mayoría de las tecnologías ascienden no más de la mitad de la pirámide antes de estabilizarse o ser empujadas hacia abajo a niveles más bajos por las nuevas tecnologías emergentes. Algunas tecnologías, como las alcantarillas y la informática digital, han subido a la etapa "vital". Solo un puñado de tecnologías, como la escritura, están tan integradas y omnipresentes que ya no se experimentan como tecnología, por lo que las consideramos parte de la naturaleza humana. Un contundente ejemplo de tecnología naturalizada es la cocina o mejor dicho la acción de cocinar, una acción universal de naturaleza humana que comenzó hace 500.000 años y que para los primeros homínidos, era una técnica innovadora. Estudios demuestran que del intercambio intestinal-cerebro, el tracto digestivo humano se contrajo mientras que el cerebro crecía, a medida que las sucesivas generaciones de nuestros antepasados homínidos dependían de la cocina (Aiello & Wheeler, 1995). Por otro lado, el trabajo de cocinar y cuidar el fuego puede haber dado lugar incluso a la unión de parejas, el matrimonio, el hogar e incluso la división del trabajo (Wrangham, 2010).

La naturaleza y la tecnología no son opuestas, la historia muestra como estas últimas, cuando se vuelven exitosas, transforman nuestra naturaleza humana.



Desde esta perspectiva y dentro del campo de la producción arquitectónica ¿Qué lugar ocupan las actuales tecnologías de las AEC? ¿En qué lugar de esta escala podríamos situar a la fabricación digital?

En principio la mayoría de las actuales tecnologías utilizadas en la producción arquitectónica se sitúan entre lo vital y lo aplicado, difícilmente encontremos alguna en el nivel invisible, quizás el concepto de protección o de nido, podrían encontrarse en este nivel, pero solo si entendemos que para ello es necesaria la utilización de la tecnología. Sin embargo, muchas tecnologías que podemos denominar emergentes se encuentran entre el nivel operacional y aplicado, las recientes investigaciones que se centran en la fabricación aditiva, son un ejemplo de ello. De hecho, algunos se atreven a arriesgar que el futuro de los edificios será en un entorno donde los mismos se replicaran, ensamblarán y repararán a sí mismos.

A modo de referencia de investigaciones en este campo, se puede reseñar el trabajo realizado por el Laboratorio de auto ensamblaje en el Centro de Diseño Internacional del MIT, fundado por el profesor Skylar Tibbits<sup>68</sup>, el cual se centra en estudios relacionados a tecnologías de materiales programables y de auto ensamblaje para productos, procesos de fabricación y construcción (fig. 34).

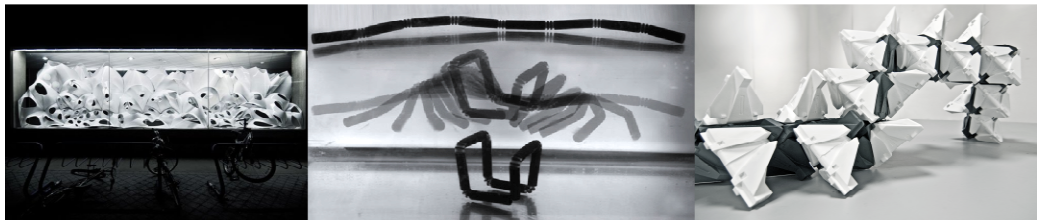


Fig. 34 [Voldatom en el MIT], Fuente: <http://bit.ly/2MOziR9>, [Hebra auto plegable], Fuente: <https://bit.ly/36E84zP> y [Módulos ensamblables], Fuente: <http://bit.ly/3axpX4e>.

El proceso de fabricación digital reedita el ida y vuelta del diseñador con los materiales y sus características intrínsecas, aunando la etapa de elaboración de proyecto y la etapa de construcción, ya que existe una relación directa del proceso y el material actuante, dando posibilidades de exploración hacia métodos no concebidos. El proceso de materialización se hace directamente entre el diseño y la maquinaria, eliminando pasos intermedios, donde el diseñador posee el control inmediato del producto final. El *file to Factory* permite experimentar, prototipar, detectar errores y reelaborar el diseño, de manera que el diseñador pueda perfeccionar las limitaciones entre materia y proyecto. Más allá de presentarse como una tecnología emergente y de vanguardia, la industria de la producción arquitectónica ya cuenta con algunos ejemplos concretos de fabricación digital, que con el correr del tiempo, va encontrando nuevos modos de materializar los proyectos.

Este desarrollo continuo de las tecnologías de producción arquitectónica, es traccionado por el avance de las arquitecturas computacionales caracterizada por formas fluidas y dinámicas, de raíz no euclidiana. Hay una estrecha relación entre el potencial de las tecnologías digitales y la facilidad de reproducir físicamente los

<sup>68</sup> Skylar Tibbits es un diseñador estadounidense, conocido por su trabajo en autoensamblaje y pionero de la impresión 4D. Es profesor en el Departamento de Arquitectura del MIT, donde fundó el Laboratorio de autoensamblaje. Tibbits se graduó de la Universidad de Filadelfia con una Licenciatura en Arquitectura y recibió una Maestría en Ciencias de la Computación, así como una Maestría en Ciencias en Diseño y Computación del MIT. <https://bit.ly/3DfDZEi>

diseños, lo que permite correr los límites de lo que se entiende como técnica, morfológica y materialmente imposible.

Esto da por tierra con la manera con que actualmente afrontamos los procesos de diseño, reinterpretando los mismos desde el pensamiento computacional, enfocado en el proceso en sí más que en el resultado en particular, sugiriendo posibilidades, que en un principio parecieran estar del lado de la utopía más que de la realidad pura, pero que invitan a los desarrolladores de tecnología a tomar caminos no convencionales, en la búsqueda de nuevas soluciones.

### 2.3.2. Eficiencia como presupuesto de diseño

En la producción arquitectónica, la optimización se empieza a visualizar demasiado tarde en el proceso, es decir cuando resulta complicado o imposible el cambio propuesto dado su impacto en los tiempos y en los costos. De allí que resulte más ventajoso para aumentar la eficiencia, la optimización en la etapa de gestación de un proyecto, cuando el diseño está en un estado factible de cambios y estos se pueden implementar sin sacrificios. No obstante, ello y aun adoptando procesos flexibles y con retroalimentación de datos para lograr un óptimo resultado, todavía es incipiente el traslado de esta eficiencia lograda en el proceso de diseño, al proceso productivo. Es por ello que el impacto que produce la asociación de tecnologías digitales y la facilidad de reproducir materialmente los diseños realizados mediante esta, hacen factible la materialización de los mismos, dentro de un ámbito, donde invención e innovación, marcan el rumbo. Los modelos digitales poseen la ventaja de ser reversionados constantemente y así optimizan nuestra propuesta en etapas de ideación del proyecto, donde los cambios pueden ser implementados previamente al inicio de un proceso productivo, sin que este sufra el impacto de los mismos. Por otro lado, la industria está reconvirtiendo los procesos de producción en masa, proveniente del taylorismo, a procesos de producción que posibilitan un conjunto diferenciado de productos flexibles y adaptables en el tiempo, los cuales pueden ser modificados frecuentemente, sin bajar el rendimiento de la producción.

A pesar de la incidencia de las tecnologías digitales, que visiblemente han repercutido facilitando la tarea de los profesionales, la gran mayoría de los actores de las AEC mantienen modos constructivos en base al trabajo del hombre, algo que sucede desde las épocas de las pirámides.

Aún no se evidencia el potencial que acarrearán estas innovaciones, de hecho, según el Departamento de Comercio de los EEUU y la Oficina de Estadísticas Laborales, la arquitectura tiene hoy una productividad más baja en relación a los años `60 y ello se debe básicamente a tres factores: el *tiempo perdido* en documentación y papeleo, que aumentó con la complejidad del diseño; la *dependencia de la fuerza de mano humana* en el proceso de construcción y la *mala comunicación* entre los equipos de diseño y los contratistas.

El impedimento que se describen en las dos últimas razones ha hecho que los desarrolladores de tecnología empiecen a mirar otras industrias cuyos procesos dependen cada vez menos de la mano de obra del hombre, como por ejemplo la industria automotriz. La industria automotriz, como tantas otras, apelan a la repetición como modo de sustento productivo y la principal diferencia que hace que estos modos no sean tomados literalmente por las AEC, es que, en su mayoría, estas industrias realizan productos en masa, y un pilar clave del sustento de las mismas, es la repetición, una característica infrecuente dentro de la producción arquitectónica.

El uso de maquinaria autónoma de producción ya sucede desde finales del siglo XX, se pasó de una tecnología analógica, mecánica y electrónica, a una tecnología digital que globaliza el planeta a través de tecnificar los medios productivos, a fuerza de ordenadores y a una mayor automatización de los procesos, que como meta final u objetivo, es la masificación de productos.

Hoy la industria se encuentra cada vez más inmersa en un contexto de hiper conectividad y sistemas *ciberfísicos* o internet de las cosas (*IoT-Internet of Things*), donde la incorporación de microelectrónica y TICs automatizan todo el proceso de trabajo, un escenario en el cual los sistemas de producción están interconectados globalmente, con un gran impacto en la incorporación dentro de los sistemas de producción tecnologías como la impresión 3D y los robots colaborativos ó *Cobots* (fig. 35).

Esta ciber-industria apunta a una convergencia digital entre los componentes industriales y los de negocio y entre los modelos y los procesos internos de las empresas. El nuevo modelo de industria centrada en los datos requiere de una transformación profunda, basada en la integración inteligente de las TICs con los procesos de producción industriales, la correcta administración de la creciente y variada información que de estos procesos productivos se desprenden y su análisis, como así también predecir anomalías o facilitar la gestión de recursos, es decir buscar una mayor optimización a través de conocer profundamente el comportamiento de la producción industrial<sup>69</sup>.

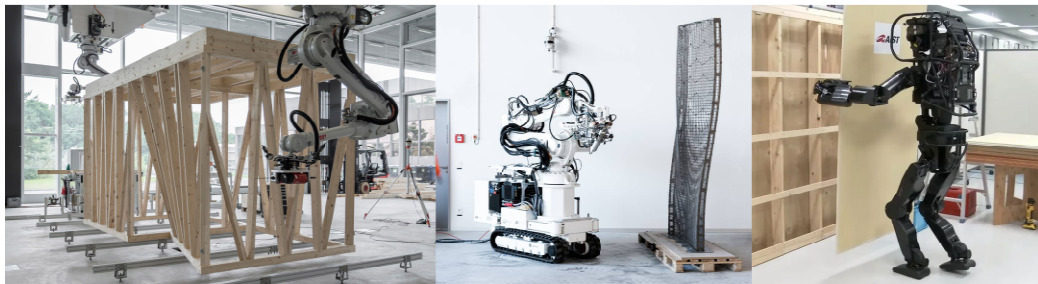


Fig. 35 [Robots en la industria AEC], Fuente: izq. <http://bit.ly/3olscqn>, centro <http://bit.ly/3cGr5VU> y der. <http://bit.ly/3jbdlUs>.

Se presupone así un ámbito productivo que estará solventado por la robótica, la conexión entre maquinas sin intervención del hombre y los sistemas digitales de producción, será necesario que la producción tenga estándares claramente definidos, para que los protocolos sean universales y donde la conectividad colaborativa sea el factor preponderante para el desarrollo. El uso de estas tecnologías hará posible reemplazar de manera flexible las máquinas que deban ser reparadas, reemplazadas o mejorar sus prestaciones dentro de la cadena de valor.

La transformación digital de un sector tan tradicional como el de la construcción, impactara no solo a través de una mayor industrialización del sector, sino también afectando a la manera como esta produce sus componentes, caracterizada por una demanda que exigirá estándares más altos y un cambio en los modos de construir que terminaran por determinar el producto final.

<sup>69</sup> *Big Data* (macrodatos), *Data Mining* (minería de datos) y *Data Analytics* (análisis de datos) son las principales herramientas utilizadas con este fin.

Este proceso de transformación de los modos de producción, responde en gran medida a la búsqueda de optimizar los mismos y minimizar las pérdidas, características propias de una industria globalizada sumida en un capitalismo cuya forma de reproducción exige un crecimiento económico constante, una competencia permanente entre capitales y un desarrollo continuo de las tecnologías para aumentar la ventaja competitiva; necesita de la liberación de las fuerzas de destrucción creativa para despejarle el camino a las innovaciones tecnológicas y sociales, en constante aceleración. Esta idea de “velocidad” de los acontecimientos es llevada adelante por algunos pensadores post-capitalistas, inscriptos en la corriente filosófica del *aceleracionismo*, que sostienen que, hay deseos, tecnologías y procesos que el capitalismo hace surgir y de los que se alimenta, pero que no puede contener; y que es necesario acelerar estos procesos para empujar al sistema más allá de sus límites. Dado la creciente automatización de los procesos productivos, incluido el “trabajo intelectual”, pone de manifiesto la crisis secular del capitalismo y su pronta incapacidad a la hora de mantener los niveles de vida actuales, incluso para las clases medias del hemisferio norte, ya en proceso de desaparición.

*Si hay algún sistema que se haya asociado con ideas de aceleración, ese es el capitalismo. El metabolismo esencial del capitalismo demanda un crecimiento económico constante, una competencia permanente entre entidades capitalistas individuales y un desarrollo continuo de las tecnologías para aumentar la ventaja competitiva, todo ello acompañado de una fractura social cada vez más grande. En su forma neoliberal, su proclama ideológica es la liberación de las fuerzas de destrucción creativa para despejar el camino a las innovaciones tecnológicas y sociales, en constante aceleración.<sup>70</sup>*

Como venimos afirmando el modelado digital tiene grandes beneficios para las AEC, pero aún no se ha logrado trasladar esa eficiencia que se ha logrado en el proceso de diseño, al campo productivo; dentro de este, aún existen etapas muy dependientes de la tarea manual, con la inevitable tasa de error humano que esta implica. Es allí donde, en la búsqueda de equiparar el rendimiento del proceso virtual con el del proceso de materialización, surge la idea de replicar los métodos de automatización de otras industrias con el fin de minimizar las fallas.

La automatización de gran parte de los pasos que presuponen los procesos de producción arquitectónica, es uno de los caminos y la misma estaría solventada por distintos tipos de robots, los cuales aumentan sustancialmente la producción. Las posibilidades son infinitas y esta transformación aún es incipiente, las maquinas autómatas podrían reemplazar casi la totalidad de las tareas hechas por humanos, como por ejemplo desde escanear edificaciones existentes, replantear nuevos proyectos, recabar datos de entorno y medioambiente (temperatura, humedad, radiación, calidad del aire, etc.), tareas de doblado y soldado de barras de acero, hasta la impresión de una vivienda completa en 24 h.

Este escenario presenta un cambio no solo en los modos de construir, sino que como en tantos otros sectores, una reconversión de la futura mano de obra que se volverá obsoleta y que a pesar de las miradas pesimistas de aquellos vislumbran una crisis

---

<sup>70</sup> Manifiesto por una política aceleracionista, Alex Williams y Nick Srnicek. Independientemente de la adhesión que pueda generar este manifiesto, describe la contracara del desarrollo tecnológico, que si bien es pesimista en su visión a futuro, aun es reversible y posee la característica propia de todo desarrollo tecnológico: este no es ni bueno, ni malo, el problema es que hacemos con dicho desarrollo.

laboral, promete una industria que producirá con mejor calidad, más sustentabilidad, menor costo, reducción de riesgos, mayor ciclo de vida y menor mantenimiento. En ese sentido, el Foro Económico Mundial Davos (WEF), a través de su presidente Klaus Schwab, ha señalado que serán tres los ámbitos orgánicos donde los cambios van a ser radicales: *el trabajo, los gobiernos y las empresas*. En 2016 el WEF anunciaba que en 2020, la automatización, la robótica y la computación avanzada harán desaparecer siete millones de empleos y tan sólo se crearán dos millones de puestos nuevos. En los principales países industrializados de Europa Occidental, los trabajadores efectivos ocupados en la industria representaban el 40% de la población activa a comienzos de los 40'. Hoy esta proporción es de alrededor del 30%. Se calcula que bajará a un 20% o 25% a comienzos del próximo siglo (Gorz, 1990). La reducción del proletariado fabril, especialmente en los países del capitalismo avanzado, como consecuencia del cuadro recesivo y los avances tecnológicos, está generando una creciente tasa de desempleo estructural. El WEF recomienda invertir en reencauzar las habilidades de los empleados actuales, captar el talento femenino, impulsar la movilidad y la rotación laboral, ofrecer capacitación, colaborar con instituciones educativas, enfocarse en el talento de las minorías, atraer talento extranjero y hacer equipo con otras industrias del sector.

El rol del arquitecto en este futuro escenario seguirá siendo preponderante, estos deberán pensar y diseñar bajo los nuevos estándares tecnológicos, ir más allá del planta, corte y fachada, y centrarse en la investigación en torno a nuevos materiales y nuevas técnicas de construcción, en función de mejorar lo que producimos, de la manera más sustentable posible.

La automatización, las mejoras en técnicas y procesos constructivos y los avances en nuevos materiales contribuirán a construir más rápido, desde esa óptica, para Matthias Koehler<sup>71</sup>, *...la posibilidad de fabricar directamente componentes de construcción descritos en la computadora expande no solo el espectro de posibilidades de construcción, sino que, mediante la implementación directa de material y lógica de producción en el proceso de diseño, establece una expresión arquitectónica única y una nueva estética...*

Desde nuestra realidad local, no debemos soslayar hacia donde se dirige el futuro de la producción arquitectónica, la institución educativa debe poner manos a la obra respecto de adecuar la formación de sus profesionales acorde a las futuras demandas. Hoy la industria de la construcción sigue teniendo un alto componente de trabajo manual y ello ocurre desde hace siglos, pero el cambio es imperativo, no se puede luchar contra el avance tecnológico y el sector de la construcción deberá sacar provecho de ello.

### 2.3.3. Tecnologías y modos constructivos factibles

*"El conocimiento único desarrollado a través de la práctica de la construcción, es el nuevo valor central de la arquitectura"* UNStudio

---

<sup>71</sup> Matthias Kohler, es un arquitecto profesor del departamento de arquitectura de la ETH Zúrich, interesado en el diseño computacional, la fabricación robótica y la innovación material. En 2000, fundó Gramazio-Kohler junto con Fabio Gramazio. Fundó el primer laboratorio robótico arquitectónico del mundo en la ETH Zurich, creando un nuevo campo de investigación que combina procesos de diseño arquitectónico avanzado y fabricación aditiva mediante el uso personalizado de robots industriales. La investigación reciente se describe y se enmarca teóricamente en el libro *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture* (Park Books, 2014).

Pensar en fabricación digital, como ya hemos dicho, lleva a repensar el modo en que llevamos a cabo los procesos, debido a que, las restricciones propias de las actuales tecnologías en uso, impiden la ejecución de formas poco convencionales y se sostienen mayoritariamente en las tareas ejecutadas de forma manual. El escenario representa un cambio de paradigma respecto a la forma en que venimos desarrollando dichos procesos y restablece los lazos entre diseño, proyecto y producción.

Más allá de la búsqueda de nuevas formas de materializar, la eficiencia, en términos de costo/beneficio, sigue siendo uno de los principales objetivos y de momento algunos métodos están lejos de resolver esta ecuación, ostentando altos costos para llevar adelante sus procesos.

Una de las principales causas que dificultan la implementación de fabricación digital, por parte de más actores de la industria de las AEC, es el desacople que existe entre los desarrolladores de software y los fabricantes de máquinas herramientas. Un claro ejemplo de ello es la implementación del BIM en los proyectos ejecutivos, ya que este formato se centra solamente en implementar un protocolo universal de documentación, dejando de lado la fabricación, lo cual no termina de cerrar el círculo del proceso productivo. Es decir, en cierta medida el BIM no responde a las lógicas de los procesos de fabricación digital, quedando más como una herramienta de control de proyecto y documentación, que un paso previo para obtener el *output* que el sector productivo necesita y así concretar el cierre del ciclo productivo, de manera fluida y eficaz. De allí, que la mirada hacia las industrias metalmeccánicas, especialmente la automotriz y aeroespacial, en donde los procesos están altamente digitalizados tanto en su diseño como en su producción, nos solventen con su conocimiento previo, empezando por el uso del software que contempla los protocolos de información, que las máquinas herramientas necesitan para producir. Es decir, un proceso integral de generación de la geometría y exportación para su fabricación de forma que se reduzcan al mínimo las dificultades, mejorando los plazos y costos.

Más allá de la adaptación de los desarrolladores de software pensando en cómo exportar sus datos para ser fabricados y la necesaria complementariedad entre diseño y desarrollo de máquinas herramientas, el rol de las universidades como formadores de futuros profesionales, no es menor, no solo desde los contenidos, sino también desde la interoperabilidad que implica el manejo de proyectos cada vez más complejos, que requieren del uso de métodos de producción más participativos entre los diferentes actores.

La industria hoy cuenta con una diversidad de modos de manufacturar a través de tecnología digital, si bien la mayoría se encuentran en estado operacional, muchos de ellos están comenzando a ser aplicados y con resultados satisfactorios. El espectro es bastante amplio y diverso, en el encontramos básicamente tres formas de trabajar el material, por adición, corte y desbaste, que a su vez podemos clasificar en dos grandes grupos: aquellos métodos que sustraen material (CNC con brocas, cuchillas y chorros de alta presión) y otros que adicionan (extrusión y posterior solidificación); pero a pesar de la variedad, es la fabricación aditiva la que goza de mayor popularidad dentro de los desarrolladores que buscan obtener una tecnología, que resulte cada vez más accesible dentro de los sistemas de producción (fig. 36).



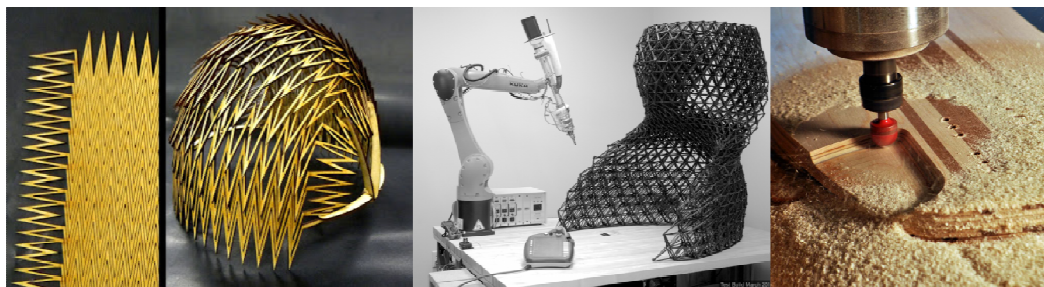


Fig. 36 [Fabricación digital por corte, adición y sustracción], Fuente: izq. <http://bit.ly/3oTiBNT>, centro <https://bit.ly/3cCoHiV> y der. <https://bit.ly/36Hponw>.

De hecho el grado de I+D en este campo, lo hacen cada día más accesible y ya existen modos de producción arquitectónica que materializan a altas velocidades con bajos costos y un alto grado de optimización; no obstante aún se muestran ciertas limitaciones en cuanto a escalas, tolerancias y uso del material, requerimientos necesarios para satisfacer los estándares del mercado.

Si bien La fabricación aditiva es la práctica en mayor desarrollo dentro del contexto internacional, en nuestro medio tiene una existencia prácticamente nula<sup>72</sup>.

Conjuntamente a los recursos disponibles para emprender un proceso, deberemos evaluar con cuales técnicas llevaremos adelante la producción, hasta el momento se reconocen cinco modos de conformación: *sección, teselado o panelado, pliegue, relieve o contorno y forma o moldeo* (Fig.37). Demás está decir que estas técnicas se pueden combinar y muchas veces se dificulta establecer los límites entre una y otra manera de fabricar, pero en principio podemos decir que *sección*, es la técnica que



Fig. 37 [Conformaciones en fabricación digital, sección, teselado, pliegue, relieve y molde], Fuente: arriba izq. <http://bit.ly/3jeiWJC>, arriba der. <http://bit.ly/3oLGS8v>, abajo izq. <http://bit.ly/36E7GRU>, abajo centro y der. "Digital fabrications. Architectural and materials techniques" (2009).

<sup>72</sup> En el capítulo siguiente estableceremos algunas categorías, en relación al tipo de material utilizado y las posibilidades de maquinado de los mismos, que permitirían aprovechar las ventajas de la fabricación digital, mediante el uso del instrumental que si poseemos en nuestro medio.

apela a “costillas” para reproducir la forma ya sea en una o dos direcciones (waffle); *teselado o panelado*, es aquella donde la modulación y la composición se realiza con piezas poligonales diferentes que se unen sin dejar ningún espacio entre ellas; el *pliegue*, es otra técnica que permite a través de figuras en dos dimensiones obtener por superposición y angulación entre ellas, espacios dotados de rigidez estructural; el *relieve o contorno*, que permite generar una nueva geometría partiendo de una superficie bidimensional, con suficiente grosor para llegar a una tridimensional, mediante un proceso de sustractivo; y por último la técnica de *forma o moldeo*, que como su nombre lo indica consiste en el empleo de moldes y posterior curado del material interviniente.

La mayoría de estas experiencias surgen previamente en los laboratorios de fabricación digital de distintas universidades y de aquellos estudios de arquitectura que tienen integrantes vinculados a ellas. Estos FabLabs son el caldo de cultivo de experiencias en tecnologías no convencionales, permitiendo a los participantes llevar adelante procesos íntegros, identificando virtudes y defectos de las diferentes técnicas, como así también los condicionantes propios del material, a través de una revisión constante entre diseño y materialidad.

Por último, está más que claro hacia dónde se dirige el futuro industrial de las AEC, un futuro que demandara profesionales que sepan adaptarse a los flujos de trabajo totalmente digitalizados y permeables a aprender nuevas habilidades, por lo que es necesaria una tarea mancomunada entre universidad e industria.

## 2.4. Contexto arquitectónico

*¿Qué es un arquitecto?*

*“Y llamo arquitecto al que, con un arte, método seguro, maravilloso, mediante el pensamiento y la invención, es capaz de concebir y realizar mediante la ejecución todas aquellas obras que, por medio de movimiento de las grandes masas y de la conjunción y acomodación de los cuerpos, pueden adaptarse a la máxima belleza de los usos de los hombres”.*

León Battista Alberti (1450), *De Re Aedificatoria*

### 2.4.1. Moderno centrismo

*Mi argumento es que estamos en el comienzo de una nueva manera de hacer arquitectura y construir ciudades, que creció en el movimiento posmoderno en ciencias y otros lugares, pero que todavía no ha madurado. El nuevo paradigma existe, pero algo ambiguo. Pasó de las punzadas del parto, pero está aún en la infancia, y hay mucho que decidir sobre cómo va a desarrollar y madurar.*

Charles Jenks (2002), *The New Paradigm in Architecture*

Es indiscutible que las universidades son las que forjan los profesionales del mañana, suena hasta reiterativo, pero si uno observa en derredor, no solo el panorama local, sino también el internacional, vera que salvo raras excepciones, las universidades funcionan con cierto *manierismo*, sin un objetivo claro o preciso en cuanto al carácter y el porqué de los contenidos que deben brindar a sus estudiantes, no solo en relación a las demandas actuales del contexto socioeconómico, sino también para avizorar cuales serán aquellas demandas a las que deberán atender al momento en que



ejerzan. Esto trae como consecuencia, básicamente, la formación de estudiantes alejados de los quehaceres profesionales y faltos de compromiso con la realidad. Por otro lado hay una vasta cantidad de profesores que en general, posee nula o poca experiencia profesional y terminan “utilizando” la temática de la programación anual como una forma de vehicular sus propias inquietudes profesionales, sin un correlato genuino entre los objetivos trazados y su verificación social. Esto muchas veces se ve potenciado por la similitud programática que existe en los diferentes niveles, dejando lugar para más dudas respecto de las habilidades necesarias para desempeñarse con solvencia en un ámbito profesional.

Algunos de estos modelos pedagógicos se centran en un revisionismo acrítico del movimiento moderno, utilizando el taller como ámbito de formación excluyente, instaurado por el modelo academicista del siglo XVII. Este modelo pareciera ser la única vertiente de la cual tomar los insumos necesarios para montar los contenidos, generando un proceso recesivo y anacrónico respecto de las formalizaciones y el lenguaje compositivo. La aparición de tecnología digital en los procesos de diseño y construcción, marcan un antes y un después en términos de lenguaje y concepción programática, obligando a revisar los modos pedagógicos vinculados a esta visión moderno centrista, entendiendo este nuevo modelo como una instancia superadora con alto contenido experimental.

Ya en los 90' Jenks<sup>73</sup>, elucubraba una realidad donde el lenguaje o la forma arquitectónica debían seguir la visión del mundo y que esta visión estaba en pleno proceso de transformación, proceso este, refrendado por las aportaciones de la ciencia contemporánea, básicamente aquellas relacionadas con la complejidad. Caos, fractales, sistemas auto organizados, dinámicas no-lineales, etc., se entrecruzan y nutren a la disciplina reconfigurándola, alejándose por completo de la rigidez propia del movimiento moderno, caracterizada por ser determinista, mecanicista, reduccionista y materialista (fig. 38).

Desde ese lugar y frente a un contexto socioeconómico enmarcado en una era postfordista, resulta imperativa la aprehensión de nuevas habilidades, tanto sea de parte de los estudiantes en curso, como de los profesores en su conjunto. Así como en su momento la arquitectura estuvo sometida a una transformación producida por la mecanización, estandarización y producción en masa de la segunda revolución industrial y que derivó en el movimiento moderno, hoy los avances tecnológicos



Fig. 38 [Arquitectura de los '90, Coop Himmel(l)au, Bolles & Wilson y Zaha Hadid], Fuente: izq. <http://bit.ly/2MwLpyn>, centro <http://bit.ly/3auvHf7> y der. <http://bit.ly/3rkrjWR>.

<sup>73</sup> *The Architecture of the Jumping Universe: a Polemic. How Complexity Science is Changing Architecture and Culture.*

transforman los procesos involucrados en la producción arquitectónica gracias a los nuevos materiales y el soporte digital.

En ese sentido y como lo mencionáramos en el apartado anterior, los FabLabs juegan un rol fundamental frente al nuevo paradigma; integrar diseño, investigación y desarrollo para llevarlo a la práctica; esta mecánica de trabajo, generalmente es ofrecida como asignatura alternativa o en formato de workshop, donde se trabaja de manera colaborativa, procesando grandes volúmenes de información.

Poner en la práctica de manera temprana a los estudiantes a través de estos laboratorios, es una manera efectiva de acortar la brecha entre academia y quehacer profesional. John Dewey<sup>74</sup>, sostenía que el ser humano aprende de sus propias experiencias, de hecho la experimentación y exploración sobre la construcción formal y material, es un ejercicio corriente dentro de nuestra disciplina, que hoy se ve expandida por la lógica del file-to-factory. Venimos de una concepción estética de la arquitectura, que es formalista, mecanicista y racionalista, una arquitectura de planta y fachada libre, despojada, que exhibe el poder que las nuevas tecnologías brindaban a través del hormigón armado y el acero, como así también el soporte científico que permitía a estos materiales, ser exigidos en su máximo potencial. Hoy, ese soporte, se ha renovado y se mantiene en evolución constante, expandiendo los límites, no solo de las posibilidades formales, sino también de las posibilidades de materialización de dichas formas. Esto no solo afecta al lenguaje y su materialidad, sino que también redefine el espacio y su contenido, como un emergente propio de la contextualidad compleja de nuestros tiempos.

#### 2.4.2. Híbridez programática

*"La palabra método ayuda a pensar por uno mismo para responder al desafío de la complejidad de los problemas. Necesitamos un anti-método en el que ignorancia, incertidumbre, confusión, se vuelvan virtudes". E. Morín*

Las lógicas de pensamiento computacional, incorporan en los procesos de diseño el concepto de indeterminación. Este concepto está nutrido de muchos otros como por ejemplo, ilimitación, mutación, crecimiento, sistémico; conceptos que en definitiva, corren a un margen la actitud protagonista del diseñador, tan propia de los procesos proyectuales con los que estamos acostumbrados a trabajar, devenidos de los procesos propios del movimiento moderno.

El escenario no solo le quita el poder absoluto al diseñador, sino que valoriza acciones marginadas por el *estilismo*, como lo son el azar, la intuición y la experimentación, por lo tanto, la actitud proyectual está más abierta a un cierto grado de indefinición y no-control, muy alejado del régimen que marca el canon dentro de los estilismos.

El error, el margen y el accidente deben ser aceptados como variables positivas dentro de un proceso de diseño computacional; *continente y contenido* ya no se encuentran *embretados* en un espacio determinado, ordenado y euclidiano, sino que la velocidad de cálculo nos permite crear espacios desestructurados, fluidos y dinámicos, que van en busca de dar respuesta a un entorno caracterizado por la *hiper contextualidad*, donde el libre movimiento de flujos de información y capital, son algunos de sus componentes característicos. El edificio ya no depende de su función para definir su forma, sino que la mixtura de actividades cotidianas, puján, presionan, estiran, en

---

<sup>74</sup> John Dewey (EEUU, 1859-1952) fue un pedagogo, psicólogo y filósofo estadounidense. Aspiraba a la unificación de pensamiento y acción, de teoría y práctica. Fue el padre de la psicología progresista. <https://bit.ly/3Fiybf6>

definitiva, deforman el continente adaptándolo a las necesidades temporales. La topología espacial de los diseños computacionales, acompaña este entorno, siguiendo el axioma arquitectónico que obliga a la disciplina a ser el reflejo de su contemporaneidad.

La dinámica de cambio permanente que rodea nuestras vidas, ese constante *up-grade*, exige flexibilidad y la flexibilidad requiere cierta indeterminación, cierta polivalencia, que según nuestra visión debería ser anónima, de impacto cero y mimetizada al entorno, por lo que muchas veces nos preguntamos, los edificios deben parecerse a lo que son? O sea, una escuela debe verse como tal?, al igual que un hospital o una vivienda? Es altamente discutible, pero no obstante, eliminar el estigma de los estilismos favorece al dinamismo necesario para ser flexible, mutar cuando lo amerite y entrar en un estado de hibridez.

El diseño computacional a través de la manipulación de parámetros, gracias al diseño paramétrico, posibilita evaluar las diferentes conformaciones espaciales demandadas por la gran heterogeneidad de funciones, muchas de ellas de carácter efímero, circunstancial e imprevisto, que conviven simultáneamente, desfigurando los límites entre lo público y lo privado. El correlato de *form follow function*, queda marginado, la forma ya no sigue a la función, la forma obedece a flujos sistémicos, permeables, sensibles a los cambios y adaptable a las circunstancias.

Esta hibridación programática y espacial, no solo es una respuesta formal al contexto emergente, sino que también se debe en parte al intercambio de información y toma de conceptos que la teoría de la arquitectura hace de otras disciplinas, ajustando el discurso de manera más afín a nuestra realidad contextual.

Es fundamental como hablábamos anteriormente en este mismo capítulo, un cambio de mentalidad respecto a cómo afrontar un proceso de diseño bajo entornos digitales, ser conscientes de que el mismo no debe ser un medio para “dibujar” formas, sino para crear un repertorio de respuestas formales, que los medios digitales dejen de ser un modo de representar y sean un modo de diseñar, es plasmar el nuevo paradigma que diferencia entre proceso y estilo, en definitiva, comprender que la concepción espacial está atada a la formulación de relaciones entre los diferentes parámetros intervinientes cuyo valor reside en el proceso mismo, reemplazando el rígido concepto de tipología, por el de espacio topológico.

#### 2.4.3. Industria 4.0

*“Los requisitos científicos, económicos y culturales se han modificado por completo. Tanto la tecnología como la economía se enfrentan a problemas radicalmente nuevos. [...] Nos encontramos inmersos en una transformación que modificará el mundo.” Mies van der Rohe*

El presente digital reencarna los cambios de paradigmas sucedidos en las anteriores revoluciones industriales, el potencial tecnológico que la misma nos provee, posibilita la emergencia de nuevos modos de producir arquitectura.

La puja digital ha llevado a que tanto medios como herramientas, co-evolucionen, expandiendo las posibilidades constructivas, dentro de las cuales, máquinas herramientas no convencionales, empiezan a tener un lugar en el campo de las AEC. CNC, corte laser, impresión 3D y 4D, ya nos son términos ajenos a nuestro medio; este instrumental necesita más allá de ser operado, ser cargado con la respectiva información y en el formato adecuado; como en todo proceso CAD-CAM-CAE,

necesitamos utilizar lenguajes que nos permitan interactuar con ellas. Estos lenguajes resultan de mayor utilidad si son adaptables a nuestras necesidades, máxime si los mismos entran en la categoría open source<sup>75</sup>, o sea software que puedo modificar a mi antojo, pero evidentemente, para ello es necesario programar, algo que en principio genera cierto rechazo, pero que en definitiva, es bastante más sencillo de lo que se presupone, sobre todo porque no todos los softs necesitan programarse a través de líneas de código o sentencias, sino que puede realizarse de manera “visual” o gráfica, es decir, que a través de la vinculación una serie de iconos que representan sentencias pre configuradas, como es el caso del plug-in Grasshopper<sup>76</sup>, podemos generar un sistema o algoritmo de manera asociativa.

Aprender código es una opción a mediano plazo y una obligación a futuro, es una habilidad que tarde o temprano deberá formar parte de nuestro conocimiento. Hoy existen muchas formas de aprender estos idiomas, algunas son gratuitas y se encuentran disponibles de manera on-line, de hecho los EEUU ha impulsado el cambio con acciones directas, a través del Code.org<sup>77</sup>, la cual es una organización que pretende instalar la enseñanza de lenguajes de programación desde la edad pre-escolar a través de la llamada *Hora del código*, teniendo como objetivo organizar eventos donde se capacite sobre programación a personas de 4 a 104 años, impulsando la incorporación del pensamiento computacional, algo que Steve Jobs, bregaba cuando decía, “todos deberían aprender a programar computadoras, porque te enseña a pensar”.

Ahora bien, ¿es necesario saber programar para diseñar? ¿Es necesario conocer de códigos y lenguajes de programación? ¿No será demasiado? Posiblemente sí, pero así como hubo generaciones que “padecieron” el punto de inflexión tecnológico que implicó el paso del dibujo profesional a mano (analógico) al dibujo en CAD (digital), en un medio profesional que se resistía con argumentos tales como, que *es un dibujo duro, inexpresivo, no tiene la fuerza del lápiz*, etc.; ahora los cambios también generaran procesos traumáticos y de resistencia a la innovación, pero en aquel momento, al igual que ahora, el avance tecnológico dentro del contexto productivo, fue derribando todos los mitos existentes y se terminó por valorar las bondades de dichos avances.

Incorporar nuevos conocimientos, regidos por lógicas que para muchos de nosotros pueden resultar completamente desconocidas, forma parte de las situaciones conocidas como *crisis igual a oportunidad*, que frente a los avances tecnológicos, nos desafía a adquirir nuevas aptitudes. Esta transformación, va afectar indefectiblemente la forma en que diseñamos, por lo que en definitiva expresa un cambio de paradigma, que no es solamente una reconversión de los proceso tecnológicos, sino que también

---

<sup>75</sup> El Open source (código abierto) es un modelo de desarrollo de software basado en la colaboración abierta. Se enfoca más en los beneficios prácticos (acceso al código fuente), que en cuestiones éticas o de libertad que tanto se destacan en el software libre. Para muchos el término “libre” hace referencia al hecho de adquirir un software de manera gratuita. Se utilizó por primera vez en 1990 en las comunidades de software libre, tratando de usarlo como reemplazo al ambiguo nombre original en inglés, *free software*. Hace referencia a aquel software que podemos usar, escribir, modificar y redistribuir libremente.

<sup>76</sup> Grasshopper™ es un lenguaje de programación visual desarrollado por David Rutten en Robert McNeel & Associates. Es un plug-in que corre dentro del soft Rhinoceros 3D. Los programas son creados arrastrando componentes en el área de trabajo, los cuales tienen entradas y salidas, las salidas se conectan a las entradas de los componentes subsecuentes. Es utilizado principalmente para programar algoritmos generativos.

<sup>77</sup> Code.org® es una organización sin fines de lucro, dedicada a expandir el acceso a Ciencias de la Computación; haciéndola disponible en más escuelas y a aumentar la participación de las mujeres y minorías sin representación. El objetivo es que cada estudiante en cada escuela tenga la oportunidad de aprender informática, de la misma manera que biología, química o álgebra. Code.org es apoyado por empresas tales como Amazon, Facebook, Google, la Fundación de Infosys, Microsoft, entre otras.

representa un cambio de mentalidad, adoptar otra perspectiva y por sobre todas las cosas, un cambio filosófico de lo que entendemos por industria y producción. La Industria 4.0 representa la integración de toda de la cadena de valor, que va desde los cambios en las demandas del gran público, al logro de su satisfacción por parte de estas fábricas inteligentes; que en la búsqueda de mayor productividad, requerirá de un alto grado de adaptabilidad a los constantes cambios que demanda el mercado; por lo que una pormenorizada planificación del proceso CAD-CAM-CAE, es la clave para lograr una acertada secuencia de los pasos necesarios para fabricar y ensamblar. Muchos países están usando los beneficios que trae la fabricación de componentes repetitivos no estandarizados, fabricados partir de datos digitales, para ser montados directamente en el sitio, minimizando la tarea manual convencional. Entre los principales beneficios que aporta al sector AEC, se encuentran, la reducción de plazos y costos, y un menor impacto en la huella de carbono, no obstante estos cambios no serán repentinos y tendrán algunas dificultades que salvar, que van más allá de cuestiones tecnológicas y que están relacionadas con las personas y sus hábitos laborales. Otro aspecto a revisar es, que la mayoría del software utilizado fue pensado para la industria automotriz y aeroespacial, dado que algunos diseñadores no encontraban respuestas dentro del CAD tradicional, apelaron a ellos para poder desarrollar sus ideas, lo que los llevo a experimentar conceptos propios de las industrias antes mencionados como lo son el ensamblaje 1:1, BOM y código G<sup>78</sup>. Como dijimos con anterioridad, la fabricación aditiva es la que goza de mayor popularidad entre los modos de fabricación digital, no solo en el desarrollo de envolventes continuas, sino también en la fabricación de componentes ensamblables. John Hart<sup>79</sup>, sugiere que ello da prueba de la madurez de esta tecnología y afirma que en poco tiempo grandes compañías como Hewlett Packard, estarán fabricando mega impresoras 3D. Según Hart, *...la convergencia de innovaciones en robótica, inteligencia artificial, instrumentación, materiales avanzados y nuevos procesos está haciendo posible que los sistemas de producción sean más ágiles, eficientes y digitalizados. La manufactura aditiva es un pilar de la fábrica del futuro.*

---

<sup>78</sup> El termino *BOM* (Bill Of Materials) hace referencia a la correcta gestión de las estructuras o listas de materiales es una necesidad clave en cualquier industria que hoy en día diseñe y fabrique un producto. No importa si este producto es propio o para un tercero. Tampoco importa el tipo o complejidad del producto: Puede ser un mueble, una máquina de afeitar o un avión. La industria puede tener un centro de trabajo o varios. Su proceso de fabricación puede estar centralizado o distribuido. El motivo de su importancia es que la BOM es el punto de conexión entre todos los procesos de la organización involucrados en el ciclo de vida del producto. El *código G* (G-code), también conocido como RS-274 ó programación G, es el nombre que habitualmente recibe el lenguaje de programación más usado en control numérico (CN), el cual posee múltiples implementaciones, tales como Siemens Sinumeric, FANUC, Haas, Heidenhain o Mazak. Es usado principalmente en automatización, forma parte de la ingeniería asistida por computadora. En términos generales, un lenguaje mediante el cual las personas pueden decir a máquinas herramienta controladas por computadora qué hacer y cómo hacerlo. Esos "qué" y "cómo" están definidos mayormente por instrucciones sobre a dónde moverse, cuán rápido moverse y qué trayectoria seguir. Las máquinas típicas que son controladas con G-code son fresadoras, cortadoras, tornos e impresoras 3D.

<sup>79</sup> John Hart es profesor asociado de ingeniería mecánica y presidente de desarrollo profesional de Mitsui en el MIT. Antes de unirse a la facultad del MIT en julio de 2013, fue Profesor Asistente de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Química y Arte / Diseño, en la Universidad de Michigan. En el MIT, John dirige el Grupo de Mecanosíntesis (<http://mechanosynthesis.mit.edu>), que crea nuevas máquinas, materiales y principios de diseño para la fabricación avanzada, incluidos los nanomateriales de carbono, los procesos de fabricación aditiva y el diseño de materiales inspirados en origami.

Esta realidad se demuestra en proyectos realizados por entidades como la Rusa Apis Cor<sup>80</sup>, el IAAC<sup>81</sup> en España, el ejército de los EEUU y la empresa China Winsun<sup>82</sup>. Concretamente esta última, posee una máquina herramienta de poco más de seis metros de altura, diez metros de ancho y ciento cincuenta metros de largo, que imprime con una argamasa hecha de cemento y doscientos metros cuadrados en solo veinticuatro horas.

Uno de los referentes dentro de este campo, es la empresa D-Shape, dirigida por Enrico Dini<sup>83</sup>, quien patentó una impresora a gran escala en el año 2006, con la cual



Fig. 39 [Producciones de Apis Cor, Winsun y D-Shape], Fuente: izq. <http://bit.ly/3ro4odp>, centro <http://bit.ly/2LqOSk5> y der. <https://bit.ly/36AY4ak>.

construye la escultura *Radiolaria* en el año 2008, diseñada por Andrea Morgante<sup>84</sup> (fig. 39). El método utiliza aglutinantes inorgánicos en secciones de cinco a diez milímetros, con agregados como arena, polvo o grava, su volumen de impresión está limitado a un cubo de seis metros de lado, utilizando un cabezal que contiene trescientas boquillas accionadas por servos y sostenida por cuatro columnas de aluminio. Lo interesante de D-Shape, es que esta máquina herramienta puede ser montada en el lugar, para fabricar los componentes al pie de obra, lo que la ha llevado obtener contratos con el gobierno de los EEUU, para realizar varios elementos para rutas como, guarda rails, barreras, topes de aceras, trampas de grasa, entre otros. La empresa sigue ampliando su espectro productivo, obteniendo encargos tales como, impresión en regolito de

<sup>80</sup> Apis cor, es una empresa rusa con sedes en San Francisco (EE.UU.), Moscú e Irkutsk (Rusia), es la primera empresa en desarrollar una impresora 3D de construcción móvil capaz de imprimir edificios enteros completamente en el mismo lugar, en muy cortos espacios de tiempo y a precios muy bajos. <http://www.apis-cor.com/>

<sup>81</sup> El Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña, es un centro educativo y de investigación dedicado al desarrollo de una arquitectura capaz de hacer frente a los desafíos mundiales en la construcción de la habitabilidad a principios del siglo XXI. Con sede en Barcelona, es una plataforma para el intercambio de conocimiento con profesores y estudiantes de más de 40 países, incluidos Estados Unidos, China, India, Noruega, Polonia, Italia y México, Perú y Sudán.

<sup>82</sup> Yingchuang Building Technique Co. Ltd, o Winsun como se le conoce, es una empresa con sede en Shanghai, tiene como objetivo revolucionar el ámbito de las AEC gracias a la fabricación aditiva. Usando una tinta especial hecha de cemento, arena y fibra, junto con un aditivo patentado, su impresora agrega capa por capa para imprimir paredes y otros componentes en su fábrica en Suzhou. Winsun también está detrás del primer edificio de oficinas impreso en 3D que se inauguró en Dubai en mayo de 2016. <http://www.winsun3d.com/En/>

<sup>83</sup> Enrico Dini es un ingeniero civil italiano, que dedicó la mayor parte de su carrera a la aplicación de la automatización y la robótica en la industria del calzado. En 2003, luego de experimentar con la impresión 3D, dimensión, vislumbró una aplicación de esta técnica en gran escala e imaginó una nueva forma de arquitectura libre basada en la estereolitografía. En 2007, probó su prototipo impresor en gran escala, la D-Shape, y al año siguiente imprimió *Radiolaria*, la primera estructura edilicia de forma libre. <https://d-shape.com/what-is-it/>

<sup>84</sup> Arquitecto con sede en Londres, trabajo con RMJM, colaboró con Future System como Director Asociado, junto a Jan Kaplicky. En 2008 trabajó con Ross Lovegrove; En 2012, como director de arte, completó la construcción del Museo Casa Enzo Ferrari. Shiro Studio es el taller de diseño fundado por Morgante en 2009. La firma se centra en la arquitectura, el diseño de objetos y las instalaciones temporales. Los clientes incluyen: Ferrari, Maserati, Alessi, M&C Saatchi, Peroni, D-Shape, Agape, Poltrona Frau, Seiko Japan, Nodus. Morgante es profesor en el Politecnico di Milano.

luna artificial para la Agencia Espacial Europea, arrecifes artificiales, muebles para el hogar y el exterior, y elementos de arquitectura paisajística, que incluye fuentes, piscinas entre otros.

## 2.5. Cierre del capítulo

Es más que evidente la relación intrínseca de la geometría con nuestra disciplina a lo largo de la historia. Si bien surge como una herramienta empírica auxiliar, dada la necesidad de mensurar distancias, áreas y volúmenes, logra alcanzar un desarrollo que su aplicación excede sobremedida el campo en el que originalmente surgió. En la arquitectura, el trabajo con el espacio y la materia, hizo que su relación fuera indisoluble, lo que permite mediante un buen uso, lograr resultados más eficientes. El principal proceso de transformación en relación a nuestra disciplina, radica en pasar de un instrumento de representación, a un instrumento que permite desarrollar procesos integrales, que van desde la ideación, al objeto.

Este profundo cambio, requiere no solo de la adaptación del diseñador al manejo de herramientas digitales, sino que en dicho proceso, también necesita adquirir un modo de interpretar las variables del proyecto a través de un pensamiento computacional, un pensamiento adaptado a establecer permanentemente relaciones entre las variables intervinientes y asumir que estas son dinámicas y cambiantes.

Por otro lado, el concepto de complejidad, comienza a formar parte del discurso arquitectónico y permite a diseñadores, que toman como base diferentes teorías desarrolladas dentro de este campo, renovar el repertorio morfológico de una disciplina, que hasta principios de los '90, seguía dominada por las formas Euclidianas. Este relación inter disciplinar, permite experimentar procesos de diseño no-lineales y entender tanto a la arquitectura, como al urbanismo, como problemas complejos.

En ese sentido fueron fundamentales los estudios matemáticos que se hicieron en torno al análisis de los sistemas dinámicos, ya que estos permitieron desarrollar conceptos como los de caos, azar e indeterminismo, escenarios donde las variables se encuentran dominadas por la imposibilidad de predecir la evolución futura de un sistema. Esto dio pie a que varios diseñadores, incorporen estos conceptos dentro de su discurso teórico y de alguna manera, recrear el binomio arquitectura-mimesis, desde una visión más científica.

Este vínculo se vuelve más estrecho, gracias al crecimiento en la capacidad y velocidad de cálculo de los ordenadores, sin este desarrollo tecnológico no hubiera sido posible y toda inspiración surgida de la observación de la naturaleza, requeriría de procesos análogos como los realizados por Füller, Otto o Gaudí, que apelaron a herramientas no convencionales de maquetación y análisis.

Naturalizar los recursos informáticos como una herramienta de diseño, es un camino ineludible hacia una producción arquitectónica realizada a través de fabricación digital. La materialidad vuelve a estar en el centro de la escena, ya no como un soporte solamente del lenguaje, sino como una parte del proceso donde se relaciona directamente, con el método de producción.

Esta posibilidad que como arquitectos experimentemos el desarrollo integral de nuestro producto final, permite hacer foco en aquellos aspectos que van más allá del diseño formal y que mejoran la productividad, ya sea a través de una mayor racionalización en el uso del material, o en virtud de cuál será el instrumental que se dispondrá según el cometido, o como mejorar el proceso de realización y montaje.



Las herramientas CAD-CAM permiten trabajar con valores dimensionales muy pequeños con gran exactitud, los márgenes de error son menores y hay materiales que se adaptan mejor a esta tecnología, por lo que revertir los modos constructivos que tradicionalmente se usan en nuestro medio, requerirá no solo de la adaptación de nuestros profesionales a modos constructivos no convencionales y las herramientas digitales de fabricación, sino también a la posibilidad de contar con las mismas dentro del escenario productivo.

El futuro, aunque también podríamos decir el presente, es prometedor, en poco tiempo las industrias de las AEC, se verán reforzadas y complementadas por máquinas herramientas que reemplazarán las tareas manuales habituales, convirtiéndose en los nuevos obreros de la era pos capitalista.

# Capítulo 3 – Tecnología digital para envolventes ligeras

## Capítulo 3 – Tecnología digital para envolventes ligeras

### 3. Diseño de envolventes ligeras

*“Me pregunto cuál es el propósito o la necesidad de desarrollar proyectos basados en geometrías avanzadas y complejas. ¿Para qué? ¿Por qué? ¿Para el beneficio de quién? ¿Para resolver qué problema? ¿Es acaso para resolver problemas de constructibilidad? ¿Para mejorar la industria de la construcción? ¿Mejorar el ambiente? ¿Energía? ¿Performance? ¿O para producir clones de Gehry? ¿O su propósito es el lucro de los fabricantes de software? Ahora mi respuesta es que el interés no está en las geometrías complejas en sí. No son ellas las interesantes, sino que lo son los procesos subyacentes por los cuales generamos la geometría avanzada, así como las estructuras de datos que las posibilitan lo que es realmente significativo” John Frazer<sup>85</sup>*

En este capítulo desarrollaremos el porqué de la selección del tema y su relación con los tipos de envolventes usados comúnmente en nuestro medio; y dentro de ellos, cuáles serían propicios para la fabricación digital, teniendo en cuenta el material, su lógica de producción y su eficiencia funcional.

Paralelamente se elaboran las premisas básicas que definirán el marco dentro del cual ocurrirá el proceso proyectual (metadiseño), en función de ello se definirá una estrategia de diseño que nos permita, mediante el uso de software específico, elaborar los algoritmos generativos con los cuales obtendremos una serie de alternativas para ponderar y establecer la factibilidad de fabricación de las mismas.

*““Cuando trabajo en un problema, nunca me preocupo por la belleza. Pero cuando acabo, si la solución no es bella, sé que está mal”.* Buckminster Fuller

La arquitectura puede ser interpretada y analizada como un sistema donde se relacionan al menos cuatro componentes fundamentales: *estructuras, envolventes, instalaciones y circulaciones*. Realizar esta abstracción a sabiendas que todos ellos son parte de una unidad, nos permite concentrarnos en cada elemento constitutivo de cada uno de estos componentes, perfeccionando la técnica de producción de la arquitectura.

Desde principio del siglo pasado hasta la actualidad, la evolución de las diferentes técnicas y materiales utilizados para realizar una envolvente, lograron que esta fuera perdiendo masa y espesor. Podemos identificar claramente dos grandes grupos de envolventes, las *pesadas* y las *ligeras*, en donde por lo general, las primeras son asociadas a todas aquellas tecnologías por *vía húmeda* y las segundas a las por *vía seca*.

En el ensayo proyectual elaborado en el *capítulo 4*, se optó por utilizar *envolventes ligeras*, ya que estas poseen la ventaja tecnológica de adaptarse a la realización de diseños sin restricción formal, dado que por lo general, estas envolventes no asumen la capacidad de carga estructural, se auto soportan y asumen funciones más específicas y diferenciadas. La antigua envolvente sinónimo de peso y fuerza, se

---

<sup>85</sup> Frazer, J. «The generation of virtual prototypes for performance optimization». En: Oosterhuis, K., Feireiss L. The architecture co-laboratory: Game set and match II - On computer games, advanced geometries and digital technologies. Rotterdam: Episode Publishers, 2006.

convirtió en piel, filtro, transparencia, cascara, interface. Es una y varias cosas al mismo tiempo.

*La arquitectura contemporánea sustituye la idea de fachada por aquella de piel: una capa exterior que media entre el edificio y su entorno. No una elevación neutral, sino una membrana activa, informada; comunicativa y en comunicación. Más bien que paredes con agujeros, pieles técnicas, interactivas. Piel colonizadas por elementos funcionales capaces de contener las instalaciones y los servicios; capaz de recibir y de transmitir energías; pero también capaces de contener otras capas incorporadas: traslape más bien que pegamento. Correcciones manipuladas y/o temporales, erupciones, gráficos o grabados; pero también imágenes proyectadas. Así como reversible y virtual-fantasías digitales dirigidas transformando el interfaz auténtico del edificio entre el individuo y el entorno; y la fachada, en pantalla (inter)activa, el límite friccional entre el edificio y un contexto que cambia con el tiempo. Manuel Gausa (2001).*

Esta transformación de la envolvente nos ha llevado a una gran especificidad en respuesta a los requerimientos más diversos, a tal punto que, una envolvente hiper tecnologizada, es capaz de responder a diferentes estímulos ya sean naturales o artificiales, adaptándose a nuestras más diversas necesidades<sup>86</sup>.

Por otro lado, la demanda de confort, llevo a que se desarrollen materiales que den respuesta a funciones específicas, acorde a las exigencias requeridas para cada envolvente: *estanqueidad, aislación hídrica, térmica y acústica.*

Esta especificidad de los materiales nos llevó a lo que hoy conocemos por *envolvente multicapa*, donde la producción comercial de la mayoría de los materiales para este uso, es en formato de placas (rígidas) y láminas (flexibles), cuya principales características son por un lado, su delgado grosor y por ende, su ligereza, y por el otro, la utilización de técnicas de montaje en seco.

En una mirada al pasado, la fachada ligera se transformó en un recurso casi excluyente dentro del movimiento moderno, la evolución en los procesos industriales del metal y el vidrio lo permitían y al separar la piel de su soporte, se lograba una imagen etérea, de luminosidad y liviandad.



Fig. 40 [Envolventes ligeras de forma libre: Rhike Park Music Theatre, Fuksas; Hotel Yas Viceroy, Asymptote y Centro Acuatico Olimpico, Hadid], Fuente: izq. <http://bit.ly/3ar51Mi>, centro <http://bit.ly/3pKvFq0> y der. <http://bit.ly/3pGcTzX>.

Este rasgo inmaterial propio del movimiento moderno, era posible no solo gracias al artilugio de separar envolvente de estructura, sino que los avances en el campo de esta última, lo hacían posible.

<sup>86</sup> Las envolventes responsivas ya cuentan con propuestas que han sido llevadas a la práctica, entre ellos vale citar los más emblemáticos como lo son, el *Instituto del Mundo Arabe* de Jean Nouvel, el *Abu Dhabi Investment Council* de Aedas Architects y el *Kiefer Technic Showroom* de Ernst Giselbrecht + Partner.

En un lapso de alrededor de 100 años las técnicas utilizadas pasaron de una elaboración netamente artesanal con adaptación de materiales en un formato comercial estándar, a una producción industrializada con elementos diseñados *per se*, que mejoran las prestaciones y modifican los procesos de concepción, elaboración y montaje de los distintos elementos constitutivos.

Una envolvente ligera puede responder a múltiples propósitos, de manera muy simple, pero también de manera muy compleja, y en ambas, se requiere de un rigor constructivo que este marcado por un proceso ordenado, sistematizado y planificado exhaustivamente.

En el contexto productivo de las AEC, dentro de nuestra ciudad (Córdoba, Argentina), el uso de envolventes ligeras es acotado y su uso se resume a, techos, muros cortinas y construcciones de pequeña escala con modos constructivos tipo Steel frame y Wood frame, por lo que, básicamente, intervienen elementos metálicos (chapas conformadas, lisas, composite, perfilería, anclajes, fijaciones, etc.), de madera (natural, laminados, de partículas, etc.), plásticos (chapas, aislaciones, pegamentos, fijaciones, etc.) y vidrio (común, armado, laminado, doble hermético, etc.). En menor medida también podemos encontrar derivados como, lana de roca, solventes, siliconas, etc. En virtud de lo antes mencionado, respecto al carácter de las envolventes ligeras y sus usos más extendidos, es que el presente trabajo ensaya una estrategia que, mediante la utilización de los materiales antes mencionados, nos permita a través de un proceso de diseño paramétrico, adoptar modos constructivos basados en la fabricación digital, repensando sus lógicas de transformación y producción.

### 3.1. Definición de envolventes ligeras

#### 3.1.1. Consideraciones generales

La envolvente es, en un sentido amplio, un componente que posibilita el control y delimitación de los espacios habitables, a la vez que constituye una herramienta generadora y contenedora de la forma. Es la que dota, a través de su lenguaje, el carácter identitario a la obra de arquitectura. Desde su aspecto funcional, es el filtro entre interior y exterior, a través de ella se produce el intercambio que posibilita nuestro confort, regulando humedad, temperatura, iluminación, ventilación, acústica, estanqueidad y seguridad. Es el componente que permite implementar estrategias termodinámicas, para controlar los flujos de aire y temperatura en beneficio de la calidad ambiental, por lo que no solo resulta necesario, conocer y distinguir las características básicas de los principales elementos empleados para su resolución, sino cual será el modo o la técnica a utilizar para ordenar dichos elementos.

Al momento del desarrollo del presente trabajo, no tenemos ninguna normativa que defina, y mucho menos que clasifique, lo que entendemos por envolventes ligeras, no solo a nivel local, sino también a nivel nacional. Dado esto, recurriremos a normas europeas, donde tipifican este concepto y así encuadrar las mismas.

La norma europea EN 13830, define la envolvente ligera de manera genérica como, "Redícula de elementos constructivos verticales y horizontales, conectados conjuntamente y anclados a la estructura del edificio, lista para rellenar finalmente con paneles ligeros de cerramiento, hasta formar una superficie continua y ligera que delimita completamente el espacio interior respecto del exterior. Esta envolvente aporta, por sí misma o conjuntamente con otros elementos del edificio, todas las

funciones normales que corresponden a un muro exterior, pero no asume ninguna de las características de soportes de cargas de la estructura principal del edificio”.

Otra norma, un tanto más específica, la UNE-EN 13119, también de la Unión Europea, hace referencia a la forma en que está constituida y define a una envolvente ligera como “la piel exterior del edificio, realizada con enmarcados de metal, madera, o PVC-U (Polyvinyl Chloride Unplasticized ó policloruro de vinilo no plastificado), en forma de montantes y travesaños que hacen la veces de estructura del cerramiento, que a su vez se ancla a una estructura portante del edificio, como muros o forjados (losas de hormigón), pudiendo estos enmarcados, ser practicables o no”.

Estos dos conceptos, básicamente hacen referencia a lo que conocemos como *piel de vidrio* y en principio este vasto conjunto de envolventes ligeras, lo podemos subdividir en función de la relación que la envolvente tiene con la estructura: por un lado el *muro cortina* y por el otro lo que llamamos *fachada panel*. En el primer caso la envolvente se encuentra “suspendida” de la estructura, generando una superficie continua y en el segundo, hace referencia a la envolvente que se encuentra “entre” piezas estructurales (losas y vigas), apoyándose en estas.

Estos modos de cerramiento han estado asociados a aquellas envolventes de geometrías convencionales, pero que con las innovaciones tecnológicas, tanto sea en tipo de materiales como en herramental, se ha facilitado la ejecución de otras geometrías, poniendo en revisión la situación estructural, respecto de si están suspendidas, apoyadas o en una combinación de ambas.

### 3.1.2.Elementos constitutivos

Previo a realizar una clasificación de las envolventes ligeras, es necesario establecer cuáles son los elementos constitutivos de las mismas. Generalmente, en este tipo de envolventes, encontramos cuatro elementos constitutivos: la *subestructura* o *estructura auxiliar*, los *anclajes*, el *cerramiento* y las *juntas*.

La *subestructura*, es el armazón propio de la envolvente y vincula a esta con la estructura principal, puede estar resuelta tanto sea en madera, como en aluminio y acero. En algunos modos constructivos, este elemento simplemente no existe, siendo directamente un panel, con su propio armazón, el que se vincula mediante los anclajes, a la estructura principal.

Los *anclajes*, es el elemento que permite el vínculo, entre el cerramiento y la subestructura (o en su defecto con la estructura), son fundamentales dentro de la composición de la envolvente, ya que deben de estar preparados no solo para soportar las solicitaciones gravitacionales a las que están expuestos, sino que también, deben de estar preparados para soportar las cargas dinámicas producto de los agentes climatológicos.

Los actuales sistemas industrializados tienen controles de calidad, que en cierta medida aseguran las prestaciones de sus anclajes, ya que la falla de estos, puede provocar el desprendimiento del cerramiento, causando severos accidentes.

El *cerramiento*, es el que proporciona las condiciones de confort requeridas en el proyecto, esto puede ser logrado mediante una superposición de capas ó a través de elementos pre ensamblados (panel). Este será el encargado de proporcionar el lenguaje a través de, su geometría, textura, color, transparencia, opacidad, etc. Los materiales utilizados para los cerramientos, aparte del vidrio en todas sus variedades, van desde simples placas (contrachapados fenólicos, chapas conformadas o plegadas,

sidding, etc.) hasta las multilaminares con o sin estructura propia (*composite*); pasando por láminas y membranas protectoras para las diferentes aislaciones.

Por último, la *junta*, es la que posibilita darle continuidad a la envolvente y las podemos subdividir en dos grupos, las impermeables (cerrada) por un lado y las permeables por otro (abierta). La primera es aquella que es estanca en la primera capa exterior de su superficie (terminación) y puede estar resuelta con un relleno de la misma con material elastómero o puede estar cerrada por geometría, absorbiendo libremente los movimientos. La segunda, es aquella donde la estanqueidad se resuelve en una capa que se sitúa por detrás de la terminación, permitiendo el libre ingreso de aire y agua, en una cámara pensada para tal fin.

Dentro de los elementos constitutivos descritos, existe un elemento que predomina sobre el resto y es el cerramiento. Este elemento, transformado con el tiempo de monocapa a multicapa, cuenta con una amplia variedad de materiales desarrollados para cada capa en particular, conformando un universo por demás extenso e inabarcable. Por el contrario tanto la subestructura, como los anclajes y las juntas, cuentan con productos comerciales resueltos mayoritariamente en metal y eventualmente en madera o plásticos.

Un cerramiento está constituido generalmente por una capa soporte, una aislante térmica, una acústica (sino la cumple la capa soporte), una estanca (si no lo es el revestimiento), puede o no tener una cámara de aire (estanca o ventilada) y una barrera de vapor en la cara caliente. También deberá en su conjunto, ser estanca a la presión del viento y permeable al vapor en su cara fría (fig. 41).

Para abordar el ensayo proyectual, adoptaremos un concepto de envolvente donde no solo se contemple su situación estructural, sino que también se incorporen la utilización de materiales de uso corriente en nuestro medio, factibles de ser maquinados con procesos digitales, como maderas, chapas metálicas y composites.

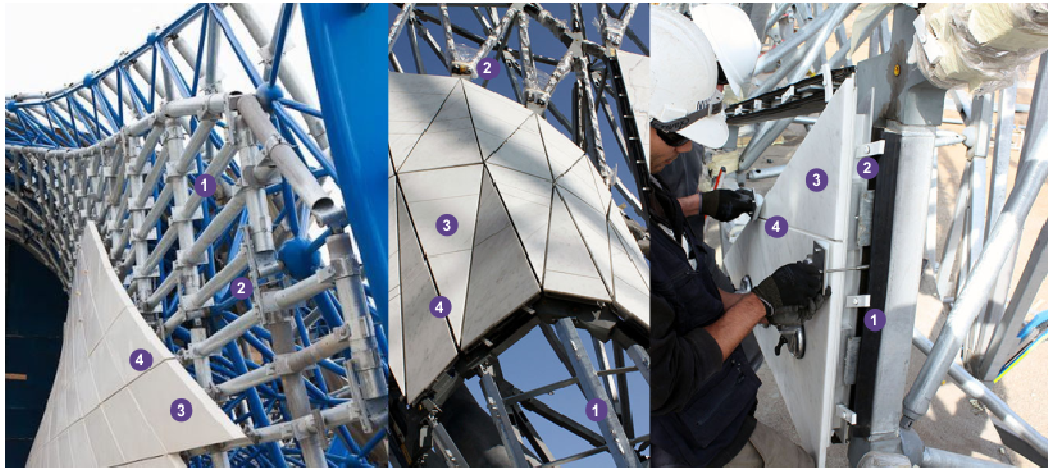


Fig 41 [Elementos constitutivos de una envolvente ligera: subestructura (1), anclajes (2), cerramiento (3) y junta (4)], Fuente: izq. <http://bit.ly/3pLDBHf>, centro <http://bit.ly/2MVDLqH> y der. <http://bit.ly/3pK8Wu0>.



## 3.2. Tipificación de envolventes ligeras

Hay varias formas de tipificar a las envolventes, como dijimos anteriormente, la forma más simple es según su *peso* (livianas y pesadas), pero también podemos tipificarlas por su *forma* (plano, curvo, doble curvatura, etc.), por su *partición* (teselados, redes, patrones, etc.), por el tipo de *material* predominante (metal, madera, plástico, etc.); y por último, según el *modo de producción* de la misma (sección, teselado o panelado, pliegue, relieve o contorno y forma o moldeo). Independientemente de la tipificación que uno quiera elaborar, es válido saber que hay casos donde los tipos antes mencionados, pueden aparecer combinados generando híbridos que pueden calzar en dos o más categorías.

### 3.2.1. Forma

La forma geométrica de la envolvente puede estar definida de manera asociada a la estructura general o de manera dissociada. En el primer caso la estructura acompaña la geometría evitando el desarrollo de piezas transicionales de vínculo entre ambas, no obstante, en este caso la estructura representa mayor dificultad constructiva. Por el contrario, cuando la envolvente se encuentra dissociada, su estructura suele ser más simple en relación a esta, y por ende más fácil de construir, pero necesitamos un entramado subestructural de transición que permita fijar los cerramientos. Qué tipo de solución adoptar, es una decisión de diseño y la misma estará íntimamente relacionada con las decisiones que se tomen en cuanto a la propuesta estructural. Lo cierto es que mientras más compleja la geometría, más complicada será su resolución constructiva, por lo cual, se debe buscar un equilibrio entre requerimientos, recursos y diseño, atendiendo siempre al concepto de eficiencia.

Las formas que podemos desarrollar en envolventes ligeras pueden ir de un simple plano a superficies con curvas positivas, negativas o ambas a la vez, no obstante, una superficie plana puede estar resuelta de manera muy compleja, si posee un *tejido*<sup>87</sup>

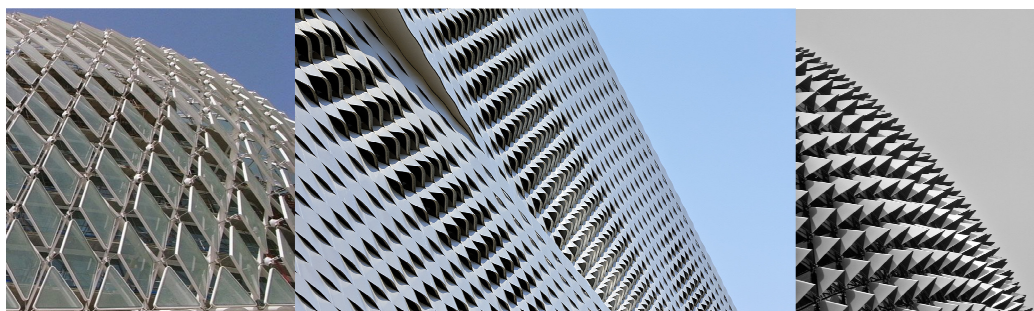


Fig. 42 [Sup. con tejido: Yas Viceroy Abu Dabhi, Messe Basel New Hall, The Esplanade Theatres],  
Fuente: izq. <https://bit.ly/3jf9vtm>, centro <http://bit.ly/2YKfr40> y der. <https://bit.ly/39K3Ylc>.

<sup>87</sup> Podemos asociar la envolvente con el concepto de *tejido* de manera amplia, diciendo que este es un “conjunto homogéneo de elementos interrelacionados que generalmente conforman la base de algo” y de manera específica decir que este es un “conjunto de células de un organismo que tienen la misma función y diferenciación morfológica y que constituyen la estructura fundamental de los diferentes órganos”. El hecho de definir a la envolvente como piel, hace que relacionemos a esta con el *tejido epitelial*, el cual definimos como el “tejido que tapiza y protege las superficies internas o externas de los organismos o estructuras derivadas de superficies embrionarias; es un tejido de escasa sustancia intercelular y tiene las células muy agrupadas.”

compositivo que le otorga volumen o espesor (fig. 42), en donde el particionado geometriza la envolvente y el tejido recubre.

Dentro del campo de las superficies curvas, encontramos una gama de formas, que surgen del resultado de la aritmetización de las mismas, y que hoy son reproducibles unívocamente de manera digital y material. Básicamente encontramos superficies de *simple* curvatura como, las cilíndricas, las cónicas y no uniforme (fig. 43); y de *doble* curvatura como las *regladas*, por un lado, entre las que se encuentran las cúpulas, los paraboloides (hiperbólico y elíptico) (fig. 44) y las rotacionales (hiperboloide y elipsoide de revolución, helicoides, toroide, etc.) (fig. 45); y las *topológicas* (Botella de Klein y cinta de Moebius) y *NURBS* por el otro (fig. 46).

Durante el ensayo proyectual, se deberá pensar que grado de complejidad se querrá adoptar para el desarrollo de una propuesta, atendiendo que las decisiones que se tomen repercuten directamente sobre la estrategia de producción y el modo de ejecución.

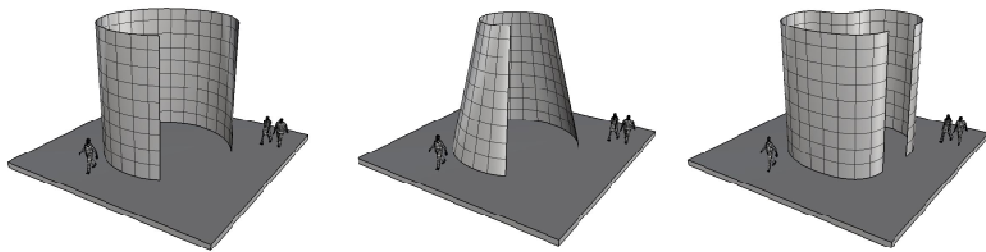


Fig. 43 [Curvatura simple: cilíndrica, cónica y no uniforme], Fuente: elaboración propia.

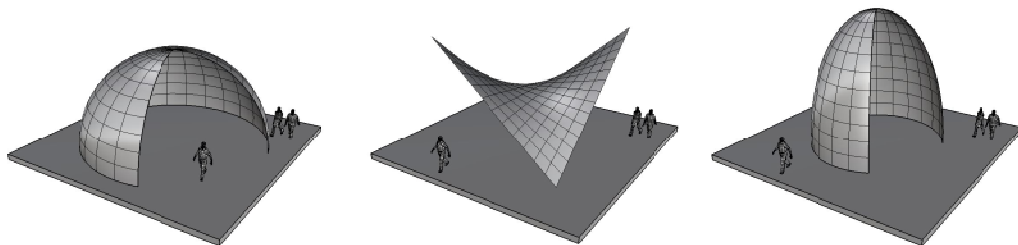


Fig. 44 [Curvatura doble, regladas: cúpula y paraboloides (hiperbólico y cónico)], Fuente: elaboración propia.

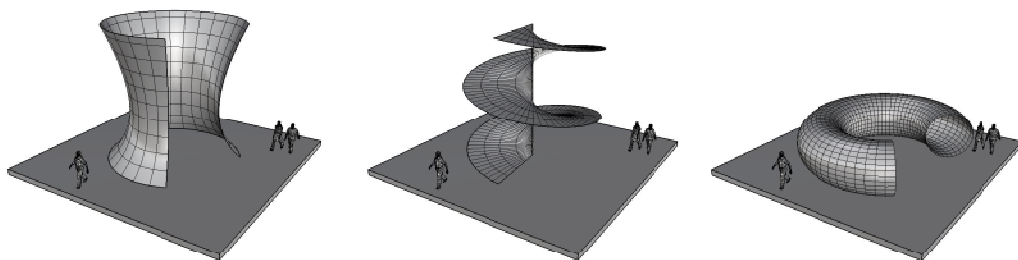


Fig. 45 [Curvatura doble, regladas rotacionales: hiperboloide, helicoides y toroide], Fuente: elaboración propia.

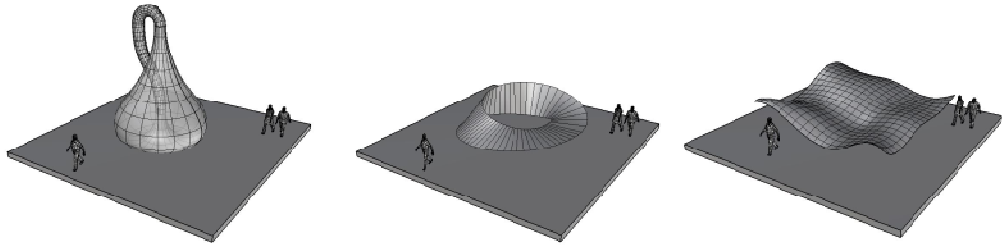


Fig. 46 [Curvatura doble / Topológicas y NURBS: botella de Klein, cinta de Moebius y NURB],  
Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2.Partición

En esta categoría hacemos referencia al modo de racionalizar la superficie de la envolvente mediante estructuras subyacentes, que le otorgan un orden y permiten su ejecución. El particionado estará en función no solo de la forma de la superficie, sino que también lo estará con relación a la estrategia de producción que se quiera llevar adelante. Por lo que, en el caso de las formas orgánicas, dependerá de si el objetivo es reproducir superficies de manera tersa y sin solución de continuidad, o si acepto superficies más rígidas, soportada a través de quiebres que le den geometría a un origen curvilíneo. En el primer caso debo optar por un método donde los elementos y subelementos del particionado, puedan ser producidos con materiales y técnicas que admitan curvado; y en el segundo, el método consistirá en trabajar un particionado triangular plano, que permita fidelizar el organicismo original y que, cuanto más pequeña la partición, más fidedigna la forma (fig. 47).



Fig. 47 [Heydar Aliyev Centre, Bakú, Azerbaiyán (Z. Hadid) y Musée des Confluences, Llyon, Francia (C. Himmelb(l)au.)], Fuente izq. <http://bit.ly/3oLYvEQ> y der. <http://bit.ly/3jdaVoe>.

Los particionados pueden ser identificados, a través de órdenes que una superficie adopta, como estructuras organizativas del diseño de las envolventes, y son: *tramas, mallas, redes, teselados y patrones*.

Todo conjunto de elementos que se entrecruzan en el espacio, generando algún tipo de red estructurante que se corresponden con una ley de disposición geométrica, sin materializar ninguna porción de espacio que no sean los propios elementos, nos permite conceptualizar la noción de *trama* (fig. 48). Es decir, la trama es la materialización compositiva de la envolvente, formada por elementos que se perciben idénticos o similares. Estos elementos pueden estar dispuestos en dos y tres dimensiones, lo que,

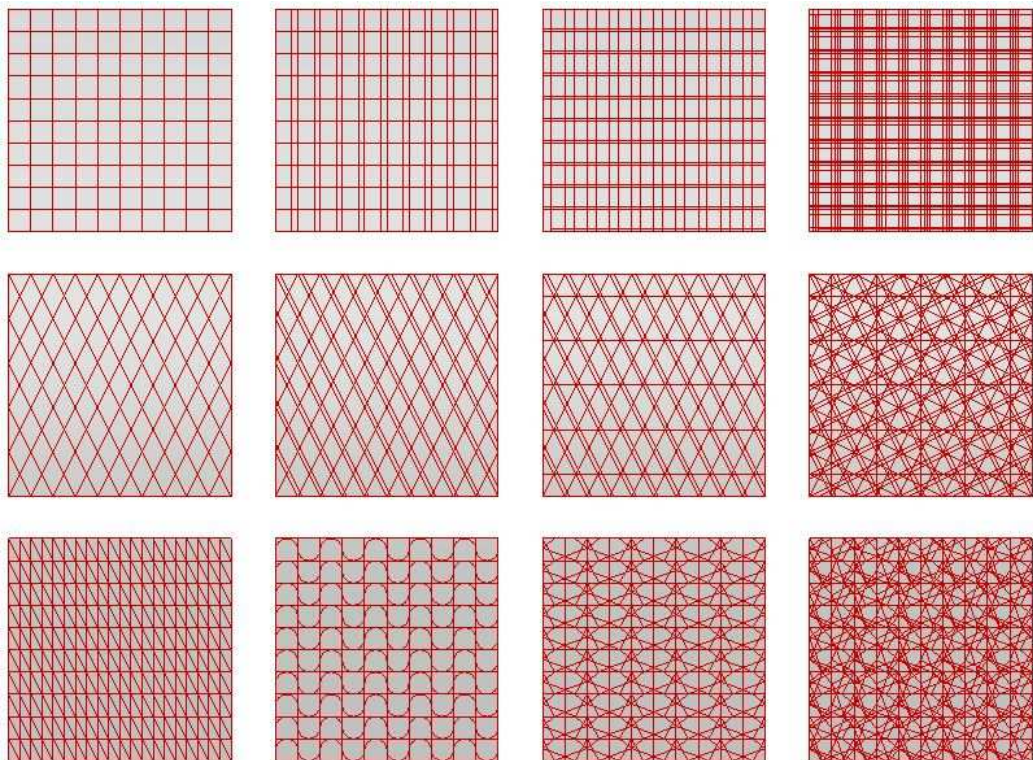


Fig. 48 [Diferentes tipos de trama], Fuente: elaboración propia.

según tipo y forma del elemento, conforman diferentes texturas de manera regular e irregular con un cierto ritmo.

Una *malla* es una subdivisión (partición) conforme de un espacio en celdas poliédricas (3D) o celdas poligonales (2D), en donde cada una de estas se intersecta con sus pares mediante un solo elemento de menor dimensión común, una cara (3D) o una arista (2D), esto implica que en una malla 2D no pueden existir, por ejemplo, uniones en "T". Su configuración está dada por un conjunto de elementos topológicos tales como: vértices, aristas y caras poligonales. Uno de los primeros algoritmos de generación de mallas es el que se conoce como *triangulación de Delaunay*<sup>88</sup> a través del cual se

<sup>88</sup> Borís Nikoláievich Delaunay (1890 -1980) fue un matemático ruso de la etapa soviética, ideó en 1934 el algoritmo denominado triangulación de Delaunay. Este algoritmo permite definir una red de triángulos conexa y convexa que cumple la condición que *la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo*. Las triangulaciones de Delaunay tienen importante relevancia en el campo de la geometría computacional, para el modelado de superficies definidas por puntos utilizados en gráficos 3D por computadora.



puede obtener, a partir de un conjunto de puntos en el espacio, una triangulación cuyos elementos son lo más equilátero posible. Una malla puede estar elaborada con polígonos de  $n$ , cantidad de lados, siendo la relación más eficiente entre perímetro y superficie de celda, la malla hexagonal<sup>89</sup> (fig. 49).

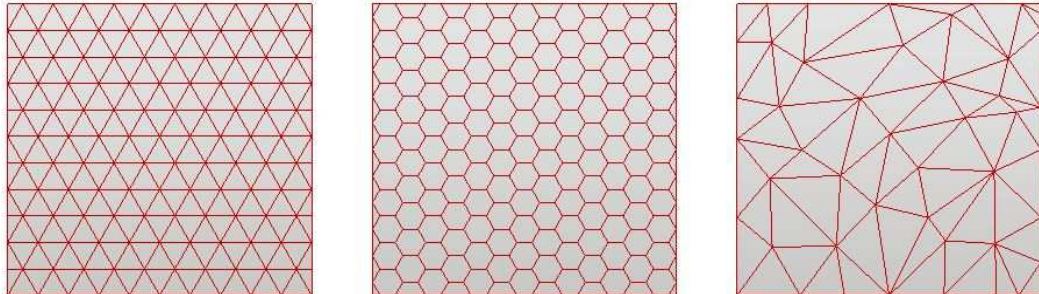


Fig. 49 [Mallas regulares (triangular y hexagonal) e irregulares (Delaunay), fuente: elaboración propia.

La organización de la superficie en *red*, difiere respecto a la malla, en que en esta, surgen situaciones de jerarquía de unos nodos por sobre otros, entre ellas podemos distinguir aquellas en estructura de árbol y estrella (centralizada) o en estructura de malla (policentralizada) (fig. 50). Esto repercute en el lenguaje de la superficie desde lo compositivo, que asociado generalmente al diseño estructural, este tipo de

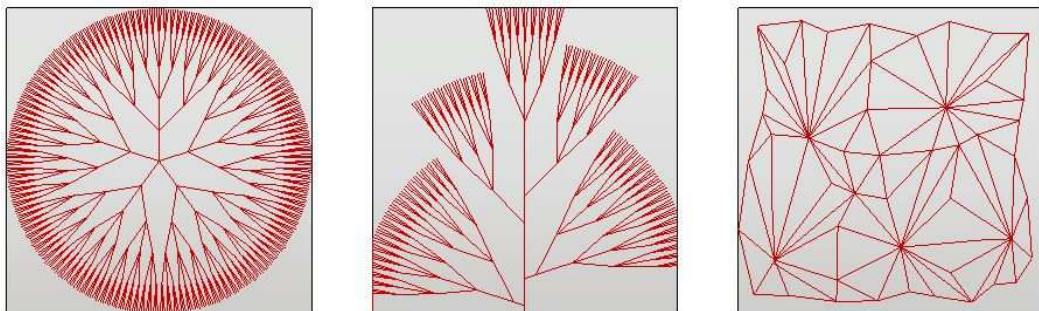


Fig. 50 [Red: estructura estrella, árbol y policentral], fuente: elaboración propia.

---

Delaunay trabajó en el campo del álgebra abstracta, la geometría de los números, la cristalografía matemática moderna y en la modelización matemática general de cristales. Fue elegido miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética en 1929.

<sup>89</sup>El relleno mínimo del plano y del espacio (economía perimetral), implica que a igualdad de área con cualquier de una figura respecto de otra, menor será su perímetro o superficie. En la actualidad se sabe que el relleno mínimo plano, se consigue con hexágonos regulares. El problema data del siglo I a. C., en el que Marco Terencio Varrón (116 a. C.- 27 a. C.) habla sobre los hexágonos de los panales de las abejas en un libro suyo de agricultura. El problema ha pasado a la historia relacionado con Pappus de Alejandría (284-305), que lo cita en su Libro V en el siglo III, como la conjetura del panal, en donde afirmaba que la forma hexagonal que imprimen a sus celdillas las abejas para guardar la miel, responde al problema de aprovechar el espacio al máximo. La respuesta es un problema isoperimétrico (del griego «igual perímetro»). Pappus había demostrado que, entre todos los polígonos regulares con el mismo perímetro, encierran más área aquellos que tengan mayor número de lados. Por eso, la figura que encierra mayor área para un perímetro determinado es el círculo, que posee un número infinito de lados. Eso fue una conjetura hasta el siglo XX. En 1943, L. Fejes Tóth (1915-2005) prueba la conjetura del panal, pero considerando como hipótesis inicial que las celdas son polígonos convexos. Recien en 1999, Thomas Hales (1958-) publica una demostración general de la conjetura del panal en su trabajo *The honeycomb conjecture*, en el que prueba que, efectivamente, el hexágono regular es la figura más eficiente.

particionado, tiene un claro orden de elementos subordinados a otros. El *teselado*, en cambio, es un conjunto de teselas, las cuales se definen como una figura que, al repetirse, genera un patrón y cumple con la restricción de calzar con otras sin superponerse y sin dejar intersticios entre ellas. Geométricamente una tesela es una región plana con estructura laminar, cuyo borde está limitado por una curva cerrada. Un teselado generalmente está regido por una trama o una malla rectora, a través de la cual se constituye. Los teselados simples, regulares o monoédricos se producen por la repetición de polígonos iguales y los semirregulares o no uniformes se producen por la combinación de más de un tipo de polígono (fig 51). Una forma de obtener teselados regulares, de apariencia irregular, es a través del concepto que en geometría se conoce como disección, el cual es el arte de cortar figuras en trozos, que luego son reacomodados, para formar nuevas figuras. Las figuras así obtenidas, están basadas en el criterio de economía o de cómo hacer más eficiente el uso del material constitutivo. Una de las primeras estructuras teseladas complejas, es la de *Voderberg*<sup>90</sup>, la cual es la primera en constituirse como un sistema en forma de espiral.

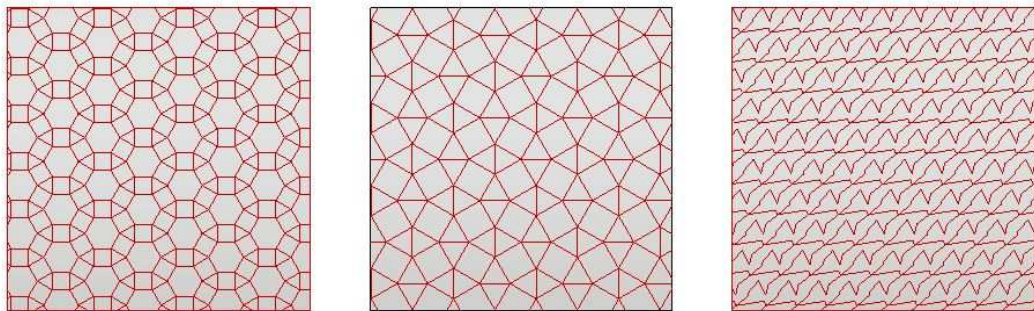


Fig. 51 [Teselados regulares e irregulares], Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, uno de los teselados no uniformes más conocidos, es el *diagrama de Voronoi*, también llamado *teselación de Dirichlet*<sup>91</sup>, el mismo consiste en la interpolación de puntos y trazando las mediatrices de los segmentos conectores. Las intersecciones de las mediatrices determinan una serie de polígonos como particiones del plano, de manera que el perímetro de las celdas sea equidistante a los puntos circundantes (fig.). Para el caso de teselas triangulares podemos emplear el método de triangulación de Delaunay (fig. 52). Por último, el concepto de *patrón*, hace referencia a una disposición de elementos que se repiten de manera regular, bajo cierto ordenamiento, quedando sujeto a ciertas

<sup>90</sup> Heinz Voderberg (1911-1945) fue un matemático alemán, Voderberg es conocido por ser el primero en encontrar inclinaciones en espiral del plano en 1936. La forma reproducida (como de un abanico exótico), está constituida por una sola tesela repetida con forma de eneágono (polígono de nueve lados). La repetición del eneágono forma una tira en espiral infinita que al juntarse con otra tira igual, cubre el plano sin dejar huecos. Branko Grünbaum y Geoffrey C. Shephard encontraron en la década de 1970 más inclinaciones en espiral y en 1980 Doris Schattschneider y Marjorie Rice.

<sup>91</sup> Este particionado geométrico fue estudiado en 1907, por el matemático ucraniano Gueorgui Feodósievich Voronói (1868-1908), de donde toma el nombre de diagrama de Voronói y en 1850, por el matemático alemán Gustav Lejeune Dirichlet (1805-1859), de donde toman el nombre de Teselación de Dirichlet. Inicialmente los polígonos de Thiessen fueron creados para el análisis de datos meteorológicos (estaciones pluviométricas) aunque en la actualidad también se aplica en estudios en los que hay que determinar áreas de influencia (centros hospitalarios, estaciones de bomberos, bocas de metro, centros comerciales, control del tráfico aéreo, telefonía móvil, análisis de poblaciones de especies vegetales, etc.).

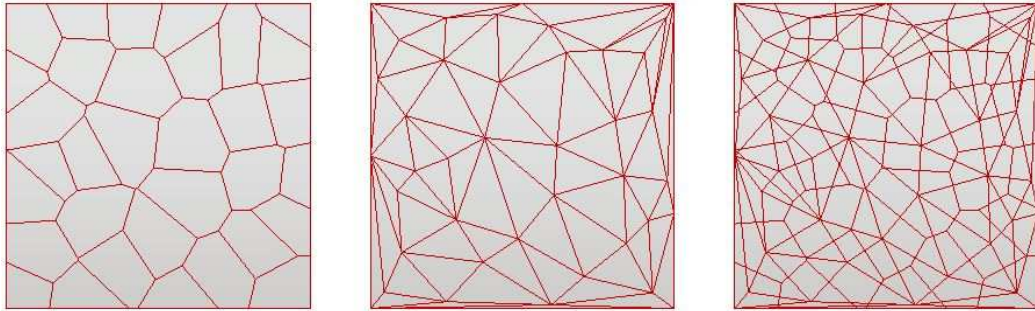


Fig. 52 [Diagrama de Voronoi, triangulación de Delaunay y ambos superpuestos con sus puntos], Fuente: elaboración propia.

restricciones que establecen las reglas para su generación. El origen de la palabra patrón es el concepto de *padre*, por lo que, todas las figuras (hijos) tienen un patrón común que los hace parecerse. Por definición, un patrón posee tres características: una célula o elemento unitario, la repetición de esa célula y un sistema de organización de las partes que se repiten. Toda vez que una célula se repite más de una vez, habrá un patrón, este al repetirse, define un tipo de simetría, por lo que, la misma es un principio básico de organización. Mediante el uso de la simetría pueden ser creados tres tipos diferentes patrones: la simetría *puntual*, también llamada de Leonardo, permite trabajar por rotación alrededor de un punto; la simetría *lineal*, también llamada de frisos, presenta siete casos por traslación y reflexión, y las partes que se repiten se dirigen en una sola dirección; y la simetría *planar*, también llamada de empapelados, presenta diecisiete grupos de simetría del plano, por combinatoria de rotación, traslación y reflexión.

El patrón también puede hacer referencia a una constante, como puede ser la representación matemática de un bucle aleatorio o un atractor y puede hacer referencia a cuestiones figurativas como la representación de imágenes, geometrías alegóricas o bio miméticas. El patrón, por otro lado, permite diferenciar los teselados en dos grupos, las que contienen figuras que se repiten (periódicas) y las que no contienen patrones repetitivos, (no periódicas) sin ser totalmente aleatorias.

Las tramas, mallas, redes, teselados y patrones, pueden ser modificados o alterados a través de transformaciones geométricas como, cambio de proporción y dirección, deslizamiento o cizallado, quiebres, reflexiones, divisiones ulteriores, distorsiones, gradación, rotación, radiación y espiral (rotación + traslación) (fig. 53).

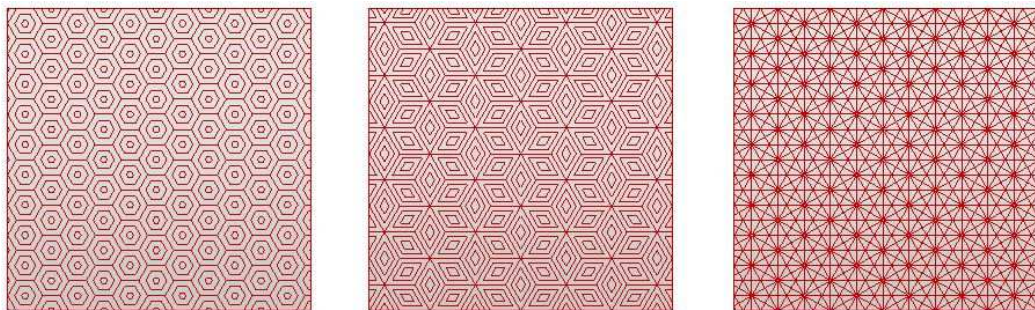


Fig. 53 [Diferentes patrones de base hexagonal], Fuente: elaboración propia.



### 3.2.3. Material predominante

Los cerramientos pueden ser clasificados según tipo de material que lo constituye y estos pueden ser: cemento, madera, metal, plástico, piedra y vidrio. Cada uno de estos materiales es elaborado en diferentes medidas y formatos, ya sea de manera simple, o combinados con otros materiales que aportan características que el material predominante no ofrece.

Entre los materiales más utilizados en la capa vista de los cerramientos (terminación), se encuentran el vidrio y los metálicos, le siguen los cementicios y más atrás los de madera y sus derivados, y por último, de manera escasa y prácticamente nula, los plásticos y las piedras sinterizadas.

Párrafo aparte merece el vidrio, ya que los cerramientos vidriados en nuestra latitud, deben tener un control de asoleamiento que permita obtener los estándares mínimos de confort. De por sí, en las construcciones ortogonales con fachadas perpendiculares al plano piso, mínimamente se debe contemplar una protección para las diferentes orientaciones, y no todas las orientaciones necesitan la misma estrategia de protección solar, por lo que, ante una situación de superficie continua de geometría libre, podríamos encontrar cerramientos de vidrio con múltiples orientaciones, por lo que se deberá analizar el bloqueo/ganancia de radiación solar. Los tipos de vidrios existentes en el mercado otorgan diferentes prestaciones, sobre todo respecto de la ganancia de calor, gracias al Doble Vidriado Hermético (DVH) y la seguridad (Laminado). Si bien la producción estándar del vidrio es en láminas planas, el vidrio es un material que puede ser moldeado y extruído, lo que da la posibilidad de obtener superficies sin solución de continuidad, aunque a un costo elevado; no obstante, no es de nuestro interés profundizar respecto del material, por lo que más adelante (ver tabla), clasificaremos los productos existentes en nuestro mercado, factibles de ser usados en envolventes ligeras.

Del resto de los materiales mencionados, podemos decir que entre los metálicos encontramos mayoritariamente el uso de aluminio y acero galvanizado, y en menor medida, el acero inoxidable, el zinc y el cobre. Dentro de ellos encontramos paneles mono capa y multicapa, estos últimos pueden tener un alma que aporta aislación y/o rigidez.

También, con uso bastante extensivo como cerramiento en tecnologías tipo steel frame, tenemos las placas cementicias reforzadas con fibras celulósicas y sílice. Son un elemento mono capa de alta estabilidad dimensional y resistencia a la rotura, lo que lo convierte en un muy buen material con relación a su costo. Es un producto que no tiene propiedades aislantes, y su uso se concentra en las capas superficiales de terminación.

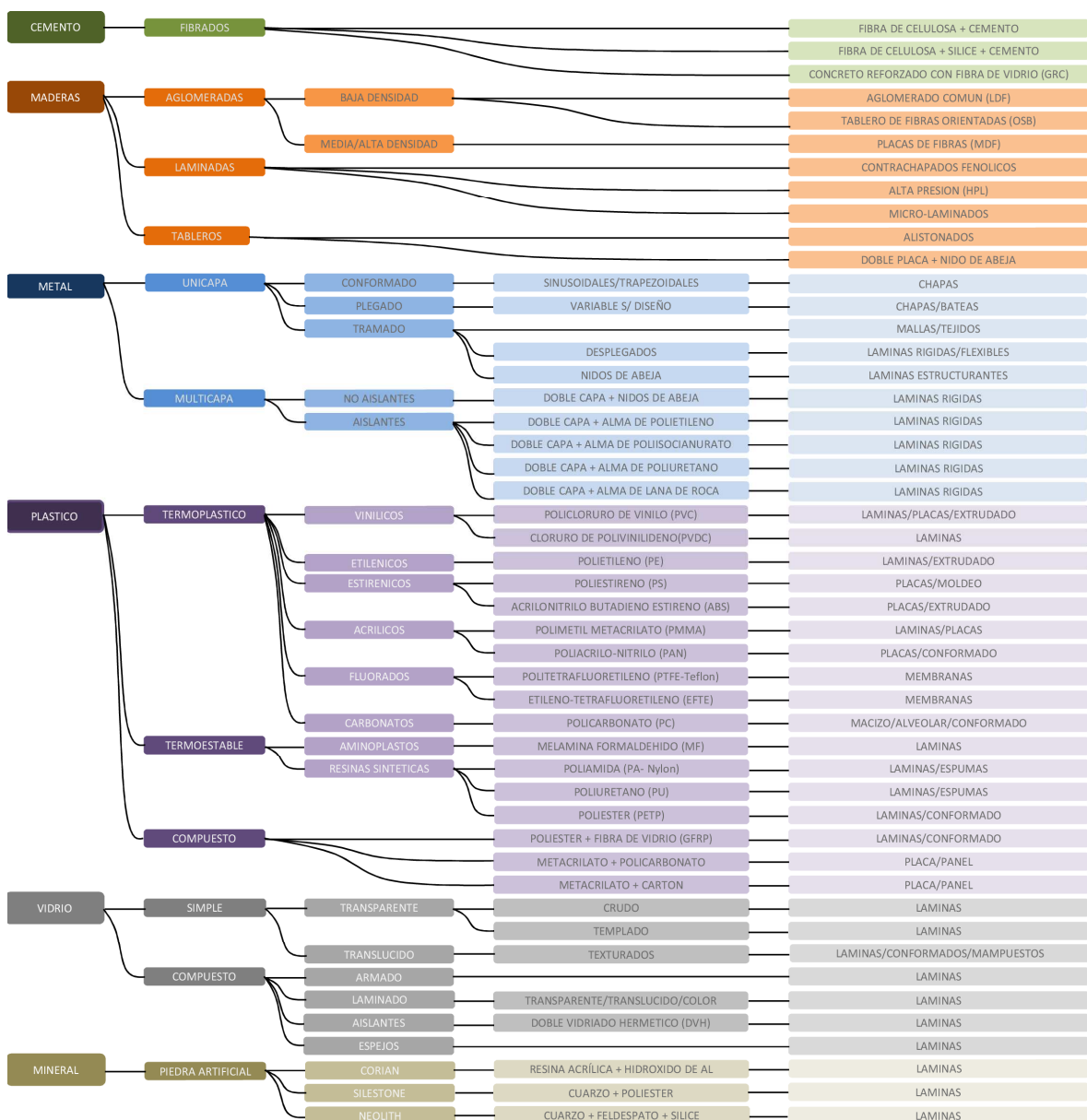
Luego tenemos los tableros de madera de baja, media y alta densidad (aglomerados), en donde los dos primeros son usados como soporte, estructurante y eventualmente como revestimiento interior; y los últimos, se utilizan como elemento de terminación. Los tableros de alta densidad son producto de un proceso que somete los componentes (celulosa + resinas) a una altísima presión, otorgándole características hidropelentes.

Finalmente encontramos a los plásticos y las piedras sinterizadas, en el caso de los primeros el formato más conocido es la combinación de poliéster y fibra de vidrio, de fácil moldeo, muy liviano, no es atacado por la humedad y, en comparación a su delgado espesor, colabora con la aislación térmica.

Por último, las piedras sinterizadas, un material relativamente nuevo, es un compuesto formado por cuarzo y feldespatos, que le otorgan dureza y fuerza al producto,

derivados del sílice, que le otorgan estabilidad química, y óxidos naturales, que le otorgan propiedades cromáticas. Estos materiales son sometidos a un proceso que replica en cuestión de horas, el proceso por el cual se crean los pétreos de forma natural a lo largo de miles de años y el mismo consiste en someter las materias primas descritas anteriormente, a altísimas presiones y temperaturas (400 bares y 1200° C). El conocimiento cabal de las propiedades de los materiales y las utilidades que estos brindan, nos permitirá reconocer los principios que posibilitan su puesta en obra. La adopción de criterios coherentes de diseño, en función de técnicas o modos constructivos factibles y la utilización adecuada de los materiales, son parte de los fundamentos que solventan el presente trabajo.

En el siguiente gráfico síntesis, clasificamos parte de un universo amplio y en constante expansión, en donde básicamente se incluyen los materiales de libre disponibilidad en nuestro medio:



[Gráfico síntesis de materiales generalmente usados en envoltentes ligeras] - Fuente: elaboración propia

### 3.2.4. Modo de producción

Existen varias técnicas de fabricación digital, que pueden ser usadas para llevar a cabo la producción, dependiendo de la geometría, habrá algunos modos que serán más adecuados que otros, que junto a la elección de materiales admisibles de ser maquinados con estos modos, nos permitirá abordar el proceso constructivo. Podemos identificar, como citamos anteriormente, cinco técnicas a las cuales apelar para desarrollar nuestro proyecto y son, *sección*, *teselado o panelado*, *pliegue*, *relieve* o *contorno* y *forma o molde* (Iwamoto, 2009).

*Sección*: Es la concreción de la forma a través de una serie de planos (laminas) situados de manera equidistante, cuyo contorno se transforma siguiendo las líneas de una superficie geométrica, utilizado como recurso frecuente en la representación de formas libres, la cantidad de planos y la separación entre los mismos, definirán una superficie más o menos suave. Este sistema tiene su origen en la técnica de cuadernas en la construcción de cascos de embarcaciones y en las costillas que conforman las alas de los aviones, pudiendo obtener rigidez a través de piezas transversales secundarias u otro seccionado, conformando una estructura tipo “waffle” (fig. 54).

Esta técnica permite resolver estructuras de bajo peso y singularidad, gracias a la precisión de corte de las herramientas digitales (CNC router de 3 ejes, corte laser y waterjet). El concepto de serialidad permite un montaje simplificado y ordenado, que no necesita de operaciones especializadas. Los materiales más utilizados en este método son los aglomerados, contrachapados, plásticos y chapas de acero.

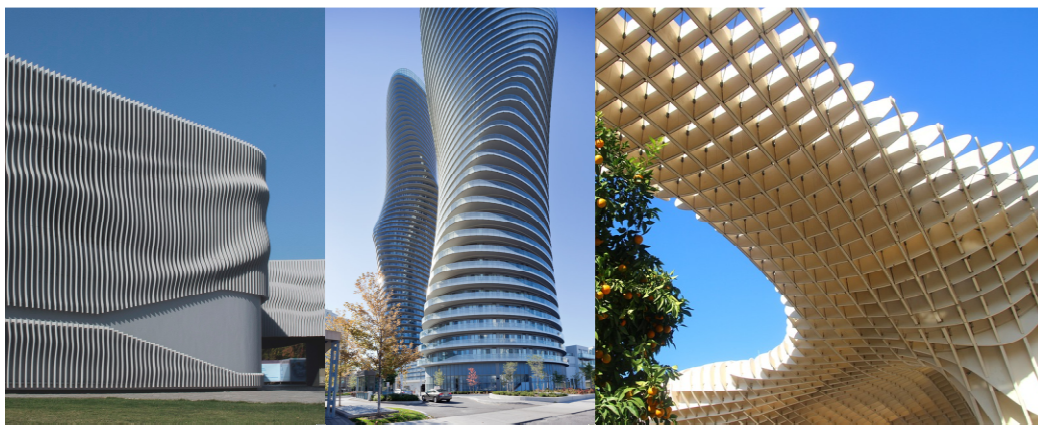


Fig. 54 [Sección en una y dos direcciones: Studio, Apical Reform; Absolute Towers, MAD; y Metropol Parasol J. Mayers], Fuente: izq. <http://bit.ly/3trssxw>, centro <http://bit.ly/3pNFRxJ> y der. <http://bit.ly/3aulbmZ>.

*Teselado (panelado)*: Es la estructuración de la forma definida por una superficie teselada, compuesta por elementos similares, no idénticos, en donde el factor unión entre los mismos, es determinante. La estructuración puede no responder a la trama de origen del teselado, por lo que la junta será una simple unión entre teselas, mientras que si la misma partición se hace cargo del sostén, los bordes tienen mayor incidencia en la configuración de la superficie. Las juntas deben poder absorber encuentros en todas sus direcciones, y por lo general en envolventes ligeras, suelen estar abiertas. Los materiales factibles de usar con esta técnica, estarán en función de

si las teselas son planas, de curvatura simple o doble. Por lo general son necesarias herramientas de corte y conformado en frio o en caliente (Fig. 55).

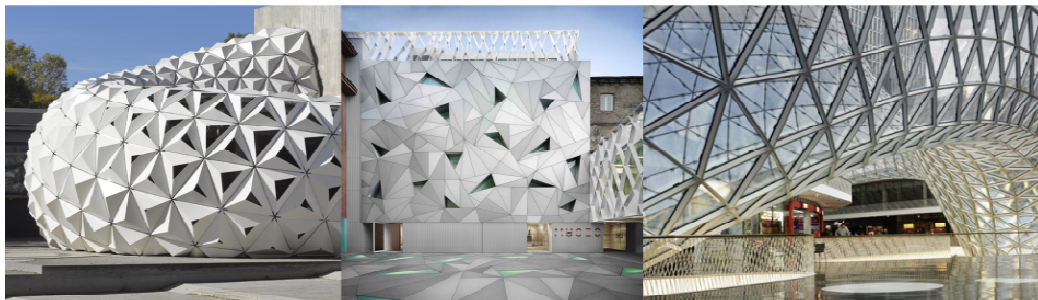


Fig. 55 [Teselado: Pabellón Arboskin, ITKE; Museo ABC Aranguren & Gallegos; y Centro Comercial MyZeil, M. Fuksas], Fuente: izq. <http://bit.ly/3jiepGe>, centro <http://bit.ly/3au4hpD> y der. <https://bit.ly/3oJqWu8>.

*Pliegue*: Es una técnica que mediante, cambios de dirección en la superficie de la forma, estos, le otorgan rigidez y estabilidad. Cualquier material bidimensional (laminas) puede ser plegado, para luego transformante en un material tridimensional. Es una estructura básicamente de tipo laminar y usada desde hace tiempo en modos constructivos tradicionales, como el hormigón armado, que es re visionada en virtud de las tecnologías de producción actuales. En el caso de las envolventes livianas, como las estructuras laminares se conforman básicamente a través de superficies (planas o curvas), estas deberán ser resueltas mediante entramado más emplacado (fig. 55).



Fig. 55 [Pliegue: Rock Gym, New Wave Architecture; CentroCultural en Mulhouse, Paul Le Querrec; y Pabellón Sauce M. Fornes THEVERYMANY], Fuente: izq. <http://bit.ly/3oLr1GS>, centro <http://bit.ly/3pHNdmu> y der. <http://bit.ly/3pPySED>.

*Relieve (contorno)*: Esta técnica da forma a través del desbaste del material, creando un relieve que será más o menos fluido según el grado de movimiento de la herramienta utilizada. La libertad formal está restringida por el máximo espesor utilizable del cual sustraer material, por lo que, diseños con superficies con menor amplitud frente/fondo, son las que desperdician menos material. Si bien podría, en el caso de ser un modo constructivo pesado, ser pensada la técnica como una respuesta estructural, como la estereotomía, para el caso de las envolventes livianas, solo pueden ser vistas como un método para revestir, usando tableros de yeso, madera o piedra, de espesores no convencionales que puedan ser desbastados. Este método también es conocido como grabado, una técnica antigua que se remonta al tallado de



esculturas de madera de los pueblos mesoamericanos y el tallado de mármol en la arquitectura griega.



Fig. 56 [Relieve: Relieves, Agata Kycia; Real Flex, Ora-Ito; y Cabiner, Min- Day Arquitectos], Fuente: izq. <http://bit.ly/2MSDQBM>, centro <https://bit.ly/2Lh2lIF> y der. <http://bit.ly/3jci8sW>.

*Forma (molde)*: Es una práctica comúnmente usada en diseño industrial, utilizada para la producción en serie. Generalmente los moldes obtienen su forma del proceso anterior (relieve), para así, y según material a utilizar, fabricar moldes negativos (hembra) y moldes positivos (macho). También a través del corte, rolado y plegado de láminas metálicas pueden conformar moldes que admitan un colado o proyectado de un material que se endurece (frague). Otros materiales como plásticos y vidrios, pueden también ser moldeados a través de un termo formado, producto de llevar estos materiales a su estado plástico, calentándolos. La técnica de *forma*, es una técnica que generalmente se desarrolla más en el ámbito de las tecnologías por vía húmeda (pesadas), que en el de las envolventes ligeras.

La fabricación digital presenta escenarios constructivos donde la producción de piezas no estandarizadas no implica grandes esfuerzos de tiempo, ni económicos; no obstante, a mayor irregularidad de la forma a ejecutar, mayor el desperdicio de material (fig. 57).



Fig. 57 [Forma: P\_Wall, Andrew Kudless; Dior Seul, C. Portzamparc; y Crushed Wall, Walter Jack], Fuente: izq. <http://bit.ly/3avbVQz>, centro <http://bit.ly/3cEpJv2> y der. <https://bit.ly/3pMK4Sx>.

Por último, respecto de las técnicas de fabricación digital, hemos dejado al margen la fabricación aditiva, que más allá de los esfuerzos de empresas que mencionáramos anteriormente, como Apis Cor, Winsun y D-Shape, es una técnica poco utilizada aun, en virtud de que la maquinaria necesaria para llevar adelante los procesos, están en desarrollo. La fabricación aditiva es una técnica aún incipiente y promete ser una forma eficiente de construir minimizando los desperdicios.

### 3.3. Cierre del capítulo

Las envolventes ligeras paulatinamente se van ganando su espacio dentro de nuestro medio productivo. Diversos modos constructivos son utilizados reemplazando los métodos tradicionales, siendo el menor tiempo de ejecución y menor desperdicio, las causas fundamentales de dicho reemplazo. Por lo que, el mercado comienza a ofrecer nuevos materiales específicos para esta modalidad, dando a los diseñadores una mayor oferta de posibilidades. Tipificar las envolventes ligeras nos brinda la posibilidad de ordenar nuestras ideas respecto de cómo organizar nuestro ensayo proyectual, teniendo presente que forma y materialidad son indisociables, y que las decisiones formales que tomemos repercutirán directamente sobre la elección de los materiales y viceversa. No obstante, el buen manejo de la técnica constructiva a adoptar y la capacidad herramental disponible en el medio, también incidirá en el diseño de la forma y la elección de los materiales.

El escenario digital actual amplía el universo formal de los diseñadores, y por ende el productivo, enfrentándolos a nuevos desafíos que implican, no solo el uso de nuevas herramientas de diseño, sino también el conocimiento y control de las leyes que regulan la forma. A su vez, deberán estar dotados de argumentos que permitan a través de un juicio crítico, realizar una selección idónea de materiales que den respuesta a las decisiones formales.

Por último, independientemente del modo y la materialidad, todo proceso proyectual basado en fabricación digital, requiere de una planificación del proceso constructivo desde el inicio del mismo, ya que un error en la toma de decisiones respecto del *cómo* llevar adelante la producción, repercutirá directamente no solo en el resultado final, sino también, en el desarrollo del proceso mismo.

# *C*apítulo **4** – *E*nsayo proyectual



## Capítulo 4 – Ensayo proyectual

Blanquearlo.  
Mire o escuche algo del período barroco.  
Cambia tu objetivo  
Salir afuera.  
Sé más biofílico  
Crea un desastre.  
Trabajo de pie.  
Disminuir el zoom.  
Construye un pequeño modelo de papel.  
Escucha el tráfico.  
Medita en ello y déjalo ir.  
Desenfoque el contexto.  
Sé más juguetero  
Hazlo de diferentes tonos de blanco.  
Guárdelo y luego haga algo que no habría hecho con el original.  
Haz un movimiento simple.  
Pin up y mire desde lejos.  
Hacer más conexiones  
Dibuja en post-its.  
Describe tu diseño en un lenguaje simple.  
Imagina a un niño moviéndose por el espacio.  
Intensifica la experiencia del lugar.  
Robar algo hermoso  
Haz un gesto dramático muy rápido.  
Lee / escribe un poema  
Atrévete a ser menos minimalista.  
Consulte a alguien en su oficina que no esté en su grupo de edad.  
Script para accidentes.  
Repita el último movimiento que hiciste.  
Intenta mezclar diferentes programas juntos.  
Excavar desde el centro.  
Pregúntale a la ciudad qué quiere.  
Pon el paisaje adentro  
Enfócate en lo que hay en el medio.  
Camina como en un bosque.  
Doble y sea siempre flexible.  
Ábrelo en todas partes.  
Escucha los materiales.  
No tengas miedo de romperlo.  
Cierre su navegador  
Explora las imperfecciones.  
Reposiciónese usted mismo.  
Construye las sombras.  
Haz la circulación express.  
Sé irregular y asimétrico.  
Déjalo emerger desde adentro.  
Intenta hacerlo mezclar.  
Haz algo que te gustaría ver.

Guy Horton, basado en *Oblique strategies* de Brian Eno y Peter Schmidt (1975)

#### 4. Diseño y abstracción de la idea

La acción de diseñar es un hecho creativo que encierra aun algunos misterios, si bien el concepto ha sido estudiado y profundizado por muchos autores, aún quedan zonas oscuras de cómo se producen ciertas configuraciones en nuestro cerebro, que permite ordenar nuestra información y devenirla en ideas. El cerebro realiza dos acciones para llegar a una idea; analiza la información que posee, por un lado y sintetiza la misma, por el otro.

Independientemente de cuales son aquellos mecanismos subyacentes que se activan durante la elaboración de una idea, la mayoría de los diseñadores necesitamos reflexionar sobre el tema con el cual vamos a trabajar y esa reflexión nos permite establecer un sistema de relaciones que organizan nuestras ideas, previo a que estas tomen cuerpo.

Esta información suele estar sistematizada y configurada a través de plantillas, cuadros, moldes o matrices, dentro de las cuales, se establecen relaciones que combinan las diferentes variables previamente establecidas. Esta etapa previa a la elaboración de una idea concreta es llamada *metadiseño*.

Tradicionalmente, en un proceso analógico, esta etapa estaba marcada por la elaboración de bosquejos o croquis, que representan las partes y el todo, en donde la modificación de esas partes, no necesariamente modificaban el todo.

Por el contrario, un metadiseño de diseño computacional, estará realizado en base a parámetros o consignas establecidas en un sistema de relaciones que las vinculan y los cambios efectuados en las partes, repercuten en el todo, por lo que cada solución proveniente de un mismo metadiseño, es única. Es un concepto que en principio opera desde lo informacional, más que desde lo creacional, donde establecemos reglas que permanecen inmanentes, pero flexibles y donde la matriz es el marco referencial de trabajo.

Esta, deberá considerar entre otros, aspectos de magnitud, de desempeño (eficiencia), de adaptación, de forma y de factibilidad.

En esta etapa debemos establecer cuáles serán nuestras reglas de diseño, que nos permitirán elaborar la suficiente cantidad de alternativas, ponderarlas y elegir la más adecuada a nuestros requerimientos.

##### 4.1. Definición y aplicación del software de diseño

*La arquitectura se está refundando así misma, convirtiéndose en parte en una investigación experimental de geometrías topológicas, en parte una orquestación computacional de la producción del material robótico y en parte generativa, como la escultura cinemática del espacio. Peter Zellner, 1990*

El diseño paramétrico es un método que utiliza la programación visual como interfaz de trabajo. Los softwares de programación visual utilizan algoritmos avanzados que permiten obtener geometrías paramétricas (modificable a través de parámetros), difíciles de realizar con otros softwares de diseño asistido (CAD), es entender la forma geométrica desde un razonamiento computacional. La programación visual, acerca de forma amena, el diseño al mundo de la codificación, ya que el sistema se apoya en un lenguaje de iconos que permite manipular los datos necesarios en la definición del código, por un lado, y las funciones y/u operaciones que modifican dichos datos, por el

otro. Es una forma de programar sin recurrir al *scripting*<sup>92</sup>, una habilidad o conocimiento poco frecuente en el ámbito del diseño, poniendo al diseñador en un lugar diferente al tradicional, en donde el mismo, deberá adoptar posturas que le permitan abordar procesos ligados a las ciencias computacionales. Esta postura debe ser flexible y desprejuiciada respecto de producir cambios, entendiendo que el software es una plataforma abierta adaptable a nuestras necesidades y que nos permite desarrollar nuestras propias herramientas. Los software paramétricos, modelan geometrías en virtud de manipular las mismas matemáticamente y no a través de su forma, trabajan sobre una serie de datos que crean diferentes objetos o configuraciones, por lo que los objetos no se diseñan, se calculan. Estos datos o parámetros se encuentran asociados entre sí, generando una interdependencia entre los objetos diseñados, en donde cada modificación que uno realiza en una parte, repercute en el todo. A su vez, la velocidad que propone el ordenador, permite explorar y redefinir las formas obtenidas de manera instantánea, ampliando las posibilidades resolutorias; no se está definiendo una resolución estable y permanente, se está definiendo una familia de posibles soluciones en constante revisión durante el proceso de diseño. Al final, el resultado será aquel que tenga asignado la mejor combinación de valores definidos en cada parámetro, propuestos desde la subjetividad analítica del diseñador. Los resultados obtenidos son matemáticamente definibles y factibles de ser fabricados digitalmente; por lo que el diseñador necesita reconocer no solo el proceso proyectual en un entorno paramétrico, sino que debe comprender como trabajan las diferentes herramientas, para poder explotar al máximo las capacidades de las mismas. El proceso proyectual que se llevara a cabo, utilizando simples definiciones paramétricas, indagará alternativas de resolución tecnológica, para envolventes ligeras, cuya conformación geométrica, este dominada por superficies, curvadas, plegadas y regladas.

#### 4.1.1. Definición del software paramétrico

Como dijimos anteriormente, el concepto de parametricidad, no es nuevo en arquitectura, los parámetros forman parte de los insumos corrientes dentro de un proceso de diseño, tradicional o analógico (programa, localización, superficie, presupuesto, plazos, etc.), operando de manera polivalente condicionando unos parámetros a otros. El manejo de dichos parámetros muchas veces sucede de manera inconsciente y en la medida que se adquiere experiencia, los mismos son controlados de manera casi natural. No obstante, y más allá de la experiencia que se pueda tener, la capacidad de albergar y manipular datos por parte del cerebro humano, es limitada. Ese límite ha sido superado por la tecnología digital, permitiendo controlar un volumen de datos casi infinito, ampliando las relaciones que podemos establecer entre los mismos.

Existe una variedad de software para diseño computacional y la mayoría necesita “correr” sobre otra plataforma, como Microstation, Revit o Rhinoceros. Las herramientas disponibles son *Generative Components*, *Dynamo*, *Marionette*, *Flux* y

---

<sup>92</sup> En informática, un *script*, secuencia de comandos o guion (traduciendo desde inglés) es un término informal que se usa para designar a un programa relativamente simple. Los *scripts* o guiones se pueden usar para prototipar programas, automatizar tareas, e interactuar con el sistema operativo y el usuario. El *scripting* es la tarea que un programador realiza cuando opera con los diferentes lenguajes de programación, con el fin de lograr el algoritmo requerido según necesidades.

*Grasshopper*. el primero, es uno de los más antiguos (2003) y trabaja en el entorno de Microstation; Dynamo, es un programa de Autodesk y se vincula directamente con Revit; Marionette, por su parte, se integra con Vectorworks desde el 2016; Flux es un producto que nace en el laboratorio de investigación de productos Google y que utiliza una interfaz basada en la web, permitiendo compartir los datos con otras aplicaciones de diseño; por último Grasshopper, es la herramienta de programación visual más popular entre los diseñadores, funciona como *plug-in* para Rhinoceros y es un producto sumamente robusto y estable, con una amplia biblioteca de datos, y numerosas extensiones, tanto para mejorar las prestaciones de diseño, como de análisis.

#### 4.1.2. Rhinoceros, Grasshopper y plug-ins

En lo particular, desde el año 2014, estamos usando para modelar el software en base a Nurbs, Rhinoceros de la firma McNeel & Associates. Se abordó a esta decisión, luego de una exhaustiva búsqueda entre varios softwares similares, encontrando que Rhino, se adapta más a las necesidades propias de un proceso de diseño y con un agregado importante, que es que su curva de aprendizaje, es veloz. Previamente a Rhino, se tuvo experiencia con otros softwares que trabajan con Nurbs, como es el caso de Form-Z y Blender, teniendo ambos menos prestaciones y una curva de aprendizaje más lenta. Recordemos que las Nurbs son representaciones matemáticas de geometría en 3D capaces de describir cualquier forma con precisión, desde simples líneas en 2D, círculos, arcos o curvas, hasta los más complejos sólidos o superficies orgánicas de forma libre, con flexibilidad y precisión. Otra de las características que hicieron tomar la decisión de ser usuarios de Rhino, es que su entorno de trabajo, engloba múltiples aplicaciones que pueden ser añadidas de manera independiente y que por lo general pueden ser abordadas de manera intuitiva, ampliando las prestaciones de la plataforma. Los plug-in con los que cuenta Rhino son innumerables y abarcan aspectos como, renderizado, cálculo estructural, simulación física, CAM, BIM, Paisaje, Urbanismo, etc., constituyendo un universo amplio y diverso, con respuestas a cada ámbito del diseño.

Al ser usuarios de Rhino, decidimos implementar para el proceso de diseño, el plug-in Grasshopper, el cual es un editor gráfico de algoritmos estrechamente integrado a Rhino, que no requiere conocimientos de scripting, pero que permite a los diseñadores crear generadores de forma de lo simple a lo complejo. Los algoritmos se crean, pasando datos de componente a componente, a través de cables de conexión que conectan siempre un agarre de salida con una empuñadura de entrada. Los datos se pueden definir a nivel local como una constante, optimizando los tiempos de realización, producción digital y creación de herramientas personalizadas (definiciones).

El diseñador computacional puede desarrollar sus propias herramientas de diseño y vincularlas a un proceso productivo, ofreciendo un vasto escenario de oportunidades en términos de creatividad.

## 4.2. Idea general. Diseño (forma) /materialidad (construcción) / tecnología (fabricación).

El diseño computacional se ha convertido en una herramienta que ha logrado reconfigurar la manera en que abordamos un diseño. Los softwares utilizados pasaron de ser meras herramientas de representación, a herramientas de fabricación integradas al diseño. La forma es la resultante de la búsqueda de eficiencia en el uso de los recursos, sin caer en restricciones formales. En ese sentido los softwares que permiten abordar un proceso de diseño paramétrico, no solo permiten el dominio de formas complejas, sino que también, producen el *out-put* necesario para ser fabricado digitalmente.

En el presente trabajo exploraremos propuestas genéricas para envolventes ligeras de formas no euclidianas, desarrollando los diferentes elementos que la componen, con materiales de uso regular en nuestro medio, y cuáles serían las lógicas de producción y montaje.

### 4.2.1. Estrategia de diseño. Proceso

Como mencionábamos anteriormente, abordar un ensayo proyectual con la utilización de software paramétrico, implica adoptar una postura flexible y permeable a realizar los cambios que sean necesarios. La toma de decisiones es efectuada por la constante retroalimentación que produce el método de exploración y experimentación. La respuesta instantánea del software, ante la manipulación de los diferentes parámetros preestablecidos (algoritmos), permite evaluar con velocidad un sinnúmero de soluciones similares. Es un proceso no lineal, que constantemente vuelve sobre sus pasos y en el cual podemos establecer tres etapas: las condiciones iniciales del proyecto (matriz), el armado de la definición de proyecto (algoritmo), y el análisis y selección de los resultados (variantes morfológicas) (fig. 58). Estas etapas, a su vez, son difusas y pueden ser modificadas o ajustadas mientras se ejecuta el procedimiento, no obstante, más allá de la cierta indefinición entre las mismas, diferenciarlas contribuye a organizar el desarrollo del proceso de diseño (Davis et al., 2011).

La parametrización no es nueva en el universo arquitectónico, en todo proceso de diseño tradicional (analógico), de manera consciente o inconsciente, trabajamos con una serie de parámetros, pero de manera acotada y condicionada generalmente, por la formación recibida, el contexto social en el cual nos desempeñamos y los intereses propios de cada diseñador. En un proceso de diseño digital, los parámetros se trabajan de manera consciente, pudiendo controlar una gran cantidad de datos, que se interrelacionan para generar la morfología, gravitando de manera fundamental dentro del proceso, más allá de los estilismos y los dogmas. Las condiciones iniciales están relacionadas, a la capacidad de fabricación digital (herramental) que contamos, por un lado, y el tipo de envolvente que se quiere explorar, por el otro. En relación a la capacidad de fabricación sabemos que no contamos en nuestro medio con megas impresoras 3D ni brazos robóticos, pero si se cuenta, con máquinas de corte (plasma, laser y chorro de agua) y de desbaste (router CNC). Por otro lado, al trabajar con envolventes ligeras, técnicas como Forma y Contorno serán indefectiblemente dejadas de lado, ya que no son idóneas para el modo constructivo que se quiera indagar. Por lo que las técnicas de Sección, Teselado y Pliegue, son alternativas factibles como modo de producción. De estas últimas se optó, por una técnica de Teselado, ya que con elementos lineales (barras y perfiles) y láminas de diferentes materiales, sumado al

herramiental disponible antes mencionado, se puede llevar adelante con éxito un proceso de fabricación digital.

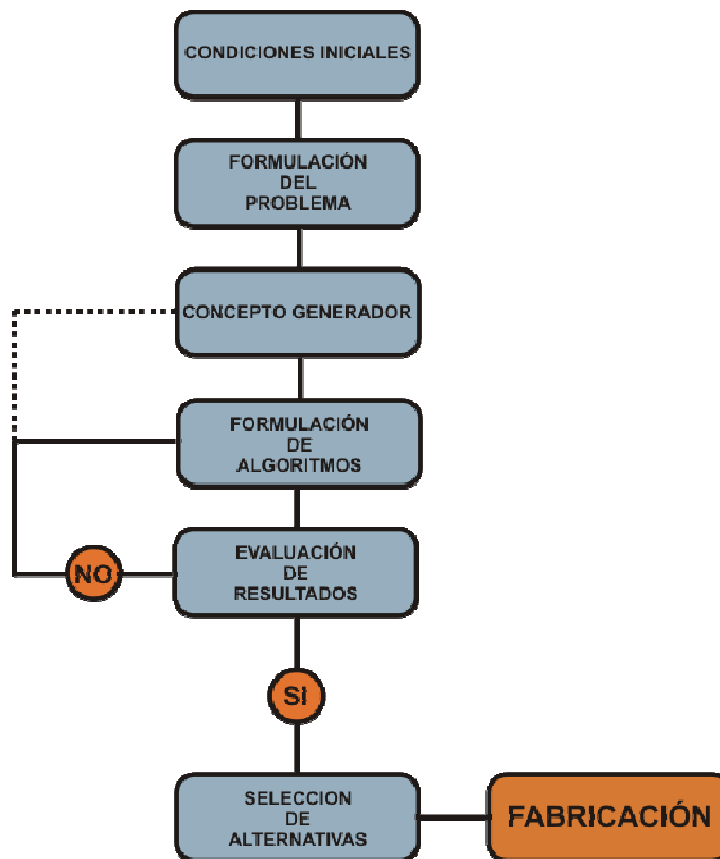


Fig. 58 [Diagrama de proceso de diseño paramétrico], Fuente: elaboración propia.

Una vez definido el modelo, este deberá tener la información necesaria para verificar que se pueda materializar, convirtiéndose en un conjunto de principios estructurales, organizacionales y compositivos, necesarios para completar el ciclo productivo. La búsqueda de una metodología general que permita abordar el diseño paramétrico de envolventes ligeras, permitirá promover el uso de tecnologías digitales en las AEC del ámbito local.

#### 4.2.2.Premisas morfológicas

Para afrontar el ensayo, elaboraremos algunas premisas que permitan acotar el trabajo, dado las infinitas derivas que pueden resultar de una experiencia que involucra metodología no convencional de diseño. Por otro lado como argumentáramos anteriormente, el diseño paramétrico implica a una actitud abierta a procesos modificables y flexibles, por lo que en un principio se adoptaron premisas geométricas generales, para luego definir las de manera más específica. Una de las variantes operacionales del soft grasshopper es que uno puede establecer formas geométricas, a través del uso de entidades u objetos previamente dibujados en Rhinoceros (puntos, curvas, superficies, volúmenes, mallas, etc.) lo que permite mayor velocidad y fluidez en el gen de la geometría base, pero a costa de obtener menor

control sobre esta. La otra variante, es aquella donde todas las entidades gráficas son definidas desde cero en Grasshopper y esta fue, la que se ha utilizado en el presente trabajo.

Ensayar el uso del software sin apelar a la ayuda gráfica de Rhinoceros, implica diseñar exclusivamente bajo un entorno de programación visual, lo que representa un desafío en sí mismo y un argumento para que, desde la formulación matemática, se explore la forma y su correlato con los números.

En ese afán se decidió explorar superficies regladas y de doble curvatura factibles de ser producidas con un modo constructivo de envolvente ligera.

#### 4.2.3. Premisas técnicas

Se exploran en base a una superficie previamente definida matemáticamente, diferentes modulaciones para un particionado de malla triangular. Se definió que fuera una malla triangular, ya que las características intrínsecas del triángulo, indeformabilidad para la estructura y planidad para el cerramiento, permiten ser aplicables a cualquier morfología de superficie.

La modulación estará condicionada por el formato de circulación comercial de cada material, pero que en principio se encuentran en planchas o láminas de 4 pies por 8 pies (aglomerados, fenólicos, chapas), 1200 mm por 2400 mm (placas de roca de yeso) y 1500 mm por 3000 mm (composites y piedras artificiales).

La dimensión de la estructura será estimativa, ya que haremos foco en la parametrización de los elementos constructivos principales del conjunto de la envolvente ligera.

Una vez definida la superficie base de la envolvente, definiremos los elementos constitutivos principales para el desarrollo de una envolvente multicapa; las tuberías de la estructura, los vínculos entre la estructura y los bastidores de fijación, los bastidores de fijación, las placas de cerramiento, las placas de terminación y dos tipos de revestimiento interior.

La elección de un modelo geométrico al cual aplicar el desarrollo tecnológico, surgirá no solo de los materiales disponibles comercialmente, sino también de la disponibilidad de herramienta con tecnología digital para el maquinado de los mismos.

#### 4.3. Diseño de algoritmos generativos en respuesta a la idea

Cuando hablamos de una estructura paramétrica nos referimos a una organización interrelacional, donde las partes están conectadas dentro de un sistema coordinado, implicando de esa manera la posibilidad de variar partes y recrear de manera automática nuevas configuraciones (Woodbury, 2010, p. 11).

En una estrategia paramétrica los diferentes elementos y componentes se encuentran altamente interconectados a través de leyes relacionales. Así pues, el diseñador no solamente idea los elementos o componentes básicos del sistema, sino que además debe diseñar y programar los vínculos existentes entre los mismos a través de funciones matemáticas. (Arteta, 2017)

Conocer las formulaciones matemáticas subyacentes tras los algoritmos, permite un mayor control sobre la forma, lo que a su vez, permite visualizar con más claridad un objetivo deseado.



El desarrollo del proceso de diseño se centrara en la elaboración de superficies de *transición* entre dos o más curvas (Crv) y que a su vez estas, se regirán por la función seno y coseno. Trabajaremos con cinco definiciones (Def), que irán de menor a mayor en términos de complejidad, a saber: *Def 01*, Superficie *reglada* entre dos curvas A (una recta y una de seno), *Def 02*, Superficie *reglada* entre dos curvas B (una de coseno y una de seno), *Def 03*, Superficie de *doble curvatura* entre tres curvas (seno, coseno y seno), *Def 04*, Superficie de *doble curvatura (bóveda)* entre tres curvas (seno, coseno y seno) y *Def 05*, Superficie de *doble curvatura (bóveda)* entre cinco curvas (seno, seno, coseno, seno y seno).

Cada definición estará conformada por tres cuerpos, la *superficie* de origen, la *matriz* constructiva y los *elementos* constitutivos de la envolvente. La matriz geométrica será la base sobre la cual se desarrollara el modo constructivo adoptado, a través de obtener diferentes superficies equidistantes, donde se desarrollan las diferentes capas de la envolvente ligera.

Así, cada una de estas superficies, será particionada con el componente *Triangle Panels B*, del set de herramientas *Lunch Box*, el cual nos permite subdividir la superficie en triángulos, controlando la cantidad de los mismos en sentido U y V.

Para el particionado debemos establecer un rango, que nos permita establecer aquella configuración que pueda establecer un equilibrio entre la fidelización de la forma, la menor cantidad de elementos posibles y el uso eficiente del material.

Para ello, se establece un rango de partición entre 1 y 20, que permitirá cotejar diferentes configuraciones de partición, seleccionando tres a modo ejemplo y así establecer comparaciones entre las mismas.

Claro está, que un mayor número de particiones obtendrá una reproducción más fidedigna de la matriz geométrica, a costa de mayor cantidad de elementos constitutivos y uniones ente piezas; conjuntamente con la necesidad de cotejar las dimensiones máximas, con el fin de hacer un uso eficiente de los materiales.

Las capas constitutivas de la envolvente ligera, se desarrollan en diferentes superficies equidistantes de la geometría matriz, en función de los espesores y necesidades de fijación de los diferentes materiales intervinientes. En este capítulo solo desarrollaremos la tubería de la estructura y posteriormente en el siguiente capítulo se verán el resto de las capas constitutivas de la envolvente ligera.

#### 4.4. Exploración y representación de los resultados

*Def 01*, Superficie *reglada* entre *dos* curvas A

La definición expresa una superficie de transición entre la Crv 1 (recta) y la Crv2 (seno). Para que las Crvs comiencen y terminen en la coordenada cero del eje X, deberán estar atadas al número Pi. En principio el primer control que vamos a establecer es el de la amplitud de la curva en el eje Y que lo haremos variando el valor de la función seno o coseno según corresponda (seno, seno/2, 2 seno, etc.). En el caso de la Crv 1, vamos a generar la recta usando la función seno, si bien la recta puede ser originada con otros componentes, se usa esta formulación como base para luego complejizar aún más la misma. Otro aspecto que podemos controlar es la cantidad de puntos que definirán la Crv para que esta represente un aspecto más suavizado o menos suavizado. En esta primera definición, si este parámetro lo establecemos en 1, la Crv 1 será plana. La Crv 2 la vamos a situar a 5 m de altura y tendrá una amplitud de seno.

Estableceremos tres frecuencias de partición y a una de ellas se le desarrollara la tubería de la estructura (fig. 59, 60 y 61).

Def 02, Superficie *reglada* entre *dos* curvas B

La definición es igual a la anterior, lo que cambia es la formulación de las curvas, siendo la Crv 1 coseno y la Crv 2 seno. También se establecen tres frecuencias de partición y a una de ellas se le desarrolla la tubería de la estructura. Ver gráficos Def 02 (fig. 62, 63 y 64).

Def 03, Superficie de *doble curvatura* entre *tres* curvas (seno, coseno y seno)

La siguiente definición expresa una superficie de transición con doble curvatura, para ello incluiremos una Crv más y rotaremos dos de ellas.

La Crv 1 estará controlada por la función seno, pero en este caso reduciremos su amplitud para generar una superficie más suave, por lo que usaremos  $\text{seno}/2$ . La Crv 2, entre la Crv 1 (recta) y la Crv2 (seno).

Para obtener la doble curvatura será necesario rotar las siguientes curvas en el eje Z, por lo que necesitamos un centro de rotación, que se ubicara a 5,00 m de distancia de la Crv 1. La Crv 2 se controla por la función  $\text{coseno}/2$  y rota sobre dicho punto  $45^\circ$ . Por último, la Crv 3 se controla por la función  $\text{seno}/2$  y rota  $90^\circ$  sobre el punto antes mencionado. Al igual que las anteriores definiciones, estableceremos tres frecuencias de partición y a una de ellas se le desarrollara la tubería de la estructura. Ver gráficos Def 03 (fig. 65, 66 y 67)

Def 04, Superficie de *doble curvatura* (bóveda) entre *tres* curvas (seno, coseno y seno)

Esta definición es idéntica a la anterior y para generar la bóveda se cambian los ángulos de rotación, siendo para la Crv 2  $90^\circ$  y para la Crv 3  $180^\circ$ . Otro cambio que debemos hacer es la frecuencia del particionado, dado que al ser mayor la superficie de trabajo, las subdivisiones en el sentido U, deberán ser más. Para ello definiremos un valor máximo de 20 U, estableciendo comparaciones con frecuencias de 12 U y 16 U. Al igual que las anteriores, a una de ellas se le desarrollara la tubería de la estructura. Ver gráficos Def 04 (fig. 68 y 69).

Def 05, Superficie de *doble curvatura* (bóveda) entre *cinco* curvas (seno, seno, coseno, seno y seno)

La última definición que desarrollamos, busca mejorar el encuentro de la superficie con el plano del suelo, respecto de cómo lo hacía la Def 04. En la anterior definición de bóveda, esta llegaba al suelo en un Angulo agudo y se buscó que la superficie lo hiciera de manera normal. Para ello se incorporaron 2 Crv más en la transición de la superficie. Estas fueron una copia en elevación a  $90^\circ$  de la primera y última Crv. Esta elevación es controlable y se definió en 1,00 m sobre el nivel del suelo.

En esta definición, también amplía la frecuencia del particionado, en el sentido U. También con un valor máximo definido en, estableciendo comparaciones con frecuencias de 12 U y 16 U, se le desarrollara la tubería de la estructura a una de ellas. Ver gráficos Def 05 (fig. 70, 71 y 72).

GRÁFICOS Def 01

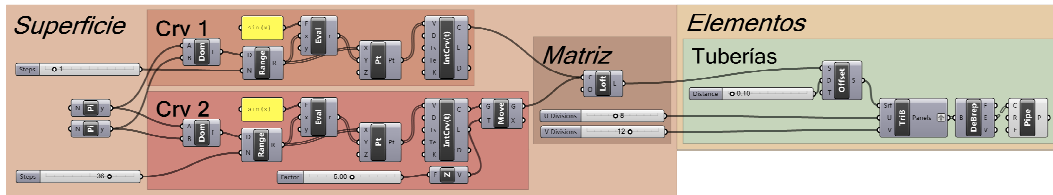


Fig. 59 [Definición 01 de Grasshopper], Fuente: elaboración propia

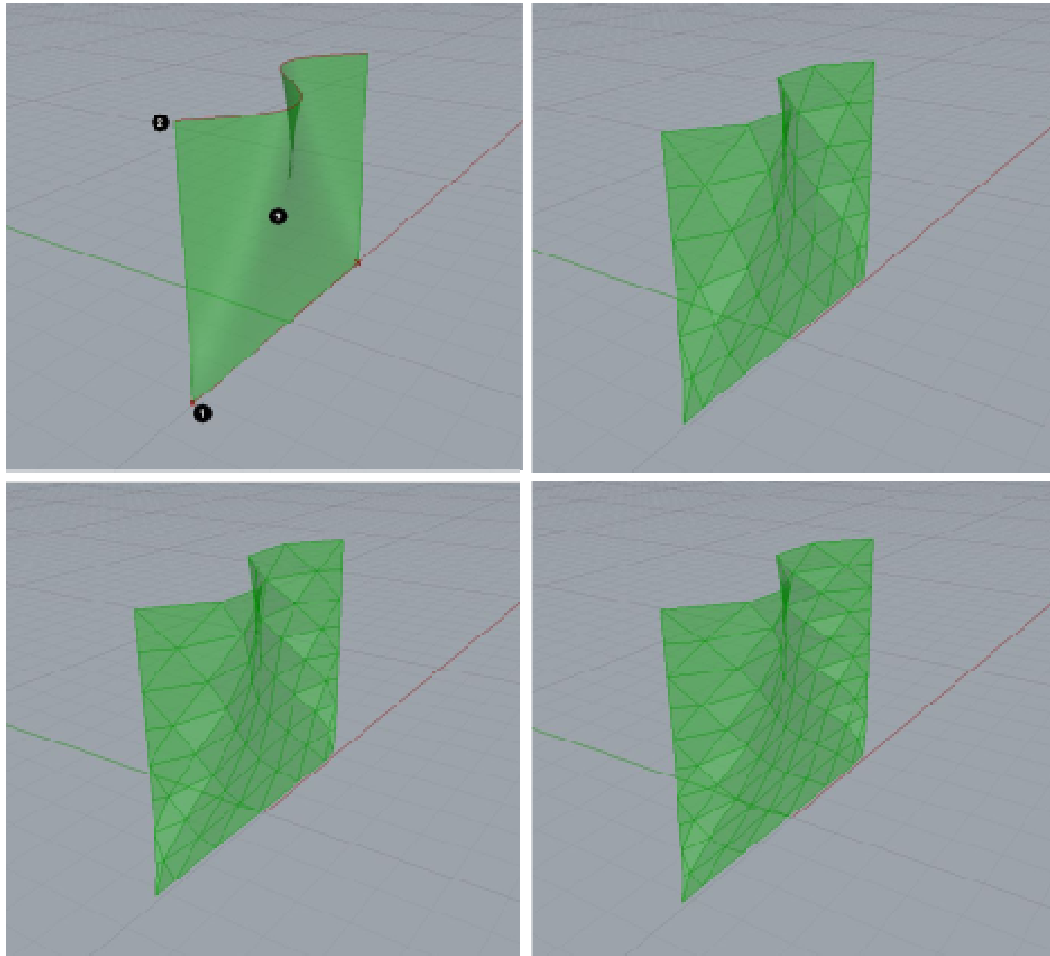


Fig. 60 [Arriba izq. Crv 1 recta (1), Crv 2 seno (2), superficie (3); arriba der. frecuencia 6U 12V; abajo izq. frecuencia 8U 12V y abajo der. frecuencia 10U 12V], Fuente: elaboración propia.

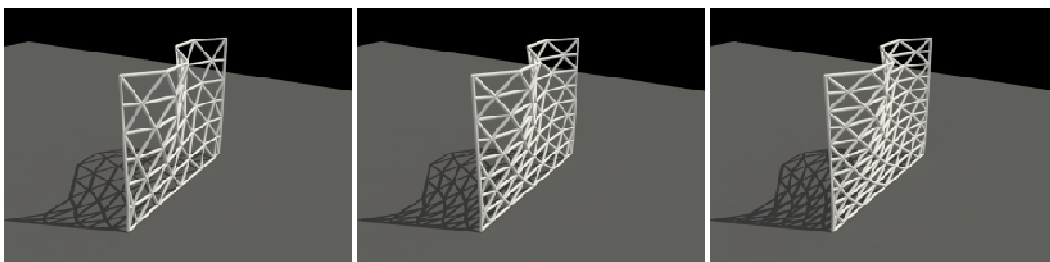


Fig. 61 [Tuberías Def 01 frecuencias, 6U 12V, 8U 12V y 10U 12V], Fuente: elaboración propia.

GRÁFICOS Def 02

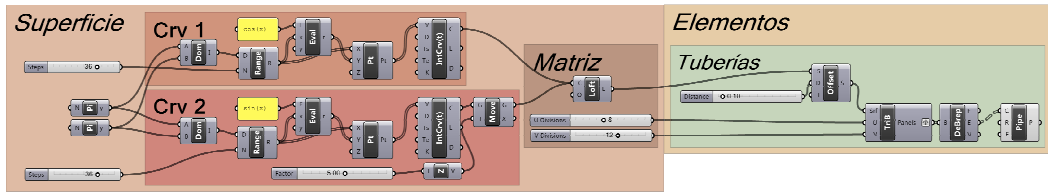


Fig. 62 [Definición 02 de Grasshopper], Fuente: elaboración propia

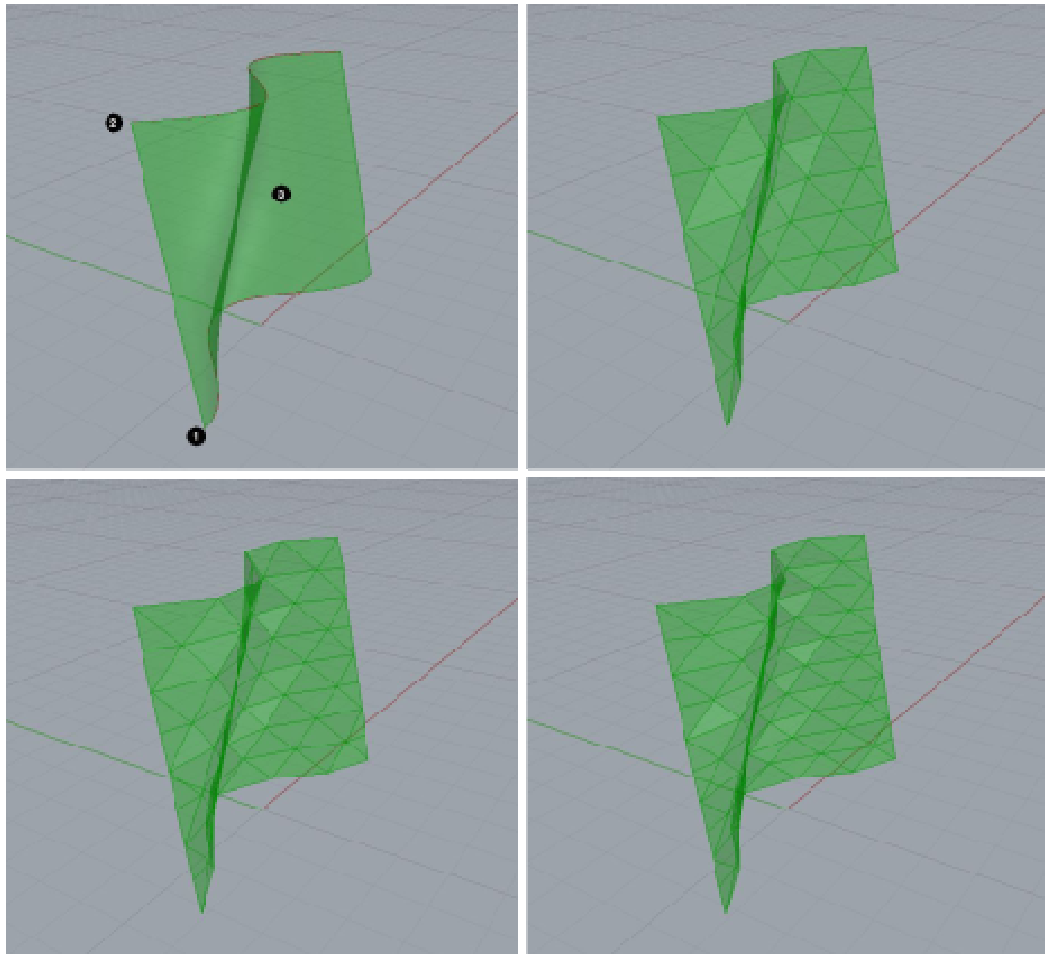


Fig. 63 [Arriba izq. Crv 1 coseno (1), Crv seno (2), superficie (3); arriba der. frecuencia 6U 12V; abajo izq. frecuencia 8U 12V y abajo der. frecuencia 10U 12V], Fuente: elaboración propia.

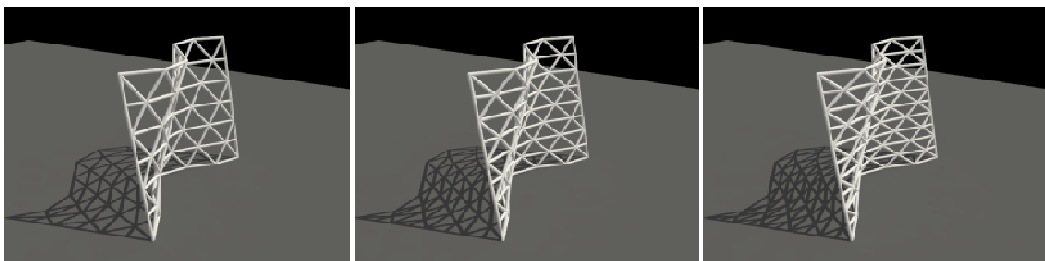


Fig. 64 [Tuberías Def 02 frecuencias, 6U 12V, 8U 12V y 10U 12V], Fuente: elaboración propia

GRÁFICOS Def 03

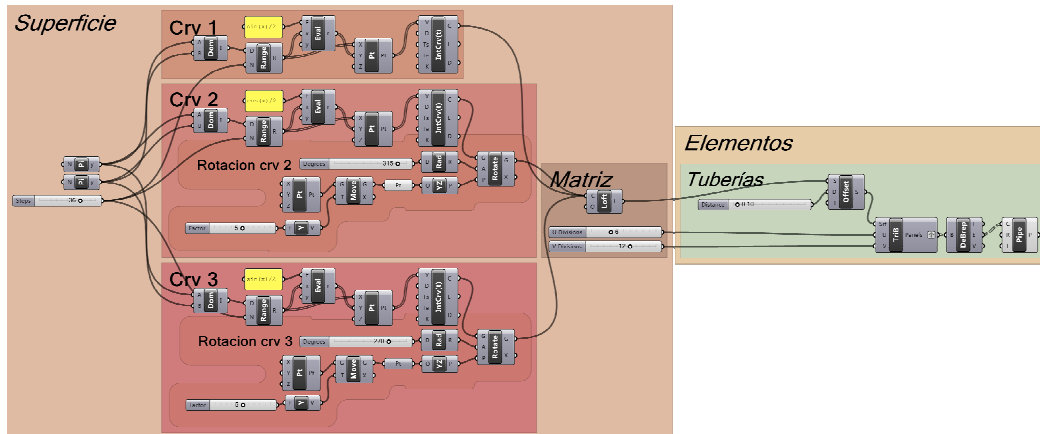


Fig. 65 [Definición 03 de Grasshopper], Fuente: elaboración propia.

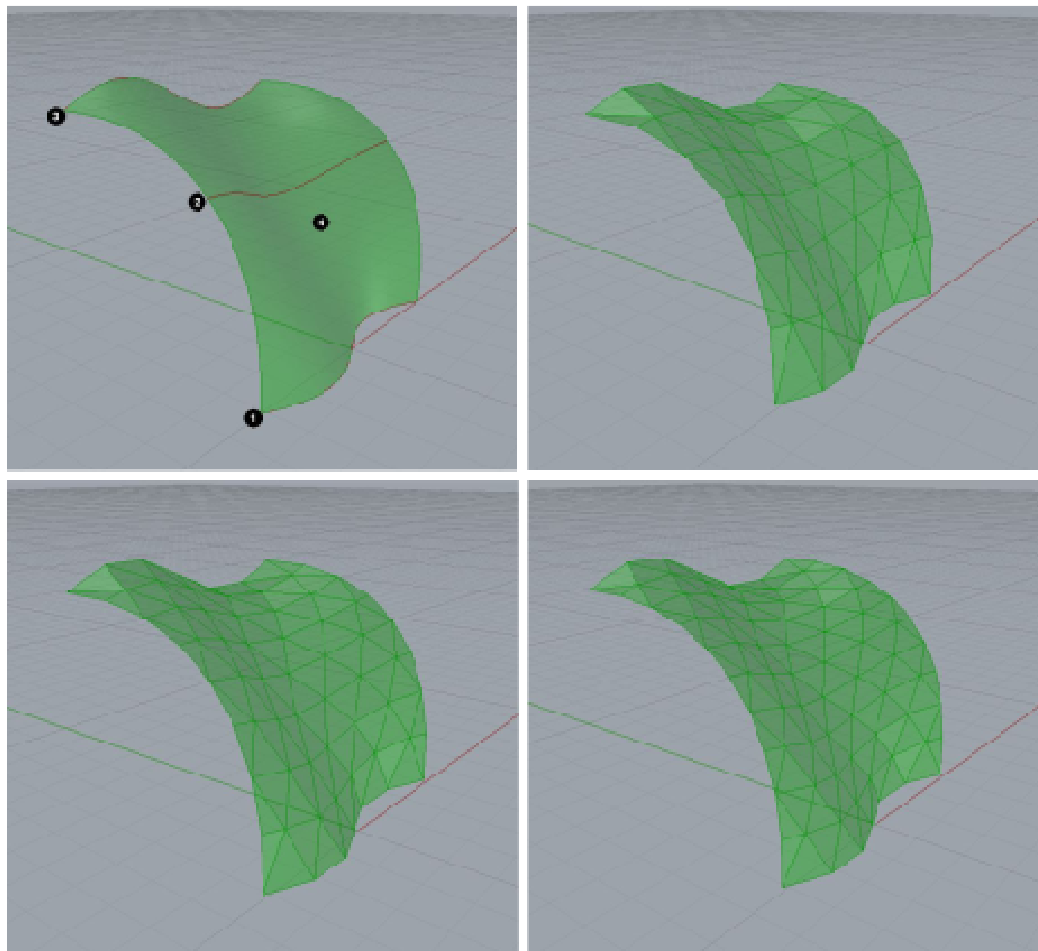


Fig. 66 [Arriba izq. Crv 1 seno/2 (1), Crv 2 coseno/2 (2), Crv 3 seno/2 (3), superficie (4); arriba der. frecuencia 6U 12V; abajo izq. frecuencia 8U 12V y abajo der. frecuencia 10U 12V], Fuente: elaboración propia.

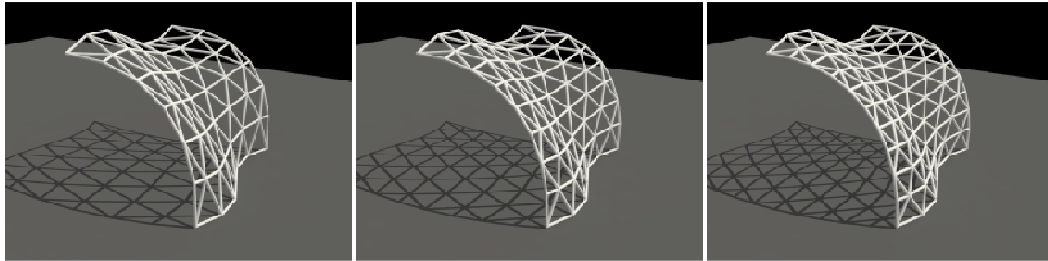


Fig. 67 [Tuberías Def 03 frecuencias, 6U 12V, 8U 12V y 10U 12V], Fuente: elaboración propia.

#### GRÁFICOS Def 04

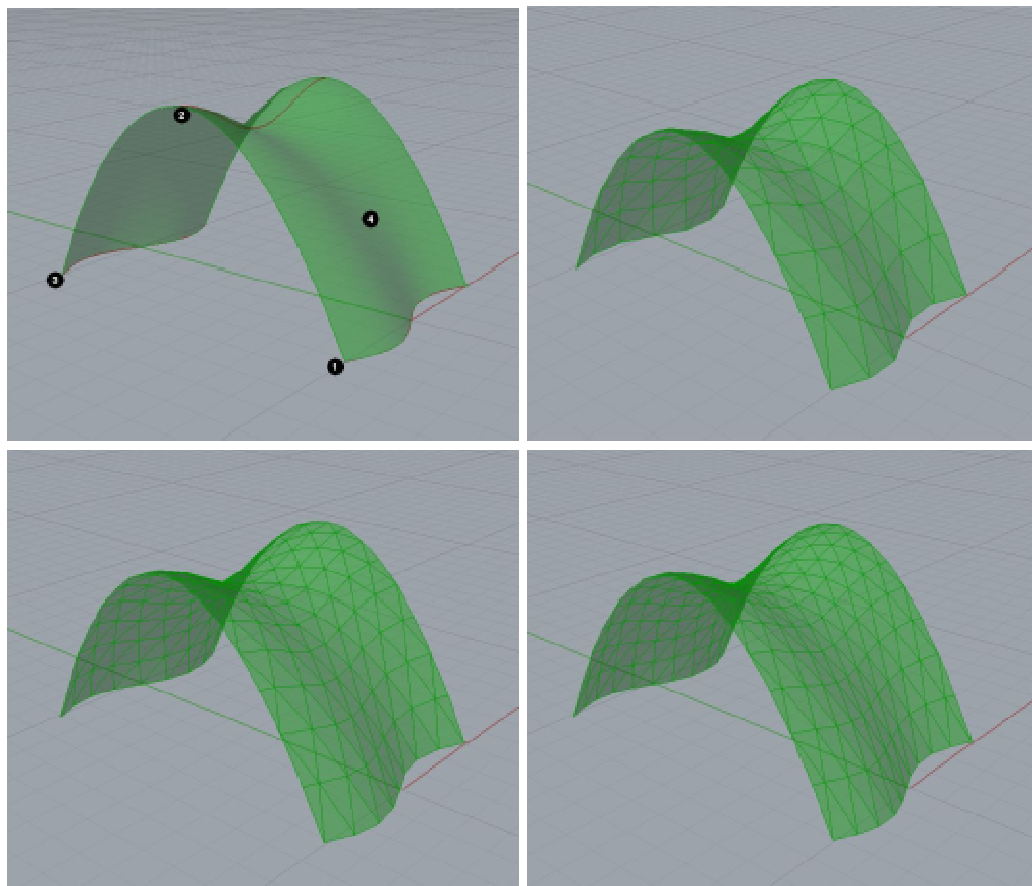


Fig. 68 [Arriba izq. Crv 1 seno/2 (1), Crv 2 coseno/2 (2), Crv 3 seno/2 (3), superficie (4); arriba der. frecuencia 12U 12V; abajo izq. frecuencia 16U 12V y abajo der. frecuencia 20U 12V], Fuente: elaboración propia.

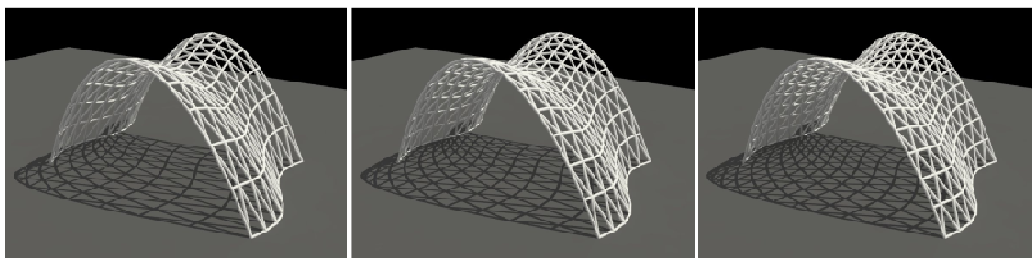


Fig. 69 [Tuberías Def 04 frecuencias, 6U 12V, 8U 12V y 10U 12V], Fuente: elaboración propia.

GRÁFICOS Def 05

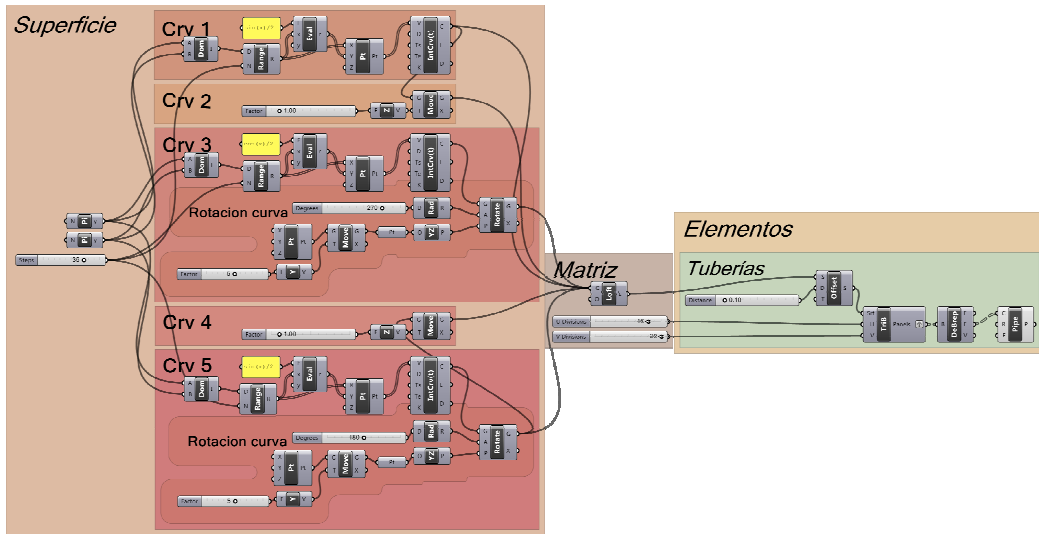


Fig. 70 [Definición 05 de Grasshopper], Fuente: elaboración propia.

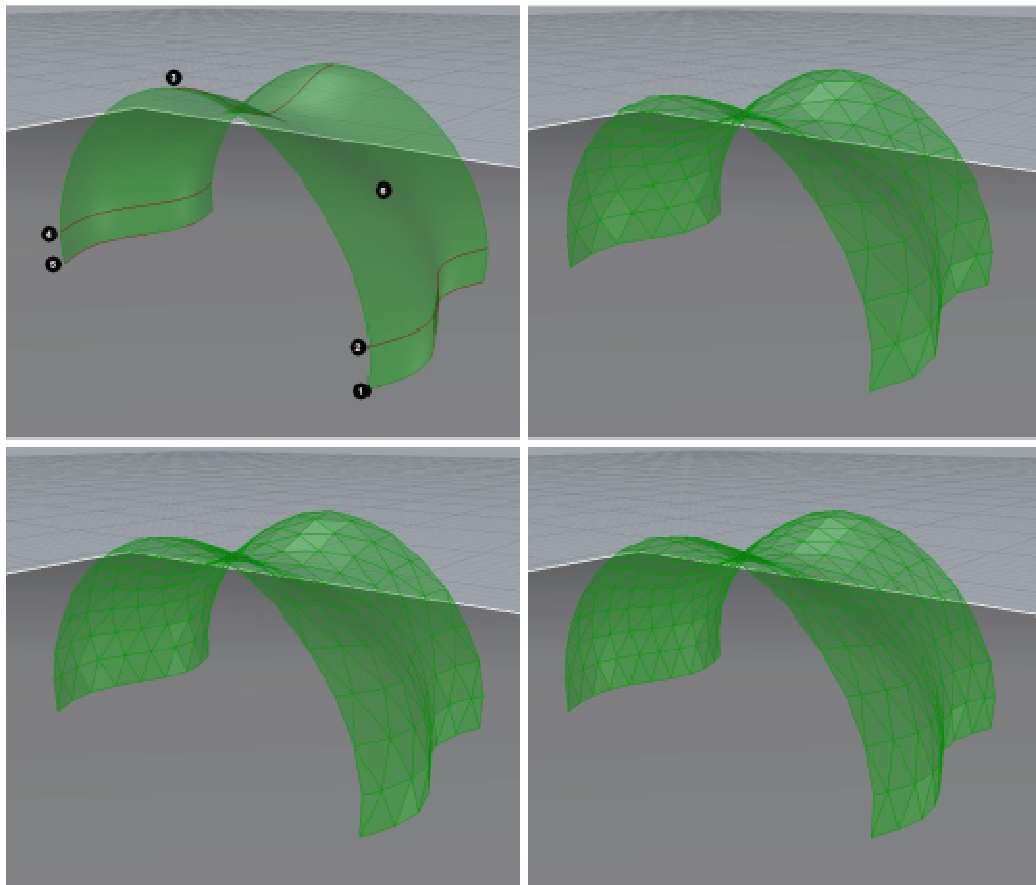
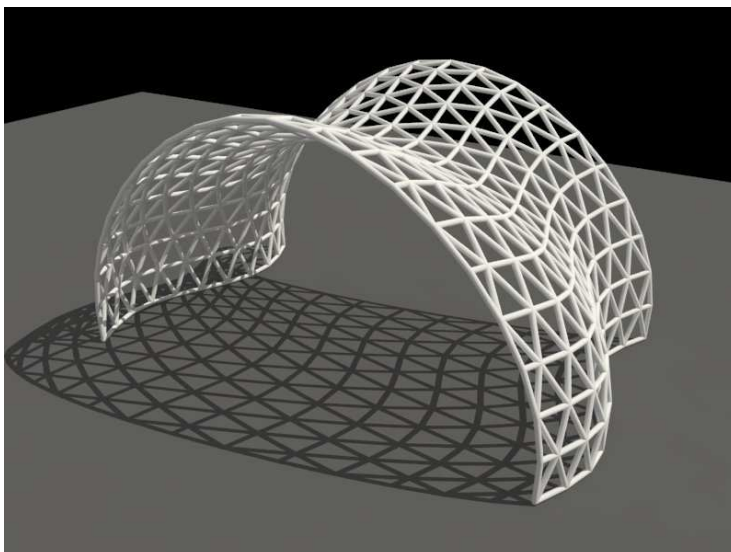
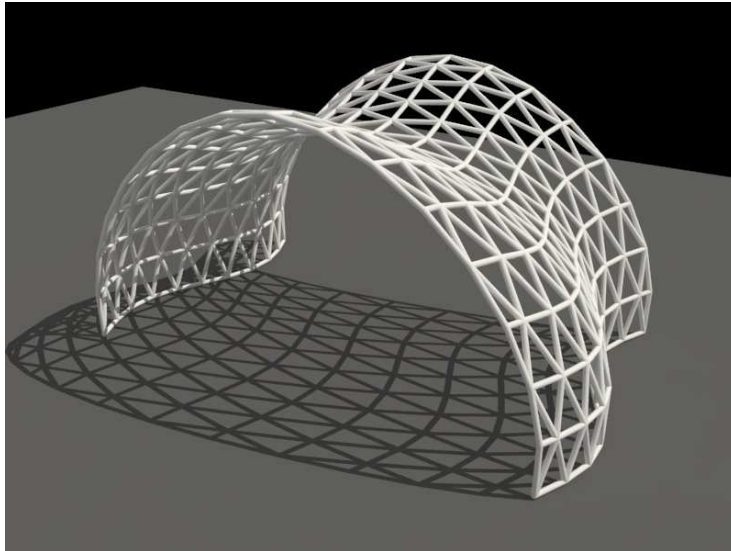
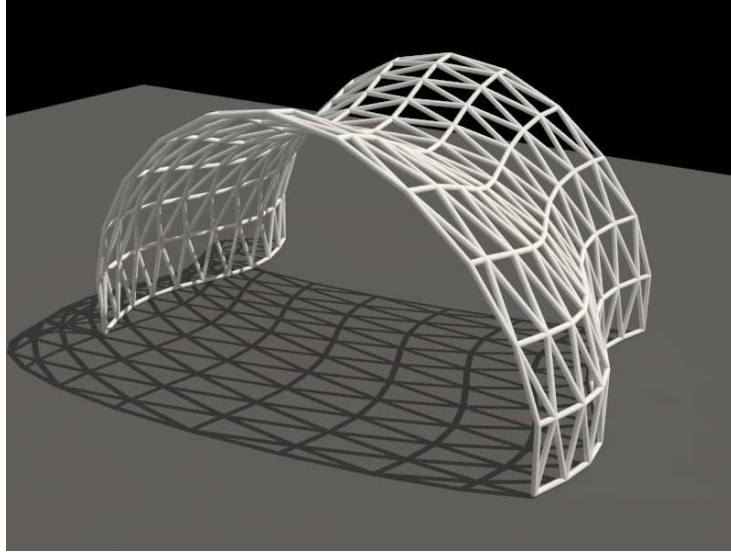


Fig. 71 [Arriba izq. Crv 1 seno/2 (1), Crv 2 seno/2 (2), Crv 3 coseno/2 (3), Crv 4 seno/2, Crv 5 seno/2 y superficie (6); arriba der. frecuencia 12U 12V; abajo izq. frecuencia 16U 12V y abajo der. frecuencia 20U 12V], Fuente: elaboración propia.





*Fig. 72 [ Tuberías Def 04 frecuencias, 6U 12V, 8U 12V y 10U 12V], Fuente: elaboración propia.*

#### 4.5. Desarrollo tecno constructivo. Estrategias factibles de fabricación y secuencia de producción

*“La raíz de nuestros problemas no es que estamos en una gran recesión, o un gran estancamiento, sino más bien en las primeras etapas de una gran reestructuración. Nuestras tecnologías están avanzando, pero muchas de nuestras habilidades y organizaciones están rezagadas. Por lo tanto, es urgente que entendamos estos fenómenos, discutamos sus implicaciones y presentemos estrategias que permitan a los trabajadores humanos avanzar con las máquinas en vez de competir contra ellas”.* La carrera contra las máquinas, Erik Brynjolfsson y Andrew McAfee (2011)

La práctica arquitectónica debe estar íntimamente relacionada con el correcto uso de los materiales lo cual mejora el comportamiento y desempeño de los mismos, no solo de manera individual, sino en relación a la disposición que se establece de los mismos dentro del conjunto o “paquete constructivo”. La fabricación digital permite restablecer una conexión estrecha del arquitecto con la materia, ya que todo proceso de diseño digital que apunte a su fabricación, requiere de pensar el material idóneo para ser procesado mediante herramientas digitales.

Esta conexión permitirá profundizar los aspectos tecnológicos que conlleva la producción arquitectónica de formas complejas, expandiendo los límites del diseño, lo que a su vez, incentivará la búsqueda y desarrollo de nuevos materiales y que estos, sean pensados, desde las lógicas del futuro maquinado al que serán expuestos.

La fabricación digital ofrece un uso más eficiente de los materiales, ya que presenta un proceso de diseño y fabricación optimizada y precisa, haciendo que tanto la estructura, como el resto de sus componentes, sea más eficiente, liviana y económica.

Por lo que, también se puede afirmar que no se puede concebir un proceso de diseño paramétrico sin conocer los métodos de fabricación digital, ya que, esto redundaría en un incremento exponencial de los costos.

En este capítulo profundizaremos en el desarrollo de las definiciones elaboradas en el anterior capítulo, con el fin de parametrizar las diferentes capas de nuestra envolvente ligera, por un lado, y a posteriori, establecer cuáles serán las estrategias que permitirán llevar adelante un proceso constructivo con herramientas digitales.

Anteriormente desarrollamos cinco definiciones, cada una con su *superficie* de origen, su *matriz* constructiva y su estructura tubular como *elemento* constitutivo. El desarrollo del resto de los elementos constitutivos implica ampliar la definición, estableciendo formulaciones para cada una de ellas, con la idea que esto posea un carácter universal aplicable a cualquier tipo de superficie. A las anteriores definiciones se le desarrollo la estructura tubular, con el fin de analizar el tamaño de sus elementos y la fidelidad en la representación de la geometría de la superficie de origen, no obstante, en esta instancia, solo avanzaremos en el desarrollo tecno constructivo de los elementos constitutivos de la envolvente ligera, de la última definición elaborada (Def 05).

La nueva definición deberá incorporar las formulaciones que permitan obtener los diferentes elementos constitutivos de la envolvente: las tuberías de la *estructura*, los *vínculos* entre la estructura y los bastidores de fijación, los *bastidores* de fijación, las *placas de cerramiento*, las *placas de terminación* y dos tipos de *revestimiento interior*. El nivel de desarrollo tecnológico del presente proceso será de una escala de detalle aceptable y enmarcable dentro de los alcances del presente trabajo. El nivel de detalle que podemos elaborar en Grasshopper es muy avanzado, pero implica definiciones

muy extensas y hardware potente que permita hacer correr la formulación matemática y sus respectivos gráficos, no obstante, las formulaciones pueden ser aplicables a más elementos de menor escala (profundización del detalle) siguiendo la misma lógica de construcción en cada definición.

#### 4.5.1. Capas. Definiciones de Grasshopper

Todas las definiciones que desarrollaremos a continuación comienzan sobre la base de una superficie equidistante a la superficie de origen. Esta equidistancia estará en función de los espesores de las diferentes capas, lo que determina finalmente un “paquete” constructivo. Las mismas deberán, al igual que en la definición de la estructura, ser particionadas a través del componente *Triangle Panels B*. Una vez que establecemos la partición, necesitamos individualizar las curvas que componen el mallado de la partición, para luego unir las y desde allí operar en función de nuestras necesidades geométricas para el modo constructivo adoptado.

##### *Vínculos*

Sobre cada curva de la malla, debemos ubicar puntos donde se situarán los vínculos. Cada segmento fue subdividido en siete partes, y se definió que, cada ante último punto cercano a cada nudo, sea la posición de cada vínculo. Estos puntos deberán estar por duplicado y equidistantes en la normal de la superficie, en función del largo que se le quiera dar al vínculo. Por último se insinúa la pieza del vínculo mediante un tubo de sección circular modificable, a través de una línea entre estos puntos (*fig. 73, 74 y 75*).

##### *Bastidores*

Los bastidores serán las piezas que permitan fijar la placa de cierre, y aportar rigidez a la misma. La unión entre el bastidor y los vínculos, es un aspecto que si bien es factible de definirlo a través de grasshopper, no formara parte del alcance del presente trabajo, dado que no es intención profundizar en ese nivel de detalle desde lo paramétrico. No obstante el tamaño y las cantidades en relación al material de conformación de los bastidores, como así también los diferentes cortes y sus ángulos, son claramente definidos. Estos bastidores están pensados para ser realizados con perfiles ángulo de alas de desiguales de 1” (contacto con placa) por 2” (nervio), no obstante estas medidas poseen *sliders* que permiten su cambio dimensional. Estos bastidores no podrán tener el mismo tamaño del mallado triangular con el cual hicimos el particionado y deberán ser de menor tamaño, tendrán un margen que permita albergar la unión y a su vez evitar que los nervios se toquen, cuando estos se sitúan en las partes cóncavas de la superficie. Con el agregado de dos *offset* internos, creamos una superficie entre estos para generar la cara de contacto con placa y una extrusión con la más cercana al triangulado original, para crear el nervio (*fig. 76 y 77*).

##### *Placas de cerramiento*

Las placas de cierre son el soporte tanto de las placas de terminación, como del material aislante y la barrera hídrica que dará la estanqueidad. Estas placas, al igual que los bastidores, también tienen una reducción dimensional respecto del particionado original ya que, los cambios de ángulo de cada pieza producto de la curvatura de la superficie, al darles espesor, impedirían realizar las juntas. Para ello se optó por una junta que permitiera absorber esta diferencia

dimensional de 6 mm, con la posibilidad de ser ajustada según necesidad. Por último a través de una extrusión cada triángulo de la malla, obtenemos las placas de cierre (fig. 78 y 79).

**Placas de terminación**

Idéntica definición a la anterior, con la diferencia en que el tamaño de la junta es mayor y se define en 10 mm ya que esta será abierta. El elemento de fijación de estas placas no se desarrolla en la definición para no ampliar más la misma, pero sería una secuencia similar a la definición de los *bastidores*.

**Revestimiento interior**

A los fines de obtener una imagen más realista de los resultados, agregamos dos definiciones que permiten obtener un revestimiento interior de paneles absorbentes que se adaptan al particionado y otro más “regular” que implica menos cortes y mayor simplicidad. La definición de los paneles absorbentes, también es idéntica a la de la placa de cerramiento, lo único que hay que modificar es el *offset* para acomodar la superficie de trabajo. En el caso de la partición más regular la definición se simplifica, teniendo un menor número de componentes (fig. 80).

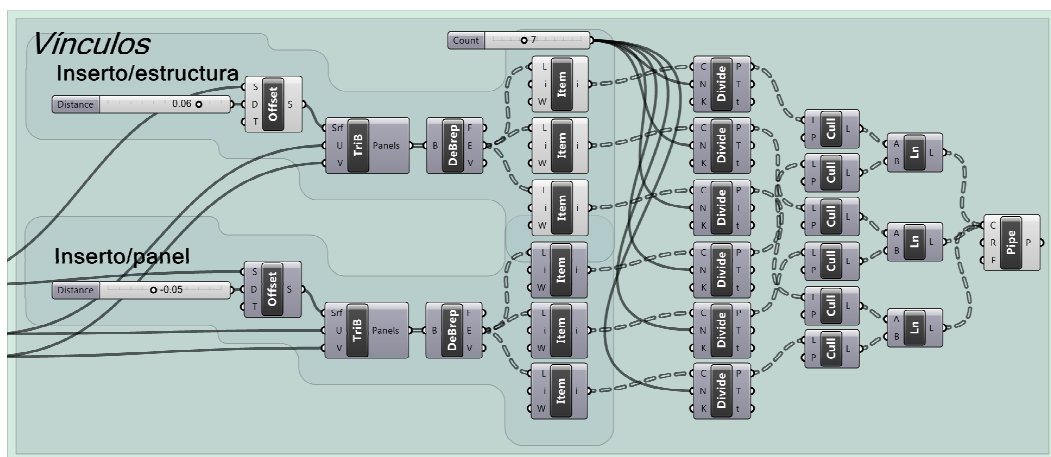


Fig. 73 [Definición para los vínculos], Fuente: elaboración propia.

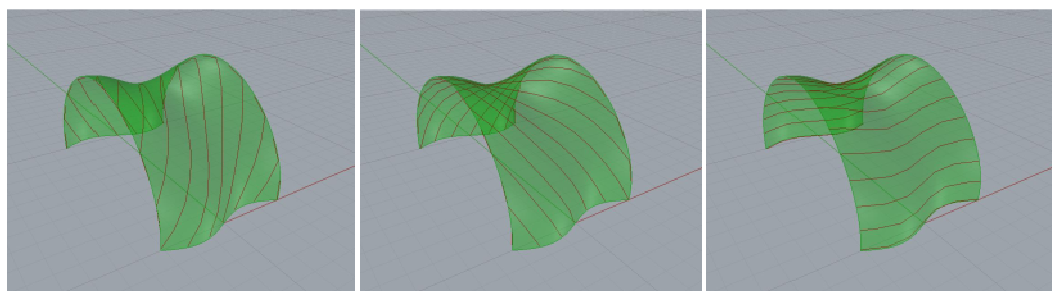


Fig. 74 [Extracción de las curvas sobre la que operar los vínculos], Fuente: elaboración propia.

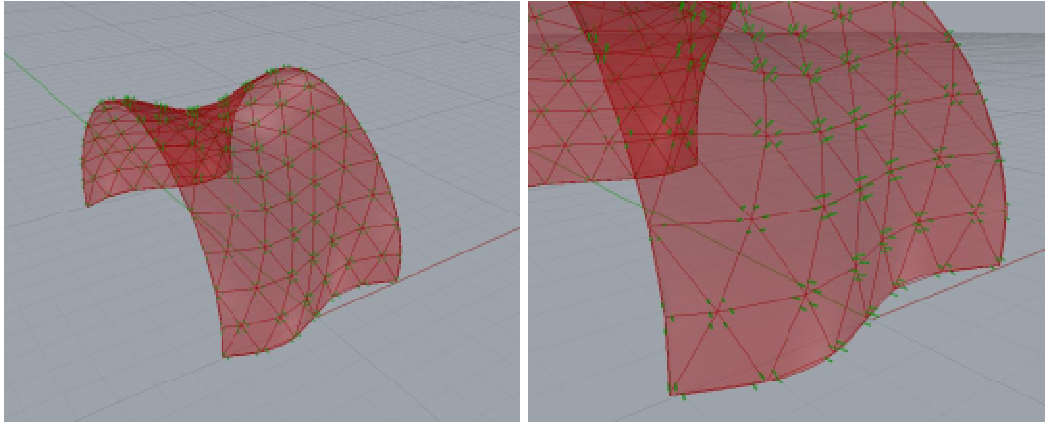


Fig. 75 [Situación de vínculos], Fuente: elaboración propia.

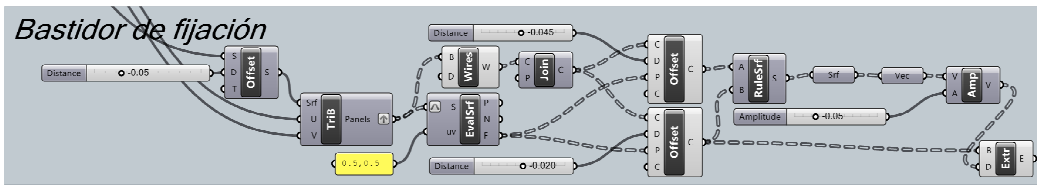


Fig. 76 [Definición para los bastidores], Fuente: elaboración propia.

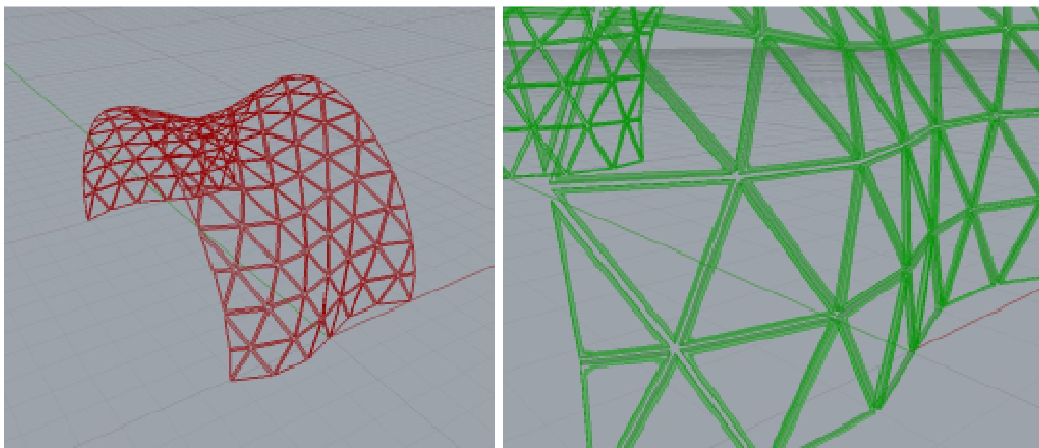


Fig. 77 [Bastidores], Fuente: elaboración propia.

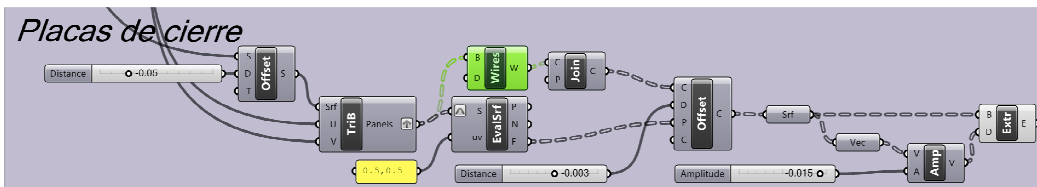


Fig. 78 [Definición para las placas de cierre], Fuente: elaboración propia.

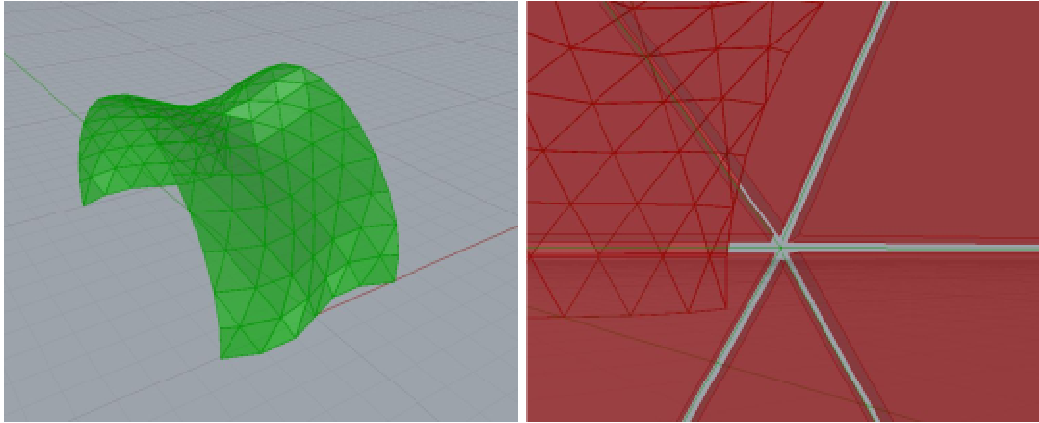


Fig.79 [Placas de cierre], Fuente: elaboración propia.

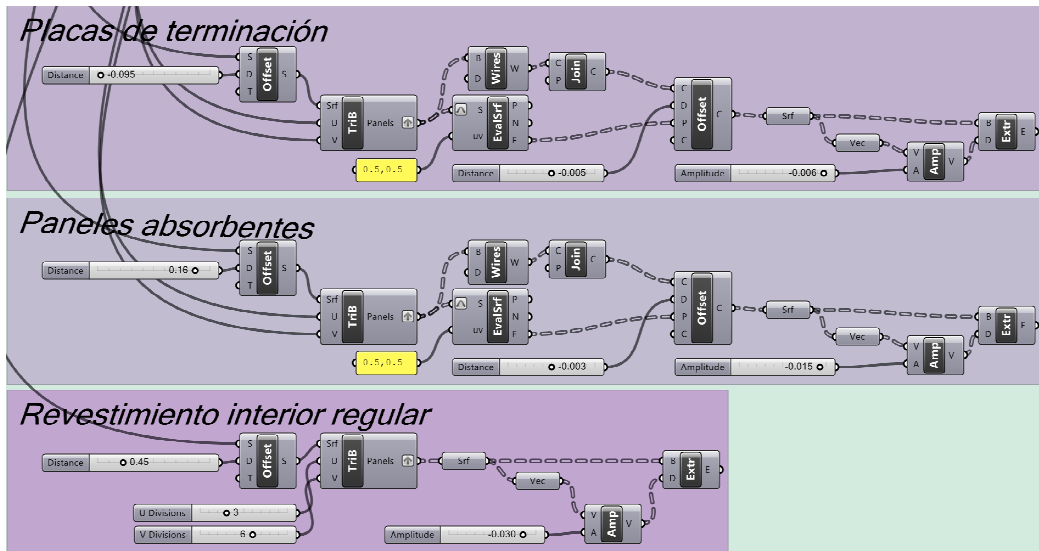
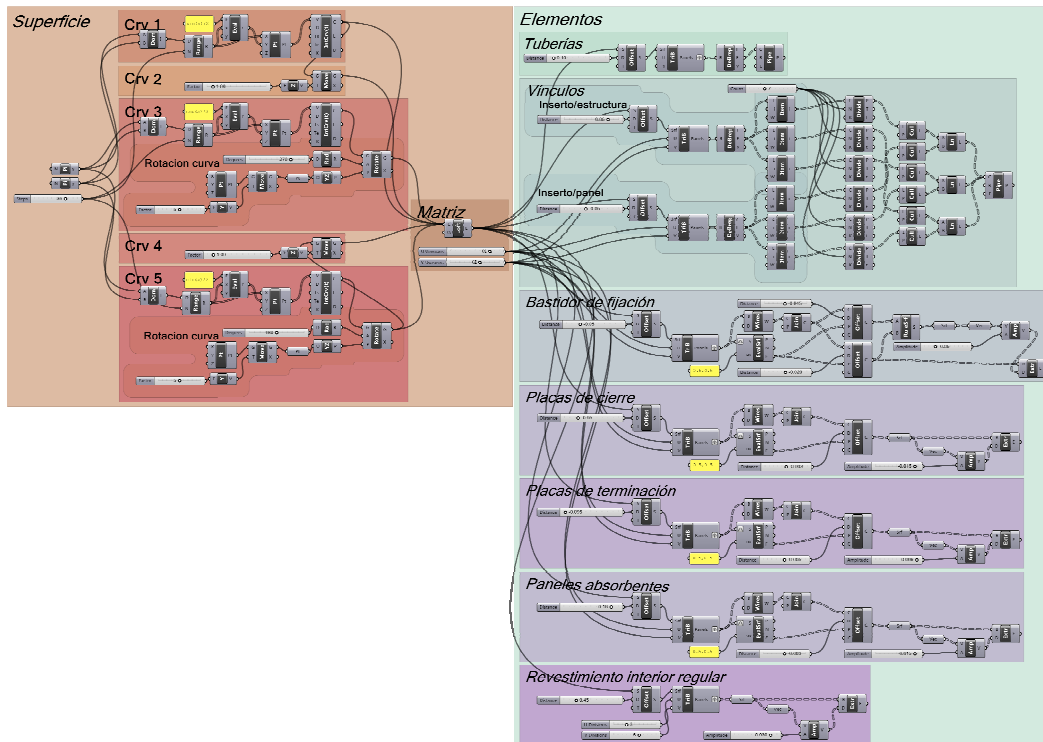


Fig. 80. [Terminaciones], Fuente: elaboración propia.

## Def 05, Superficie de doble curvatura (bóveda entre cinco curvas) completa



Fuente: elaboración propia.

### 4.5.2. Elección de materiales

Una de las premisas del presente trabajo era resolver el modo constructivo adoptado con materiales de acceso regular en el mercado local. A su vez esos materiales deben contemplar la posibilidad de ser trabajados con herramientas digitales. A sabiendas de las restricciones de dicho mercado respecto de lo que sucede en otras latitudes, la elección de un modo constructivo de envolvente ligera multicapa, nos aseguraba accesibilidad a diferentes opciones de materiales (mayormente en formatos de placas y láminas) y por otro lado, utilizando correctamente la cantidad y disposición de capas, se cubre los requerimientos para el confort y requiere menores recursos en la conformación de su estructura (menor peso y adopción de formas eficientes). Si bien todos los detalles constructivos no se encuentran desarrollados en la definición de *Grasshopper*, se elaboran unos gráficos (detalles constructivos) en base al modelo paramétrico, que permitan verificar el modo constructivo propuesto.

#### *Estructura. Tuberías*

Para simplificar el proceso se optó por una estructura compuesta por tubos de acero de sección circular, para que permita resolver los encuentros entre barras de manera más fluida y disponiendo siempre de la misma inercia de la pieza, sea cual fuera la posición que esta tenga en relación a los ejes X, Y y Z. El alcance del presente trabajo no profundiza en la unión entre barras (nudo), pudiendo esta adoptar diversas configuraciones. Existen varios modos de resolver el nudo, que permiten realizar montajes más o menos precisos, ya sea a través de una pieza que oficia de vínculo entre barras o, directamente las barras se encuentran en un punto, requiriendo de



cortes precisos y de ángulo variable. La concordancia entre las diferentes barras, se da por marcas de coincidencia que se hacen a tal efecto con el fin de asegurar el posicionamiento correcto entre piezas y luego mancomunarlas mediante soldadura continua.

En relación al tamaño de las secciones utilizadas para las barras, se hizo una estimación en virtud de las distancias promedio entre las mismas, por lo que se adoptó un diámetro de 100 mm / 4". Si bien esta dimensión es modificable dentro de la función, necesitaríamos someter el modelo a un análisis de carga, para poder realizar el cálculo de la sección necesaria y el espesor de pared de las barras.

#### *Vínculos*

Al igual que con la estructura, el vínculo está hecho con un tubo de acero de sección circular, que termina con unas aletas que disponen de un corte lineal en donde se alberga el nervio del bastidor, para luego ser atornillado. En la definición solo se representa el tubo con su posicionamiento, diámetro y largo. Estas tres variables son modificables según necesidades.

#### *Bastidor de fijación*

Este elemento es un marco metálico de sección "L", pudiendo ser realizado tanto en aluminio como en chapa de acero. Si bien el aluminio es más liviano, conformar el marco precisa de elementos que vinculen cada pieza del triángulo para mancomunarlos, por lo que se adopta una chapa de acero plegada y en donde las uniones entre piezas se realiza mediante soldadura. Como comentáramos anteriormente, la definición admite el control de las dimensiones de ambas alas del perfil. Se utiliza una chapa de 1,6 mm de espesor (fig. 81 y 82).

#### *Placas de cierre*

Las placas de cierre son el corazón del modo constructivo adoptado, ya que en ellas fijamos el aislante térmico y el aislante hídrico. Existen varias opciones de material para utilizar, siendo la madera el material más idóneo en términos de trabajabilidad, peso y estabilidad dimensional. Las opciones que se evaluaron son el OSB y el multilaminado fenólico, optando por este último en un espesor de 15 mm. La fijación de la placa de cierre al bastidor se realiza mediante tornillos autoperforantes cabeza fresada que permite que los mismos queden al ras de la superficie de la placa y facilitar la posterior impermeabilización. El aislante térmico elegido fue la celulosa proyectada que permite adaptarse fácilmente a la forma proyectada y sin la necesidad de depender de fijaciones. Este material se obtiene de los excedentes de la producción de papel, que se trituran y desfibran, para luego ser mezclado con sales bóricas, que dotan al material de propiedades ignífugas, a la vez que es insecticida y fungicida. Este material se aplica proyectándolo sobre la superficie a aislar, hasta logra el espesor requerido, que en nuestro caso será de 50 mm. Por último los aislantes hídricos (barrera corta vapor y aislante exterior) se resuelven con una lámina de fibras de polietileno de alta densidad (Tyvek®) para la BCV y una membrana líquida elastómerica, a aplicar sobre la superficie exterior, sellando las juntas entre placas con vendas de fibras sintéticas de alta resistencia a la tracción para dar continuidad a toda la superficie y así lograr, junto a la pintura impermeabilizante, una membrana armada de alta resistencia.

### *Placas de terminación*

Finalmente, las placas que darán la finalización de la superficie deben estar caracterizadas por un material libre de mantenimiento, como por ejemplo el composite de aluminio o la roca sinterizada, siendo esta última la elegida para el desarrollo de la propuesta, en un espesor de 6 mm. Si bien presentan similares prestaciones, la roca sinterizada, (*Neolite, Silestone, Corian, etc.*), brinda un mejor detalle de terminación para la junta abierta, ya que el corte necesario que requiere cada pieza, en el composite, deja al desnudo las capas constitutivas del mismo, teniendo como resultado una terminación poco feliz desde el punto de vista estético. La fijación de estos paneles se hará mediante unos perfiles “Z”, a través de cintas doble faz tipo *VHB APT* de 3M, y que también fija, del mismo modo, los perfiles al panel de cierre (fig. 83).

### *Paneles absorbentes / Revestimiento interior*

A modo de alternativas de configuración del espacio interior, se proponen dos tipos de terminación interior, por un lado placas fono absorbente de yeso perforadas, con agregado de velo de fibra acústica aplicado en su cara posterior, tipo *KNAUF Cleaneo Akustik Round 8/18r*, que se utilizan siguiendo el particionado triangular; y por el otro un revestiendo interior más regular, está compuesto por una estructura de perfiles de acero galvanizado de soleras y montantes de 70mm, con una placa de roca de yeso de 12.5 mm, tipo *Knauf W111.AR*.

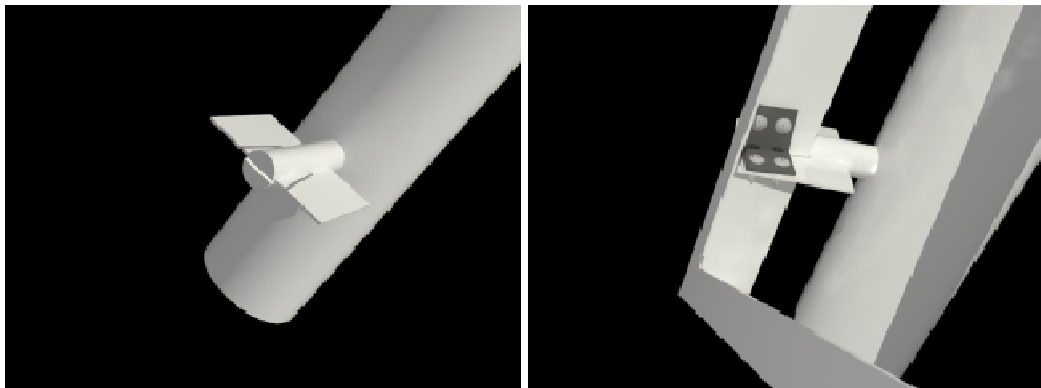


Fig. 81 [Vínculo y su unión con el bastidor], Fuente: elaboración propia.

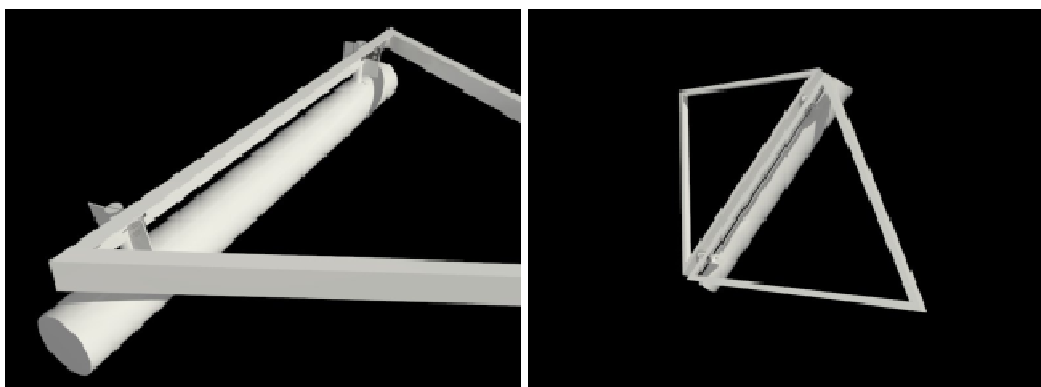


Fig. 82 [Barra de estructura, vínculos y bastidores], Fuente: elaboración propia.

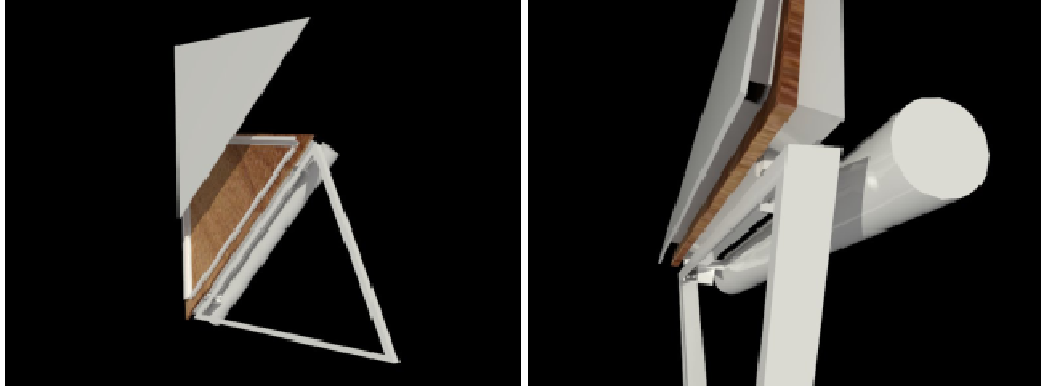
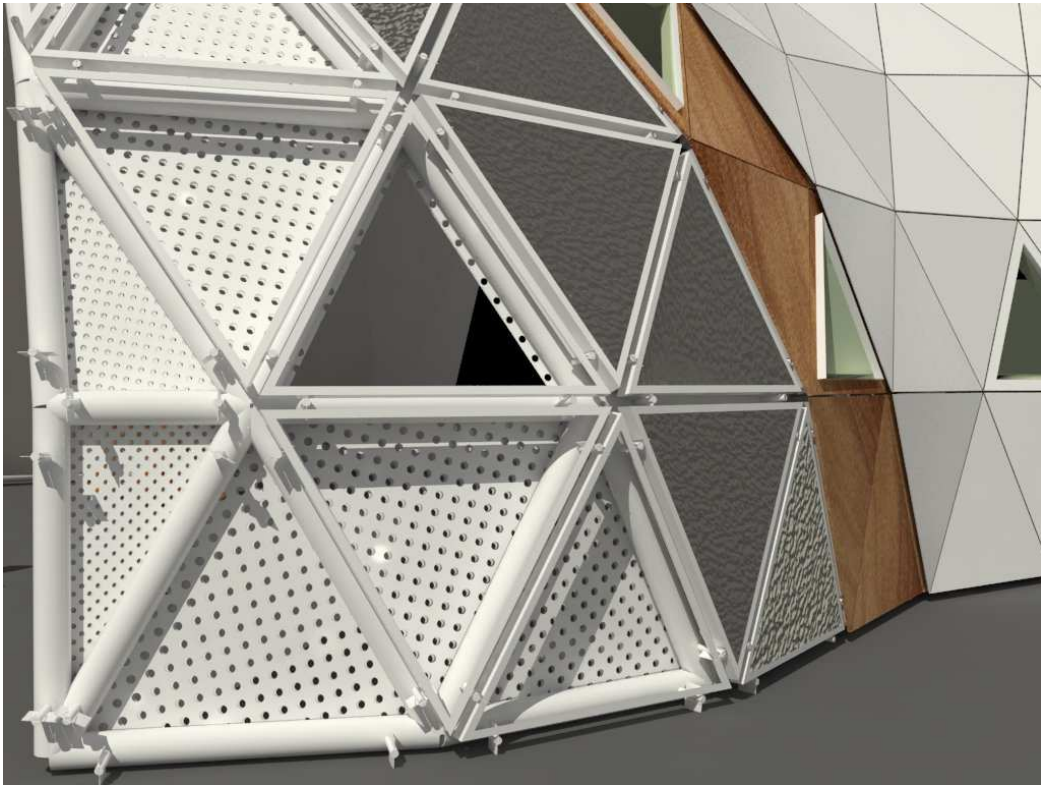


Fig. 83 [Capas de la envolvente ligera], Fuente: elaboración propia.



Despiece del conjunto. Fuente: elaboración propia.

#### 4.5.3. Proceso de fabricación. Maquinado y producción

Como dijimos anteriormente, el modo constructivo buscado es acorde a las posibilidades de producción que presenta la industria de la Ciudad de Córdoba (Argentina). En nuestra ciudad existen diversos tipos de herramientas de corte laser CNC, de las cuales utilizaremos aquellas que nos permitan cortar tubos y perfiles (estructura y bastidores), como así también bancos de corte laser CNC, más conocido

por Router, que nos permitirán realizar los cortes de los materiales laminares (multilaminado fenólico y piedra sinterizada) (fig. 84 y 85).

El primer paso es generar los archivos para el maquinado, estos, deberán incluir aparte el corte mismo de la pieza, el numerado de las mismas y las marcas de coincidencia entre piezas. Todo este nomenclado se debe realizar dentro de la definición de Grasshopper, no obstante, en el presente trabajo, no ha sido desarrollado. Los archivos de corte para tubos y perfiles, se exportan en un formato 3D (.stl, .obj, etc.), mientras que los archivos para corte 2D deben ser previamente ordenados para administrar con eficiencia el uso del material. Esto implica “acomodar” cada una de las piezas dentro de los formatos comerciales de cada material. Existe software optimizador de corte 2D, que administra automáticamente las piezas dentro de una superficie requerida, lo cual facilita enormemente esta tarea. Para el corte 2D, necesitaremos generar archivos de formato vectorial, con un amplio espectro de formatos posibles de utilizar (.dxf, .dwg, .ai, .svg, .pdf, etc.).

Una vez realizado el *input* para las maquinas, se procederá a el corte de todos los elementos, para luego ser ordenados y montados según su posicionamiento.

El proceso productivo estará directamente relacionado con la cantidad de ensamblaje a realizar in situ. El montaje podría ser hecho totalmente in situ, lo que siempre demanda mayores recursos, por lo que es conveniente pre ensamblar el mayor volumen posible en fábrica. Es lógico que la forma de la propuesta que se está desarrollando, es poco factible de ser realizada íntegramente en una planta fija, básicamente por las dificultades de traslado, pero si se deben contemplar alternativas de fragmentación de la forma en cuestión, en tramos o porciones, sobre todo de la estructura tubular, lo que permitiría achicar los tiempos de montaje in si situ.



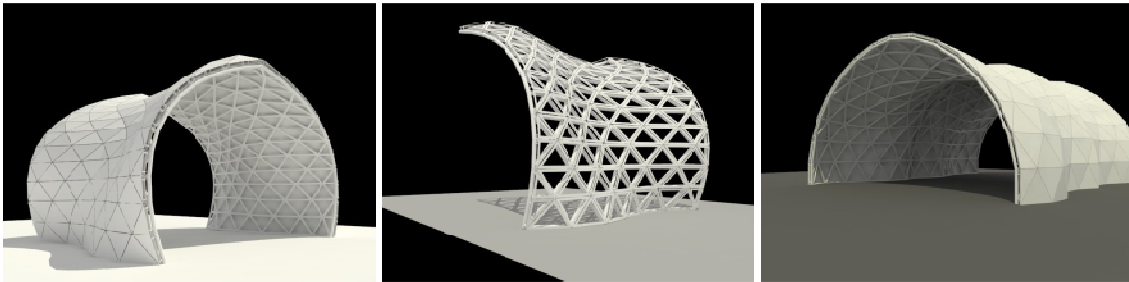
Fig. 84 [Maquina CNC de corte láser para tubos BAISHENG LASER], Fuente: <https://bit.ly/3rjCSqY>.

Una vez realizadas las tareas de maquinado digital, el resto del proceso se realiza con herramienta convencional, como ser; cordones de soldadura en estructura tubular y bastidores, atornillado de bastidores y placas de cierre, impermeabilización de las placas de cierre, proyectado de aislación térmica y montaje de revestimientos de roca de yeso.

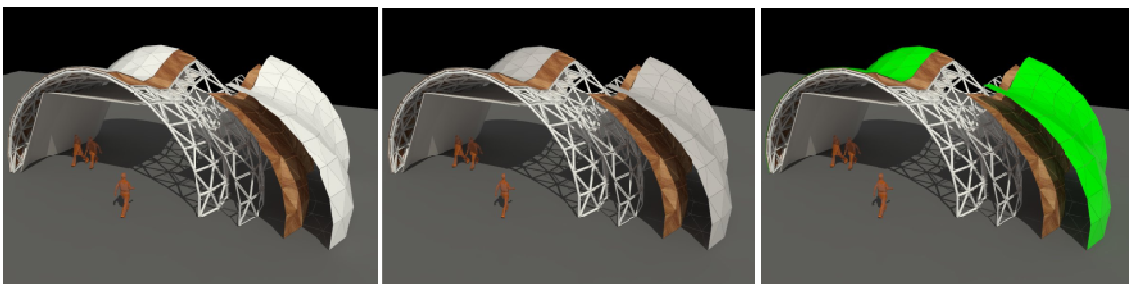


Fig. 85 [Router CNC Laser para corte de láminas STANSER], Fuente: <http://bit.ly/3oNGLsX>.

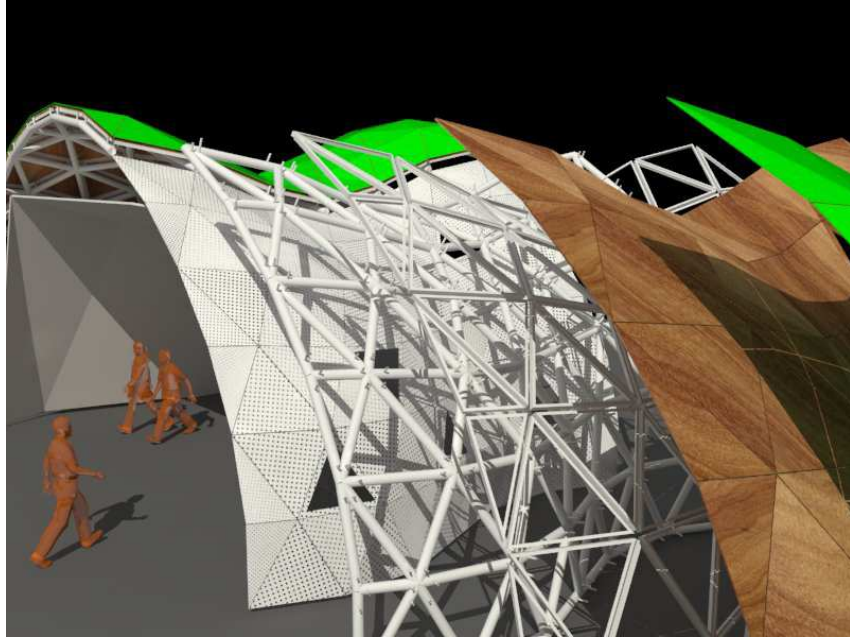
#### 4.5.4. Gráficos. Detalles



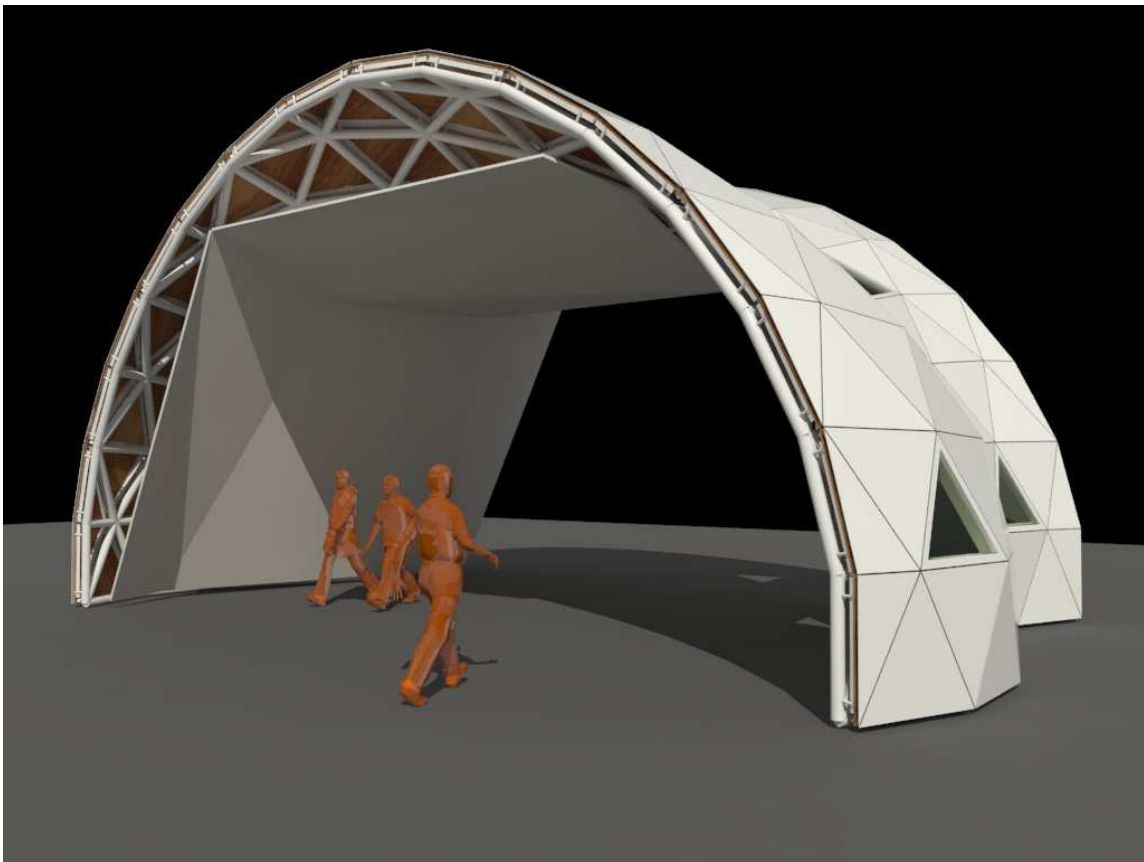
*Exploraciones formales previas.*



*Despiece y exploraciones cromáticas*

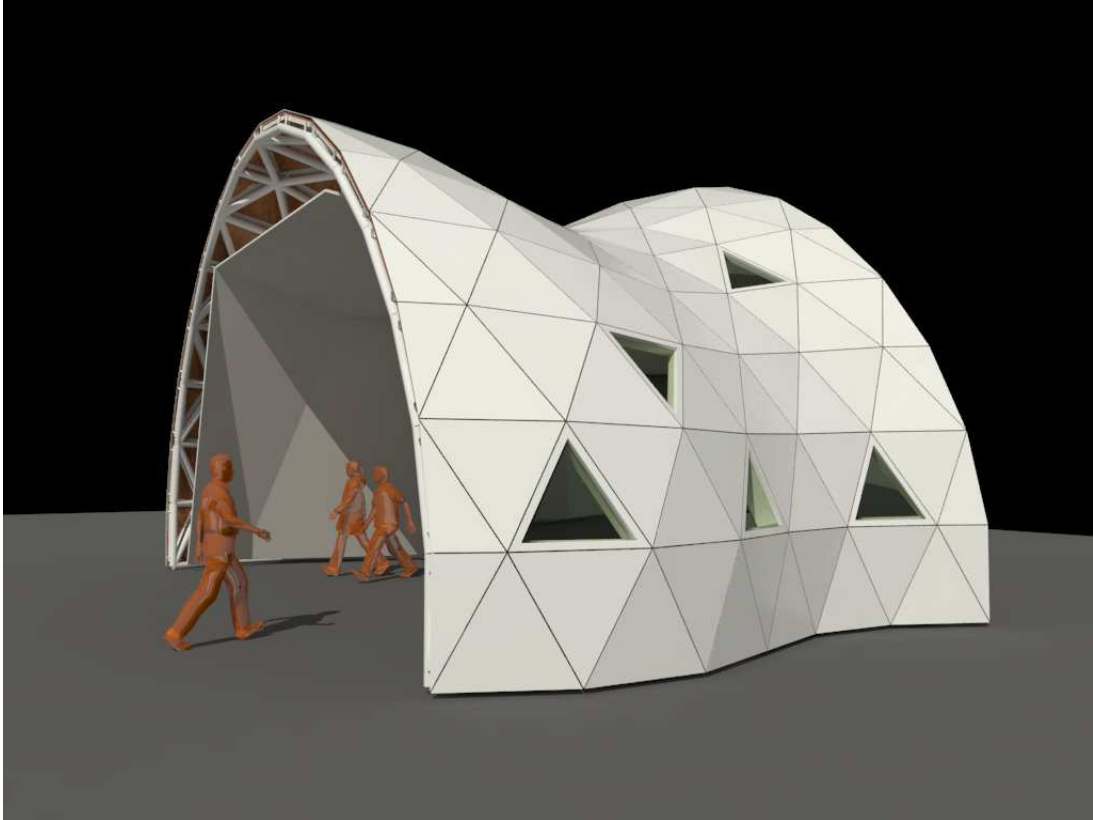


*Despiece y exploraciones cromáticas*



*Propuesta final*





*Propuesta final*



*Propuesta final*



#### 4.6. Cierre del capítulo

*Caminante no hay caminos, se hace camino al andar.* Antonio Machado (1912)

Las tecnologías computacionales y digitales renuevan profundamente el panorama de la producción arquitectónica. El parametricismo modifica lo que entendemos tradicionalmente como proceso de diseño, no solo desde la lógica de como pensamos el espacio, sino también de cómo hacemos realidad ese espacio. Esa lógica presenta una actitud frente al desarrollo de los procesos, que se ubica en las antípodas de aquellas teorías y métodos con las que se creaban las prefiguraciones y conformaciones morfo euclidianas. El hombre siempre ha estado en la búsqueda de comprender y profundizar el conocimiento de todo lo que lo rodea, y en ese sentido, las formas naturales siempre han sido de interés y objeto de estudio, descubrir y reconocer aquellos fenómenos que otorgan las infinitas configuraciones formales de la naturaleza, no solo permitió reconocer el porqué de las características intrínsecas de dichos fenómenos, sino que a través de esos descubrimientos, nos fue posible la evolución tecnológica de nuestros días. Las matemáticas, gracias a la aritmética y la geometría, se configuro como herramienta fundamental para el logro de estos avances. Software y hardware evolucionando en conjunto, dieron soporte a esta evolución, en donde la arquitectura ya no es ajena a ese conocimiento y echa mano de estos avances, para reconfigurar lo que entendemos por producción arquitectónica. Las geometrías complejas comienzan a formar parte del repertorio de herramientas de diseño, gracias al desarrollo específico de software de diseño que nos permite tener el control de geometrías, que por complejas, conllevan un gran volumen de información, que solo la tecnología digital actual, nos puede garantizar manejar tamaño información.

En el campo netamente productivo, estamos experimentado procesos acelerados de reconversión digital de la maquinaria productiva, y esta, a su vez incide en los procesos de diseño. Si bien la producción aun es incipiente, es principal escollo, sobre todo en estas latitudes, radica en la formación integral de nuestros futuros profesionales. Esta reconversión, es ineludible, ya que optimiza la producción mejorando los beneficios, por lo que, dejar fuera de este escenario a los diseñadores, es inimaginable, debiendo las academias repensar sus lógicas de enseñanza, ya que no solo los actuales estudiantes están siendo formados en gran medida bajo lógicas de geometría euclidiana, sino que la mayoría de su planta docente fue formada bajo estos cánones. Por otro lado la instantaneidad comunicacional permite ver que, aun en otros escenarios, otros modos de hacer arquitectura son posibles y que las formas libres tienen su correlato tecnológico que lo hace realidad.

En definitiva, profundizar el conocimiento que nos permite afrontar procesos de diseño bajo entornos paramétricos, puede ser una tarea motivada por el interés personal y que se forja a fuerza de manuales, tutoriales y foros en la red, pero que desde la perspectiva de la academia, como aquella que se adelanta a los hechos y es protagonista de los avances de la sociedad, debería asumir este proceso de reconversión tecnológica y adecuar su mirada sobre los modos de producción arquitectónica.

# *C*apítulo **5** - *C*onclusiones

## Capítulo 5 – Conclusiones

### 5. Recapitulación

#### 5.1 Síntesis conceptual

El presente trabajo se inicia, con el desarrollo de conceptos que forman el *corpus* teórico de este y que dan comienzo al capítulo 1. Estos conceptos nos aproximan a la idea del estrecho vínculo entre geometría y tecnología; y como la evolución de estas permite, a través del manejo de un gran volumen de datos, la creación de formas complejas mediante el modelado en tres dimensiones y su posterior aplicación a diferentes procesos productivos.

Posteriormente en el capítulo 2, vimos que mediados del siglo pasado, la arquitectura como disciplina toma nota, no solo de los modos de producción de otras áreas del diseño (automotriz, naval, aeronáutico, etc.), sino también se nutre de la intensa actividad científica y filosófica de la época.

Dentro de ese contexto, la aparición de software de modelado y nuevos materiales, hacen que en la arquitectura, emerjan paulatinamente nuevas corrientes de diseño. Muchas de estas exploran nuevos horizontes formales, a través de geometrías complejas soportadas digitalmente, que demandan nuevos materiales y nuevas técnicas capaces de reproducir, no solo dichas formas, sino también hacerlo de manera eficiente. A su vez, en un camino inverso, algunas experiencias de diseño crean nuevas formas a través del uso de materiales nuevos o no convencionales. Es decir, nuevos diseños hacen nuevas tecnologías, nuevas tecnologías hacen nuevos diseños. La tecnología digital en arquitectura comenzó como una herramienta de servicio (gráfica de representación, documentación, etc.), luego se transformó en una herramienta funcional (análisis, evaluación, etc.) y hoy interviene de manera activa en los procesos de diseño, y en muchos casos, se torna completamente indispensable, ya no solo para documentar y analizar, sino también para fabricar digitalmente.

Si bien la fabricación digital es un método incipiente, la realidad indica que cada vez son más los proyectos que se idean y trabajan en función de ella. Existen muchos ejemplos de las más diversas latitudes, con diferentes usos, condicionantes, materialidad y recursos, todos ellos desarrollados con métodos que se encuentran inmersos en lógicas de producción CAD/CAM.

Muchas industrias, sobre todo aquellas que producen bienes de consumo con obsolescencia programada, readecuan sus procesos al ritmo de los avances tecnológicos, por lo que cada salto evolutivo dentro del sector, le genera un menor impacto en sus procesos. Como contraparte, hay industrias rezagadas respecto de estas otras, no solo por cuestiones económicas, sino principalmente para mantener el status quo de los procesos que utilizan comúnmente.

Para todo sector productivo, readecuar los procesos, conlleva aparte de lo antes mencionado, una capacitación y actualización de los recursos humanos intervinientes, siendo pocas las estructuras que están dispuestas a realizar modificaciones en sus procesos, sobre todo si estos aún, cierran la ecuación económica.

A pesar de que hay sectores a nivel local y nacional, que se encuentran en esta situación, el escenario se presenta por demás estimulante, ya que en muchos casos resulta más fácil incorporar nuevas formas de trabajo que readecuar las existentes.

Es un terreno particularmente fértil para la incorporación de modelos de innovación y desarrollo, básicamente, porque algunos de los *tipos* o *modos* de producción

arquitectónica explicados en el presente trabajo, tienen la posibilidad de contar dentro del ámbito local, con el instrumental necesario para su elaboración.

La Ciudad de Córdoba (Argentina) posee una larga tradición como polo metalmeccánico a nivel nacional, regional y local, por lo que, la mayoría de las industrias de dicho sector tienen herramientas digitales dentro de sus métodos de producción, y si bien estas están circunscriptas a una cadena productiva específica y de difícil disponibilidad, existen numerosas PyMEs que se especializan en un rubro en particular (como por ej. corte laser, waterjet, etc.), brindando un servicio específico, que permite acceder al instrumental necesario, en el momento preciso.

## 5.2 Ensayo proyectual. Reflexiones

La decisión de trabajar con envolventes ligeras no fue arbitraria. Como ya decíamos en el capítulo 3, estas ganan espacio dentro del medio, gracias a sus ventajas constructivas por un lado, (mayor rapidez, mejor respuesta al confort, menor desperdicio, etc.) y a la mayor aceptación del medio, por el otro.

Cabe recordar que el contexto de producción arquitectónica local, está sumamente arraigado a los modos constructivos tradicionales, generalmente pesados y realizados por vía húmeda. Morteros, mampuestos y hormigones son los materiales que predominan en la construcción local y los diferentes modos constructivos ejecutados con estos, son percibidos como sólidos y permanentes.

Contrariamente, los sistemas livianos, siempre tuvieron el prejuicio de ser débiles y de corta duración. Esta valoración perceptual, junto a la escasa mano de obra formada en las técnicas propias del modo, limitaron su desarrollo y uso generalizado.

Paulatinamente, la evolución tecnológica nos provee de nuevos materiales y técnicas, convirtiéndolas en una solución eficaz para construir. Rapidez, confort y eficiencia son unas de las principales características para lograr una calidad constructiva, similar o superior a la de los modos tradicionales.

Este desarrollo evolutivo, derivó en lo que conocemos como formato multicapa, donde las envolventes resueltas de este modo, poseen varias ventajas que nos otorgan flexibilidad la hora de diseñar; primero, tiene la virtud de admitir variadas configuraciones con distintos tipos de materiales; segundo, se adapta a muchos tipos de requerimientos y exigencias; y tercero, la intercambiabilidad de elementos de las diferentes capas, nos da la ventaja de evaluar opciones sin depender de uno en particular, sobre todo, en un contexto que posee una oferta de universo limitado.

Definido el tipo de envolvente, el paso siguiente fue definir el software y la estrategia a utilizar para desarrollar la idea. Rhinoceros junto a Grasshopper, fueron las herramientas seleccionadas e implementadas en el ensayo proyectual. Estas herramientas han demostrado tener una curva de aprendizaje ascendente y un entorno sumamente amigable, lo que permite avanzar con fluidez en su conocimiento y manejo.

La experiencia previa con el software citado es dispar. Existe un conocimiento y manejo previo de Rhinoceros (usuario por más de 7 años) por un lado, y un breve contacto con Grasshopper a través de un curso de posgrado, por el otro. Dado que un software (Rhinoceros), es el que aloja a otro (Plug-In, Grasshopper), el conocimiento previo del primero facilitó la tarea de aprendizaje del segundo. La familiaridad con las entidades y comandos de Rhinoceros, fue de mucha utilidad, ya que si bien este no posee características paramétricas, dispone de una amplia variedad de comandos que permite resolver casi cualquier geometría.

Finalmente, en el capítulo 4, se lleva adelante el ensayo proyectual, que no solo propició el desarrollo del tema de la presente Tesis, sino que insto a profundizar el conocimiento y la formación en programación visual con Grasshopper.

La programación visual, responde a lógicas sistémicas, que requieren un ejercicio de razonamiento distinto que el del diseño analógico, requiere de la visualización abstracta de un sistema de relaciones entre diferentes, acciones, conceptos, formas, objetivos, etc., que se interrelacionan, este ejercicio previo, es el llamado metadiseño. El metadiseño nos da un marco de relaciones que establecemos previamente para interpretar un problema, es un guión que nos da la posibilidad de trabajar de manera flexible y comenzar con las exploraciones previas de las formulaciones paramétricas. Una o más definiciones pueden tener como base el mismo metadiseño y la mayoría de las veces, la prueba y el error es, lo que termina configurando cada definición.

Existen al menos dos formas de concebir una definición paramétrica; la primera, es generar los objetos en Rhinoceros (curvas, superficies, volúmenes, etc.), para luego exportarlos y parametrizarlos en Grasshopper; la segunda, consiste en no depender de entidades de Rhinoceros y crear todas estas, directamente a través de formulaciones matemáticas y componentes en Grasshopper. Esta última opción fue la que se decidió implementar, ya que brinda un mayor control sobre la forma del modelo, al estar totalmente parametrizada por una definición, sin intervención de entidades graficas exportadas. A su vez, exige a profundizar sobre cómo construir diferentes entidades desde cero, bajo un concepto matemático, que en este caso, fueron las curvas definidas por las funciones trigonométricas seno y coseno.

Desde un comienzo, el proceso empezó a abrir diferentes vías de exploración, en la medida que la superficie iba evolucionando en grado de complejidad, en virtud de ir incorporando más curvas trigonométricas, para conformar el camino por donde fluye la superficie. Está fue mutando de una superficie reglada simple, a una superficie de doble curvatura más compleja, con el fin, de que esta última proporcione características estructurales que sean beneficiosas para la estabilidad.

Las distintas superficies obtenidas, luego de ser particionadas, fueron descompuestas y desplazadas para formar los diferentes estratos de una envolvente multicapa. Las equidistancias entre los diferentes estratos intervinientes, fueron definidas en función de los materiales elegidos para su composición; estas equidistancias tienen la posibilidad de ser modificadas, lo que permite optar por materiales con otras características dimensionales o de aplicación.

La definición paramétrica desarrollada, tiene la intención de que pueda ser aplicable a cualquier envolvente ligera, independientemente de su forma y su escala, permitiendo optar por tipo y cantidad de origen y el modo de particionado de la superficie, a través de diferentes componentes de Grasshopper. La definición es abierta y no solo permite generar otros tipos de superficie, sino que constructivamente, es factible seguir incorporándole capas.

Si bien, en este desarrollo falta profundizar algunos aspectos, como ángulos de encuentro entre anclajes y estructura principal, el cálculo dimensional de los diferentes elementos compositivos y aspectos relacionados al proceso de montaje, el trabajo es un punto de partida para elaboración de envolventes ligeras bajo entornos paramétricos, que colabora para que en un futuro, se continúe, se profundice y promueva el desarrollo de técnicas constructivas de fabricación digital.

### 5.3 Verificación de los objetivos

Una serie de interrogantes se realizaron al comienzo de la investigación, de los cuales podemos decir lo siguiente:

En relación al conocimiento profundo de las geometrías complejas y si este repercute en un uso más eficiente de los materiales, podemos decir, que dicho conocimiento es complementario de otros saberes que implica el diseño arquitectónico. Este conocimiento debe de ser integrado tanto al conocimiento que se tiene de los materiales y su comportamiento, como de las herramientas y sus posibilidades. La geometría contribuirá a un uso eficiente de los materiales, pero por sí sola no podrá aportar soluciones de manera integral. En definitiva, nos aportará diversidad formal, ductilidad en la construcción de esta y una reproducción exacta de la idea, pero necesitara lo antes mencionado para su concreción.

La manera en que llevamos adelante los procesos de diseños analógicos es bastante lineal, si bien en todo proceso existen bucles de revisión y recomposición, estos suelen tener un correlato de paso a paso. Por el contrario concebirlo a través de diseño paramétrico, implica una estrategia elaborada desde la lógica del pensamiento computacional, que no se encuentre referenciada con un principio y un final, sino más bien con un todo integrado en permanente mutación. Es pensar en acciones y sus relaciones, más que en las secuencias entre una y otra.

Hay en principio dos instancias formativas en la que podemos incorporar lógicas computacionales, por un lado hacerlo como estudiante y por el otro como egresado. En el primer caso, vincular la temática con los contenidos que dictan las unidades académicas, de manera específica y de manera general. Es decir enseñar el manejo del software e integrarlo en el aprendizaje del resto de los contenidos, por lo que, algunos de ellos, como gráfica y matemáticas, trabajen conjuntamente en la utilización de las herramientas digitales de manera productiva y no como un mero hecho de representación gráfica. Sería por demás interesante contar con talleres y laboratorios que profundicen estos conceptos y permitan el intercambio de información entre la comunidad.

Por otro lado, se encuentran los profesionales egresados, que sin contar con la formación de grado en esta temática, deben recurrir a una formación extra, ya sea vía cursos de posgrado o de manera autónoma como explicáramos en el punto 5.2.

En relación al impacto que pueda tener la fabricación digital en la industria AEC, todavía es difícil hacer una evaluación, ya que si bien existen experiencias en el plano internacional, en el local son muy escasas por lo que no generan impacto alguno. Si tomamos como referencia el resto de las industrias podemos decir que todos los procesos productivos tienden a converger en la sistematización, la automatización y la digitalización, y que ese camino es indefectible, por lo que sería extraño que el ámbito de la producción arquitectónica, no siga el mismo curso.

La respuesta a todos estos interrogantes, permite establecer que los objetivos trazados en el principio del presente trabajo, han sido alcanzados. Se identificó el escenario de la fabricación digital, donde se vieron algunos ejemplos de manera general, identificando formas, materiales y diferentes técnicas de producción.

Se reconocieron algunos de los software utilizados para diseño paramétrico y se determinó cuál de ellos era el más apropiado para la temática a desarrollar durante la investigación.

Se logró llevar adelante un ensayo proyectual bajo un entorno paramétrico, basado en algoritmos visuales elaborados en Grasshopper, que nos permitieron crear una envolvente ligera, no solo desde el hecho meramente formal, sino también desde el aspecto tecno-constructivo. Para ello se adoptó tecnología apropiada y materiales acordes, al contexto productivo local. Finalmente, se proyectó una probable secuencia para el proceso productivo y su herramienta digital necesario.

Finalmente, en relación al objetivo general, podemos afirmar que la presente tesis de maestría, hace un aporte, tanto hacia dentro como hacia fuera de la academia, demostrando como un ensayo proyectual bajo entorno paramétrico, puede ser integrado a un proceso de producción. Esta experiencia, permite divulgar e incentivar el uso de estas metodologías con el fin de estrechar los vínculos, entre el ámbito académico, el investigativo y los sectores de productivos.

#### 5.4 Consideraciones finales

Como hemos visto, el uso de la fabricación digital en nuestra arquitectura, depende no solo del contexto tecnológico industrial, sino también de la vinculación que debiera existir entre este, el ámbito académico y el quehacer de la profesión.

El camino hacia un contexto donde la fabricación digital sea de uso regular, requiere de una transformación en los usos y las costumbres del ámbito arquitectónico. Se necesita contar con un contexto tecnológico que posibilite su implementación y que los profesionales se encuentren formados para afrontar procesos proyectuales de esas características. Como vimos con anterioridad, esa responsabilidad recae principalmente sobre las unidades académicas, y estas, al menos en nuestro medio, no desarrollan el tema a nivel conceptual, mucho menos a través de implementar actividades prácticas en los claustros (Workshops, Fab-Labs, etc.), a modo de experimentación y exploración de estas metodologías.

Por su parte, podríamos decir, que el medio profesional en general es indiferente a estos procesos, salvo escasos ejemplos que buscan replicar formas con lenguaje novedoso mediante la decoración o el grafismo a través de corte láser, no se encuentran obras que adopten un método integral de producción arquitectónica. Según nuestra experiencia, el diseño paramétrico se encuentra al alcance de cualquier diseñador con un mínimo dominio de las herramientas digitales. Un diseñador afecto a las matemáticas y con un buen y variado manejo de herramientas digitales, no solo tendrá acceso al diseño paramétrico de manera más fluida, sino que nos brindara un método para *crear* o redactar nuestras propias herramientas.

La formación en diseño paramétrico a través de Grasshopper, puede ser iniciada de manera intuitiva, ya sea utilizando plantillas o a través de la prueba y el error, para luego a medida que se profundizan conceptos matemáticos, desarrollar de principio a fin cada una de las definiciones que sean necesarias.

En el caso personal, la formación en Grasshopper, se realizó mediante el estudio y consulta permanente de manuales específicos, tutoriales y foros de internet. La ventaja del acceso a la información en cualquier momento y lugar que ofrece la web, brinda una excelente oportunidad para la formación en diferentes ámbitos. En el caso del aprendizaje de programas de diseño, el intercambio que se produce con diferentes usuarios, independientemente de su localidad o nacionalidad, permite reelaborar experiencias ajenas y transpolar las mismas a nuestro trabajo.

En ese sentido, las comunidades abiertas en red son excelentes plataformas para el conocimiento colaborativo y por lo general, el intercambio de información, es



totalmente desinteresado. En algunas de las instancias en que desarrollamos las definiciones, la consulta a los usuarios de los foros, permitió resolver situaciones conflictivas.

Aprender un software no necesariamente requiere la realización de cursos o talleres, sino que puede ser llevado a cabo de manera autodidáctica. Los cursos, por lo general, brindan equis cantidad de información en función del formato y duración del mismo y si bien el intercambio que se produce entre los participantes es enriquecedor, la única manera de profundizar en el conocimiento de cualquier software, es estudiar a través de los manuales de usuario, ya que estos, que por lo general son escritos por los propios desarrolladores y/o programadores. De esta manera, se interpreta la lógica de funcionamiento desde cero, de manera ordenada y barriendo por completo todas las funciones.

En el caso de Grasshopper, la mayoría de las funciones necesitan ser dotadas de información y mucha de esta información responde a formulaciones matemáticas, por lo que, imbuirse previamente de conceptos matemáticos básicos, tales como vectoriales, ecuaciones de la recta y el plano y operaciones matriciales, facilitará y mejorará la curva de aprendizaje, siendo un soporte invaluable al momento de adoptar un proceso de diseño paramétrico.

De este modo, tanto a través de bibliografía específica, como de páginas web y foros, se logró alcanzar un nivel medio de conocimiento, que nos permitió elaborar definiciones paramétricas acordes al nivel del presente trabajo. No obstante, el camino recorrido hasta el final del ensayo proyectual, no está terminado y por el contrario es el inicio en la búsqueda de incorporar mayor conocimiento, que nos permita hacer uso y sacar provecho, de la enorme cantidad de comandos disponibles en el software.

Independientemente del conocimiento y manejo de las técnicas de modelado tridimensional, reconocer las diferentes técnicas de fabricación digital y con cuales de ellas contamos en nuestro medio, es de suma importancia, ya que esta incidirá directamente en la toma de decisiones para desarrollar la definición paramétrica.

Forma, material y producción están íntimamente ligados, desconocer esta premisa, implica la obtención de resultados poco satisfactorios o difíciles de llevar a la práctica, por lo que formular premisas que mantengan la coherencia entre estos tres aspectos, es fundamental no solo en términos de la factura del trabajo en sí (detalles, terminaciones, etc.) sino también en aspectos que redundan en la eficiencia del proceso productivo (mayor rapidez, menor desperdicio y mejores prestaciones).

Las nuevas tecnologías tienen cada vez más implicancia en la práctica profesional, incorporarlas no solo es cuestión de recursos, sino también de mejorar y superar nuestras habilidades digitales, para seguir el ritmo cada vez más vertiginoso de los cambios que se suceden en el ámbito de la producción arquitectónica.

Por último, en relación al futuro de la fabricación digital en nuestro medio, mucho dependerá de que los actores intervinientes (instituciones académicas, quehacer profesional e industria) revean los procesos formativos, de diseño y producción que se realizan en cada uno de sus ámbitos. Comprender que todos los procesos productivos tienden a converger a la sistematización y automatización de tareas, es el punto de partida para que la producción arquitectónica se encuentre inmersa en estas lógicas y es solo cuestión de tiempo.

### *Bibliográficas y referencias*

ABONDANO FRANCO, David Humberto (2018) *“De la arquitectura moderna a la arquitectura digital: La influencia de la revolución industrial y la revolución informacional en la producción y la cultura arquitectónica”*

ALMADA, Pablo Fernando. (2016) *“Geometrías y forma arquitectónica en lógicas proyectuales contemporáneas. Aproximación a nuevos órdenes bajo el paradigma de la complejidad”*

ARTETA GRISALEÑA, Jon (2018) *“El paradigma de la complejidad en el diseño arquitectónico y urbano. Fundamentos. Teorías. Proyecciones”*

BARBEROUSSE, Paulette. (2008) *“Fundamentos teóricos del pensamiento complejo de Edgar Morin”*

CASTELLANOS GARZÓN, G. (2015) *“La arquitectura: una visión desde la complejidad. El pensamiento del espacio, un espacio para el pensamiento”*

DALLA COSTA, Matias (2014) *“Sistemas generativos dinámicos. Estrategias proyectuales paramétricas simples para prácticas arquitectónicas locales”*

eCAADe (2016) *“Complexity & Simplicity. 34th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe”*

FERNÁNDEZ, José; MUÑOZ, Llebrez. (2013) *“La dimensión humana de la arquitectura. Aprendiendo del Team 10”*

FERNÁNDEZ ÁLVAREZ Ángel José (2015) *“La arquitectura como interfaz. El paradigma informacional en la nueva arquitectura”*

GARCÍA DEL VALLE LAJAS, Matías (2015) *“Definición unívoca entre forma y fabricación en arquitectura”*

GONZALEZ BRAVO, Raúl (2015) *“Aplicaciones industriales para la construcción de estructuras laminares metálicas”*

GUBA, E.; LINCOLN, Y. (2002) *“Paradigmas en competencia en la investigación cualitativa”*

GRILLO, Antonio Carlos D. (2005) *“La arquitectura y la naturaleza compleja: Arquitectura, ciencia y mimesis a finales del siglo XX”*

ISSA, Rajaa (2016) *“Matemáticas esenciales para diseño computacional”*

ISSA, Rajaa; PAYNE Andrew (2009) *“Manual de Grasshopper. Segunda edición”*

IWAMOTO, Lisa (2009) *“Digital fabrications. Architectural and materials techniques”*

JACKSON, Paul (2011) *“Folding techniques for designers, from sheet to forms”*

- KHABAZI, Zubin (2011) *"Generative algorithms concepts and experiments. Strip morphologies"*
- KORALEVIC, Branco (2003) *"Digital Production"*
- LYNN, Greg (1999) *"Animate Form"*
- LACASTA CODORNIU, Miquel (2010) *"Geometría y Complejidad. La irrupción de un paradigma entre 1960 y 1973"*
- LORENZO CUEVA, Covadonga (2017) *"La fabricación digital y su aplicación en el ámbito de la educación superior universitaria. El laboratorio de fabricación digital FabLab Madrid CEU"*
- McNEEL, ROBERT & ASSOCIATES (2012) *"Manual del usuario de Rhinoceros" Nivel 1 y 2*
- MALDONADO, Carlos E.; Gómez Cruz, Nelson A. (2010) *"El mundo de las ciencias de la complejidad. Un estado del arte"*
- MENGES Achim; SHEIL, Bob; GLYNN, Ruairi; SKAVARA, Marilena (2017) *"Fabricate. Rethinking design and construction"*
- MORÍN, Edgar. (1983) *"Ciencia con consciencia"*. (1990) *"Introducción al pensamiento complejo"*
- NABONI, E.; HAVINGA, L. C. (2019) *"Regenerative design in digitalPractice: A handbook for the built environment"*
- NOVARA, Pablo José (2016) *"Geometría computacional aplicada a la generación en paralelo de mallas de elementos finitos"*
- ROIG SEGOVIA, Eduardo (2014) *"El Entorno Aumentado. Imperativo informacional para una ecología digital de lo arquitectónico"*
- SABINO, Carlos (1992) *"El proceso de investigación"*
- SCHWAB, Klaus (2016) *"The four industrial revolution"*
- SCHUMACHER, Patrik (2015) *"In defense of parametricism"*
- TAMAYO, Brando; VILLATE, Camilo. (2010) *"La práctica de la arquitectura como racionalización sistémica"*
- TEDESCHI, Arturo (2014) *"AAD\_Algorithms-Aided Design. Parametric Strategies using Grasshopper"*
- VASILACHIS DE GIALDINO, Irene (2006) *"Estrategias de investigación cualitativa"*
- VAN MENSVOORT, Koert (2009) *"What you see is what you feel"*; (2014) *"Pyramid of technology: How technology becomes nature in seven steps"*

VAN MENSVOORT, Koert; GRIEVINK, Hendrik-Jan (2011) *"Next nature. Nature change along with us"*

VELASCO PÉREZ, Raquel (2015) *"Estudio de la aplicación del diseño generativo al diseño conceptual arquitectónico"*

WILLIAMS, Alex; SRNICEK, Nick (2013) *"#Acelera. Manifiesto por una política aceleracionista"*

WING, Jeannette M. (2009) *"Computational Thinking and Thinking About Computing"*

ZAPATA-ROS, Miguel (2015) *"Pensamiento computacional: Una nueva alfabetización digital"*