

HARDWARE PARAMÉTRICA HORMIGÓN ARMADO

HARDWARE DE ARQUITECTURA PARAMÉTRICA EN HORMIGÓN ARMADO

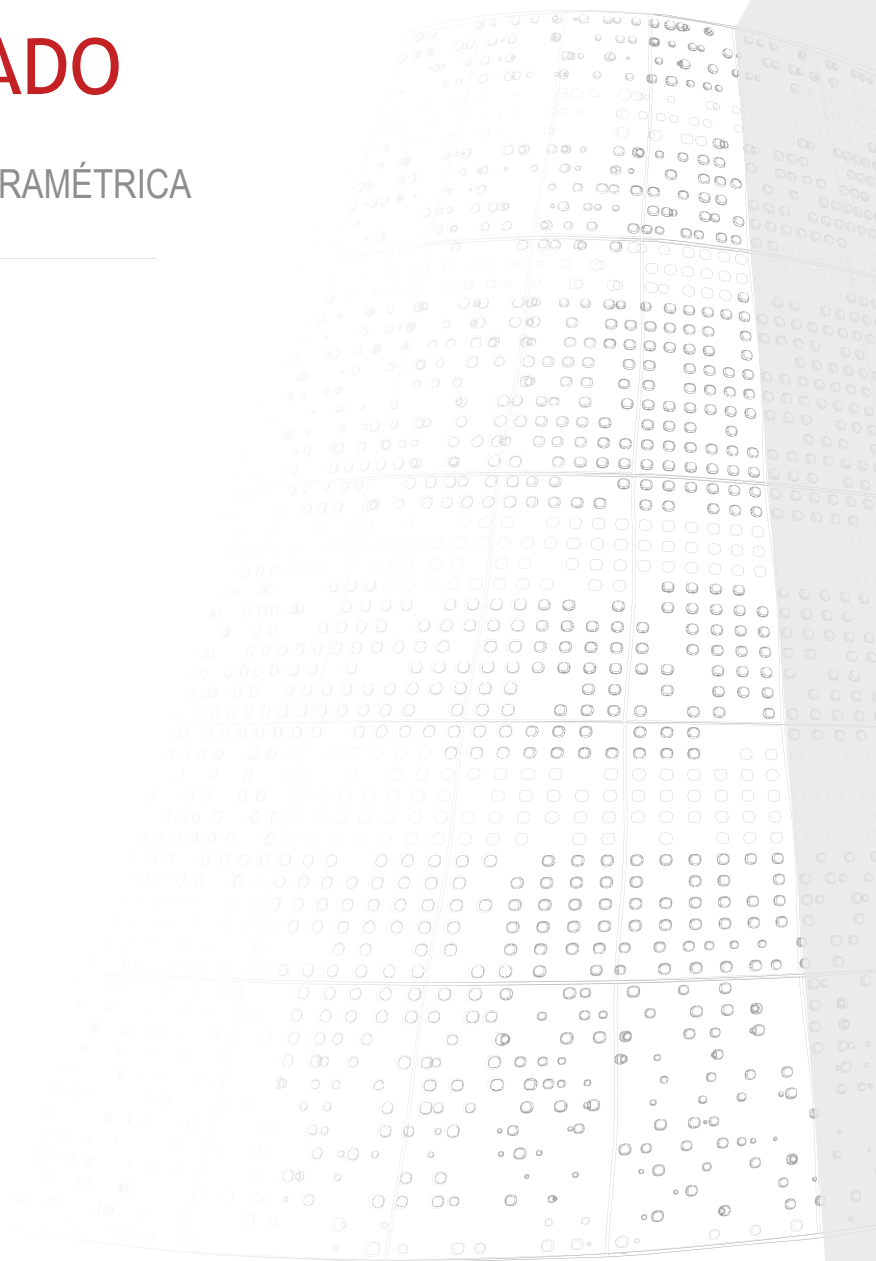
Proyecto de fin de master para optar por el título.

Master Universitario de Tecnología en la
Arquitectura
Mención Construcción-Innovación

Arq. Maria Alexandra Pelletier Navarro
maripelle24@gmail.com

Tutores:
Jaume Avellaneda i Díaz Grande, Dr. arq.
Joan Lluís Zamora i Mestre, Dr. arq.

Barcelona, a los 20 dias de Octubre de
2015.



ÍNDICE

- 0.1. INTRODUCCIÓN
- 0.2. MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I: ARQUITECTURA PARAMÉTRICA

- 1.1. DEFINICIÓN
 - 1.1.1. Arquitectura Paramétrica
 - 1.1.2. Antecedentes
 - 1.1.3. Recorrido evolutivo
 - 1.1.4. Geometría
 - 1.1.5. Teorías, conceptos y líneas
- 1.2. ACTUALIDAD EN SOFTWARE
- 1.3. HARDWARE
 - 1.3.1. Nuevo Proceso
 - 1.3.2. Fabricación, tecnologías y
procesado de materiales
 - 1.3.3. Materiales
 - 1.3.4. Puesta en obra

CAPÍTULO II: HORMIGÓN Y SU CONFORMACIÓN

- 2.1. NUEVOS HORMIGONES
- 2.2. TÉCNICAS DE
TRANSFORMACIÓN
 - 2.2.1. Industriales
 - 2.2.2. Experimentales
- 2.3. TÉCNICAS DE ARMADO
CONTEMPORÁNEO
 - 2.3.1. Industriales
 - 2.3.2. Experimentales
- 2.4. PUESTA EN OBRA

CAPÍTULO III: ESTUDIO DE CASOS

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

- Bibliografía
- Índices de imágenes

0.1 INTRODUCCIÓN

En el marco de la realización de una investigación en la línea de construcción-innovación, se presenta la oportunidad de abordar un tema de constante actualidad, que se perfila en diversos asertos de teoría de la arquitectura contemporánea, como un nuevo paradigma.

El asunto de la arquitectura paramétrica siempre se muestra como un tema y realidad un tanto sensacionalista, demarcadora de icono y enfocada en la forma. Pero la ejecución de estas formas y los procesos semánticos de esta, presentan importancia en el camino hacia la evolución y permanencia en nuestro sector. Es así como surge, la necesidad de explorar esta vertiente de la arquitectura, y hacerlo mediante la visualización de su estado del arte, el análisis de casos prácticos realizados y el detalle de las soluciones a problemas puntuales de esta práctica.

La optimización y automatización, son dos de los objetivos más presentes cuando reseñamos los sistemas de proyectado digital en arquitectura. Es muy común que estos términos se adopten con respecto a la morfología, a las características dinámicas y a la modificación de los materiales. Sin embargo es identificable como muchos autores en sus publicaciones, así como en sus aseveraciones plantean, que existe una falta de sincronización de las soluciones constructivas con respecto

al progreso de la proyección y diseño arquitectónico, de manera que diversos procesos se vuelven muy artesanales a la hora de materializar lo planteado.

Abordar el tema de arquitectura paramétrica desde la perspectiva del hardware, representa una aproximación desde: la técnica, los procesos, soluciones constructivas, métodos de fabricación y puesta en obra, que materializan lo conceptualmente propuesto. Esto permite centrarse en la identificación de las soluciones técnicas más óptimas tanto de traducción del diseño, como de ejecución y montaje en obra, profundizando en los medios de transformación de materiales (conformado, impresión 3d), utilización de maquinarias especiales (robótica), y nuevos procesos de montaje, todos estos haciendo énfasis en la fase de fabricación, pre construcción y puesta en obra.

Además el acercamiento desde el hardware es congruente a la presencia (mediante modelos, desarrollo experimental y prototipo), a lo largo de la historia análoga de esta novel perspectiva digital, de la forma proyectual. La arquitectura paramétrica y las técnicas de proyección generativas se muestran como el presente y futuro de la práctica. Por ende indagar sobre temas que buscan la optimización de sus ramificaciones, en este caso la puesta en obra, implica adentrarse en

comprender el sistema y explorar soluciones en sus campos. Siendo propicio el analizar casos de estudio y mediante estos adentrarnos a las soluciones dadas, comprendiéndolas como líneas de seguimiento y posibles parámetros futuros en la práctica. Además de entender la lógica de proceso y el paso de lo digital a lo construido.

La actual preocupación por una sinergia y retroalimentación de ambos campos: arquitectónico propositivo y el constructivo, requiere de esta tipología de análisis y búsqueda de soluciones a la construcción, puesta en obra y fabricación paramétrica.

El caso del hormigón armado es muy factible por su condición amorfa y moldeable, y por estar presente en la construcción y las diversas tradiciones constructivas. De igual manera es un material que requiere de nuevas técnicas y que a su vez está en un proceso de cambio para adaptarse a los tiempos, tanto en términos base del material, como en su transformación y en la técnicas de puesta en obra. Además de la oportunidad de profundizar en las nuevas tecnologías en hormigones desde las mezcla per se.

0.1 ABSTRACT

In the context of start of an investigation in the line of construction- innovation, it presents an opportunity for addressing an issue of constant presence nowadays currently taking shape in various assertions of contemporary architecture theory, as a new paradigm.

The issue of parametric architecture is always shown as an issue and actually somewhat sensationalist definition of an icon and focused on the form. But the implementation of these forms and semantic processes of this, are significant in the road to progress and stay in our sector. Thus, the analysis conducted case studies and detailed solutions to specific problems of this practice arises the need to explore this aspect of architecture, and do it by displaying its state of the art.

The optimization and automation are two more goals in mind when we review the projected digital systems architecture. It is very common these terms with respect to morphology, to the dynamic characteristics and modification of materials are adopted. However it is identifiable as many authors in their publications and on their claims arise, there is a lack of synchronization of constructive solutions regarding the progress of the projection and architectural design, so that various processes become very artisan to in realizing the issues raised. Addressing the issue of parametric

architecture from a hardware perspective, it represents an approximation since: technical, process, constructive solutions, manufacturing methods and application, embodying the proposed conceptually. This allows you to focus on identifying the most optimal technical solutions both translation of design and execution and assembly work, delving into the media transformation of materials (shaped, 3D printing), use of special equipment (robotics), and new assembly processes, all these emphasizing the manufacturing stage, pre construction and commissioning work.

Apart from the hardware approach is consistent with the presence (using models, experimental and prototype development) along the history of this novel analog digital perspective, the projective shape.

Parametric architecture and generative projection techniques are shown as current and future practice. Therefore investigate issues seek to optimize its ramifications, in this case commissioning work involves understanding the system enter and explore solutions in their fields. It is suitable to analyze case studies and through these head into the given solutions, understanding them as lines of monitoring and possible future parameters in practice. In addition to understanding the logic of the process and the transition from the digital to the buildings.

The current concern for synergy and feedback from both fields: architecture purposeful and constructive, requires this type of analysis and search for solutions to the construction, commissioning work and parametric manufacturing.

If the concrete is very doable for its amorphous and malleable condition, and to be present in various construction and building traditions. Similarly it is a material that requires new techniques and which in turn is in a process of change to adapt to the times, both in terms of the material basis, and processing techniques and the placement. Besides the opportunity to delve into new technologies in concrete from the mixture per se.

0.2 MARCO TEÓRICO

Metodología

El método de investigación se centra en profundizar en casos de estudio análogos, analizando aspectos tales como: parámetros, proceso de iteración, solución constructiva resultante, traducción o integración y puesta en obra. De igual manera abordar tanto las nuevas técnicas experimentales de transformación del material, como las soluciones innovadoras de a nivel constructivo, de cara a la puesta en obra.

La metodología se basa en la creación de matrices de análisis, cuadros comparativos y delimitación de soluciones, tanto en el estudio de casos como en la identificación de procesos y conceptos derivados de la paramétrica y del material a estudiar.

Se buscan definir un marco investigativo o estado del arte y sus posibles derivaciones de búsqueda de información futuras. Además definir unas conclusiones resultantes del propio análisis y claramente identificables del proceso de investigación y los métodos aplicados como medio de evaluación y definición de futuros desafíos y líneas de desarrollo del hardware.

Estado del arte

El diseño paramétrico se presenta como la línea de desarrollo futuro de la arquitectura y la construcción. Las edificaciones más recientes y de mayor relevancia a nivel de avances constructivos y de desarrollo de desafíos formales y técnicos, tienen como raíz la paramétrica. En este mismo orden la fabricación digital está en un constante avance e implementación de nuevas tecnologías y técnicas, acogiendo alternativas recientes para transformación de materiales que antes no se utilizaban con estos fines, como es el caso del Hormigón.

De la mano de este avance, existen puntos de compatibilización de las técnicas nuevas de fabricación y las técnicas que le anteceden a nivel constructivo. En estos se aloja el mayor interés, pues demarca la vía de avance técnico-constructivo de la práctica, en vías de una nivelación con los avances en software.

Además no es muy claro, el desarrollo constructivo de algunas concepciones actuales, con respecto a las prácticas tradicionales, lo que amerita una profundización en las herramientas y alternativas constructivas.

Objetivos

Como tema de actualidad, e intrínsecamente ligado al sector de la construcción, se presenta como base bibliográfica la documentación de soluciones constructivas antecedentes, la diversidad de investigaciones realizadas en relación al tema, la exploración de campos experimentales e industriales de desarrollo de las técnicas, el análisis de soluciones constructivas industriales de sectores cercanos como los mobiliarios urbanos, y la entrevista directa a equipos de trabajo en obras de referencia y visita a talleres de premontado y fabricación relevantes.

Con la bibliografía existente, la información y experiencia investigativa de algunos referentes de tesinas anteriores, así como entrevistas a expertos. Se evidencia la seguridad de llevar a un buen nivel la investigación, siempre planteando la posibilidad de continuación exhaustiva de la misma en doctorado, en términos de prototipos, experimentación directa y propuesta de proceso. A esto se suman las diferentes visitas a los talleres de fabricación tanto de Escofet, como de la Sagrada Familia, las visitas a servicios de impresión 3d, la consulta a especialistas en software, entre otras búsquedas importantes para la formulación de este documento.

- Investigar la lógica proyectual de este tipo de arquitectura y su consecuencia en la construcción.
- Profundizar en las condiciones existentes de este tipo de desarrollo proyectual: antecedentes, actualidad y posibilidades.
- Identificar de dónde proceden las técnicas que hoy en día aparecen como propias de una arquitectura cuyas características formales no son originarias de una manera de construir implícita en el pensamiento del arquitecto.
- Analizar la evolución de las técnicas de transformación del hormigón y su armado, para comprender mejor lo que se ha hecho y lo que falta.

CAPÍTULO I: ARQUITECTURA PARAMÉTRICA

PROCESO CONCEPTUAL Y DE DISEÑO |
PARÁMETROS | ITERACIÓN | PENSAMIENTO
| PARAMETRICISMO VS. FORMA CURVA |
AVANCES EN SOFTWARE



1.0. INTRODUCCIÓN

1.1. DEFINICIÓN

1.1.1. Arquitectura Paramétrica

1.1.2. Antecedentes: Pensamiento
Paramétrico

1.1.3. Recorrido evolutivo

1.1.4. Geometría y desafío de las
formas

1.1.5. Teorías, conceptos y líneas
de Paramétrica

1.2. ACTUALIDAD EN SOFTWARE

1.3. ACTUALIDAD DEL HARDWARE

1.3.1. Nuevo Proceso hardware

1.3.2. Fabricación, tecnologías y
procesado de materiales

1.3.3. Materiales

1.3.4. Puesta en obra

1.0. INTRODUCCIÓN

Esta primera aproximación al tema, parte de la identificación de una práctica alusiva a este término, sus antecedentes, su lógica de diseño y las consecuencias que presenta en términos constructivos. Objeto propulsor de análisis e identificación de la arquitectura paramétrica, desde una vertiente conceptual y teórica, que luego descompone sus diversas líneas, las maneras en las que ha sido definida. Todo esto con la intención de conocer con claridad el presente, e identificar un futuro de este tipo de arquitectura en la práctica.

La evolución del diseño asistido por ordenadores y la construcción con tecnologías digitales, de mano de los avances en el desarrollo de softwares, están conectados directamente con algunos de los más relevantes cambios en el discurso y práctica de arquitectura contemporánea. De igual manera, la innovación en la industria de la construcción y la experimentación en la práctica arquitectónica, se han visto impulsadas por la innovación digital y de procesos de fabricación, desarrollada por las industrias naval, aeronáutica, automotriz y de diseño de productos. A consecuencia, la adopción de los softwares de modelado paramétrico en la industria de arquitectura (tomados de las industrias mencionadas anterior-

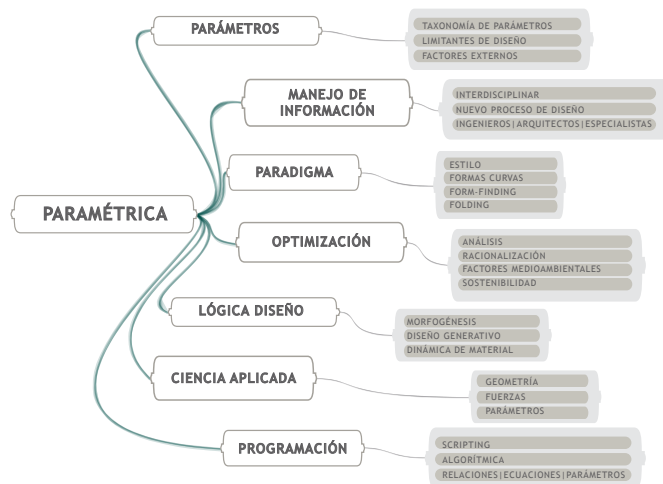
mente), han llegado para cambiar la disciplina desde dentro.

De manera que el desarrollo de softwares y tecnologías de fabricación; la búsqueda de nuevas formas; el movimiento Contra-deconstructivismo; la búsqueda de un nuevo paradigma o un nuevo estilo arquitectónico; la definición de una estructura interdisciplinar de diseño, una nueva generación del manejo de la información; la búsqueda de optimización del proceso de diseño y una nueva lógica de diseño; son las principales razones atribuidas a la existencia del uso de la paramétrica en la arquitectura contemporánea.

La paramétrica, es el resultado de la implementación de las tecnologías de modelado paramétrico, basado en una descripción algorítmica de la geometría, en la arquitectura contemporánea, a veces manipulada hacia un objetivo formal estético y a veces hacia un objetivo optimizado.



- DESARROLLO DE SOFTWARES Y TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN
- BUSQUEDA DE NUEVAS FORMAS
- MOVIMIENTO CONTRA-DESCONSTRUCTIVISMO
- BUSQUEDA DE UN NUEVO ESTILO ARQUITECTÓNICO
- DEFINICIÓN DE UNA ESTRUCTURA INTERDISCIPLINAR DE DISEÑO
- NUEVA GENERACIÓN DE MANEJO DE INFORMACIÓN
- BUSQUEDA DE OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO
- NUEVA LÓGICA DE DISEÑO



Como la denominación lo indica toma su base en parámetros, reafirmando que toda arquitectura se vale de parámetros para su concepción. Pero en el caso específico de la paramétrica se refiere a la raíz de una práctica que maneja estos parámetros para la generación constante de resultados variables, cambiando el proceso de lineal a generativo, con una firme actitud informativa entre las disciplinas y las etapas de diseño.

No se trata de definir una forma en base a una línea estilística o estética específica, por el contrario, los que se definen son los parámetros que luego darán como resultado variables posibilidades, de las cuales en base a criterios puntuales se cataloga y adopta una solución. Si estos parámetros son variados, entonces de igual manera varían las posibilidades resultantes, pero sin cambiar la lógica del proceso, puesto que no se destruye una previa iteración.

La descripción paramétrica de las formas provee una vía versátil de representar las curvas y superficies complejas. Superficies de doble curvatura, antes de la paramétrica eran representadas y entendidas desde la descomposición en secciones seriadas para identificar el comportamiento de las mismas.

Partiendo de la multiplicidad, la variabilidad y la generación de rango de posibilidades, el diseño paramétrico

redefine la concepción de las formas arquitectónicas, propiciando un proceso mejor informado en cuanto a los parámetros variables y los resultados formales. De manera que se ancla en el rechazo a la solución fija y la exploración de las infinitas posibilidades variables. En este sentido la paramétrica aplicada a la arquitectura y el diseño, pasa de diseñar una forma específica del edificio, a diseñar una serie de principios codificados como secuencia de ecuaciones paramétricas, por las que aspectos específicos del diseño podrán ser generados, y variados en el tiempo, según se requiera.

Uno de estos aspectos directamente relacionado al producto formal y que ha de ser variado según la codificación inicial es la geometría, que en la paramétrica se suscita un manejo distinto de la misma, abriendo el campo a las geometrías generativas, inteligentes y performativas, pero que conserva la lógica de la geometría convencional.

En este orden, se evidencia la oportunidad de implementación de geometrías complejas, que permite esta línea de desarrollo proyectual.

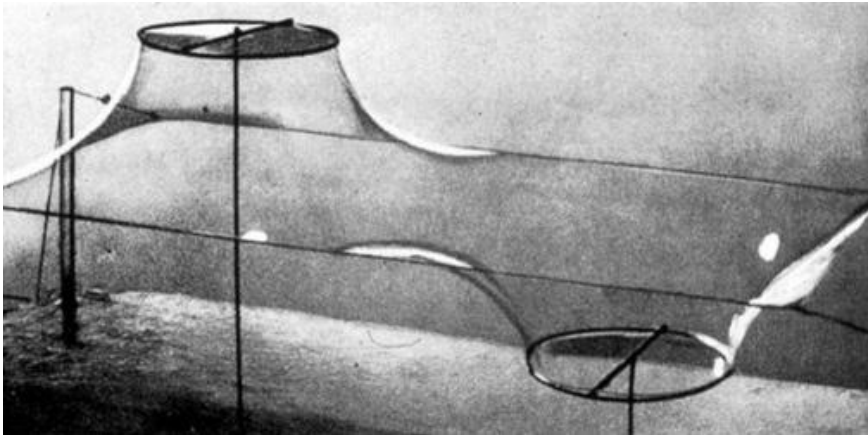
En vías de una definición más amplia de la arquitectura paramétrica, hemos de identificar que: sus vertientes de desarrollo, las líneas que desde su surgimiento, y el inicio de su implementación en arquitectura, se han generado para confinarla hasta el punto de lo identificable.

1.1. DEFINICIÓN

1.1.1. Arquitectura Paramétrica

La palabra paramétrica textualmente indica una dependencia de parámetros, los cuales en matemáticas siempre han sido reconocidos como variables independientes. Esto lo esclarece la Enciclopedia de Matemáticas cuando define las ecuaciones paramétricas como *“la especificación de los puntos del conjunto o de sus coordenadas por valores de las funciones de ciertas variables llamadas parámetros”*. Axioma de una arquitectura identificada por diversos autores como un nuevo paradigma, como el futuro en evolución, o como diversas líneas de pensamiento direccionadas en su definición a ciertos logros que esta posibilita, en base a la forma, la optimización y el proceso productivo. Ahondando en los parámetros, identificamos una definición muy congruente a la aplicación de este tipo de diseño

- I.1 Exoesqueleto vista de cubierta. O-14, Dubai UAE (2010), Reiser+Umemoto.
- I.2 Influencia de otras industrias, cabezal de corte para materiales metálicos por CNC.
- I.3 Gráfico de razones de uso del la Paramétrica.
- I.4 Mapa de conceptos de Paramétrica.



en la arquitectura contemporánea. Como variables del proceso de diseño, “tienen la función de expresar rangos, límites y configuraciones específicas.” (GARCIA ALVARADO & LYON GOTTLIEB, 2013) De manera que un mismo modelo paramétrico puede entregar diferentes resultados según varíen los parámetros que lo controlan, dotándole al diseño de posibilidades formales y programáticas, que son identificadas como versiones.

En este mismo orden es identificable como la variedad de parámetros puede ser descrita en una taxonomía, que “reconoce distintas escalas: ambientales (referidas al entorno de localización), globales (del volumen total del proyecto), locales (de elementos parciales) o de producción (de ejecución de algunos elementos). Pueden ser magnitudes geométricas generales o parciales, propiedades materiales intensivas (independientes de la forma)

o extensivas (vinculadas a la dimensiones), o relaciones formales.” (GARCIA ALVARADO & LYON GOTTLIEB, 2013)

Paradójicamente el diseño paramétrico, ancla en un método y pensamiento conceptual, que ha existido en formas análogas anteriormente en la historia, como enuncia en su tesis Daniel Davis: “en la última década el modelado paramétrico ha pasado de ser un truco matemático empleado por Gaudí, Otto, Sutherland, y algunos ingenieros a ser ahora una parte regular de la práctica arquitectónica” (A History of parametric, 2013) que hoy se emprende de una manera totalmente digital. En este ámbito digital, la arquitectura ha encontrado nuevas facilidades para el desarrollo de formas de representación y concepción proyectual. Pasando de la representación bidimensional, a la tridimensional, las simulaciones, y de aquí en

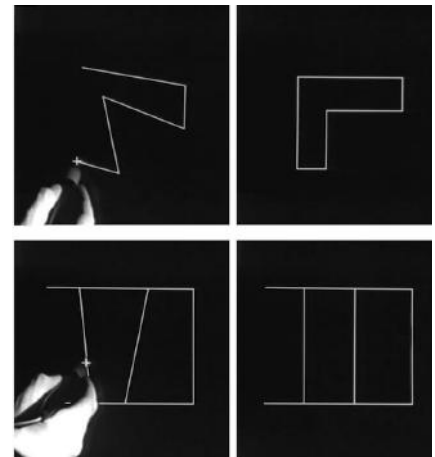
adelante a consecuentes soluciones. Evidentemente la presencia del factor evolución en la paramétrica aplicada a la arquitectura, la forma en que esta se adhiere a la arquitectura y dentro de ella se desarrolla hasta establecerse y posicionarse en la práctica como es observable hoy. De manera que es imprescindible recurrir a la retrospectiva para su análisis.

En este mismo orden, el creador de Sketchpad uno de los primeros softwares con raíz paramétrica, es mencionado por Daniel Davis (2013) al referirse en su investigación a la persistente raíz matemática de la paramétrica, haciendo alusión a las descripciones de Sutherland sobre el programa: “el cambio de una parte crítica dará lugar automáticamente a los cambios apropiados a partes relacionadas”. De manera que la geometría o las partes relacionadas, son una función explícita de un conjunto de parámetros identificados como aspectos críticos. Esta descripción de Sutherland engloba de manera breve y escueta la esencia del modelado paramétrico y secuencialmente su lógica de trabajo y de generación de resultados.

Con lo cual, la nueva generación de sistemas de diseño paramétricos, parte de la definición de parámetros o restricciones de las relaciones entre objetos, para constituir modelos con variaciones establecidas de manera anticipada. En

TABLA N°1 | Taxonomía de parámetros.

Parámetros Ambientales (PA)	Parámetros Globales (PG)	Parámetros Locales (PL)	Parámetros de Ejecución (PE)
Datos geográficos: topografía, vistas, tipos de suelo, etc.	Dimensiones o proporciones generales: rangos mínimos y máximos para largo, ancho, profundidad, curvatura, etcétera.	Dimensiones o proporciones de componentes: rangos mínimos y máximos para largo, ancho, profundidad, cantidad, etc.	Dimensiones de producción: tamaño de materiales y máquinas de ejecución.
Datos climáticos: orientación, temperatura, humedad, radiación, vientos, etc.	Requerimientos funcionales: prestaciones de confort, ergonomía, accesibilidad.	Interacción con otros componentes: condiciones de borde y respuesta a configuraciones adyacentes.	Propiedades materiales: rangos de resistencia o flexión.
Situación contextual: restricciones normativas de situación urbana, materialidad, tipología (aislado, pareado, torre, placa, etc.).	Distribución global: relaciones y topología interna.	Respuesta a valores de análisis: profundidad o espesor de las piezas según asealamiento o solicitaciones estructurales.	Características del producto: color, textura, terminación, etc.
Relaciones del entorno: flujos peatonales, vehiculares, presencia de singularidades, referencias, etc.	Condiciones expresivas: Configuración de fachadas y materialidad.	Condiciones formales: Variación gradual entre componentes.	Valores de aplicación: costos del proyecto.
Dimensiones del sitio: Ancho y profundidad del lote, pendiente, límites de edificación.	Restricciones técnicas: crujiás y voladizos según sistema estructural.	Requerimientos de montaje: tipos de ensamblaje, unión y dilatación entre componentes.	Dimensiones para transporte: magnitudes de vehículos y operación.

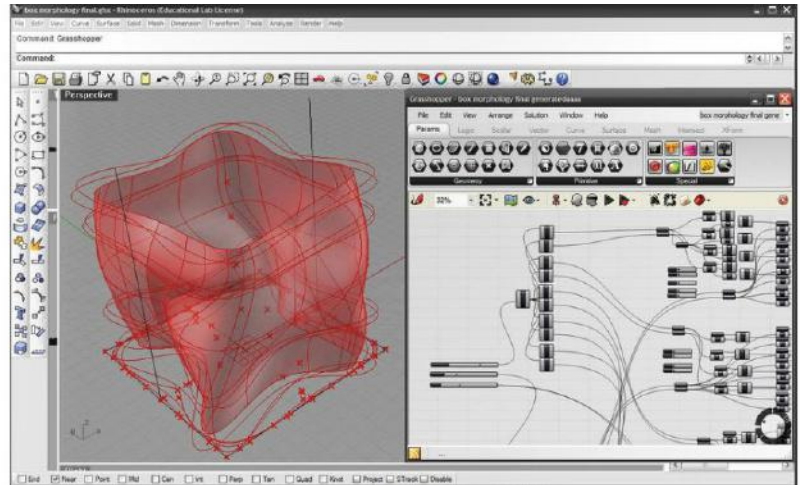


consecuencia dentro de la definición de modelos inteligentes reconfigurables que capturen la lógica de diseño, se desarrolla la modificación del diseño y la creación de las partes que lo componen.

Esto en términos constructivos repercute en la modificación no solo del proceso de diseño y su traducción para fines de fabricación, sino también: en las exigencias de prestaciones de lo construido; cierta resiliencia, para permitir variaciones; retroalimentación de las técnicas constructivas y sus limitantes; y la adopción de sistemas especializados y tecnologías que permitan realizar estos diseños.

También se presenta la paradoja, que siendo un sistema emergente del avance tecnológico y digital, de la mano de nuevos planteamientos formales, y en busca de la optimización y resolución práctica de formas geométricamente definidas de manera compleja, pero basadas en una auto-variación coherente a sus parámetros originarios y resultante de una iteración controlada y programable; éste precise mejor desarrollo tecnológico constructivo y mayor claridad a la hora de puesta en obra. En este mismo orden, tal y como establece Jacobo Krauel (2010), pasamos de utilizar el ordenador como el guion de una herramienta de representación para moldear formas externas, a usarlo como herramienta generativa que crea una lógica interna, la cual se puede desarrollar para producir una amplia gama de posibilidades. Esto significa que el diseño se describe de forma paramétrica y se procesa mediante algoritmos. Y esta característica específica, es la que permite que su iteración no sea un proceso aleatorio de experimentación, más bien se comporta como una probatoria con diferentes resultados todos racionales.

En este nuevo contexto de producción, el diseño paramétrico ha ganado cada vez más importancia, cuyo proceso



basado no en cantidades matriciales fijas, sino en relaciones consistentes entre los objetos, permite cambios en un solo elemento para propagar los cambios correspondientes en todo el sistema. (FERRE & SAKAMOTO, 2000) Sin embargo dentro de la definición de paramétrica se engloban conceptos secundarios, actualmente intrínsecos a la idea de lo parametrizable en arquitectura. Los procesos algorítmicos y generativos sirven de anclaje resolutivo de la proyección paramétrica en arquitectura contemporánea.

Apelando a las matemáticas del proceso como establecido en *"From Control to Design"* (FERRE & SAKAMOTO, 2000), la paramétrica se basa en *"procesos de diseño algorítmicos que permiten formas complejas que se cultivan a partir de métodos iterativos simples, mientras que preserva las cualidades especificadas."* Lo que refuerza la posibilidad de cambios sin eliminación de información, proporcionando una cualidad que antes no era considerada posible.

Mediante la presentación de reseñas de proyectos experimentales desde una aproximación complementaria entre la ingeniería y la arquitectura este libro establece, para nuestro interés: *"Si la paramétrica es una técnica para el control y manipulación holístico del diseño en todas las escalas de la parte al todo, la algorítmica es un método de generación, la producción de formas*

- 1.5 Modelo de films de jabón de Frei Otto.
- 1.6 Tabla de taxonomía de parámetros, Rodrigo García Alvarado. Ejemplo de definición de parámetros de diseño.
- 1.7 Sketchpad, Ivan Sutherland
- 1.8 Modelo paramétrico y matriz de programación de parámetros.

complejas y estructuras basadas en una regla de componente simple."

Es inevitable hacer esta comparación en términos de una definición clara de la paramétrica aplicada en la arquitectura contemporánea, dados los diversos conceptos de diseño, que a esta se adhieren a razón de las lógicas de softwares y de inquietudes formales del propio siglo. El caso de la algorítmica y su proceso generativo, durante el desarrollo de la paramétrica se ha diferenciado y relacionado, e incluso confundido.

Desde 1995 en *"An Evolutionary Architecture"* se planteaba que los conceptos arquitectónicos se expresan como reglas generativas para que su evolución pueda acelerarse y testarse. Las reglas se describen en un lenguaje genérico que da lugar a un código de instrucciones para la generación de formas. (FRAZER, 1995)

Con certeza, la arquitectura paramétrica desde su lógica interna permite una concepción generativa del diseño, basado en algoritmos. De manera que como plantea una distinción de la animación y la simulación, la paramétrica es una “*distribución de diferencias*” (SNOOK, 2012) y la generativa es una “*distribución de complejidad*” (SNOOK, 2012). En un sentido más amplio el diseño paramétrico es la columna vertebral del diseño generativo, puesto que este último se vale de la lógica y la sistematización de la paramétrica, desarrollando mayor complejidad y edificando el proceso ante la generación del objeto.

Como el mismo Ronald Snook (2012) plantea, el modelado paramétrico describe una relación lineal entre los parámetros y la transformación de la geometría, permitiendo el control y manipulación preciso de modelos flexibles. Sin embargo el diseño generativo puede ser descrito como el diseño del proceso, antes que del objeto.

En un sentido más amplio, “*Los modelos paramétricos están estructurados de manera jerárquica, teniendo relaciones causales directas en cascada. Así, mientras que los modelos paramétricos permiten una distribución de la diferencia, esta no es la diferencia que surge de procesos intensivos, sino más bien una que se describe directamente, de arriba hacia abajo, operando gradualmente dentro de un rango predefinido. Aquí, toda posibilidad ya se da dentro de la condición de partida.*” (SNOOK, 2012)

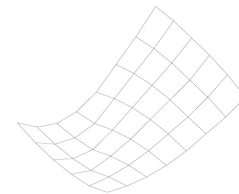
Una de las definiciones más relevantes de la paramétrica es la presentada por Koralevic en “*Architecture in the Digital Age*”, pues enfatiza conceptos como variabilidad, posibilidades y proceso, dentro del concepto general de la paramétrica:

La paramétrica puede proporcionar una poderosa concepción de

la forma arquitectónica mediante la descripción de una gama de posibilidades, sustituyendo en el proceso, lo estable con lo variable, la singularidad con multiplicidad. Usando la paramétrica, los diseñadores pueden crear un número infinito de objetos similares, manifestación geométrica del esquema previamente articulada de dependencias dimensionales, relacionales u operativas variables. Cuando a estas variables se les asignan valores específicos, áreas de instancias particulares son creadas a partir de una gama potencialmente infinita de posibilidades. (KOLAREVIC, 2003)

Es importante inquirir en el asunto de las posibilidades, que es una cualidad dada por la iteración muy propia de este tipo de aproximación al diseño y proyección arquitectónica. Al partir de unas condicionantes definidas y graduar la manera en que las adoptamos,

en tanto se generan y evalúan soluciones como resultado de esta retroalimentación entre las condicionantes o parámetros y las soluciones, descubrimos un proceso de diseño en sí mismo.



2 Parametrisation of surface



3 Fabricated components in towers

Proceso desarrollado en otras vertientes de arquitectura de manera más intuitiva y previsor: como es el caso del bocetaje, de la experimentación conceptual, de los modelos de trabajo, y del juego con los materiales, pero que en la paramétrica son realidades crudas que se convierten en parámetros. Esto lo esclarece Jacobo Krauel cuando reafirma que “*un diseño paramétrico describe un espectro de posibilidades en vez de un objeto fijo. Ciertas magnitudes y características de diseño se pueden describir de forma paramétrica en cambio de usar valores explícitos. Diversos parámetros se pueden relacionar con ecuaciones para crear cadenas de dependencias y jerarquías entre*

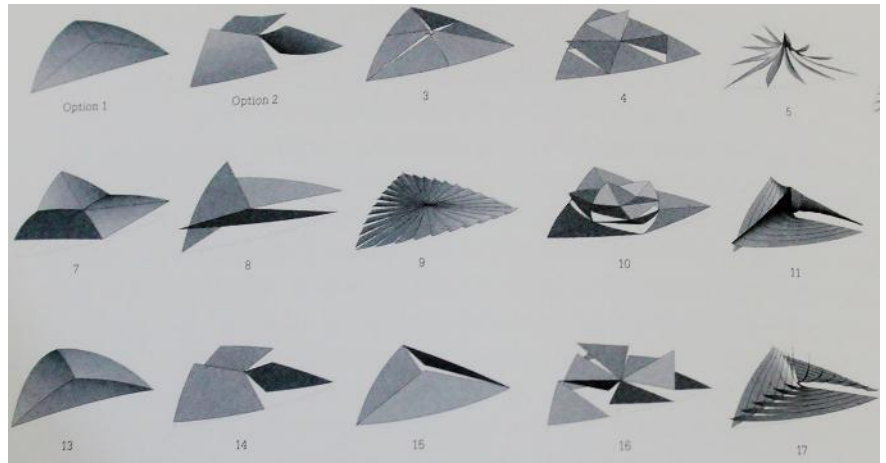
- 1.9 Esta iteración y manejo de diversas soluciones direcciona a la generación de variabilidad de la fabricación también: CAST on CAST, desarrollo experimental de encofrados reciclados.
- 1.10 BP Sunbury, Proceso de generación y testado de diferentes soluciones geométricas mediante el uso de modelos paramétricos, *From Control to Design*.
- 1.11 La nueva figura del arquitecto, *Refabricating Architecture*.

las partes del diseño.” (KRAUEL, 2010)

En este sentido Branko Koralevic (2003) en sus aseveraciones plantea, que el enfoque del diseño paramétrico, si se aplica sistemáticamente desde su fase conceptual hasta su materialización, cambia profundamente toda la naturaleza y las jerarquías establecidas de la industria de la construcción, así como el papel del arquitecto en los procesos de construcción. A consecuencia los arquitectos pasan a diseñar, no la forma específica del edificio, sino un conjunto de principios codificados como una secuencia de ecuaciones paramétricas, por el cual los casos específicos del diseño se pueden generar y variar en el tiempo como sea necesario. En este mismo orden, el diseño paramétrico pide el rechazo de soluciones fijas y la exploración de las potencialidades infinitamente variables.

El cambio es un aspecto vital en el proceso de concepción paramétrica actual, pues dejamos de ver el proceso conceptual como la creación de una solución aislada y fija de diseño personal y subjetivo. Acotando la concepción a lo demostrable y probable según las iteraciones, ya no se da cabida a una concepción sin una base probatoria. Esta probatoria se extrapola a todas las fases del proceso proyectual. En lugar de que el diseñador cree la solución de diseño (mediante manipulación directa) como una herramienta de diseño, la idea es que el diseñador establezca en principio las relaciones mediante las cuales las partes se conectan, construye un diseño usando estas relaciones y modifica las relaciones mediante observación y selección de los resultados producidos. (WOODBURY, 2010)

Lo que a la vez reafirma la idea de que este es un nuevo proceso, con nuevos matices y metodología, pero al final es nuestro criterio como diseñadores y especialistas técnicos el que segrega los resultados y potencia sus opciones. El

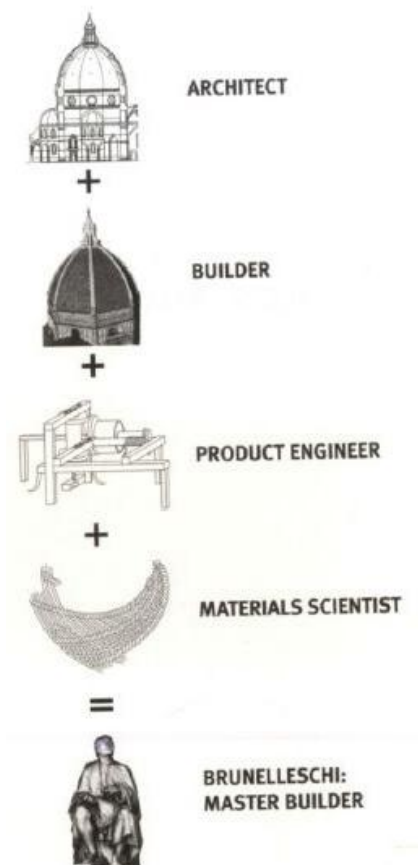


ordenador y los resultados del software no decidirán por nosotros la mejor solución, más si brindara respaldo a nuestras decisiones de diseño. Puesto que “el sistema tiene en cuenta el trabajo de mantener el diseño consistente con las relaciones, así mejora las habilidades del diseñador para explorar ideas y reduce el tedio de re-trabajar.” (WOODBURY, 2010)

Con certeza los criterios planteados por Robert Woodbury (2010) en “Elements of Parametric Design”, delinean la idea de que la paramétrica aplicada al diseño arquitectónico, reside no solo en la definición de relaciones como antes hemos planteado, sino también en la voluntad y habilidad del arquitecto, que se convierte en geómetra, programador, fabricante (que Koralevic (2003) compara con la figura del arquitecto en el renacimiento) y quien tiene la responsabilidad de considerar la fase relación-definición como una parte integral del proceso de diseño, enfocándose en la lógica del conjunto y su conexión en el diseño final.

En este sentido identificamos el uso de “principios de organización que promueven la comunicación en varias escalas, donde lo particular puede afectar lo general y viceversa.” (REISER & UMEMOTO, Atlas of novel tectonics, 2006) Además son el agente de transformación de la manera convencional de desarrollar la arquitectura y sobre todo la construcción.

Una consecuencia de esta evolución, es que estamos siendo testigos de un cambio de arquitectura modulada a arquitectura seriada, de las versiones de diseño. La idea de versionado sobrepasa la variación simple entre diferentes iteraciones de diseño parametrizado, el versionado también opera en la micro-escala, con las estructuras y estética del diseño en sí mismas. (ROCKER, 2008)





Es indudable que la arquitectura paramétrica en términos llanos, se vale de operaciones proyectuales, que engloban la denominada manipulación estratégica, que es más rápida que la manipulación manual y virtual, porque opera en la estructura del modelo, alterando simultáneamente la configuración general. (BERNACCHI, 2010) Además posee una taxonomía de parámetros y diversas técnicas de modelación constructiva, programación geométrica, optimización estructural, simulación ambiental, algoritmos genéticos y fabricación digital. (GARCIA ALVARADO & LYON GOTTLIEB, 2013)

1.1.2. Antecedentes:

Pensamiento Paramétrico

“Es necesario establecer que el diseño arquitectónico es inherentemente un proceso paramétrico, y que el arquitecto siempre ha operado de manera paramétrica” David Gerber 2007 en (DAVIS D. , 2013)

El pensamiento paramétrico en arquitectura, antecede por mucho los avances digitales y la inclusión de la concepción arquitectónica basada en parámetros algorítmicos, en los softwares de uso masivo. Innumerables arquitectos exponen esta premisa de manera categórica, como es el caso de Farshid Moussavi, en un artículo direccionado a reconocer la arquitectura paramétrica en todos sus aspectos, no solo en el aspecto morfológico.

Moussavi plantea que *“No es nada nuevo el pensamiento paramétrico en arquitectura. La buena arquitectura siempre ha estado consciente de su rol social, y consecuentemente ha estado informada de parámetros polivalentes.”* (MOUSSAVI, Farshid, 2011) Es por esto, que la raíz del diseño paramétrico siempre ha sido vigente en la arquitectura, desde los vestigios de las primeras construcciones, los edificios han sido concebidos en base y en respuesta a

factores externos que los condicionan y los forjan volviéndose intrínsecos.

Así lo enuncia el AIACC: *“los edificios han sido diseñados y construidos en relación a una variedad de fuerzas cambiantes, incluyendo el clima, la tecnología, el uso, el carácter, el escenario, la cultura, y el estado de ánimo. El ordenador no inventó el diseño paramétrico, ni tampoco ha redefinido la arquitectura o la profesión...”* (AIACC: The American Institute of Architects, California Council, 2012)

Es una concepción completamente errada plantear que la arquitectura digital antecede a la arquitectura paramétrica, sin embargo la arquitectura y construcción paramétrica que conocemos hoy le debe mucho a los avances de softwares y de recursos digitales, pues estos significaron una herramienta muy valiosa que ha permitido mayor exactitud a nivel cuantitativo y cualitativo de proyección y concepción arquitectónica.

En los trabajos, teorías y planteamientos de muchos arquitectos y movimientos anteriores a la revolución digital, se denota una manera de proceder, un lenguaje, unos intereses muy parecidos a la forma de desarrollo proyectual denominada hoy paramétrica. Arquitectos como Antoni Gaudí, Frei Otto, Frederick J. Kiesler, Heinz Isler, Erich Mendelsohn, Kiyonori Kikutake, habían concebido y modelado estructuras y formas complejas con diferentes grados de capacidad técnica, y de la misma manera teorías como las de Durand y Palladio se pueden interpretar como descripciones algorítmicas del proceso de diseño.

Esto podemos ampliarlo al detallar casos específicos como: El modelo funicular de Gaudí, para la capilla de la Colonia Guell, que se basaba en un análisis con base en el parámetro de cargas y fuerzas aplicadas mediante un sistema suspendido en cables in-



vertido, donde resulta un modelo de fuerzas a compresión, que de manera sencilla planteaba un resultado. Este método de la computación análoga fue ampliado por Frei Otto para incluir, entre otras cosas, las superficies mínima derivada de películas de jabón y caminos mínimos encontrados a través de lana sumergidos en líquido. Otto llama el diseño con estos modelos Form-finding. Una frase que pone en primer plano la naturaleza exploratoria de modelado paramétrico. (DAVIS D. , A History of parametric, 2013)

Es curioso como estos, hoy identificados como grandes arquitectos, utilizaron esta forma de conceptualizar como una técnica oculta y personal de experimentación en el proceso proyectual, denotando la propiedad natural y un tanto resultante de la paramétrica.

Al profundizar en los antecedentes, es inevitable identificar que aun cuando este pensamiento paramétrico existió en la arquitectura en periodos pasados, se manifestó en forma primitiva, en consecuencia no fue desarrollado y utilizado por los sectores comunes de la construcción. Estuvo presente en la concepción de grandes arquitectos, pero su aplicación no fue masiva o general, lo que hace que no sea comprendido como la forma de construir implícita en el pensamiento del arquitecto.

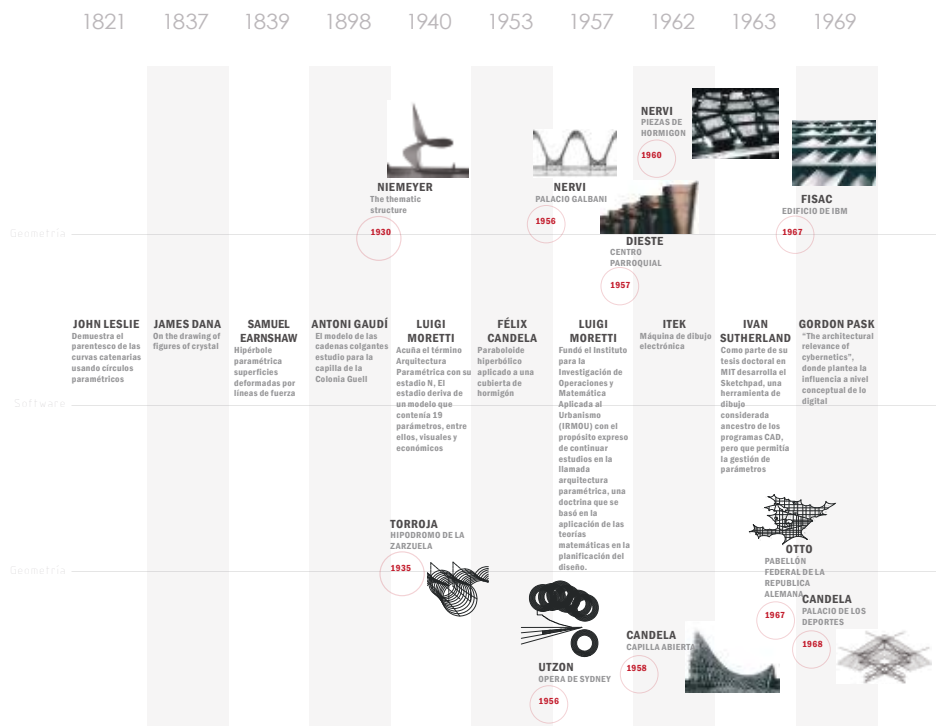
Un aspecto importante de esta condición es la fabricación en serie, a la

que nuestro sector está acostumbrado actualmente, y que se contrapone a la forma personalizada y variable de la arquitectura paramétrica, que toma mucho en el aspecto constructivo de las técnicas de manufactura artesanal. De manera influyente en la adopción de la construcción seriada, en contraposición con la personalización y variabilidad que ofrece la paramétrica Lisa Iwamoto plantea: aunque el proceso de hacer dibujos había pasado de ser analógico a ser digital, en el ámbito del diseño de edificios esta transición no se vio realmente reflejada. El diseño asistido por ordenador sustituyó a los dibujos hechos sobre el tablero, pero los edificios seguían teniendo prácticamente el mismo aspecto: un tipo de representación bidimensional reemplazó a otro. Fue necesaria la aparición del modelado tridimensional por ordenador y de la modelación digital para dar un vuelco al enfoque del diseño y ampliar los límites de formas arquitectónicas y la construcción. (DUNN, Proyecto y Construcción Digital en Arquitectura, 2012)

De manera que la arquitectura paramétrica como resultado de vertientes muy direccionadas a la búsqueda de formas óptimas, formas que responden a su propio comportamiento natural y que: resultan, surgen, emergen, de la experimentación e iteración matemática, con un lenguaje basado en la com-

- I.12 m
- I.13 m
- I.14 m
- I.15 m
- I.16 m





presión tridimensional, lo que no es congruente con una fabricación de series moduladas, sino que da origen a técnicas y procesos de fabricación basados en prototipado, en clasificación de variantes, en versiones; y amerita nuevas técnicas de fabricación a la altura de su proceso conceptual.

1.1.3. Recorrido evolutivo

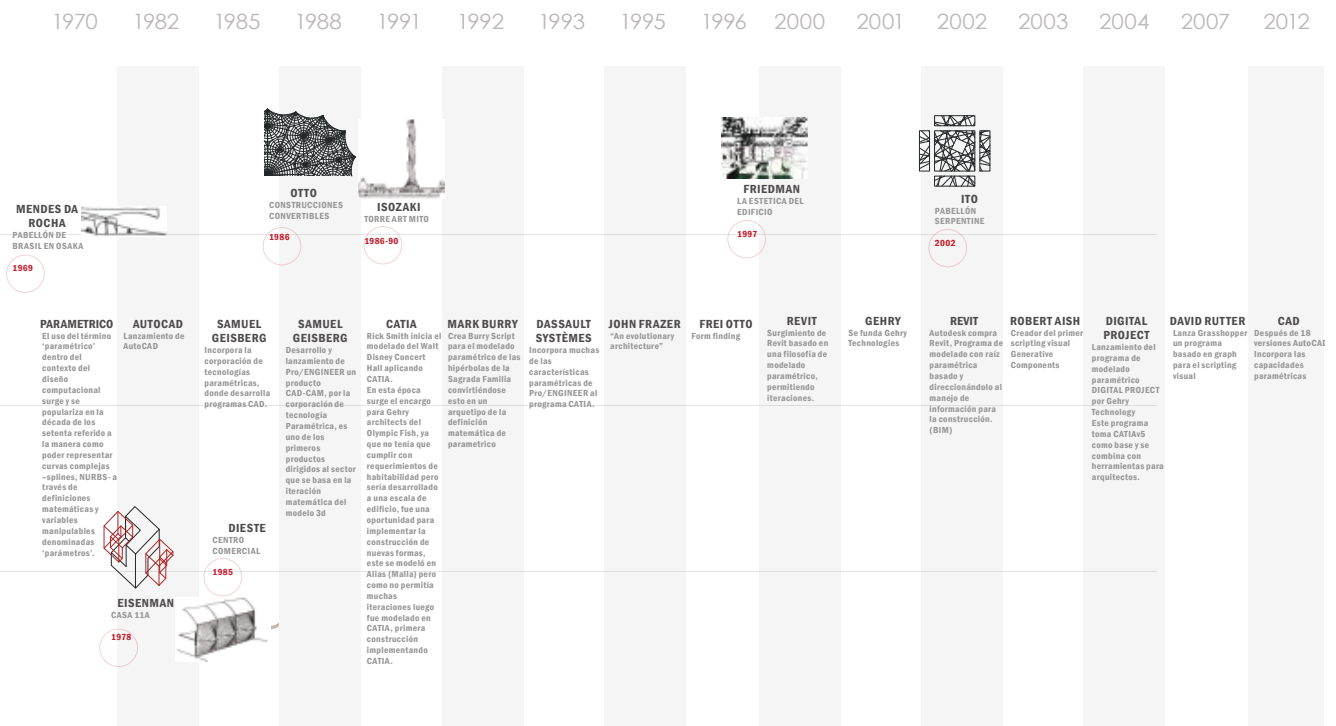
Partiendo de los primeros vestigios de pensamiento paramétrico en la historia de la arquitectura, junto con los avances en software paramétricos y vistos en contraposición con los posibles avances en técnicas constructivas de esta vertiente, así como los cambios relevantes del hormigón armado en la historia enfocados al tema que nos concierne. Nos direccionamos al análisis del desarrollo de la arquitectura paramétrica y las distintas líneas de enfoque de la misma. Buscando siempre identificar el ritmo evolutivo: de las técnicas, soluciones puntuales, y recursos del sector construcción para este tipo de arquitectura.

1.1.4. Geometría y desafío de las formas

La geometría es uno de los aspectos más importantes e intrínsecos del proceso de diseño paramétrico. Presente en todas las etapas de su desarrollo, desde la definición de la forma, hasta el proceso constructivo y en el interme-

dio de ambos. Las nuevas libertades en términos de geometría, dentro del contexto paramétrico y generativo, presentan nuevos problemas o retos en la emergencia, aplicación y ejecución de estas nuevas y complejas formas. En la última mitad de la década, la descripción de la forma arquitectónica se ha expandido radicalmente más allá de la forma euclidiana para incluir nuevas geometrías: las no-euclidianas, las fractales, las procesales y las paramétricas. La existencia de tales geometrías ha sido supuesta alrededor de los tres siglos pasados, pero antes de la computación digital, solo podían ser tratadas en sus formas más generales y a través de sus ejemplos más simples, ampliamente inaccesibles a todos excepto los topólogos, o en casos aislados con un desarrollo análogo, basado en la experimentación con modelos físicos (hiperboloides parabólicas presentes en la sagrada familia de Antoni Gaudí, las catenarias invertidas de Frei

Otto, etc). Con lo cual, se identifica la existencia en la práctica de diseñadores con cierta experiencia en estos temas, “de manera implícita geométricas dentro de su rama. Usando las herramientas disponibles en el momento, los diseñadores siempre han desarrollado un conjunto de trucos del oficio por los cuales podrían crear las formas deseadas de manera confiable.” (BERNACCHI, 2010) Como identificable el medio fricciona el diseño, las herramientas al alcance hacen posible la concepción y desarrollo de estas nuevas formas, posibilitando la visualización de características y dimensiones, que era imposible percibir en el pasado. De manera que los softwares permiten la realización de nuevas geometrías complejas, curvas y articuladas, ya que, “el modelado digital trajo consigo el cambio de la representación del diseño arquitectónico de la notación explícita de la geometría a la instrumentación

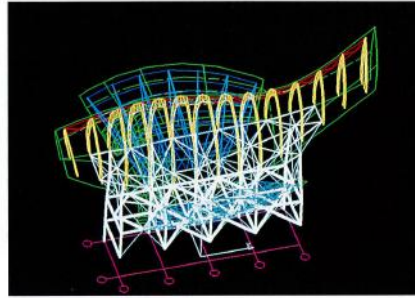
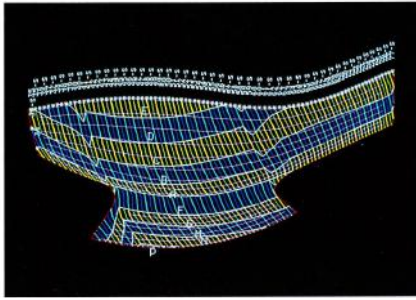


de relaciones geométricas. (MENGES, Archim, HENSEL, Michael, & WEINSTOCK, Michael, 2006) Posibilitando la descripción de las formas en todas sus dimensiones y abriendo el campo de la fabricación de las mismas, en este precepto dimensional.

Las nuevas geometrías ya no son vistas como monstruosas o patológicas, creadas para desafiar los límites de la euclidiana, sino como una generalización de las geometrías clásicas, formalismos de la utilidad y aplicabilidad para la arquitectura y la experiencia de cada día. (SHELDEN & WITT, 2011) La aproximación a la geometría desde la paramétrica, amerita la identificación de formas complejas y compuestas. El reconocimiento de estas composiciones geométricas, es el centro de las herramientas de representación y concepción paramétrica y se vale de construcción explícita, el modelado 3d, la geometría descriptiva e intersecciones. Desde la definición de paramétrica y las

líneas teóricas que desarrollan el concepto, podemos identificar la intención de “reconectar la teoría y discurso de la forma arquitectónica contemporánea a su origen en el desarrollo de las matemáticas modernas, mientras trae a la palestra las implicaciones radicales que ofrecen esos desarrollos teóricos a la epistemología de la forma.” (SHELDEN & WITT, 2011) Esto desde una aproximación programática y computacional del desarrollo geométrico-morfológico y de sus posibles emergencias. “Es discutible la adopción de las geometrías propias de las matemáticas modernas, en la arquitectura contemporánea, como derivadas o eliminadas de la evolución correspondiente en la base fundamental de espacio y forma que estos avances proponen.” (SHELDEN & WITT, 2011) Sin embargo, es inevitable identificar unas tendencias geométricas basadas en relaciones y ecuaciones. Es el caso de la paramétrica que en su desarrollo formal no solo

I.17 Línea de tiempo de Paramétrica y obras con geometría significativa.



adopta métodos de diseño basado en comportamientos desarrollados por ordenador, también adopta algoritmos matemáticos dentro de los softwares. Como el diseño algorítmico, ha surgido vía la aplicación de una colección de técnicas geométricas discretas, el lenguaje contemporáneo de la forma se ha convertido en un archipiélago disperso de geometrías con identificaciones topológicas únicas, colectivamente demandadas en el espacio pero de otra manera desconectadas de cualquier marco unificador. (SHELDEN & WITT, 2011) Un ejemplo evidente de esto es la aparición de la fluctuación de la forma, como plantea Mario Carpo: “...entre lo recto y lo curvilíneo, entre la parataxis y la sintaxis” (BERNACCHI, 2010) para resultar en el desarrollo de formas curvas complejas con mayor facilidad.

Dichas geometrías curvilíneas complejas son producidas con la facilidad de las geometrías euclidianas de superficies planas y cilíndricas, esféricas o cónicas. El plano ya no genera el diseño; las secciones solo mantienen un rol puramente analítico. (KOLAREVIC, 2003)

Una vez más anclamos en el desarrollo del software, ya que en los últimos quince años, la arquitectura contemporánea ha sido profundamente alterada por la computación y la tecnología de la información. La diseminación del diseño de software y la maquinaria de fabricación por control numérico han re-actualizado el rol tradicional de la geometría en la arquitectura y la han abierto a la búsqueda

de posibilidades administradas por la topología, geometría no euclidiana, diseño de superficies paramétricas y otras áreas de matemáticas.

Del aspecto técnico del código de scripting, al paradigma biomorfo de la forma y su asociación con genéticas, el impacto de la computación en la disciplina ha sido ampliamente documentado. (SHELDEN & WITT, 2011)

Pero para los fines de esta investigación, tan centrada en un desarrollo constructivo de estas nuevas complejidades, la aproximación desde la geometría busca, la definición de las nuevas formas, desde su estado más primitivo y la identificación de sus posibles transformaciones, para la aplicabilidad y soluciones constructivas de las mismas. Esto nos direcciona a la identificación de estrategias conceptuales de la construcción geométrica como:

- Form-finding: Incluye formas colgantes naturales asociadas con las estructuras funiculares de Antoni Gaudí, las catenarias invertidas de Frei Otto y en las cáscaras de Heinz Isler, pero también las cáscaras de rejillas tensadas, que cuentan con esfuerzo de flexión. Si la forma es encontrada digitalmente, es inicialmente parametrizada por piezas o por polinomios de alto grado. Su forma final es el resultado de la consecución de un estado de equilibrio estático. (ADRIAENSSENS, BLOCK, VEENENDAAL, & WILLIAMS, 2014)

- Auto-organización (Self-organization): Proceso de organización espontánea (es decir, sin directrices ni dirigida por un sistema externo), del desarrollo de una estructura organizada. La creación espontánea de un “todo organizado” de una colección “desordenada” de partes que interactúan, como lo demuestra en los sistemas de auto-organización de la física, la química, la biología, la sociología, etc. Es una parte básica de emergencia dinámica. (HEYLIGHEN, 1989)
- Forma libre (Free-form): Cáscaras esculturales o de curva libre que son generadas sin tomar en consideración el comportamiento estructural. Al ser formadas digitalmente, son descritas por polinomios de alto grado como los NURBS. (ADRIAENSSENS, BLOCK, VEENENDAAL, & WILLIAMS, 2014)
- Plegado (Folding): El uso de este concepto remonta a la publicación del filósofo francés Gilles Deleuze, “Le Pli”, un estudio de la metafísica de Leibniz, que plantea la posibilidad de visualizar la complejidad en formas no necesariamente ortogonales. Se define por Mario Carpo como: *la tendencia hacia curvilinearidad que revirtió una tendencia anterior hacia la angulosidad de la forma.* (CARPO, 2004) Evidentemente engloba toda tendencia formal a la curva y que sirvió de respuesta contra el desconstruccionismo.
- Panelado (Paneling): Consiste en la racionalización de las superficies en paneles para su ensamblaje in situ, valiéndose de herramientas para transferir modelos digitales estándar en una forma adecuada para la aplicación de arquitectura y



fabricación, o viceversa.

- Este se basa en la subdivisión es un método popular para dar forma al modelado de superficies y se basa en el refinamiento sucesivo de una malla gruesa de entrada. Los algoritmos de subdivisión, tienden a producir mallas estéticamente agradables y por lo tanto son particularmente interesantes para la arquitectura. Pueden ser utilizados para generar mallas formadas por triángulos, cuadrados o hexágonos, o patrones aún más complicados. También puede ser parte de la estrategia de optimización geométrica de una estructura arquitectónica. (POTTMANN, Geometry and New and Future spatial patterns, 2009)

Sobre la base de la elección del material y de la tecnología de fabricación, se prefieren ciertas formas geométricas de



los paneles; paneles planos son siempre los más simple y más barato. Los Paneles curvados deben ser cilíndricos cuando se trabaja con vidrio; pueden ser más generales, de curva sencilla cuando se utiliza el metal; y deben ser superficies regladas para ciertas tecnologías en la fabricación de paneles curvos de hormigón armado con fibra de vidrio. (POTTMANN, Geometry and New and Future spatial patterns, 2009)

* Superficies regladas (Ruled Surfaces): Superficies formadas por una familia de líneas rectas y por lo tanto poseen ventajas en la fabricación. Genéricamente, las superficies regladas poseen curvatura gaussiana negativa (K), lo que significa que tiene forma de silla de montar; también pueden ser de una curva sencilla ($K = 0$). Por lo tanto los diseños que contienen grandes áreas con curvatura gaussiana negativa son candidatos prometedores para la racio-

I.18 m
I.19 m
I.20 m

nalización en paneles reglados. (POTTMANN, Architectural Geometry as Design Knowledge, 2010)

* Blob: Término acuñado por el arquitecto Greg Lynn en 1995 en sus experimentos en el diseño digital con metaball software gráfico, para referirse a un tipo de formas con tendencia a la curvatura y organicismo, llegando incluso a parecer a la ameba. Pronto una serie de arquitectos y diseñadores de muebles comenzó a experimentar con este software "blobby" para crear formas nuevas e inusuales. A pesar de su aparente organicismo, la arquitectura blob es impensable sin este y otros programas de diseño asistido por ordenador similares.

En la formación digital de las geometrías y formas, surgen aproximaciones a la construcción de la forma, como consecuencia directa de las opciones de softwares y sus respectivas lógicas conceptuales. Las presentadas a continuación, son solo el punto de partida:

* Superficies racionales no uniformes b-spline (NURBS): Las geometrías se producen como asignaciones entre dos o más espacios topológicos distintos, y el espacio tridimensional continente fuera de la superficie. El espacio extrínseco contiene la forma como punto de ocupación, mientras el espacio intrínseco (el espacio de la superficie) es la base mediante la cual su superficie es descrita, medida y atravesada, y la perspectiva por la cual emerge su continuidad. Su marca, como una superficie continua emerge de ambas estructuras cartesianas numeradas intrínsecas y extrínsecas, y por las relaciones entre coordenadas específicas definidas a través de la cartografía. (SHELDEN & WITT, 2011)

* Mallas: Son aproximaciones geométricas a través de una disposición de "vértices", "aristas", y "caras" que se combinan para definir la forma del objeto


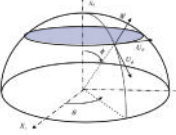
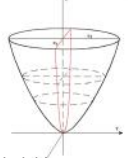
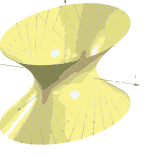
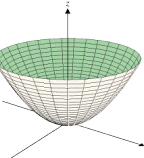

deseado. Un “vértice” es un punto que describe las esquinas o intersecciones de una forma geométrica, y también se le puede asignar funciones adicionales, como color y textura coordenadas. Una “arista” es una conexión entre dos vértices, mientras que una “cara” es un conjunto cerrado de bordes que describe un ejemplo de forma -por geométrica, un triángulo o cuadrilátero en función del número de aristas. (DUNN, Digital Fabrication in Architecture, 2012)

* Superficies desarrollables (Developable Surfaces): Estas superficies, también conocidas como superficies de curva simple, pueden ser desplegadas en el plano sin estiramiento o desgarrar. Se caracterizan por una familia de líneas rectas, a lo largo de cada uno de los cuales poseen un plano tangente constante. La investigación reciente relaciona la cobertura de una superficie de forma libre por las tiras de superficie desarrollables (D-strip) con el trabajo en mallas de cuadriláteros con caras

planas. (POTTMANN, Architectural Geometry as Design Knowledge, 2010)

* Geometrías Curvilíneas complejas: Comprende formas geométricas y topológicas con tendencia a apariencia de alabeado o combado, cóncavo y convexo de las superficies. Su auge revela la existencia de softwares actuales que facilitan su realización y la experimentación formal con estas, además de transformación y revolución de las formas. Son consecuencia de la tendencia actual a la complejidad formal basada en la definición topológica de superficies curvilíneas o quebradas frente a la definición geométrica de la retícula ortogonal o la repetición de pórticos uniformes.

I.21 yI.22 Tabla síntesis de geometrías curvilíneas que se presentan en las prácticas actuales.

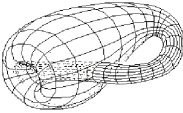
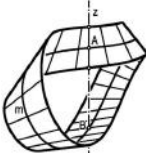

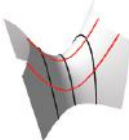
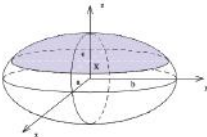
	Descripción	Estrategia	Construcción
 <p>Bóveda de Túnel</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Consiste en una curva simple extruida longitudinalmente con desarrollo semi-cilíndrico y desarrollo transversal en forma de arco cóncavo. 	<ul style="list-style-type: none"> •Panel de hormigón de 80x80cm 	<ul style="list-style-type: none"> •Encofrados industriales curvos
 <p>Cúpula circular</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Es una cáscara rotacional o de revolución, semejante a media esfera cóncava, una bóveda redondeada hecha de cualquiera de los segmentos curvos o más bien un arco girado alrededor de su eje vertical central. 	<ul style="list-style-type: none"> •Elementos lineales estructurales, columnas 	<ul style="list-style-type: none"> •Molde configurable, moldeable o confeccionado con maquina de control numerico de fresado y corte.
 <p>Paraboloides</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Es una cuádrica, un tipo de superficie tridimensional que se describe mediante ecuaciones, una superficie del espacio tridimensional real usual, en un sistema de coordenadas ortogonal y unitario, y cuyas coordenadas son x, y, z. 	<ul style="list-style-type: none"> •Envoltorio continuo, con previsión de instalaciones y de componentes acústicos 	<ul style="list-style-type: none"> •Encofrados industriales curvos y molde reconfigurable
 <p>Hiperboloides de revolución</p>	<ul style="list-style-type: none"> •El hiperboloides es la superficie de revolución generada por la rotación de una hipérbola alrededor de uno de sus dos ejes de simetría. 	<ul style="list-style-type: none"> •Reglado de la superficie 	<ul style="list-style-type: none"> •Moldes reconfigurables y moldes flexibles
 <p>Paraboloides elíptico</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Un paraboloides será elíptico cuando los términos cuadráticos de su ecuación canónica sean del mismo signo y si este es girado en torno a su eje de simetría resulta en un paraboloides de revolución. 	<ul style="list-style-type: none"> •Division de la superficie. 	<ul style="list-style-type: none"> •Encofrados con perfiles congruentes.
 <p>Helicoides</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Superficie mínima barrida por una línea que gira alrededor de un eje perpendicular a la línea y al mismo tiempo moviéndose a lo largo del eje. 	<ul style="list-style-type: none"> •Subdivisión de la superficie para lanelado 	<ul style="list-style-type: none"> •Encofrado y moldes hechos a medida.

Dentro del campo de las formaciones curvilíneas, se desglosan una gama de superficies y formas, resultantes de la descomposición superficial, con características diversas que se ven intrínsecamente ligadas a la construcción paramétrica actual. Algunas de estas formaciones parten de la base digital y otra de la experimentación en la búsqueda de la forma y prototipado, pero todas tienen base en la geometría de cascaras, las superficies regladas y la topología de la formas, como es evidente en su designación:

- Bóveda de Túnel: Consiste en una curva simple extruida longitudinalmente con desarrollo semi-cilíndrico y desarrollo transversal en forma de arco cóncavo. Es una curva isométrica al plano con poca deformación plástica del material.
- Cúpula circular: Es una cáscara rotacional o de revolución, semejante a media esfera cóncava, una bóveda redondeada hecha de cualquiera de los segmentos curvos o más bien un arco girado alrededor de su eje vertical central.
- Superficie traslacional: Generada por deslizamiento de una curva

plana a lo largo de otra curva plana o generatriz, mientras se mantiene la orientación de la curva constante de deslizamiento. Esta comprende paraboloides elíptico (generatriz cóncava), paraboloides hiperbólico (generatriz convexa), paraboloides cilíndrico (generatriz recta) etc.

- Paraboloides hiperbólico: Superficie reglada alabeada, con curvatura negativa y forma de silla de montar, es una superficie trascendental que consiste en el deslizamiento de una curva plana (paraboloides) cóncava a lo largo de una generatriz convexa.
- Paraboloides: Es una cuádrica, un tipo de superficie tridimensional que se describe mediante ecuaciones, una superficie del espacio tridimensional real usual, en un sistema de coordenadas ortogonal y unitario, y cuyas coordenadas son x , y , z . Los paraboloides pueden ser elípticos o hiperbólicos, según sea que sus términos cuadráticos tengan igual o distinto signo.
- Paraboloides elíptico de revolución: Un paraboloides será elíptico cuando los términos cuadráticos de su ecuación canónica sean del mismo signo y si este es girado en torno a su eje de simetría resulta en un paraboloides de revolución. Que en términos formales comprende un paraboloides convexo que gira en torno a su eje de simetría.
- Elipsoide de revolución: Es la superficie generada por una elipse que gira alrededor de uno de sus dos ejes de simetría. A veces se le da el nombre de esferoide.
- Hiperboloides de revolución: El hiperboloides es la superficie de revolución generada por la rotación de una hipérbola alrededor de uno de sus dos ejes de simetría. Dependiendo del eje elegido, el hiperboloides puede ser de una o dos hojas.

	Descripción	Estrategia	Construcción
 <p>Botella de Klein</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie no orientable abierta sin interior, ni exterior, ni borde, cuya sección resulta ser una cinta Möbius 	<ul style="list-style-type: none"> • División de la superficie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Moldes especiales, textiles, configurables, y hechos a medida
 <p>Cinta de Möbius</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es una superficie topológica de un solo lado y un sólo perímetro. La cinta de Möbius tiene la propiedad matemática de ser no orientable. Puede ser realizado como una superficie reglada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reglado de la superficie. y discretización de la forma. 	<ul style="list-style-type: none"> • Encofrado configurable.
 <p>Toroide</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie de revolución generada por una curva plana cerrada simple que gira alrededor de una recta exterior coplanaria (el eje de rotación) con la que no se interseca. 	<ul style="list-style-type: none"> • División de la superficie, congruencia de perfiles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Encofrados 3d especiales hechos a medida
 <p>Paraboloides hiperbólica</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie reglada alabeada, con curvatura negativa y forma de silla de montar, es una superficie trascendental que consiste en el deslizamiento de una curva plana (paraboloides) cóncava a lo largo de una generatriz convexa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reglado de la superficie 	<ul style="list-style-type: none"> • Moldes reconfigurables y hechos a medida
	<ul style="list-style-type: none"> • Es la superficie generada por una elipse que gira alrededor de uno de sus dos ejes de simetría. A veces se le da el nombre de esferoide. 	<ul style="list-style-type: none"> • División de la superficie, congruencia de perfiles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Encofrados 3d especiales hechos a medida
<ul style="list-style-type: none"> • Helicoide: Superficie mínima barrida por una línea que gira alrededor de un eje perpendicular a la línea y al mismo tiempo moviéndose a lo largo del eje. • Cinta de Möbius: Es una superficie topológica de un solo lado y un sólo perímetro. La cinta de Möbius tiene la propiedad matemática de ser no orientable. Puede ser realizado como una superficie reglada. • Botella de Klein: Superficie no orientable abierta sin interior, ni exterior, ni borde, cuya sección resulta ser una cinta Möbius. • Toroide: Superficie de revolución generada por una curva plana cerrada simple que gira alrededor de una recta exterior coplanaria (el eje de rotación) con la que no se interseca. 			

Las antes mencionadas son la base de las tan nombradas nuevas geometrías, atribuidas a muchas de las construcciones arquitectónicas actuales y en conjunto trabajadas con un esquema paramétrico de sus limitaciones o factores que influyen sobre estas. De manera que al referirnos a estas geometrías complejas y el desafío que representa su construcción, evidentemente identificamos la necesidad de estrategias para su construcción y puesta en obra. Esto dará origen a las inquietudes de fabri-

cación y transformación del material para cubrir sus efectos de deformación dados por la complejidad de las formas. De manera que la geometría identifica dentro del campo de la paramétrica, pide el desafío de sí misma, buscando resolución de retos formales y mecánicos de las fuerzas y parámetros que la conforman.

1.1.5. Teorías, conceptos y líneas de Paramétrica

Alrededor del término paramétrica, existe un grupo de estrategias e ideologías teóricas que siguen la línea del diseño digital, pero que se nutren de otras disciplinas en términos teóricos. El caso de geometría asociativa, scripting, modelado flexible, diseño algorítmico, y diseño generativo, son algunos de los atribuidos a la paramétrica como nueva lógica del diseño.

Daniel Davis es uno de varios autores preocupados por el aspecto del software de modelado paramétrico, que ha planteado la existencia de una incertidumbre en la aplicación del término paramétrica, cuando se refiere a una batalla de estilos planteada por Schumacher (SCHUMACHER, 2008), y a otras líneas que se exponen actualmente en torno al término. Sin embargo este mismo expone que *“esto significa la importancia creciente del modelado paramétrico dentro del discurso arquitectónico.”* (DAVIS D., 2013)

En las diferentes definiciones de la paramétrica y las ideas de desarrollo de su lógica y características, hemos visto una evolución del concepto, pero también un desarrollo tanto analógico como digital, y la aplicación en arquitectura desde la búsqueda de realización de geometrías complejas.

Observamos su desarrollo y aplicación poco constante a lo largo de la historia de la arquitectura, las diferentes maneras en las que ha sido aplicada, sus móviles principales, las diferentes

líneas de pensamiento, al abordar tanto los proyectos de diseño paramétrico, como al desarrollar las herramientas de trabajo que lo posibilitan, así como también los enfoques de pensamiento y líneas de definición de la misma.

Algunas de las definiciones de paramétrica en arquitectura, que mejor direccionan a una respuesta en nuestra búsqueda de entendimiento del concepto y que aparecen en nuestro recorrido del tiempo con una línea coherente, son las enunciadas en diferentes épocas por: Luigi Moretti en 1960, que se adhiere al aspecto matemático y computable de la paramétrica y sus parámetros, en un momento donde esta práctica solo se había realizado de manera análoga y nunca había sido enunciada como tal, ni había sido identificada con esta línea de pensamiento; Mark Burry (2011), que una vez más apela a la identificación de su uso de parámetros y amplía la idea planteando su composición en una serie de ecuaciones; Koralevic (2003) que llama posibilidades a los resultados de ecuaciones antes planteadas por Burry y que además resalta el cambio de proceso de la singularidad a la multiplicidad; y del mismo modo Michael Meredith (2000), establece que se produce mediante relaciones entre objetos que permiten cambios en elementos por independiente y se propagan por el sistema, dando lugar a la condición generativa atribuida al proceso.

Dentro de estas definiciones es identificable la existencia como antes planteado, de los parámetros, las relaciones de estos y los resultados de las mismas, la tendencia a un proceso generativo por medio de la propagación de cambios en el sistema y sobre todo la identificación de un nuevo proceso, un nuevo sistema polivalente con base en una lógica matemática. Todas estas definiciones a lo largo del tiempo tienen una congruencia y aspectos comunes fácilmente relacionables, se mantienen en una misma página, dando origen a las

bases determinantes de la paramétrica aplicada a la arquitectura.

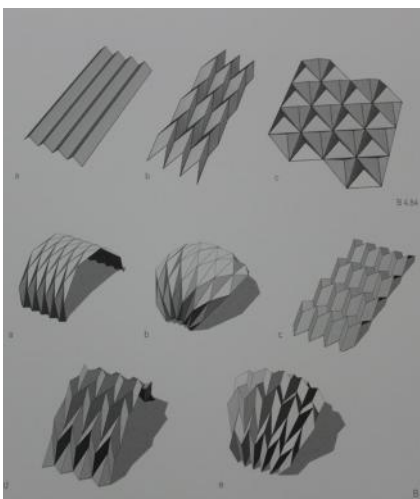
Pero es significativo indagar en todas las vertientes del concepto y dentro de líneas un tanto diferentes, descubrimos la iniciativa de ver la paramétrica como un estilo de época, como un paradigma mismo en la arquitectura. Es el caso de la definición de parametricismo dada por Schumacher (2008), la cual en su directo y claro enunciado plantea que hemos de *“asumir la corriente principal para convertirse en el nuevo estilo de época en el sentido de finalmente impactar y determinar la fisonomía del entorno construido.”* Refiriéndose en su discurso de manera notoria a la vertiente morfológica y estética. Aun cuando hace alusión a una nueva definición del estilo que no solo descansa en los aspectos estéticos, planteando que *“los estilos son programas de investigación del diseño, que no solo son sobre la apariencia, sino también sobre las metodologías y agendas, y también involucran cierto entendimiento y manejo de programa.”* (SCHUMACHER, 2008)

“La denominación del parametricismo como nuevo estilo de época, tiene la intención de facilitar un balance retrospectivo y un avance prospectivo en nombre de la obra de toda una generación de arquitectos de vanguardia que han cohesionado en torno a diversos métodos digitales y principios estéticos.” (SCHUMACHER, 2008)



A pesar de ser una idea muy distinta de las antes presentadas, guarda realidades irrefutables, cuando menciona el manejo de software, el asunto de las formas, los diversos métodos digitales y cuando resume en premisas como: la existencia de una *“gran diferencia del parametricismo en comparación con todos los enfoques anteriores”* o el asunto de la *“transformación verdaderamente radical del repertorio espacial y formal provocada por procesos computacionales.”* Schumacher, muy fervientemente lanza a la palestra (con intenciones particulares), conceptos que al extraer por independiente conservan una realidad indudable en términos de la arquitectura paramétrica.

Categoría, es la diferencia de la arquitectura, las tecnologías y las técnicas constructivas, así como las aspiraciones formales y el desarrollo de las



herramientas conceptuales de la actualidad, con respecto a tiempos atrás. No es la excepción el desarrollo del proceso proyectual que se presenta hoy como un proceso semántico, con mayor énfasis en la retroalimentación, e información bidireccional en las diferentes etapas de su desarrollo. Estas son realidades comunes a todos los planteamientos alusivos a este tipo de arquitectura.

De estas líneas de pensamiento principales, así como los conceptos adheridos a la práctica, a los softwares y herramientas que la posibilitan, de la mano de la concepción de un pensamiento paramétrico que antecede este movimiento actual, podemos rescatar lineamientos importantes que trazan los atributos intrínsecos e innegables de la paramétrica aplicada a la arquitectura contemporánea:

* La forma, topología, morfogénesis, geometrías complejas, curvas

- * La genética, sistemas generativos
- * Parámetros
- * El diseño asistido por computador, softwares
- * La fabricación digital
- * Dinamización del material y el desarrollo de una nueva materialidad
- * El algoritmo, scripting, la ecuación, la relación
- * Desarrollo de lo singular

Estos atributos mencionados, son una consecuencia notable de los principios presentes en la evolución del diseño paramétrico aplicado en arquitectura. Principios tales como: parámetros variables, forma de proliferación de parámetros para diferenciación de sistemas y la forma de correlacionarse de estos sistemas diferenciados. Así lo esclarece Patrick Schumacher (TENORIO, 2014) en una entrevista sobre el impacto del Parametricismo en la arquitectura y sociedad actual:

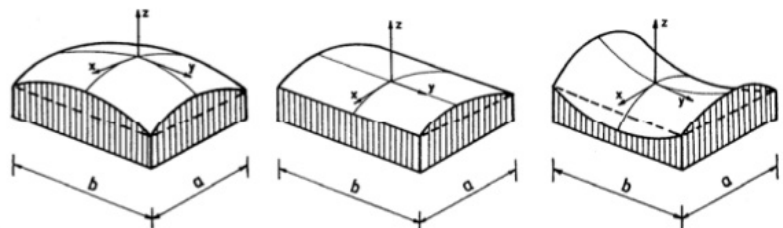
“... todos los elementos de la arqui-

SURFACES OF TRANSLATION :

SURFACES OF TRANSLATION ARE GENERATED BY SLIDING A PLANE CURVE ALONG ANOTHER PLANE CURVE, WHILE KEEPING THE ORIENTATION OF THE SLIDING CURVE CONSTANT.

THE LATTER CURVE, ON WHICH THE ORIGINAL CURVE SLIDES, IS CALLED THE GENERATOR OF THE SURFACE.

IN THE SPECIAL CASE IN WHICH THE GENERATOR IS A STRAIGHT LINE, THE RESULTING SURFACE IS CALLED A CYLINDRICAL SURFACE.



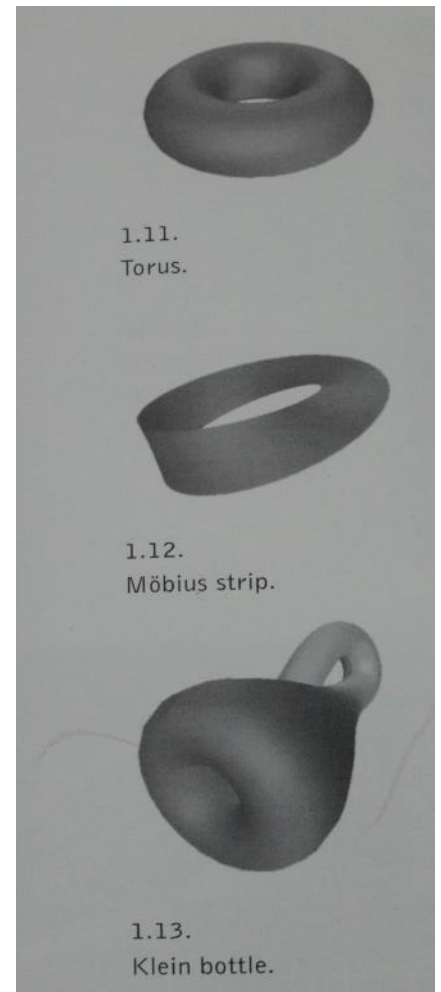
fiere a un entendimiento de que todos los sistemas generativos operan desde un amplio ambiente del que dibujan información o entrada sobre la cual actúan. El componente ambiental describe el flujo de información entre el proceso generativo y su ambiente operativo.

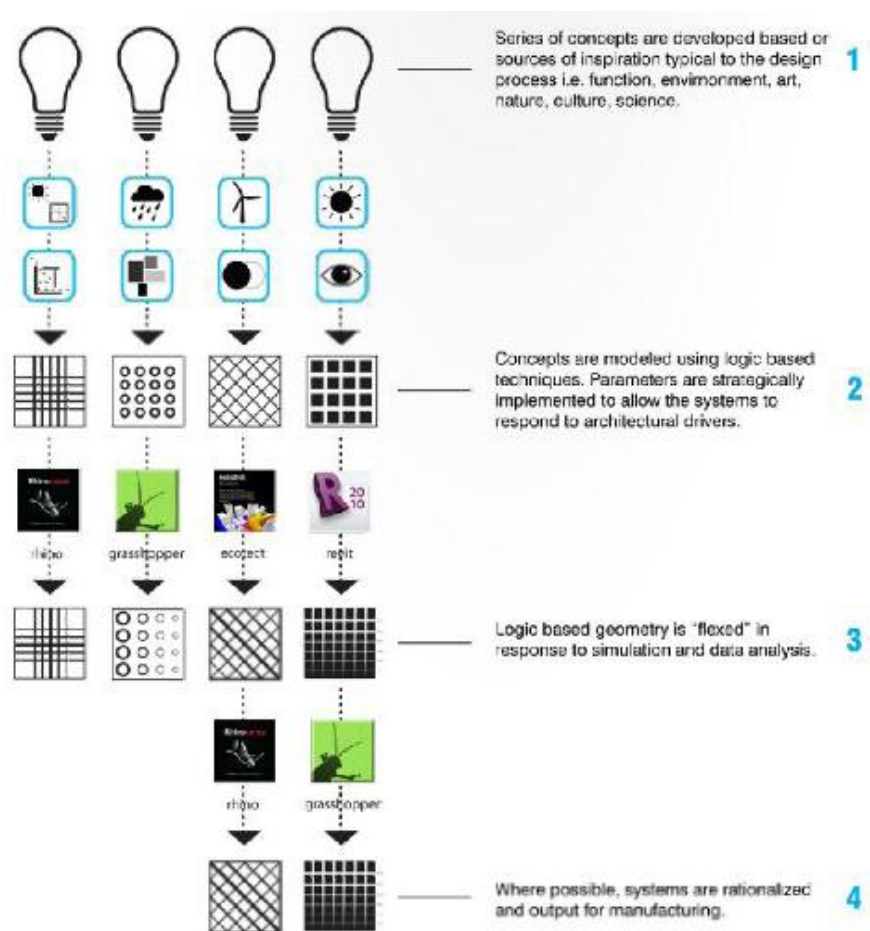
- Resultados sensoriales: los artefactos producidos por este proceso como selección instantánea, estados finales o acumulaciones como mapeo o percepción directa de las entidades. (RIIBER, 2011)

En este orden, *“sistemas de diseño paramétricos están introduciendo un nuevo conjunto de conceptos, basado en la teoría del diseño, la teoría computacional y orientada a objeto, e ingeniería de software que pueden ser bastante desconocidos para la práctica de los diseñadores.”* (TENORIO, 2014) Algunos de estos conceptos tienen base en aspectos formales, otros en métodos de diseño o intenciones de eficiencia proyectual, como es el caso de: Optimización y racionalización: Estas técnicas permiten obtener formas geométricas alternativas de cáscaras y mejorar su comportamiento mecánico, cumpliendo con las condiciones de diseño (limitaciones de estrés, condiciones de construcción, etc.) de una manera óptima (peso mínimo, máximo de rigidez, nivel mínimo de estrés, etc.). Estas se han visto fuertemente impulsadas por el tremendo aumento de las capacidades computacionales y gráficas, ampliando el campo de la utilización de ordenadores y permitiendo al usuario obtener diseños óptimos para las condiciones de diseño establecidas.

La optimización es la selección de la mejor solución. Selección con respecto a algunos criterios de algún conjunto de alternativas disponibles. En el caso del diseño paramétrico es todo acerca

de la creación de la secuencia de comandos para que coincida con la idea y permite las variaciones necesarias. Especialmente para la geometría, esto significa la creación de una lógica de interacción e interconexión de puntos, líneas y superficies. (HOLST, 2012) Morfogénesis digital: Generación, transformación y derivación de la forma por medios digitales, mediante la utilización de softwares generativos, con cálculo e integración de lógica generativa, con resultados auto-producidos. Geometrías complejas son generadas por la continua dinámica de transformación que permiten los softwares generativos, dando origen a conceptos como emergencia y form-finding. Topología: Comprende las formas geométricas cuyas propiedades cualitativas le permiten no ser afectadas por los cambios de tamaño, ni las deformaciones.





1.2. ACTUALIDAD EN SOFTWARE

Actualmente, el uso del ordenador y de sus respectivos softwares y aplicaciones es indispensable en la práctica de la arquitectura, llegando a ser cuestionada nuestra creciente dependencia del software ante técnicas como el bocetaje, que han perdido hegemonía en la concepción y proyección arquitectónica. Sobre esta crítica existen dos líneas identificables de pensamiento, una expresa nuestra lentitud en el sector de arquitectura para acoger las técnicas y los avances tecnológicos, y otra expresa cierto temor por una dependencia del ordenador y por la supuesta pérdida del rol del arquitecto y su capacidad de decisión.

La denominada arquitectura digital, nos provee constantemente de herramientas para la proyección y avances

en manejo de la información e interpretación de la forma. Pero su mayor logro es: suministrar una lógica, un sistema, facilidades para optimización, métodos y focos de avances en la proyección y concepción. Volviéndose más que una herramienta, en una asistencia inteligente del proceso.

Sin embargo, para alcanzar su dominio actual el software ha tenido que introducirse por medio de CAD como una herramienta sustitutiva del dibujo a mano alzada, en su naturaleza bidimensional, hasta lograr introducir el modelado tridimensional, los softwares generativos y la fabricación digital, para verdaderamente energizar el pensamiento de diseño y expandir los límites de la forma y construcción arquitectónica.

Modelado y visualización tridimensional, form finding generativo, sistemas de modulación encriptada, análisis estructural y térmico, gestión y coordinación

de proyecto, y producción file-to-factory, son solo algunas de las estrategias relevantes desarrolladas con asistencia del software. En este mismo orden, Branko Koralevic explica: *“La arquitectura digital, está definida por procesos basados en ordenadores para origen y transformación, procesos de morfogénesis digital, donde el plural enfatiza la multiplicidad inherentes a la lógica de los conceptos digitales subyacentes, como: geometrías topológicas, poli-superficies isomórficas (blobs), cinemática y dinámica de movimiento, animación de una forma clave (metamorfosis), diseño paramétrico, algoritmos genéricos (arquitectura evolutiva), y performance.”* (KOLAREVIC, 2003) Conceptos que aunque anclan en las posibilidades concedidas por el desarrollo de softwares, poseen un trasfondo teórico y formal, siendo parte de una lógica de diseño distintiva de estas herramientas, de mano de las voluntades del diseñador.

Los programas de arquitectura no están hechos para sustituir la imaginación del arquitecto. Estos sirven de suplemento a las ideas proyectuales del mismo, proveen de diversas posibilidades, permiten los análisis previos, y facilitan el proceso de diseño, planificación y fabricación. Contrastantemente, si un diseñador tiene que utilizar la computación, su imaginación e ideas están delimitadas por las posibilidades de un programa.

De manera que es de rigor comprender los diversos softwares y su lógica interna (tal hiciera un carpintero con respecto a sus herramientas), para poder adoptarlos, explotar su potencial y mejorarlos en función de nuestras necesidades proyectuales. Como herramientas al fin, hemos de considerar las combinaciones de programas y aplicaciones de las que podemos valernos para la realización de labores específicas, tanto en el ámbito de diseño como en su gestión y desarrollo constructivo.

El diseño paramétrico en específico, requiere de mayor conocimiento técnico de temas que antes no eran demandados al rol del arquitecto. Pero con el avance de la programación y su influencia en las posibilidades que provee a nuestra práctica, han sido suficiente razón para que las firmas más importantes de arquitectura se nutran de esto.

Con nuevas demandas, nacen nuevas herramientas o mejoramiento de las existentes, esto es lo que ha sucedido con los softwares. No solo ampliando la oferta, también las características hasta volverse herramientas que podemos modificar para nuestras necesidades. Los softwares paramétricos hacen que sea posible crear variaciones y cambiar elementos mientras se mantienen dependencias especificadas. Creando relaciones entre entidades que al ser modificadas, modifican el sistema de manera automática. Con certeza dotando a todo el proceso de facilidad para la realización de cambios, automatización de las consecuencias y almacenaje del historial. Además de que al utilizarse para fines de análisis, es posible verificar con mayor precisión el proceso evolutivo del diseño.

Este tipo de programas permiten al diseñador *“...trabajar directamente sobre el objeto tridimensional en cualquier momento. Con los modelos de geometría asociativos, el proceso de desarrollo se guarda junto con los objetos, se almacena en la historia de la construcción; esto significa que a pesar de la misma apariencia externa, los objetos se crean con diferentes características y opciones de intervención.”* (PECK, 2014)

No se puede obviar que *“...trabajar con estos programas requiere una comprensión diferente de relaciones y dependencias como características inseparables de cada forma. También hace que sea posible deshacer los pasos de*

proceso individuales.” (PECK, 2014)

En el caso específico del diseño paramétrico y generativo, el arquitecto tiene el reto de un entendimiento cabal del software y del proceso en sí mismo, al punto de adentrarse al historial algorítmico y el desarrollo programático del software y sus aplicaciones compatibles. Además de conocer los paradigmas programáticos y los ambientes de software y funciones de los mismos. Iniciando con las bases funcionales a nivel general de este tipo de softwares, para concepción, diseño y construcción paramétrica, se destacan como presentes desde la constitución de programas como CATIA y Pro-ENGINEER, las características intrínsecas a la lógica funcional de los softwares, siguientes:

Modelación Constructiva (CAD3D – BIM): para realizar configuraciones geométricas con asociación de datos y visualizaciones.

Programación Geométrica: para la definición de procedimientos declarativos que manipulan formas, como Grasshopper en Rhinoceros, Generative Components en Microstation, Digital Project en CATIA.

Optimización Topológica: para cálculo resistente por análisis de elemento finito con restricciones de material o comportamiento.

Simulación Ambiental: cálculo de radiación solar, iluminación, ventilación o consumo energético de edificaciones.

Algoritmos Genéticos: para operaciones que evalúan su resultado según una fórmula de efectividad, utilizando secuencias evolutivas.

Fabricación Digital: equipamientos para elaborar modelos físicos de información digital mediante acciones de corte, rebaje o solidificación.

Existe un rango de ambientes de softwares, donde los arquitectos realizan los modelos paramétricos: desde modelado basado en historial, hasta

el scripting visual, modelado físico, y ambientes de programado textual, estos detallados por Daniel Davis (*Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*, 2013) de la siguiente manera:

“Modeladores basados en historial, identifican como los diseñadores crean la geometría, permitiéndole hacer cambios después. Ejemplos: CATIA, Solidworks, Pro/Engineer Scripting visuales, ejemplifican diagramas de flujo que expresen como los parámetros generan la geometría. Los diseñadores pueden manipular las funciones de los scripting o scripting mismos para generar el modelo. Ejemplos incluyen: Grasshopper, GenerativeComponents, Houdini. Modelos Físicos como el modelo de cadenas colgantes de Gaudí y las películas de jabón de Frei Otto, usaban las propiedades físicas para calcular formas basadas en un conjunto de parámetros. Interfaces de scripting incluidas en la mayoría de los programas CAD. Estas permiten a los diseñadores configurar unos parámetros y un conjunto de funciones explícitas que generan la geometría y otros resultados paramétricos.”

De igual manera, existe una amplia taxonomía de paradigmas programáticos. Sin embargo actualmente los arquitectos solo tienen acceso a dos bandos

dentro de los cuales se identifican los lenguajes de programación y por consiguiente los programas que reinan en el campo del modelado paramétrico.

El paradigma de programación en diseño paramétrico es un "...conjunto de principios subyacentes que conforman el estilo de un lenguaje de programación." (DAVIS D. , 2013) Estos se dividen en imperativos y declarativos, los primeros describen una secuencia de acciones que el ordenador deberá desempeñar, los segundos definen el resultado que se busca conseguir sin explicar los algoritmos necesarios para lograr los resultados.

Dentro de los imperativos, se aloja el lenguaje de programación textual ocupado por programas con inclinación a la programación procesal, como: 3DsMax: Maxscript, Archicad: CDL, Autocad: AutoLISP, Digital Project: Visual Basic, Maya: Maya Embedded Language, Processing: Java, Revit: Visual Basic & Python, Rhino: Visual Basic & Python, Sketchup: Ruby (DAVIS D. , 2013)

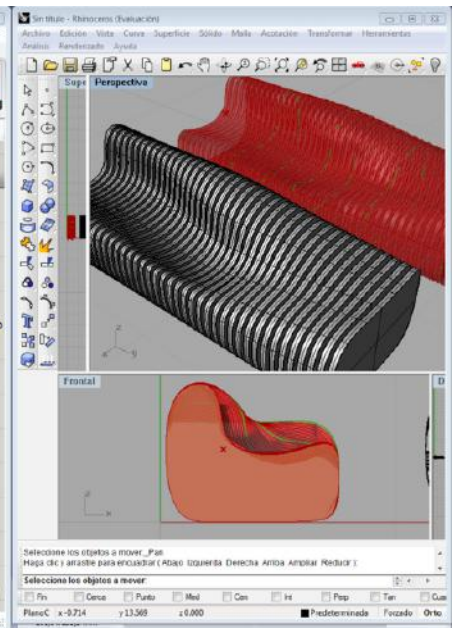
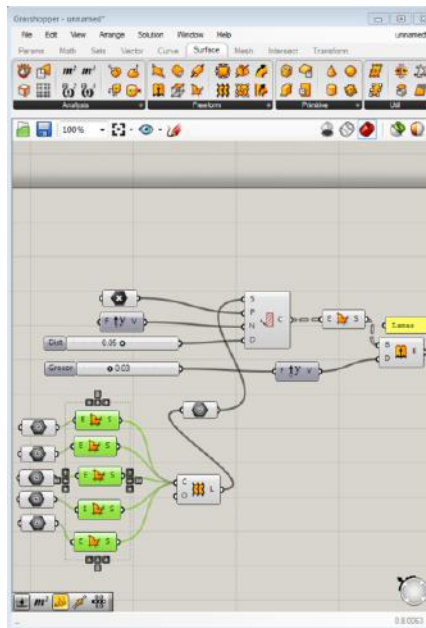
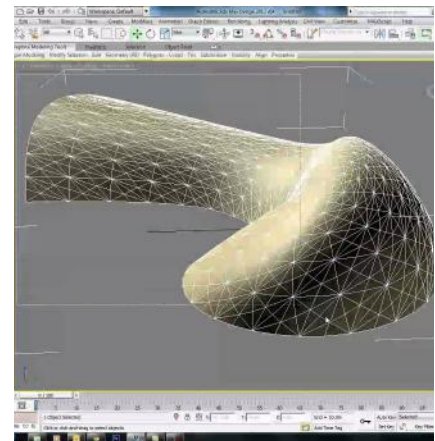
En el caso de los declarativos, se presenta el lenguaje de programación visual, ocupado por programas como: Grasshopper, GenerativeComponents, Houdini, MaxMp, que tienden a la programación basada en flujo de información. (DAVIS D. , 2013)

Independientemente de sus diferencias en lenguajes de programación, cada programa posee unas características lógicas de trabajo y desempeño específicas, que condicionan su elección y su combinación con las aplicaciones necesarias para la realización de los fines del diseño. Para nuestros fines, hemos de definir los softwares que actualmente son herramientas primordiales para el diseño paramétrico:

- Autodesk Maya: Software de gráficos por ordenador en 3D actualmente propiedad y desarrollado por Autodesk, Inc. Se utiliza para

crear aplicaciones 3D interactivas, incluyendo juegos de vídeo, película de dibujos animados, series de televisión, o efectos visuales. Maya expone una arquitectura gráfica de nodo. Elementos de la escena son basados en nodos, cada nodo tiene sus propios atributos y personalización. Como resultado, la representación visual de una escena se basa totalmente en una red de interconexión de los nodos, dependiendo de la información de cada uno. Para la comodidad de visualización de estas redes, hay una dependencia y un gráfico acíclico dirigido.

- Autodesk 3ds Max: Software de modelado 3D paramétrico proporciona un modelado integral, animación, simulación y renderizado solución para juegos, películas y gráficos en movimiento. 3ds Max ofrece nuevas herramientas eficientes, rendimiento acelerado y flujos de trabajo optimizados para ayudar a aumentar la productividad en general para trabajar con los activos complejos, de alta resolución. 3ds Max utiliza el concepto de modificadores y parámetros cableados para controlar su geometría y la da



al usuario la capacidad de escritura de su funcionalidad mediante el MAXScript como los lenguajes de programación Python.

- Max Creation Graph: es un plug-in totalmente nuevo, entorno de creación de herramienta basada en nodos de programación visual en 3ds Max 2016 de trabajo similar al Grasshopper y el Dynamo.
- CATIA: Paquete de software comercial multiplataforma CAD / CAM / CAE, desarrollado por la empresa francesa Dassault Systèmes y orientado al diseño aeroespacial. Escrito en el lenguaje de programación C ++. Comúnmente referida como un paquete de software 3D, CATIA soporta múltiples etapas de desarrollo de productos (CAx), incluyendo la conceptualización, el diseño (CAD), ingeniería (CAE) y la fabricación (CAM). CATIA facilita la ingeniería de colaboración entre disciplinas alrededor de su plataforma 3DEXPERIENCE, incluyendo la superficie y diseño de la forma, el fluido eléctrico y sistemas de electrónica de diseño, ingeniería mecánica e ingeniería de sistemas.
- Digital Project: es una aplicación de diseño (CAD) asistido por ordenador basado en CATIA V5 y desarrollado por Gehry Technologies, una compañía de tecnología de propiedad del arquitecto Frank Gehry. Posee una nueva interfaz visual adecuada para el trabajo de arquitectura y surge por la inquietud de realizar formas complejas.

“Empecé a hacer formas difíciles de dibujar. Eso nos llevó a los programas de ordenador y a Catia, que me hizo darme cuenta de las posibilidades y el nivel y el grado de precisión que se puede crear en sus documentos y sus relaciones debido al software”.

Frank Gehry

- Rhino 3d: Rhinoceros 3d es un software de modelado 3d base.
- Grasshopper 3d: Es un Plug-in del software de modelado 3d Rhinoceros, funciona a partir de la versión 4.0 de Rhinoceros 3d. Posee un lenguaje de programación visual desarrollado por David Rutten y está vigente desde septiembre de 2007. Ayuda a la generación de algoritmos para el diseño paramétrico y no necesita de conocimiento de programación y scripting, pero aún así permite a los diseñadores construir generadores de formas.
- La interfaz consiste en un editor basado en nodos, que conecta diferentes componentes y pasa datos a través de los cables de conexión. El cable de conexión se une al enganche de salida de un componente, hasta el enganche de entrada de otro componente. De manera que mediante un sistema de mapa conceptual permite relacionar ecuaciones que son los parámetros o acciones que atribuimos al modelo.
- Este se basa en diversos plug-ins o módulos que le proveen de más funciones de evaluación y ayuda, como:
- Galápagos: Solucionador evolutivo, busca soluciones como plug-in de Grasshopper.
- Kangaroo: Es un motor para simulaciones interactivas de comportamiento físico, realizando optimización y form-finding directamente desde Grasshopper.
- Python: Es un Plug-in de lenguaje de scripting, que sirve de ayuda inteligente para el Grasshopper.
- gHowl: Es una serie de componentes que extienden la habilidad de Grasshopper de comunicar e intercambiar información con otras aplicaciones y dispositivos físicos.
- Hyas: Análisis de incidencia de la lluvia en los materiales y superficies.
- Firefly: Permite el flujo de informa-

ción entre Grasshopper y el micro-controlador Arduino, para una constante comunicación entre el modelo digital y el modelo físico.

- Geco: Conecta el modelo de Rhino/Grasshopper con Ecotect, para análisis, evaluación y simulaciones de comportamiento del edificio.
- Karamba3d: Es un consultor estructural para Grasshopper.
- Autodesk Revit: Es un software de BIM (Building Information Modeling) utilizado por arquitectos y otros profesionales de la construcción. Revit fue desarrollado en respuesta a la necesidad de un software que podría crear modelos paramétricos tridimensionales que incluyen tanto la geometría y la información sobre el diseño y la construcción no geométrica. Cada cambio realizado en un elemento de Revit se propaga automáticamente a través del modelo de mantener todos los componentes, opiniones y anotaciones consistentes. Esto facilita la colaboración entre los equipos y garantiza que toda la información (áreas de suelo, horarios, etc.) se actualizan dinámicamente cuando se realizan cambios en el modelo.
- Dynamo: Entorno de programación de código abierto para el diseño gráfico. Dynamo se extiende a la construcción de modelado de información (BIM) con el entorno de datos y la lógica de un editor gráfico algorítmico.
- GenerativeComponents: Es un sistema de modelado y desarrollo ambiental, con lenguaje de programación visual, bajo un paradigma declarativo y orientado al flujo de información, basado en una interfaz objeto-orientada que representa la convergencia entre la teoría del diseño con la teoría de los ordenadores. Los ocho conceptos clave de este sistema, que pueden ser extrapolados a todo

modelado paramétrico son:

* Implicación: La habilidad para definir larga cadena asociativa del constructo geométrico, permitiendo la exploración de implicaciones de cambio vía propagación automática de cambio.

* Modelado condicional: Habilidad para codificar y ejercitar implicaciones alternativas, permitiendo cambios de comportamiento y configuración del constructo geométrico.

* Extensibilidad: Habilidad de convertir los modelos paramétricos en nuevos componentes reusables, donde el comportamiento del componente es definido por el modelo original.

* Componentes: La transición de componentes digitales representando entidades físicas discretas a dispositivos para estructuración cognitiva.

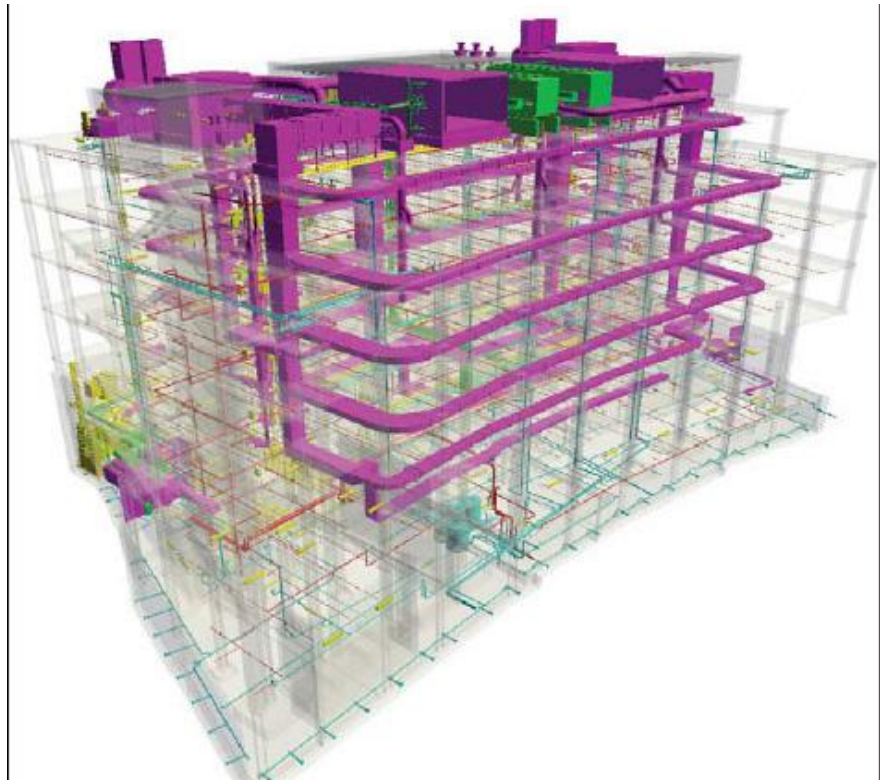
* Replicación: Habilidad para operar potencialmente en un conjunto de componente digitales, donde cada miembro del conjunto responde únicamente a variaciones en su contexto.

* Diseño Programático: Habilidad de combinar representaciones declarativas en la forma de una estructura de implicación y representaciones de proceso.

* Representaciones múltiples: Habilidad para el usuario crear y operar en diferentes representaciones conectadas, de manera simultánea.

* Modelo transaccional de diseño: Las representaciones son una historia de diseño editable y re-ejecutable. (MENGES, Archim, HENSEL, Michael, & WEINSTOCK, Michael, 2006)

Los programas de ordenador, y su desarrollo son más que componentes en un proyecto que descansa en el mejoramiento de nuestras habilidades para trabajar con grandes volúmenes de información; también promueve nuevas y diferentes maneras de pensamiento. Estos programas traen consigo una modificación del proceso convencional de diseño, que se extrapola a la demanda de un nuevo proceso de fabricación y construcción.



Apareciendo dentro del manejo del proceso de diseño mediante softwares, la utilización secuencial de combinaciones de softwares y módulos que le sirven de auxilio a los softwares de modelado base, tanto para el análisis (ambiental, estructural, de sostenibilidad, climático, etc.), como para la racionalización, y traducción del modelo para otras disciplinas y controles, previos a la etapa constructiva.

Un aspecto evidente de este cambio del proceso es la aparición de la transformación de información en el paso de etapas, desde la concepción paramétrica del diseño a la traducción detallada en documentación gráfica digital en lenguaje de máquinas. Pasando del modelo 3d de diseño a la concepción de modelos 3d y planos de trabajo que varían según la técnica de fabricación que se elija (impresión 3d; amerita de un seccionado transversal del modelo, CNC; amerita de G-código, etc.).

1.3. HARDWARE

"La práctica sin la teoría es ciega; la teoría sin la práctica es estéril" Confucio
Pese al conocimiento de las alternati-

vas digitales de concepción y diseño, la arquitectura no puede evolucionar sin el avance de las herramientas y métodos de fabricación y ejecución en el ejercicio de la construcción. Tal cual lo declara Confucio, sin la materialización de las influencias filosóficas, teóricas y formales, no existe ni trasciende la arquitectura. De manera que el móvil de investigación parte de la necesidad de un conocimiento de las técnicas y métodos actuales de desarrollo del hardware, para la que se postula como la práctica arquitectónica futura.

No cabe duda que los intereses por una evolución de la paramétrica aplicada a la arquitectura, están dando cada día razones para avanzar, no solo en la concepción proyectual, sino también en la manera de materializar estos resultados proyectuales. El asunto de la construcción y las soluciones aisladas dadas a casos de diseño paramétrico, han generado la necesidad de un proceso de fabricación compatible con los avances tecnológicos en el software, que facilite y ofrezca eficiencia al constructo. De manera que los recursos técnicos implementados en fabricación y construcción, sean congruentes a los

tan denotados avances de esta práctica arquitectónica.

En términos de hardware, en el pasado inmediato nos hemos valido de la industrialización, la creación de series repetitivas de módulos, la simplificación de la forma, volviendo a lo básico, en búsqueda de un mejoramiento cualitativo y cuantitativo de los productos de la industria de la construcción. Esto es un punto importante en términos de un entendimiento de los procesos en obra, la prefabricación y la forma en que se han visto impactados por la necesidad de creación de nuevas complejidades formales y sistemáticas, impuestas por los nuevos sistemas.

Estos desafíos formales, sistemáticos y programáticos, han generado incongruencias entre la concepción y la construcción. Siendo esta última la más débil de la cadena productiva. Como lo afirman William Mitchell y Malcolm McCullough, Existe *“una brecha entre el diseño y la producción que se abrió cuando los diseñadores comenzaron a hacer dibujos... y que se cierra con una redefinición de las relaciones diseño-producción”* (In digital design media, 1995) Las superficies altamente curvilíneas que parecen tan prominentemente en la arquitectura contemporánea de manera continua, traen consigo el dilema de cómo trabajar las ramificaciones espaciales y tectónicas de formas tan evidentemente no-euclidianas. Para muchos arquitectos, entrenados en la certeza de la geometría euclidiana, fue el asunto de la construcción que trajo el cuestionamiento sobre la credibilidad de las complejidades espaciales planteadas por las nuevas aproximaciones digitales de vanguardia. (KOLAREVIC, 2003)

Desde que la constructibilidad se volvió una función directa de la computación, la cuestión ya no es si una forma particular puede ser construida, sino saber,

qué nuevos instrumentos son necesarios para aprovecharnos de las nuevas oportunidades abiertas por los modos de producción digital. (KOLAREVIC, 2003) En particular en la arquitectura paramétrica, y los desafíos formales y sistemáticos que esta presenta, ya no nos basta con las técnicas habituales de construcción, ni con el mismo proceso de ejecución. Se amerita de mayor manejo de información en todo el proceso de fabricación, permitiendo que se domine y prevea cualquier posibilidad a la hora de puesta en obra.

Es por esto que, no solo las herramientas de diseño se han convertido en digitales, en paralelo, las tecnologías de fabricación para producción de componentes y partes de edificio también lo son. Ya que el ordenador se ha convertido en inseparable de todas las etapas de realización de arquitectura, y todas las etapas ahora están potencialmente sistematizadas por medios digitales. De esta manera identificamos procesos conocidos como ingeniería asistida por ordenador (CAE) y manufactura asistida por ordenador (CAM), procesos capaces de producir la mecanización de una serie de instrucciones enviadas digitalmente por un software. Estos dan origen a una serie de estrategias de fabricación y desarrollo tecnológico para la materialización del diseño paramétrico.

Secuencialmente, comenzaron a desarrollarse herramientas complejas: máquinas de corte, (por chorro de agua, láser o arco de plasma), máquinas de sustracción de material, (por agentes químicos, eléctricos o mecánicos), máquinas de prototipado rápido, (fabricado por moldeo en capas, de materiales plásticos, yesos o resinas), con precisiones de décima de milímetro, dando lugar al nacimiento de la automatización y de la robotización de la producción arquitectónica. (FRAILE, 2014)

El hecho de que las geometrías topológicas sean precisamente descritas como NURBS y sean computacionalmente posibles también significa que pueden ser realizadas mediante técnicas de fabricación con control numérico, como cortes, sustracción, adición y conformado, mencionadas anteriormente. (KORALEVIC, 2001)

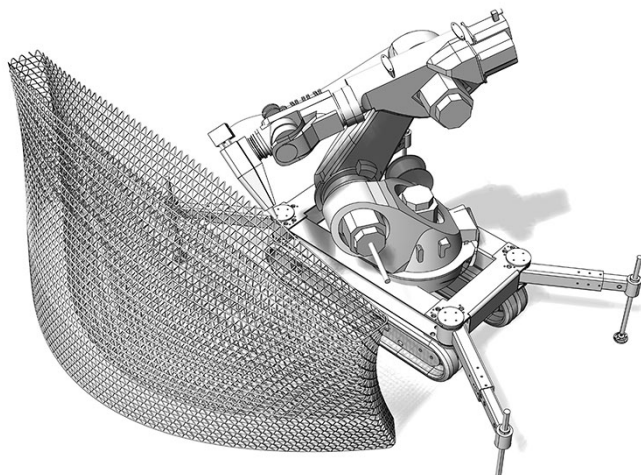
Para moverse del diseño a la construcción, es necesario traducir los datos gráficos de dibujos bidimensionales y modelos tridimensionales a datos digitales que las máquinas de control numérico puedan comprender. Algunos aspectos de esta traducción son relativamente automáticos e involucran el uso de maquinaria con softwares específicos; otros están más al alcance de diseño. (IWAMOTO, 2009)

Desde esta aproximación, con el avance de los softwares de traducción, herramientas y maquinarias surgen nuevas estrategias de transformación de materiales, nuevas tecnologías y procesos de fabricación y la creación de nueva materialidad. Dando origen a la experimentación y a resultados empíricos que poco a poco se adentran como solución a desafíos conceptuales.

1.3.1. Nuevo Proceso hardware

Evidentemente con la implementación de nuevas herramientas de fabricación en secuencia a los softwares de modelado, aparece un nuevo proceso de diseño y fabricación, un proceso no lineal, basado en constante retroalimentación de información y donde el diseño no necesariamente antecede en su totalidad a la fabricación, más bien se vale de los inputs que esta presenta. Este nuevo proceso, se vale de características específicas que le dotan de una nueva sistematización y un nuevo desarrollo tanto en la planificación y gestión como en la realización de la construcción.

- Desarrollo no lineal
- Circuito de retroalimentación
- Sistema Multidisciplinar
- Mayor control y dominio de todo el proceso
- Programación y la nueva figura del arquitecto-programador
- Simulaciones y prototipado
- Inclusión de nuevas herramientas de maquinarias y Robótica en el proceso de fabricación
- Traducción digital de documentación para fabricación
- Previsión y planificación de procesos de puesta en obra y tolerancias



Estos cambios en el hardware son el producto de un nuevo orden y lógica en el proceso de diseño, de la mano de un manejo más eficiente de la información. Sentencia que es apliada por Robert Aish, en una dirección hacia el dominio del arquitecto, al plantear: *“El diseñador que quiere estar en total control de los resultados debe estar en control del proceso. Para estar en control de proceso, el diseñador debe estar en control de las herramientas. Las herramientas son computación, por ende un diseñador que desee tener el control debe ser un programador (o sufrir las consecuencias de la no identificada influencia de usar las herramientas de otros).”* (BURRY, Scripting Cultures, 2011) De modo que en el conocimiento de las nuevas herramientas, sus tolerancias, y las posibles alternativas estratégicas aplicadas a la construcción y su consecutiva puesta en obra, es como podremos prever u controlar tanto el proceso constructivo, como las prestaciones requeridas del material.

Un aspecto importante es el hecho que se enuncia en From Control to Design: *“La apertura del sistema es posiblemente un resultado directo de la falta de ideología o posición dominante, ciertos aspectos de un “trabajo abierto” (término de Umberto Eco). Describe una faceta de producción actual, enfatizando múltiples lecturas, y la falta de alguna narrativa singular, sin una jerarquía narrativa, donde buscamos “ámbitos de significado”, en lugar de hilos lineales de significado.* (MEREDITH, 2000) Claramente en lo referente a la característica iterativa de este nuevo proceso, tan basada en el mencionado circuito de retroalimentación, existe una tendencia a generar diferentes lecturas como opciones (basada en parámetros), cuya elección ya no se rige estrictamente por un estilo estético sino más bien por un resultado eficiente, optimizado. Que sigue siendo elección a criterio del arquitecto, en función de

los parámetros priorizados.

Dogmáticamente la anterior inferencia se basa en una *“aproximación resolutoria del problema”* que como planteado por Marco Vanucci: En la industria contemporánea de la construcción, los softwares paramétricos son usualmente empleados en procesos de diseño de racionalización y post-racionalización, donde según el proyecto, la respuesta a problemas específicos es requerida para actualizar la forma deseada. (VANUCCI, 2000) Y que evidentemente es de naturaleza iterativa.

En este orden existen líneas de pensamiento, un tanto categóricas al plantear que, *“las técnicas específicas de producción paramétrica y experimentación formal revelan la normativa fluida de trabajo dentro y entre oficinas de arquitectura, también sugiere como en su actual naturaleza, problemática, proliferativa e imaginativa, el contexto y uso pueden ser embebidos en cualquier proyecto paramétrico multiplicador, auto referenciado.”* (MEREDITH, 2000) Con certeza la lógica del proceso iterativo, es extrapolable a diferentes desarrollos proyectuales, mas no debe ser visualizado como una receta que puede ser utilizada para una serie de distintos proyectos con resultados similares, pues en cada proyecto aun con el uso de una misma base sistemática, surgirán diferentes variantes del método de desarrollo proyectual, que son congruentes a las necesidades y requerimientos que presente cada proyecto.

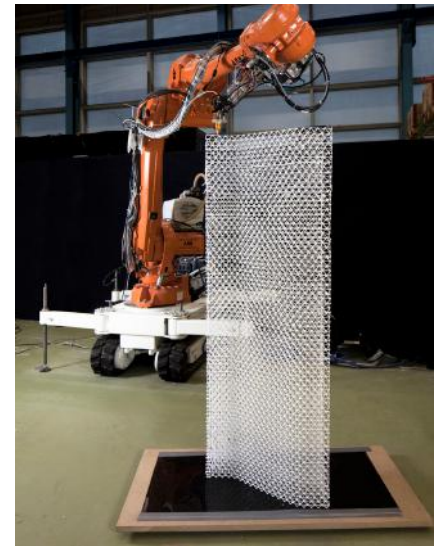
Las nuevas herramientas paramétricas digitales dejan detrás algunos potenciales inesperados de la arquitectura contemporánea, particularmente en relación a la posibilidad de definir conjuntos altamente modulados junto a la determinación o diferenciación de componentes. (VANUCCI, 2000) Esto se traduce en el proceso, a un cambio de la modulación a la personalización

del diseño y de las técnicas y procesos del material, permitiendo una fabricación basada en el versionado.

En un sentido más amplio, se introducen al discurso arquitectónico, las nuevas lógicas de serialidad, la variación local y diferenciación en series, y la personalización en masa en lugar de la producción en masa, la habilidad para producir en masa componentes irregulares de una edificación con la misma facilidad que se producen las partes estandarizadas. Ahora es posible producir *“fabricación en serie, de objetos diferenciados matemáticamente coherentes, al igual que componentes elaborados precisa y relativamente baratos simultáneamente”* (KORALEVIC, Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Digital Age, 2001)

Como Catherine Slessor plantea: *“la noción de que la originalidad es tan económica y fácil como la repetición, desafía la presunción simplificadora del Modernismo y sugiere el potencial de un nuevo paradigma post-industrial basado en el mejoramiento de las capacidades creativas electrónicas antes que mecánicas”* (KORALEVIC, Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Digital Age, 2001) Dicho paradigma post-industrial, debe en gran medida su desarrollo a los softwares. Consecuentemente, es preciso comprenderlos para estar a la altura del proceso de hardware actual.

El potencial de las herramientas computacionales es utilizado por su mayor grado de precisión y rapidez para entregar soluciones a medida: el modelado paramétricos es dirigido por la necesidad del ingeniero de racionalizar las soluciones con el objetivo de cumplir con los requerimientos estructurales, geométricos y de fabricación. (VANUCCI, 2000) En este orden, la adopción del software y sus posibilidades, desde el proceso de diseño hasta el proceso



de construcción, no solo provee de una planificación previa, y simulaciones analíticas, sino que también permite la solución rápida a problemas que puedan surgir en el proceso, aun cuando este proceso cierra cada vez más el campo a los conatos y contrariedades. El diseño de fuente abierta (open source design) se basa en una estructura interdisciplinaria, y heterogeneidad del espectro investigativo. Además de la constante colaboración entre diferentes disciplinas y especialidades, con la intención de crear una base común donde pueda ser posible generar nuevas estrategias de diseño. (VANUCCI, 2000) Con la multidisciplinariedad, y el diseño de fuente abierta que la posibilita, nace el requerimiento de mayor control del proceso de diseño digital, y traducción para la construcción. Además de mayor rigurosidad en el dominio y manejo de la información, fortaleciendo la necesidad de una figura de control, programador y gestor de la información. La paradigmática innovación del diseño paramétrico se origina en su modus operandi: La intrínseca resiliencia del ejercicio de bocetaje, de forma libre, pero que de hecho requiere un mejor entendimiento de las geometrías complejas e induce al diseñador a pensar a través de la lógica del sistema, antes de siquiera dibujar una línea. (VANUCCI, 2000) Enfatizando del carácter analítico y previsor, para los posibles casos que puedan generarse en el proceso. Esto es directamente proporcional al cambio requerido en el proceso proyectual, donde “arquitectos trabajen directamente con los fabricantes, subcontratistas; esta desintermediación debe traer consigo nueva eficiencia en el diseño y construcción de edificios.” (KORALEVIC, Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Digital Age, 2001) Esta aproximación reconoce lo que Michael Speaks denomina “Inteligencia del Diseño”: “El hacer se convierte en conocimiento o creación inteligente. De

esta manera pensar y hacer, diseño y fabricación, y prototipo y diseño final se convierten en confusos, interactivos, y parte de un medio no lineal de innovación”. (IWAMOTO, 2009)

Apegándonos a la idea de un proceso basado en el antes mencionado circuito de retroalimentación, podremos comprender que: “El diseño es una, no lineal, cíclica, iterativa y compleja red de conocimiento”. (BROWN, 2009) Que se desarrolla en un flujo general de trabajo donde ocurre un alto grado de iteración, en lugar de entender el proceso como una secuencia rígida.

Mayor fluidez de comunicación de diseño y producción creativa, se conseguirá al acercar los diseñadores a los fabricantes y constructores, desarrollando la tecnología para fomentar las complejas interacciones contenidas en los aspectos menos entendidos del proceso de diseño. (BROWN, 2009)

1.3.2. Fabricación, tecnologías y procesamiento de materiales

“Las decisiones sobre qué maquinaria o métodos utilizar debe unir la intención de diseño con las capacidades de la máquina. Por ende se ha convertido en una necesidad para los expertos digitales en arquitectura, comprender como funcionan estas herramientas, que materiales son más adecuados, y donde se albergan las posibilidades en el proceso de mecanizado.” (IWAMOTO, 2009)

Dicha sentencia describe claramente, los aspectos involucrados en el proceso constructivo que hemos de considerar siempre y que a la vez son combustible para la creación de estrategias, soluciones y tecnologías constructivas congruentes a los requerimientos actuales.

La evidente invitación a la innovación en el hardware que exige este tiempo, requiere de comprender el estado del arte, para visualizar los campos de desarrollo técnico posibles. De manera

que resulta importante comprender las categorías, que reiterativamente aparecen en las descripciones de diferentes autores, para englobar las estrategias y técnicas de fabricación y las maquinarias que lo posibilitan. Escaneado, corte, sustracción, adición y formación; estaban presentes en la industria de la construcción desde los procesos manuales de ejecución, pero ahora se implementan desde un desarrollo tecnológico y con maquinaria que lo posibilita.

Escaneado Tridimensional

Es un método que se basa en la digitalización de una nube puntos dispuestos en una superficie, para la recolección de información (dimensiones y posiciones) de un modelo u objeto físico existente. Algunos escáneres pueden capturar objetos de varios cientos de metros de distancia, y pueden recoger los puntos de datos precisos hasta tan poco como 5 mm. En el caso de edificación, varias exploraciones desde diferentes ángulos pueden vincularse para completar la imagen.

Existen varios métodos de escaneado digital, uno de estos se basa en el uso de la sonda de digitalización de posición para rastrear mediante puntos las características de las superficies del modelo físico; también se emplea el láser que ilumina la superficie del objeto generando patrones de luz de reconocimiento, que luego son captados por cámaras digitales y luego evaluadas por reconocimiento óptico; Otra opción

es la tecnología de (MRI) resonancia magnética para visualizar el comportamiento de los materiales. También está presente en las maquinarias de fabricación digital a manera de reconocimiento de las superficies de trabajo y en el caso de robots inteligentes que a la vez interactúan con el espacio de trabajo.

Con respecto al software no se amerita de gran esfuerzo, una vez realizada la exploración, ya que los resultados del reconocimiento tridimensional podrán ser exportados a softwares con base CAD y BIM para generar un dibujo o modelo 3D, que según lo avanzado de la máquina y la calidad de las muestras no necesitara de mucha modificación. Este tiene un potencial muy notorio en la restauración de edificaciones y puede a la vez servir para recopilar información analógica y llevarla al plano digital, en el caso de objetos que no son producto de medios digitales. Este es utilizado para la traducción de modelos físicos en el proceso de conceptualización, tomando de estos la información para un desarrollo digital sucesivo. También tiene aplicación en la compilación de información tanto as built, como la identificación de cambios en el proceso de construcción.

Fabricación 2d

Es la técnica de fabricación más utilizada, la primera en ser adoptada para la construcción de piezas modeladas paramétricamente. Se basa en el control numérico computarizado (CNC) para el corte de materiales, que regularmente se presentan en grandes planchas o planos.

Las tecnologías de corte actualmente implican movimiento de 2 a 8 ejes, y esto engloba tanto las estrategias de corte como las sustractivas, puesto que pasa del plano bidimensional a tridimensional. En el caso del plano bidimensional depende la presentación del material, optando por el uso de 2 ejes de movimiento de la plancha del mate-

rial respecto al cabezal de corte y son implementadas como un cabezal movable, una mesa movable o ambos casos. Estas son muy variadas en su desarrollo y dependerán de la necesidad, el material que se emplea y su espesor, las alternativas principales de corte 2d son:

* Corte con arco de plasma: Consiste en el paso de un arco eléctrico a través de chorro de gas comprimido, por el cabezal de corte de la máquina, el cual calienta el gas hasta convertirlo en plasma de alta temperatura, este se revierte a su estado gaseoso a medida que el calor se transfiere al material en el área de corte.

* Corte laser: Se basa en un haz de luz infrarroja de alta intensidad combinado con una corriente de gas (CO₂) altamente presurizado, para degradar de manera localizada el material y resultar en el corte de la plancha. El tipo de degradación puede tener una reacción de derretido o quema según el material que se emplea.

* Corte con chorro de agua: Utiliza un chorro de agua de alta presión, combinado con partículas de un esmalte sólido o abrasivo, a través un cabezal de corte de diámetro pequeño, para efectuar el corte del material, por la erosión focalizada del mismo en el área de corte.

La traducción del modelo o dibujo digital a la fabricación, amerita la simplificación del modelo en versión CAD y su correspondiente traspaso a CAM, como

en este proceso se trabaja con superficies bidimensionales, se necesita un dibujo legible, con líneas continuas.

Su aplicación está supeditada a la posibilidad de realización off-site de piezas que luego serán ensambladas in situ, como paneles, elementos estructurales, elementos arquitectónicos, componentes de un sistema y siempre dependerá de las estrategias adoptadas para la creación del modelo como:

* Seccionado: Consiste en la subdivisión de una superficie en secciones, costillas o planos seriados. Los comandos de seccionado y contorneado de los programas de modelado pueden casi instantáneamente cortar las secciones paralelas del objeto en intervalos designados. Esto efectivamente mejora el proceso de hacer secciones seriadas en paralelo. Esta es una estrategia de fabricación utilizada en la construcción en seco desde tiempos atrás, pero que con la fabricación digital, en específico las técnicas de corte, se ha visto eficiente y rápidamente ejecutada. Reduciendo el desperdicio por el aumento de la precisión en el corte.

* Plegado: Con base en el doblado de materiales de poco espesor y presentados en planchas, esta técnica consiste en convertir una superficie plana en una tridimensional. Ofrece a materiales planos propiedades como rigidez e inflexibilidad, ser autoportante y aumento en su luz. Es un concepto teórico, una



táctica formal y una operación material.

* Contorneado: Técnica que reconfigura la superficie de algún material de grosor específico, creando un relieve tridimensional, mediante la sucesiva remoción de capas del material. Es un proceso sustractivo que se emplea en la mayoría de los casos en superficies con cierto espesor y que tiende al escarbado de patrones regulados.

* Teselado: Es la subdivisión de una plancha en una colección de piezas que encajan entre sí, sin dar paso a resquicios, para formar un plano o superficie. Estas pueden formar cualquier configuración a manera de rompecabezas. En este término convergen el concepto de patrones de baldosas y patrones de mallas digitales.

Fabricación sustractiva

Similar al proceso de corte 2d pero desde aproximación 3d y con mayor desarrollo de los ejes posibles de fresado. "Consiste en la remoción de volúmenes específicos de material de un sólido existente, usando procesos eléctricos, químicos o mecánicamente reductivos" (KOLAREVIC, 2003), basados en el fresado y enrutado, a diferentes velocidades respecto al material, y dejando unas características específicas en el componente.

El fresado puede ser limitado por la superficie o volumen del material, dependiendo del espesor del sólido y sus características, este método de fabricación se basara en herramientas de variada sección para resultar en un relieve y acabado en la superficie, o una sustracción de volumen considerable. Los ejes son una limitante en menor medida puesto que las tecnologías sustractivas actualmente alcanzan el uso de hasta 8 ejes. Permitiendo mayores posibilidades de movimiento en XYZ y rotaciones, tanto al cabezal del corte, como a la superficie de corte. Posibilitando la producción de formas y características superficiales complejas.

El fresado y enrutado permiten operaciones de tallado, aserrado, perfilado,

perforado, contorneado, lijado, etc, que pueden ser realizadas gracias a la forma y el tamaño de la herramienta de corte. "La mayoría de las máquinas de control numérico, tienen un procedimiento de cambio automático de la herramienta." (DUNN, Digital Fabrication in Architecture, 2012)

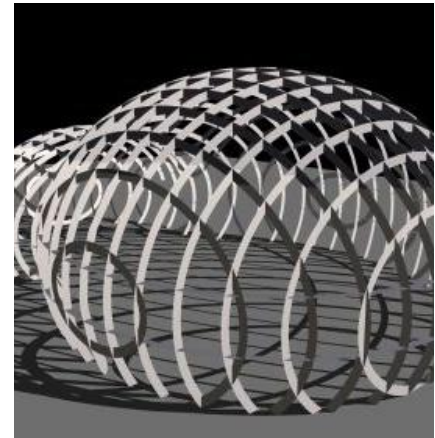
La fabricación sustractiva tiene su base en la necesidad de materialización de un objeto tridimensional o el relieve de una superficie, por ende parte de un modelo 3d que ha de ser simplificado, seccionado (en el caso de modelos de gran dimensión) y traducido para fines de su fabricación, el mismo debe ser exportado a versión CAM. Requiere de G-code o información de la trayectoria de la herramienta.

Esta tecnología se ha aplicado en la construcción de modelos arquitectónicos y estudios de ensamblaje; construcción de componentes arquitectónicos prefabricados; y de manera muy importante para la generación de moldes y encofrados para vertido de otros materiales como el hormigón, permitiendo el conformado de piezas prefabricadas o elementos constructivos in situ y dando pasó al conformado.

Fabricación aditiva

Esta técnica de fabricación consiste en la adición de material capa por capa, para formación de un elemento. Comprende el prototipado rápido (Rapid Prototyping), que constituye una serie de métodos basados en la descomposición o fraccionado del modelo en capas bidimensionales (0.1524 mm aprox.), que según el método serán: solidificadas; pegadas; vertidas; laminadas, incrementalmente hasta conseguir la forma y luego ser limpiada y curada. Otra alternativa dentro de las técnicas aditivas, es el Contour Crafting. Para fines de construcción, es necesaria una traducción de modelo 3d, mediante la generación de un documento gráfico que descompone el mismo en capas independientes.

Los métodos de fabricación aditiva más



comunes son:

* Estereolitografía (SLA): Consiste en un polímero líquido sensible a la luz, que solidifica al ser expuesto a una luz láser. Para la composición del objeto, se procede a trazar con el haz de luz láser la sección del objeto de cada capa sobre un depósito de foto-polímero, que contiene una plataforma interior sobre la que se forma el material al descender la misma.

* Fabricación de chorro múltiple (Multi jet manufacture, MJM): Mediante un cabezal de impresión, se inyecta el material fotopolímero líquido formando las capas de la sección transversal una a una, sobre una placa de acumulación, el mismo cabezal contiene una UV que solidifica el material.

* Sinterización selectiva por láser (Selective Laser sintering, SLS): En este proceso el láser derrite capa por capa un polvo de metal, hasta crear el objeto sólido.

* Impresión tridimensional (3d Printing): En este método de fabricación digital, capas de almidón o polvo de cerámica se unen para crear objetos. Aunque los modelos y componentes fabricados de este modo se deben limpiar y sellar con un agente para mejorar su durabilidad, siguen siendo comparativamente frágil y sus superficies tienen una tendencia para granular cuando se manipula.

* Fabricación de objeto laminado (Laminated object manufacture, LOM): Láminas de papel o plástico son cortadas con láser y luego laminadas hasta formar el artefacto.

* Modelado por deposición fundida (Fused deposition modeling, FDM): Cada sección transversal es producida por un filamento plástico fundido, que se solidifica al enfriarse.

* Confección por contorno (Contour Crafting, CC): Es un método híbrido que combina la extrusión para crear la superficie perimetral del objeto y un proceso de relleno mediante la inyección de material (hormigón personalizado, cerámicos) al centro del elemento



constructivo.

Este tipo de fabricación tiene su aplicación directa en la creación de objeto de cualquier industria y a cualquier escala. En el caso del Contour Crafting (CC) y las técnicas de impresión 3d, se puede aplicar directamente a la construcción, con materiales personalizados como arena, piedra, cerámicas y hormigón.

Fabricación formativa

Este proceso utiliza fuerzas mecánicas, junto a calor o vapor, para formar o deformar materiales en la manera deseada. Se basa en la dilatación del material y la aplicación de fuerzas para lograr geometrías permanentes una vez se estabiliza su temperatura.

Ensamblaje

En la construcción era habitual el ensamblaje de piezas prefabricadas mediante coordenadas y dimensiones dadas por documentación gráfica 2d, específicamente detalles de montaje y ensamblaje que se creaban para estos fines. Pero el reconocimiento y posicionamiento in situ requería de herramienta manuales y métodos que no aseguraban la precisión y tenían mayores grados de tolerancia, como cintas de medición, plomadas, y dispositivos manuales de medición. Esto era posible pues no existía el nivel de complejidad en el diseño ni se generaba la cantidad de detalles constructivos

que actualmente se aprecia.

En este orden, nos muestra en "Materializing Complexity", Fabien Sheurer (2010) de una manera bastante severa el efecto de la complejidad de las formas y específicamente las consecuencias en el detallado gráfico y el ensamblaje con el potencial crecimiento de la especificación de detalles en obra. Lo que en su específica argumentación llama "una pesadilla de trabajo intensivo". "De repente, los paneles de fachada tuvieron que ser curvos, (caro). O la panelización tuvo que ser meticulosamente optimizada para aproximar las curvas con facetas planas, (difícil). Y donde se reunieron los paneles, ya no estaban allí los detalles de repetición que pueden extraerse de una vez y se multiplican por todo un edificio. Gracias a la forma no regular, cada panel y todas las articulaciones tenían una geometría ligeramente diferente. El conjunto conveniente de planos de detalle estándar fue sustituido por cientos y miles de dibujos de los talleres individuales." (SCHEURER, 2010)

De manera que el modelo tridimensional digital y la paramétrica, trajo consigo la simplificación de la generación de estos detalles. Y de la mano de la integración de las tecnologías digitales de escaneo laser, podemos planificar desde el modelo digital, en las etapas de diseño y prefabricación, las exactas

coordenadas de los componentes, para una simplificación y mayor precisión en el proceso de ensamblaje.

Durante la fabricación, cada componente estructural, fue codificado y marcado con los nodos de intersección con sus capas de estructuras adyacentes. In situ, los códigos de cada pieza revelaba las coordenadas exactas del modelo CATIA. Lo que posibilitó la realización del museo Guggenheim de Bilbao. (LECUYER, 1997) Esta práctica de codificación de las piezas para posterior ensamblaje, también es adoptada en la Sagrada Familia actualmente, para identificar, por colores e información breve, el posicionamiento exacto de los moldes en obra.

No obstante con las técnicas de fabricación in situ o en taller como la utilización de robótica inteligente en obra, para el ensamblaje de elementos, así como los componentes auto ensamblables, tenemos en la actualidad un foco de desarrollo en la construcción directa de la información de diseño digital a la máquina de fabricación digital y a los componentes con características dinámicas.

Robótica Inteligente

El robot provoca cambios fundamentales en la disciplina: la conexión recíproca de la realidad digital del ordenador con la realidad física de la arquitectura. Este se ve enfocado en el enriquecimiento físico de la disciplina. (GRAMAZIO, KOHLER, & WILLMANN, 2013) Es el posibilitador de una fabricación directa y congruente a las estrategias digitales y lógica de diseño del software contemporáneo. Permitiendo desarrollar nuevos procesos constructivos y de materialización.

La construcción con robots transporta la arquitectura más allá de la creación de formas estáticas, hacia el diseño de procesos formativos materiales. Data y material, programación y construcción, ahora son conectadas para que la lógica algorítmica de los softwares

pueda conectarse directamente con la realidad del material. (GRAMAZIO, KOHLER, & WILLMANN, 2013)

Los robots son capaces de procedimientos complejos y, en contraste con otros métodos de fabricación digital, que son relativamente fijos debido a la posición de la bancada de la máquina o propias restricciones dimensionales de los equipos, ofrecen una flexibilidad considerable. Esta flexibilidad es nacida de la capacidad del robot para trabajar en un espacio no cúbico, auto-referenciando su posición en relación con un objeto. (DUNN, Digital Fabrication in Architecture, 2012)

Los robots permiten mediante el cambio de su cabezal mayor cantidad de realizaciones, como: fresado, extrusión, agarre, posicionado, accionado, sierra, deposición de pegamento, deposición granular, corte, tiro, soldado, formado de hormigón, escaneado, tallado, aserrado, perfilado, perforado, contorneado, lijado, rollo, etc. Evidenciando que como un modo emergente de traducir los datos de fabricar de vanguardia y diseños de alta complejidad, la robótica proporciona un terreno fértil para una mayor exploración.

Un ejemplo directo de la utilización de robótica para la puesta de mampostería de ladrillo es la fachada del viñedo Gantenbein hacia el año 2006, por Gramazio & Kohler. El método de producción robótica, desarrollado en la ETH Zurich, permitió a los diseñadores colocar los 20.000 ladrillos, de acuerdo a los parámetros programados de ángulo requerido y exactos intervalos prescritos. Esto le dio a cada pared la permeabilidad deseada para la luz y el aire, mientras se creó un patrón que cubre todo el edificio.

La producción robótica de los elementos de pared requirió una serie compleja de movimientos para facilitar la geometría correcta de cada panel. Además de la organización de las unidades el robot también aplicó un agente adhesivo a cada ladrillo en la

fachada de 400m², de acuerdo con un proceso automatizado desarrollado por los diseñadores para acelerar el proceso de fabricación. Debido a que cada ladrillo tiene una rotación diferente, cada uno tenía un solapamiento diferente y único con el ladrillo debajo y por encima. (DUNN, Digital Fabrication in Architecture, 2012)

Estrategias de superficie

En el campo de las superficies, encontramos nuevos desafíos del diseño paramétrico para solucionar una parte de la edificación, que hoy es tratada como envolvente, convirtiéndose en una fachada con múltiples funciones. A las superficies de los edificios hoy, se le demandan prestaciones estéticas, de cerramiento, de estructura, de fachada y cubierta a la vez.

La creación y manipulación digital de superficies y el avance en los softwares que posibilitan su modelado, ha permitido la producción de pieles arquitectónicas, que resultan no solo en cualidades estéticas y expresivas sino también en nuevas complejidades geométricas y tectónicas.

Existe un incremento notable en la exploración de la envolvente del edificio, por su potencial para reunificar la piel y la estructura, de manera que esta última se ve embebida en la envolvente o resulta ser la envolvente en sí misma. Esto direcciona a la construcción de superficies y formas auto portantes que no necesiten de estructuras auxiliares ni requieran de armaduras.

Las cáscaras o monocoques, representan las formaciones superficiales por excelencia para la generación de las envolventes de estos tiempos, por su potencial de partida de formas geométricas cuyas extensiones pueden ser subdivididas en paneles, tratadas como mallas o conformadas. De manera que pueden funcionar como piel monolítica o sistema de capas que trabajan en conjunto.

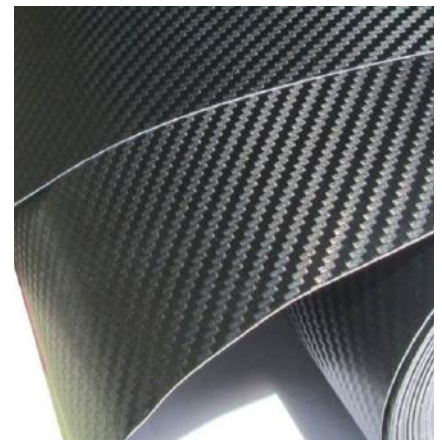
Las estrategias de producción de superficies más frecuentes son, la triangulación, plegado, panelización, teselado, uso de superficies regladas, superficies desarrollables, en casos de desarrollo de superficies curvilíneas complejas. Pero en este tipo de desarrollo de superficies, el sistema masivo de producción a medida que traduce la entrada para el diseño en los datos de producción tiene que ser desarrollado primero. Sus detalles dependen de la forma y la calidad de la superficie prevista, de los materiales y métodos de fabricación utilizados, la logística y las secuencias de montaje, el hardware que mecaniza los componentes, y en muchos más factores. (SCHEURER, 2010)

Con la exploración de nuevas geometrías y formas para lograr la deseada envolvente, de la mano de la exploración de sus estrategias de producción, se desafía también el campo de los materiales y sus nuevas prestaciones.

1.3.3. Materiales

Ya que nuevos procesos de concepción y producción comienzan a permear el diseño y producción de edificios, también hay un crecimiento en el interés en nuevos materiales, bien conocidos en otros campos de producción y solo recientemente descubiertos por los arquitectos. La mayor parte de ese interés se alberga en las nuevas complejidades geométricas, las cuales han renovado el interés en las superficies y cáscaras, donde la piel absorbe la mayor de las cargas. Presentando el desafío de la necesidad de nuevos materiales.

Espuma de alta temperatura, gomas, plásticos, y compuestos, los cuales eran raramente usados hasta hace poco en la industria de la edificación, comienzan a ser integrados en el proceso de fabricación. De este modo se establece una relación recíproca interesante entre



las nuevas geometrías y nuevas materialidades: nuevas geometrías abren la búsqueda de nuevos materiales y viceversa. (KORALEVIC, Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Digital Age, 2001)

Una vez adquirido el interés por la exploración del campo de los materiales y la experimentación con los mismos, para adquisición de condiciones específicas de diseño. Se observa una diversidad de materiales, e innovación con estos, que no se mantiene fija, más bien se percibe un conjunto en constante cambio de los materiales que ofrecen mejoras continuas en los estándares conocidos o que hacen esas normas obsoletas.

De manera que la tendencia a superficies multifuncionales, a las que demandamos nuevas prestaciones: estructurales, estéticas, dinámicas, de protección, de transparencias, etc., sirven de motor en la adopción y cambios de materiales que hoy ofrecen:

- * Delgadez sin precedentes
- * Composición gradiente funcional
- * Propiedades dinámicamente cambiantes
- * Articulación
- * Nuevo repertorio de efectos superficiales
- * Mayor ligereza y corrección de sus reacciones

Desde las alternativas de sustituciones del armado por nano tubos de carbono, la aparición de pieles dinámicas y móviles, la adopción de destilados plásticos y resinas, de armados textiles, de materiales que guardan información y reaccionan de manera inteligente, se gesta un movimiento tendente a la utilización del material no solo como recurso inerte, sino también como recurso mapa de información al diseño y la fabricación.

Actualmente, a parte de las propiedades químicas y físicas conocidas de los materiales, con la utilización de los nuevos softwares, se explora la posibi-

lidad de la aproximación del material como conductor generativo de la forma. Mediante el modelado, simulación y fabricación de ensamblajes con múltiples y cambiantes limitaciones funcionales. Apareciendo conceptos como la codificación del material, la estructuración del material, etc.

Pero lo que estos conceptos tienen en común su base en, "la capacidad de controlar estratégicamente la densidad y la direccionalidad de la sustancia material en la generación de la forma. En este enfoque, el material precede a la forma, y es la estructuración de las propiedades del material como una función del rendimiento que se anticipa a su forma. Fundamentos teóricos y técnicos para este enfoque se han denominado diseño computación basado en el material". (OXMAN, 2010)

1.3.4. Puesta en obra

No es desconocida, la necesidad latente de alterar la estructura del proceso de construcción industrial habitual, para la realización de la arquitectura paramétrica. Más aún, es entendible que solo con este cambio en el proceso, se podrá manejar la información de manera fluida y sin fricción o acumulación de laboriosidad en las etapas de puesta en obra.

En este enunciado se hace alusión a la puesta en obra, evidenciando el crecimiento de la proporción del trabajo inmaterial en el volumen total, de parte de los constratistas. Pues en ese extremo de la cadena productiva, suelen presentarse conatos de ruptura de la planificación y logística empleada.

Con frecuencia vemos que las tecnologías son continuamente combinadas con procedimientos manuales; tanto en el ensamblaje in situ, como en la fabricación en taller.

En numerosos casos de construcción de esta tipología de obras complejas, se altera el proceso y se incurren en la

realización manual, por factores como: falta de disponibilidad de equipos de fabricación digital (máquinas de soldado en Dynaform, fueron sustituidas por la mano de obra con unas tolerancias muy estrechas), falta de capacitación de la mano de obra, falta de entendimiento de los sistemas, no utilización de recursos digitales de lectura al alcance; como el escaneado laser (En O-14 proyectaron la geometría de las formas de los vacíos manualmente), falta de sincronización de los softwares y sus productos gráficos para las diferentes fases de fabricación y grupos de interés involucrados, etc.

Aún cuando Bernhard Franken plantea que, "...el factor decisivo no es el manejo de material a granel, sino más bien la capacidad para apoyar un proceso de diseño digital, llevar a cabo la producción del taller, y asumir la logística de un proyecto de este tipo." (FRANKEN, 2003) Estar preparados para las maniobras que se requieran, con un conocimiento de las técnicas y de sus resultados, se torna en momentos de obra, como una condición de rigor.

Necesitamos integrar en el proceso y en la lógica de proyecto a los contratistas y distribuidores, a los consultores de productos, y dotarles de un mínimo de conocimiento intuitivo de aplicaciones y métodos, para un mejor desarrollo del proceso de construcción.

CAPÍTULO II: HORMIGÓN Y SU CONFORMACIÓN

PROCESO CONCEPTUAL Y DE DISEÑO |
PARÁMETROS | ITERACIÓN | PENSAMIENTO
| PARAMETRICISMO VS. FORMA CURVA |
AVANCES EN SOFTWARE



2.0. INTRODUCCIÓN AL HORMIGÓN

- 2.0.1. Presentación
- 2.0.2. Compuesto y sus estados
- 2.0.3. Antecedentes
- 2.0.4. Armado
- 2.0.5. Conformado
- 2.0.6. Superficies
- 2.0.7. Prefabricación vs. In situ

2.1. NUEVOS HORMIGONES

2.2. TÉCNICAS DE TRANSFORMACIÓN

2.3. TÉCNICAS DE ARMADO

CONTEMPORÁNEO

2.3. PUESTA EN OBRA

El hormigón, material compuesto y amorfo, protagonista del siglo XX en nuestro sector construcción. Es un material unido de manera intrínseca a la memoria constructiva del mundo, siendo controlado, procesado y constantemente mejorado para el cumplimiento de requerimientos y prestaciones específicas. Técnicamente y económicamente es casi imposible imaginarnos la sustitución de este material a nivel global, pues su habilidad para influenciar la construcción y el diseño lo han posicionado como uno de los materiales de mayor producción en diversos países del mundo.

A pesar de los avances de otros sistemas, se mantiene aún presente en las propuestas de arquitectura contemporánea, de una manera constante, con variación de sus aditivos y las técnicas de su procesado, pero siempre en vías de su mejoramiento y la ampliación de las posibilidades constructivas.

El hormigón no puede ser considerado un material en estado puro, porque es el resultado de un escrutinio y desarrollo científico, o más específicamente resultante de una reacción química, que lo convierte en un material especializado y de alto rendimiento. De manera que este material no puede ser relacionado con una forma en específico pues es un combinado y permite múltiples posibilidades, así lo esclarece

Martin Peck "...como material no dicta ninguna aplicación particular. Tiene sus propiedades particulares de los materiales, pero no forma o textura inherente, por el contrario alberga una gran cantidad de potencial que se debe utilizar." (PECK, 2014)

A consecuencia permite una amplia gama de estrategias constructivas y de posibilidades resultantes, que continuamente se presentan en el campo de la innovación y los desafíos con este material. La clasificación del mismo en función de las prestaciones lo evidencia y de igual forma garantiza un mayor rigor en su fabricación. De esta fabricación surge un abanico de variantes, que actualmente se amplía aún más en la búsqueda de lograr la construcción de formas singulares.

La principal razón de su presencia en la construcción es su característica informe, moldeable, que provee de mayor libertad morfológica. Como así se enunciase en la revista Tectónica (1996): "La construcción con hormigón visto es sinónimo de una arquitectura sincera porque evidencia los materiales que lo componen, así como el elemento que lo contiene y le da forma (el encofrado), y porque, para demostrar sus cualidades, es esencial extremar la atención en la puesta en obra e incluso en la elaboración, ya que los errores que se cometan son irreversibles."



En este orden, es identificable la característica de compuesto: por seis materias primas base; las posibilidades de armado: pretensado, post-tensado, fibras, acero; las oportunidades estratégicas de procesado: prefabricado, el vertido in situ, impresión, deposición, y demás tecnologías actuales. Todo esto es consecuencia de la propiedad resultante del material como producto de una reacción química, en la que al cambiar de estado, se puede prever su forma, su resistencia, las características de su superficie y la inclusión de elementos que lo potencien (armado), además del manejo en su estado líquido para la trabajabilidad.

Compuesto y sus estados

El hormigón contemporáneo, resulta un sólido pétreo sintético, por la previa transformación química de una pasta fluida en su estado inicial, a su vez compuesta de cemento, agua, áridos, aditivos, agregados químicos y aire, además de fibras o acero en su armado.

Evidentemente es preciso considerar tanto sus componentes, como ambos estados del material, para su uso en construcción. Puesto que con la variación de características de sus componentes se obtienen diferentes clases o tipologías de hormigón, acorde a los requerimientos constructivos. De igual manera se revelan dos estrategias constructivas, prefabricación y construc-

ción in situ como consecuencia de los dos estados del mismo.

En las palabras de Jesús María Aparicio (El hormigón y Aristóteles, 2007): "Esto hace que su ejecución tenga un doble registro. Por un lado, se basa en la continuidad, en la inmutabilidad, en el vaciado y en el molde in situ, todos ellos conceptos vinculados a la idea estereotómica de espacio; por otro lado, en la precisión y discontinuidad de las piezas que se ensamblan, se enmarca dentro de la idea tectónica de espacio." De manera que en paralelo podemos identificar como propiedades de ambos casos las siguientes:

Hormigón fresco (estado fluido)

- Material amorfo
- Permite monolitismo
- Acepta la indeterminación
- Requiere de procesos artesanales en el armado

Hormigón en estado sólido

- Material conformado
- Permite manipulación
- Exige precisión
- Requiere de previsión de las uniones

Con lo cual, con base en la exploración del material se definen diversas maneras de identificarlo y de resumir sus características: en términos geométricos, superficiales, estructurales y de la materia per se. Esto se distingue muy



claramente en los escritos del arquitecto Jesús Aparicio, cuando plantea, "... por un lado, se reconocen las características geométricas y, derivadas directamente de esta percepción, extraemos algunas cualidades que afectan al espacio, como la estructura, el espesor y la continuidad del material; por otro lado, se descubre la apariencia superficial que procede del molde con el que se ha encofrado y que es el origen de la textura, del brillo, de la escala y de la capacidad de cambio a lo largo del tiempo o envejecimiento; por último, y tras la apariencia del continente anterior, se llega a descubrir el contenido del material o materia que relata su construcción, constitución y consistencia." (APARICIO, 2007)

Estas características fortalecen la idea de que al ser un material compuesto, permite se le exijan mayores prestaciones en diferentes direcciones con-

- 2.1 Fotografía Hormigón contemporáneo y moldes
- 2.2 Hormigón fresco mezcla y sólido
- 2.3 Gráfico comparativo estados



estructivas y se le pueda a la vez mejorar para suplirlas, abriendo de esta manera el campo tecnológico de la construcción con hormigón. Con nuevas exigencias, se potencia la inventiva y nacen nuevas tecnologías, y técnicas de procesado del material, tanto en la mezcla fluida como en el momento de su procesado y puesta en obra.

Como se plantea en la tercera edición de "Concrete mix design, quality control and specification": "El hormigón se ha convertido en un potencial material high-tech, capaz de muy alta resistencia, alta durabilidad y apariencia excelente y por ser fácil de bombear y ser auto-compactante. Sin embargo está en riesgo de perder su tan deseada propiedad tradicional, ser comparativamente económico." (DAY, 2006) Uno de los inconvenientes en el cambio del componente, es la inclusión de nuevos materiales a la mezcla que cambian la materia prima de la misma y elevan su costo en el mercado. Además hacen más químico y especializado su proceso de diseño de mezcla requiriendo equipo con conocimiento específicos de los componentes, dosificaciones y reacciones.

En adición a esto: "Los hormigones de mayor interés son frecuentemente auto-compactantes, reforzados por fibras, de resistencia en exceso de 150 MPa. Áridos finos (Msand, arena fabricada) y calizas superfinas, cenizas volátiles,

humo de sílice y metacaolín son integrados y vistos con potencial." (DAY, 2006)

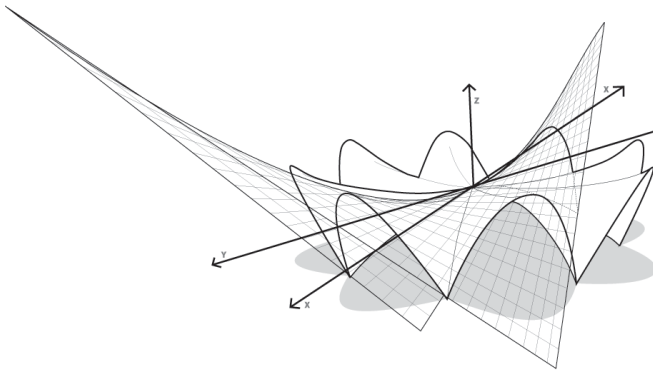
Estas y muchas otras estrategias de diseño del compuesto tanto en su fase fresca de mezcla fluida (aditivos, variedad de fibras, armados textiles, granulometría de los áridos, etc.), como en el momento de su vertido o puesta en obra (estrategias de procesado del material, mayor vibrado, etc.), surgen para la mejoría de las prestaciones requeridas según cada proyecto, y la reducción del deterioro al que se ven expuestos sus componentes (como oxidación, retracción, erosión, etc.).

La fragilidad de sus componentes es un tema importante puesto que esto condiciona el comportamiento del material en todas etapas, pero tanto, "...valores y defectos puede decirse que se encuentran en un momento de cambio por la investigación constante que se lleva a cabo en todos los campos que integran la construcción en hormigón" (Dominar la materia, 1996), como el conformado con nuevos sistemas de encofrados y moldes, la deposición robótica e impresión 3d, las últimas generaciones de aditivos, la inclusión de diferentes clases de fibra como armado, y todas las mejorías de proceso para superior aspecto y comportamiento final del hormigón.

De manera que, es importante conocer tanto los componentes como las estrategias constructivas, para poder manejar con seguridad lo que en la tercera edición de Tectónica se describe como: "un material que tiene la excepcional virtud de ser al tiempo estructura y cerramiento" (Dominar la materia, 1996)

Sin embargo, resulta paradójico que un material evidentemente disforme, que parte de un estado líquido, para ser posteriormente consolidado en su curado, y con vocación de envolvente continua, le cueste tanto calar en la realización de formas "fluidas". Uno de





los factores influyentes en la existencia de esta premisa, es el pasado constructivo y su imagen proyectual, al ser un material cuya evolución y acogida en construcción se debe a la necesidad de resolución de problemas de ingeniería que le califican como “símbolo de fuerza y resistencia” (Dominar la materia, 1996), pero que también le proveen de antecedentes constructivos y técnicas condicionantes de materialización.

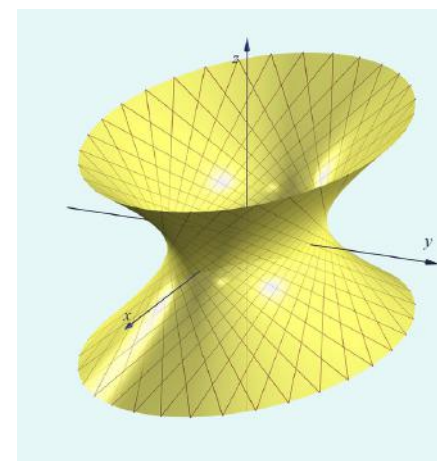
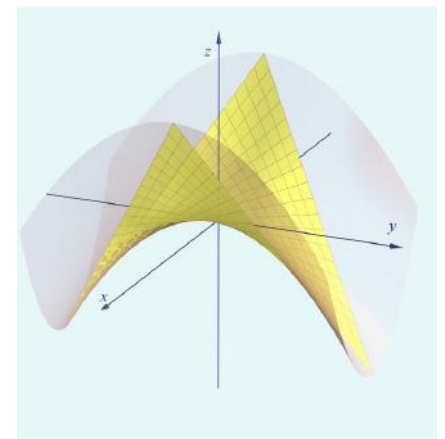
Antecedentes

En continuidad con la imagen de “símbolo de fuerza y resistencia” (Dominar la materia, 1996) que antecede las prácticas actuales en construcción con este material, es preciso visualizar precedentes que lograban sobrepasar esta imagen, dotándole de vestigios constructivos que desafían aun hoy la cultura constructiva habitual, y que representan las raíces posibilitadoras de la construcción de formas complejas actuales.

Las cáscaras con formas de paraboloides hiperbólicas, cilíndricas y cúpulas, de hormigón armado, que caracterizaron a Félix Candela, por el alcance de las luces logradas y la esbeltez de las láminas de hormigón, realizadas gracias a la construcción de encofrados basados en elementos rectos; son ejemplos importantes en la realización de formas complejas basadas en las superficies regladas.

Una de sus obras más emblemáticas el Restaurante Los Manantiales en Xochimilco, México, construido en 1958, presenta una bóveda de crucería de ocho láminas, con una planta circular de 42 m de diámetro compuesta por cuatro paraboloides-hiperbólicos interceptados, logrando un espesor de 4 cm de las láminas de hormigón y evidenciando el hecho que mediante el manejo de la geometría, se lograba una construcción de formas complejas con este material. En la práctica implicaba un sistema de encofrado basado en tablas rectas dispuestas por capas, sobre un sistema de andamios provisionales de madera, formando una especie de mesetas superficiales donde se colocaba el armado de acero y se procedía al vertido del hormigón para lograr el conformado del material. Una vez conformada la cubierta le sucedía el desmantelado del andamiaje, lo que abarataba su construcción y dependía en mayor porcentaje de la mano de obra.

De igual manera vemos presente en la obra de Gaudí la creación de formas complejas con base geométrica, como: paraboloides-hiperbólicas, hiperboloides de revolución, helicoides; y desarrollo de superficies doblemente regladas y de doble curvatura para la construcción de la Sagrada Familia, pero que para fines de su materialización se han llevado a cabo en diversos casos con un sistema de encofra-





dos de chapa o poliéster, previamente realizados, mediante la disposición de chapas curvas o un laminado de poliéster sobre la configuración reglada de elementos lineales, conformando una superficie base y armado de acero, formando superficies para el conformado de un hormigón con características especiales.

La terminal TWA del aeropuerto JFK de New York, diseñada por Eero Saarinen y completada en 1962, es un ejemplo fehaciente de la intención de construcción con hormigón de una "envolvente continua" mediante conformado de elementos de hormigón armado, que configuran una cáscara con cuatro laminas, cuatro puntos de apoyo y un armado en malla de acero con apariencia monolítica. La característica más prominente de diseño de Saarinen era los 5665 m² aproximados de hormigón armado que forman la cáscara delgada

de hormigón del techo, volumen principal del edificio.

En sus planes originales, este techo era una losa ondulante continua pero por indicación de los estructuralistas, su construcción requirió de la separación de las láminas de techo, conectadas por cuatro articulaciones, para evitar el agrietado de contracción del hormigón, producido por las diferentes capas del mismo en el vertido y sus respectivas temperaturas. Como es evidente su construcción se basó en el conformado mediante el uso de encofrados y con una malla de acero en su armado.

Otro ejemplo importante es la Opera de Sídney construida hacia 1973 y diseñada por Jorn Utzon, cuya edificación requirió de la descomposición de la superficie de las cáscaras semiesféricas en costillas y paneles de hormigón prefabricados, conectados por un siste-



ma de pretensado, para evitar la realización de un encofrado costoso.

Un aspecto relevante de la misma fue la conclusión formal con base geométrica en la esfera (con radio de 75m), que simplificó, luego de diversas iteraciones y uso del ordenador para sus cálculos y búsqueda de soluciones, el desarrollo constructivo. De manera que, todas las vigas podrían ser porciones de mayor o menor tamaño de una misma viga y los moldes para la prefabricación de piezas se podían reutilizar varias veces. Así con doce encofrados se construyeron las 1498 vigas que forman el esqueleto de las bóvedas. Esta obra tiene un desarrollo constructivo del hormigón desde una aproximación industrial, basada en la prefabricación y la producción en masa.

Hacia el año 2000 con la adopción de tecnologías de fresado CNC, las torres

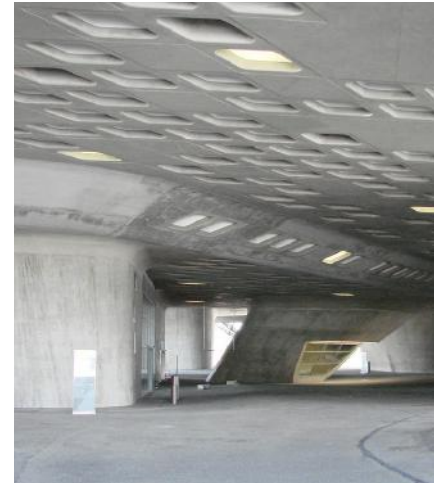


de Zollhof, edificadas en Düsseldorf y diseñadas por Frank Gehry, se basan en esta técnica aplicada en la creación de moldes de espuma de poliestireno extruido de célula cerrada para la posterior conformación de paneles prefabricados de hormigón armado. Se recurre a esta alternativa tan innovadora en su momento, porque el diseño de las torres presentaba todas su superficie de fachada dominada por curvas. De manera que el proceso se basó en la construcción de, "...una maquina CAD-CAM que realizaba el fresado de grandes bloques de foam, para luego ser utilizados como moldes, para el conformado de piezas de hormigón únicas en individuales, que se instalaron in situ para la construcción." (GLYPH, 2003) La fachada con capacidad de carga y geometría de doble curvatura, está compuesta de aproximadamente 1.355 paneles curvos de hormigón armado, distintos todos, de 25 cm de espesor, que fueron conformados en esta tipología de molde no estandarizado. Esta obra en específico marco el inicio de tecnologías de control numérico aplicadas a la construcción del encofrado, abriendo un campo de desarrollo para la conformación del hormigón de manera personalizada.

La obra cuya línea de aproximación en términos constructivos resulta similar, es el Crematorio Meiso no Mori de Kakamigahara, Japón, diseñado por Toyo Ito y construido hacia 2006, toma de las técnicas de encofrados iniciales, vistas en las cáscaras de Félix Candela, su sistema de construcción, pero en este caso el desafío principal era conseguir superficie de mejor acabado. De manera que esta cáscara de apenas 20 cm de espesor fue conformada con un encofrado especial usando tecnologías CAD/CAM, como se explica en "From Control to design": Para el soporte del encofrado superficial de entablado de madera contrachapada, se dispuso vigas curvas de gran dimensión a



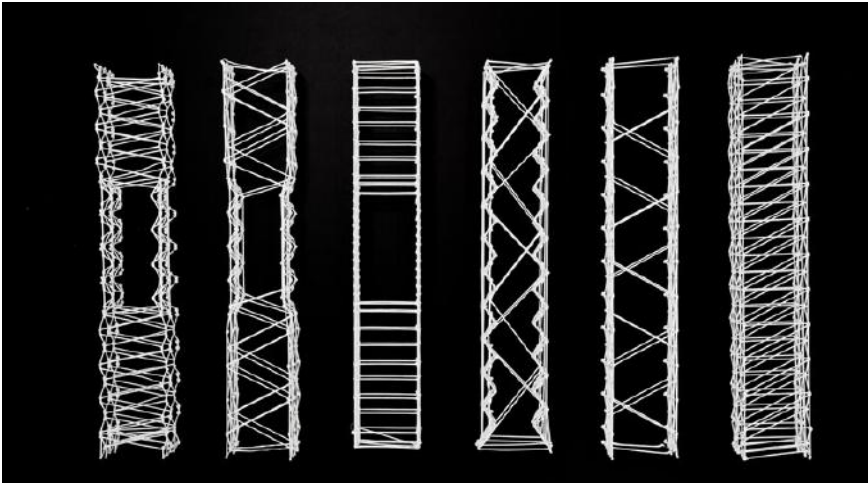
intervalos de 1 m, con vigas secundarias más pequeñas en la otra dirección separadas a 25 cm. En adición a esto, se utilizaron moldes especiales en los puntos más curvos. (FERRE & SAKAMOTO, 2000) Aunque se intenta adoptar las técnicas de fabricación con control numérico, para mayor eficiencia y reducción de la mano de obra, se evidencia lo laborioso del proceso de puesta en obra y la constante presencia de la mano de obra para la puesta



in situ.

En el caso de Centro de ciencias Phae-no, diseñado por Zaha Hadid y construido hacia el 2005 el hormigón es una vez más usado en la construcción como vertido in situ esta vez un hormigón autocompactante, que es conformado resultando en formas curvas continuas. Compuesto de diez conos y superficies de hormigón armado curvas y continuas, presenta unas intenciones similares pero un desarrollo constructivo mejora-





do del aplicado en la terminación de TWA de Saarinen. En este caso se recurre a la realización de secciones de encofrados fabricados individualmente, gracias al modelado por ordenador previo.

En este breve recorrido por algunas obras relevantes, que anteceden las prácticas constructivas de formas complejas con hormigón armado, pasamos de un uso intensivo de andamios y encofrados, para un vertido in situ del hormigón; a una industrialización de piezas prefabricadas de la mano de un pretensado; y a la fabricación de moldes reciclables ya utilizando tecnologías de control numérico, para conformado del hormigón. Todo esto presentando en términos técnicos los logros alcanzados, necesidades y limitaciones, así como también las posibilidades de desarrollo de las tecnologías y técnicas constructivas.

Armado

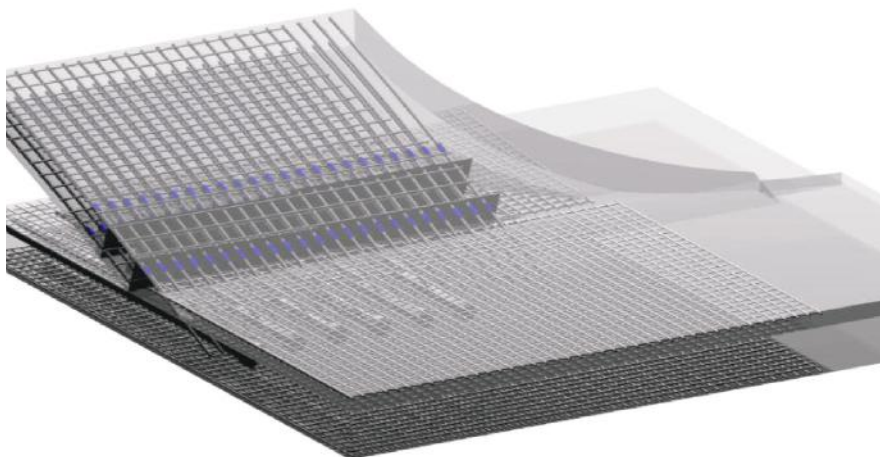
El armado es un aspecto importante cuando se explora el campo de la construcción con hormigón, pues este aporta al compuesto una propiedad que el mismo no posee en su ausencia y que es de suma importancia en la mayoría de las aplicaciones estructurales, se trata de un comportamiento resistente a la tracción.

Con el nacimiento del hormigón armado y las primeras patentes del mismo, se presenta la conformación de este material de la mano de inclusión de mallas de acero para el conformado de objetos. Una patente introducida por Joseph Monier en 1860, presenta exactamente esta composición para la construcción de depósitos de agua y maceteros de jardinería. Evidenciando que la integración de un armado al hormigón, permitía la construcción de mayores desafíos.

Mejor conocido como el esqueleto del hormigón, el armado convencional se basa en el uso de acero, en su presentación de barras corrugadas o mallas, pero actualmente se presencia la utilización de micro-refuerzos, fibras, pretensado y postensado, así como la variación del material, para cada una de estas aproximaciones. Cuyo objetivo es reducir la cantidad de material utilizable, los desperdicios y el tamaño del mismo, en búsqueda de un comportamiento ya no como huesos, sino como membranas o redes estructurales.

Además la utilización de estas nuevas tipologías de armado se debe a una patología común en muchos vestigios arquitectónicos de tiempos pasados, la corrosión, consecuencia de la utilización de acero para el armado.

Este sistema constructivo, ha sufrido cambios en sus componentes y la transformación del material para lograr suplir desafíos morfológicos, pero las



estrategias constructivas, producto de la inventiva han sido el punto focal de desarrollo en términos de este sistema, tanto en la planificación, fabricación y puesta in situ.

De manera que la técnica de procesado del material, la estrategia de vertido o colocación en obra, y de igual manera las prestaciones requeridas para los casos específicos (superficies lisas, impermeabilidad, color, textura, resistencia, etc.) son los aspectos principales a la hora de clasificar las alternativas de armadura. No obstante el tipo de armadura también condicionara la mezcla de hormigón fresco a utilizar.

En la realización de superficies complejas con hormigón armado, el complejo refuerzo de acero encuentra un desafío significativo, en el proceso de fabricación, pues se requiere de una planificación y modelado previo del mismo, con base en los mismos softwares que desarrollan las superficies. Además requiere de la consideración de doblado, mediante máquinas de la barras de refuerzo, para precisión del armado para tales formas, o de alternativas muy laboriosas para conseguir el doblado.

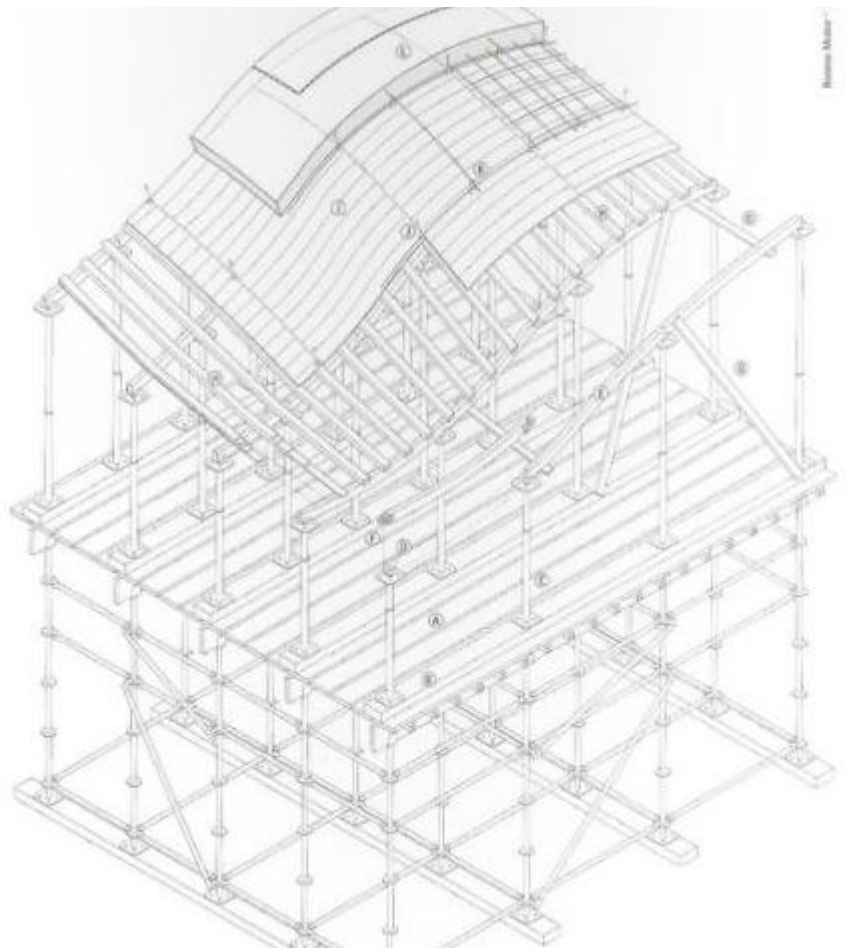
Conformado

En la fabricación del hormigón se utilizan encofrados y moldes que sirven de cofre para que la materia plástica introducida en su interior fragüe sin derramarse. El molde tiene la función de trasladar su forma a la pasta vertida

mientras va endureciendo. Una vez sólida, normalmente se retira, por lo que el encofrado no es parte constituyente del hormigón aunque sí sea fundamental para su fabricación. (CEHOPU-CEDEX, 2010)

Por ser una parte tan fundamental de la construcción con hormigón, el encofrado y los moldes han visto a través del tiempo una gran evolución, y muchas soluciones para su confeccionado. Desde el encofrado de tabla de madera

que tradicionalmente se observa en la construcción de cáscaras de hormigón armado, pasando por los encofrados de chapa de acero, de fibras de poliéster laminadas, encofrados textiles, evolucionando en moldes de ceras recicladas, moldes de poliestireno expandido, moldes reconfigurables por accionado robótico, entre muchos otros que resultan de la búsqueda de formas efectivas de sus realización como confeccionado por técnicas CNC, laminados de mate-



riales, etc.

Evidentemente, el conformado del hormigón es lo que ha posibilitado hasta nuestros días, la utilización de este material en la construcción, pues las técnicas habituales de construcción todas, se basan en el conformado del mismo, sea por componente o superficies continuas, de manera prefabricada o in situ.

A nivel industrial, existe toda una tradición constructiva basada en el conformado. De los métodos actuales y en desarrollo, la fabricación digital de moldes y encofrados, resulta con mayor acogida, por el conocimiento existente de los procesos y técnicas de vertido en el sector y de parte de la mano de obra.

En otro orden, presentan limitaciones con el cambio de la lógica constructiva que va de lo repetitivo a lo personalizado, presentando la necesidad de mayor variación, con lo cual los moldes deben ser cambiantes o de uso único. A consecuencia actualmente vemos alternativas como el proyectado y la impresión 3d que no ameritan de un molde para su aplicación en la construcción, dotando al hormigón de nuevas posibilidades constructivas.

Superficies

La superficie del hormigón es la principal expresión de su proceso constructivo. Nos evidencia las técnicas de conformado, la subdivisión de su superficie, el resultado de la mezcla, sus juntas de dilatación y hasta las condiciones de su entorno climático al momento de su vertido.

La arquitectura del moderno, celebro la exposición de este material, de manera tan influyente en la continuidad del tiempo, que aún hoy se exhiben las características de conformado superficial del mismo, desde una vertiente de exploración estética, dotándole de color, transparencia, texturas, relieves y estampados sugestivos.

Indudablemente la confección de superficies de hormigón, ocupa una línea de desarrollo paralela a la edificación con hormigón, pero que en diferentes situaciones ha servido para informarla, permitiéndole un camino de desarrollo técnico al hormigón. Aplicaciones de pavimentos, mobiliarios urbanos, paneles de superficies, fachadas, son algunas de las principales en la utilización de impresión ornamental y de recursos estéticos aplicados.

Como consecuencia del tratamiento de las superficies, el hormigón permite una lectura, no solo espacial y técnica, sino también estética, una forma un tanto poética de un material: químico, industrial, solido.

Prefabricación vs. In situ

La construcción con el material ya "curado" hace pensar en su unión solidaria con el resto de la construcción, las distintas posibilidades de uso de técnicas de fijación o la de adición de hormigón, definen dos grandes grupos que vendrán matizados ya que no son excluyentes. (APARICIO, 2007)

Con este enunciado, Jesús Aparicio se refiere a la constante diferenciación de la construcción continua o la construcción basada en componentes del hormigón armado. Donde las piezas prefabricadas y la construcción monolítica in situ vuelven a mostrarse, incluso en la generación de pieles multifuncionales contemporáneas.

Sin embargo es evidente que, "la industria ha volcado las experiencias de la prefabricación en taller a la obra in situ, incorporando el potencial de la industria química a la hora de modificar y optimizar la dosificación del hormigón para adaptarlo a los muy diversos objetivos de cada caso. La puesta en obra hoy día se asemeja más a un taller al aire libre donde se realiza meramente un ensamblaje: hormigón certificado de central e incluso con nombre propio (Agilia, Chronolia, Actium, etc.) altas

resistencias iniciales (H50 a 25 MPa en 18h, desencofrados en 4h), características modificadas según necesidad (consistencia, impermeabilidad, etc.), sistemas eficaces de bombeo (distancias de 500 m, caudales de 100 m³/h), armaduras modulares prefabricadas en taller y completos sistemas de encofrados, permiten una puesta en obra donde ya nada queda a expensas del azar, salvo la climatología.” (JURADO, 2007)

2.1. NUEVOS HORMIGONES

Como antes mencionado, el hormigón contemporáneo, ha dejado de ser el resultado de la mezcla de solo tres compuestos, este consiste de seis elementos base: cementos, agregados, agua, ingredientes químicos, aditivos y aire. Dentro de estos compuestos, existe también un crecimiento en las variantes y posibilidades de cada uno por individual y de la interacción entre sí para resultados específicos. De manera que se genera un campo de especialización, apareciendo la figura del técnico especialista en hormigones, quien tiene el dominio de la diferencia de los materiales por individual, sus interacciones, reacciones y las propiedades de los materiales asociadas con ellos.

El conocimiento de los materiales que lo conforman y su propiedades incluye el manejo de las maneras en que al variar y modificar estos componentes puede crear un nuevo y preciso proceso, y uso de propiedades requeridas para unas exigencias específicas.

Este cambio significativo del hormigón como compuesto, es una consecuencia de las prestaciones y exigencias en función de las nuevas necesidades y los desafíos constructivos constantes. El caso del diseño paramétrico y el desarrollo constructivo de formas complejas es una prueba fehaciente de los retos a los que este material amorfo se enfrenta.

Tanto el material y el manejo de sus prestaciones como las tecnologías constructivas y las posibilidades de transformación y fabricación, así como las características de su puesta en obra, son el resultado de una búsqueda de soluciones a nuevos retos.

Lo cierto es que, este es el resultado de una mezcla, y las características y variantes de cada uno de los involucrados o partes del proceso, tendrá como resultado diferentes clases de hormigones. Algunas clases que pueden servir de guía: hormigón armado con acero, armado con fibras o microarmado, proyectado (shortcrete), hilado (spun concrete), fluido, visto, vacío (vacuum concrete), aligerado, normal, pesado, pretensado, estampado, hormigón textil, hormigón de alto rendimiento y ultra alto rendimiento, refractario, traslucido, auto-compactante, hormigón de alta resistencia, hormigón celular, y muchos otros.

Es importante adherirnos a la idea de que la elección del hormigón dependerá de las necesidades del proyecto y específicamente las propiedades que se requieren y las que por el contrario no se desean. Con lo cual: la durabilidad, trabajabilidad, rendimiento, plasticidad, fluidez, impermeabilidad, rigidez, estabilidad dimensional, apariencia, resistencia, entre otras serán pautas para la elección de una clase.

En el caso del diseño paramétrico se presenta la demanda de construcción de formas complejas, como piel del edificio, un desafío que incrementa la necesidad de construir superficies continuas que tengan libertad de forma y prestaciones estructurales, donde el hormigón aparece como potencial para el desarrollo e incremento de sus prestaciones, pero de igual manera se requiere de una personalización del hormigón y de las técnicas de procesamiento aplicadas.

Según el proceso llevado a cabo para uso de hormigón, sea por vertido, impresión 3d, proyectado, conformado

mediante moldes y los tipos de moldes, encofrados, etc. tendremos también una clasificación importante a la hora de realizar formas complejas en construcción. Estas son las tipologías más usadas para la arquitectura paramétrica en función de sus requerimientos:

* Hormigón de alto rendimiento y Ultra alto rendimiento: Permiten la esbeltez de los elementos, y superficies realizadas, por su alta capacidad resistente. Poseen grandes cantidades de plastificantes, y un ratio reducido de la relación agua-cemento.

* Hormigón Autocompactante: Estos son utilizados para su empleo en la conformación mediante encofrados y moldes complejos, en los que el vibrado no supe la necesidad de compactado. Posibilitan la realización de componentes prefabricados de calidad. Y se relaciona directamente con el desarrollo de aditivos policarboxilatos y superplastificantes que le dotan de sus características sin disminuir prestaciones. Usualmente poseen finos menores de 125 mm. (PECK, 2014)

* Hormigón de alta resistencia: Permite reducir las secciones resistentes, mejora la durabilidad, y acometer objetivos estructurales singulares.

* Hormigón reforzado con fibras: Tiene su composición ajustada, pues las fibras incrementan la proporción de partículas finas que requieren ser humedecidas y cubiertas con la pasta de cemento, lo que presente resequeidad. (PECK, 2014)

2.2. TÉCNICAS DE TRANSFORMACIÓN O PROCESADO

En la construcción de formas complejas surge también el determinante de la solución técnica, la manera en que se coloca en obra o el proceso de su conformación. Ya que es un material líquido (en su estado inicial), necesita de un vertido especial, un conformado previo, un manejo de la mezcla o una modificación en su presentación para puesta en obra, dependiendo del proyecto. Estas son las técnicas y tecnologías que posibilitan su uso.

2.2.1 Bases

Encofrados y moldes

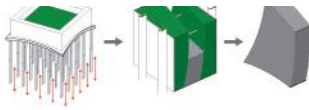
El encofrado es el negativo de nuestra forma ideada, aquel que dejara impreso por siempre cualquier defecto que presente. La industria ha ido desarrollando los encofrados modulares para otorgarles facilidad de manejo, rápida recuperación del material, medidas espaciales y múltiples accesorios que permitan estanqueidad y acabados mejorados (berenjeno, clipado, planchas de revestimiento interior). (JURADO, 2007) De igual manera la industria del encofrado hoy crece hacia la reducción de los desperdicios, el reciclado de los mismos, la variabilidad y flexibilidad de su forma, para la realización de formas curvas complejas en hormigón.

El encofrado puede confeccionarse en

diversos materiales y técnicas. Esto lo detallaremos desde las técnicas industriales y experimentales con posibilidad de aplicación en arquitectura paramétrica. Una de las técnicas más comunes y presentes en menor medida en la actualidad es el encofrado de madera, que hoy aparece en modelos 3d de encofrados para desarrollo de superficies complejas. Este consiste en su mayoría de casos de una superficie encofrante constituida por tableros fenólicos y encerradas por herrajes de acero galvanizado, lo que puede constituir un punto de partida de las técnicas que observaremos a continuación.

Por otro lado los moldes, que son la presentación reducida y mejor controlada del encofrado, han tenido un desarrollo orientado al componente prefabricado de la construcción y mediante ellos se ha visto mayor potencial de racionalización del proceso. Los moldes de poliestireno expandido, realizados con fabricación sustractiva mediante CNC, son de las primeras soluciones constructivas para formas complejas que aparecen en la memoria reciente de la acogida de modelos realizados con CATIA como es el caso de Neuer Zollhof, de Frank Gehry (1999)

El hormigón por mucho tiempo ha sido el único material estructural capaz de rellenar y ocupar espacio. Esta condición, es lo que nos permite modificarlo a corde a nuestros requerimientos formales mediante moldes volumétricos



Tecnologías Industriales para estructuras de hormigón a medida

elementos de cera reusada, formada con molde ajustable por sistema de accionado robótico

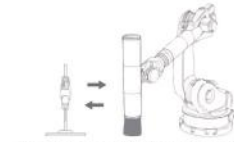
con aditivos superplastificantes
•Cera termoplástica industrial personalizada

hormigón de 80x80cm



in situ con andamiaje regular
•Reduce el desperdicio
•Permite la formación libre de paneles

elementos de formas complejas



Fabricación robótica de estructuras de hormigón complejas

•Puesta vertical de fundición de hormigón con brazo robótico

•Hormigón con aditivo fluidificante y reforzado con fibras

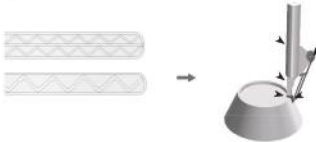
•Elementos lineales estructurales, columnas

•SMART DYNAMIC CASTING



•Permite el vertido in situ de elementos estructurales verticales

•Columnas o elementos lineales con formas complejas



Construcción por deposición continua de hormigón in situ

•Impresión 3d, deposición continua de hormigón controlado por ordenador

•Hormigón

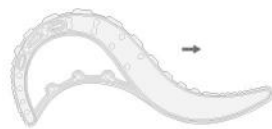
•Envolvente continua, con previsión de instalaciones y de componentes acústicos

•CONTOUR CRAFTING (CC)



•Permite el vertido continuo in situ
•Prevee el paso de instalaciones
•No requiere ensamblaje
•No desperdicios

•Envolvente continua del edificio



Modelado por deposición fundida de hormigón para elementos a medida

•Impresión 3d, deposición de hormigón controlado por ordenador. FDM (Fused Deposition Modelling)

•Hormigón

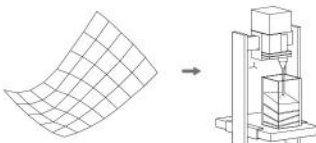
•Piezas de hormigón de 2x2x2m, con previsión de instalaciones y de componentes acústicos

•FREEFORM CONSTRUCTION



•No necesita encofrado
•Prevee el paso de instalaciones
•Reduce desperdicios
•Libertad geométrica

•Paneles doblemente curvados
•Componentes complejas
•Trabajar en entornos peligrosos.



Proceso de Fabricación para piezas con doble curvatura

•Molde por apilamiento, con material viscoso separador

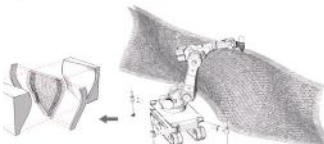
•Hormigón

•Piezas de hormigón apilables

•CAST ON CAST

•No necesita encofrado
•Reduce desperdicios
•Libertad geométrica
•Facil de transportar

•Paneles doblemente curvados
•Componentes complejas



Mallas 3d fabricada robóticamente como Encofrado poroso y refuerzo

•Impresión 3d de armado de refuerzo y encofrado poroso para formación de hormigón

•Armado impreso 3d sintético y vertido de hormigón

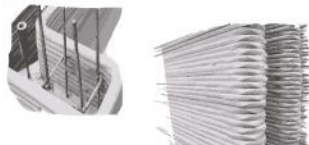
•Paneles

•MESH-MOULD



•elimina la necesidad de encofrado convencional
•Mayor eficiencia de armado
•Libertad geométrica

•Paneles



Fabricación de componentes por deposición de hormigón

•Impresión 3d, deposición de hormigón controlado por ordenador

•Hormigón con aditivos de desperdicios de la construcción.

•Piezas de elementos constructivos para ensamblaje en obra

•WINSUN 3D PRINTING



•No necesita encofrado
•Reduce desperdicios
•Facil de transportar
•Prevee el paso de instalaciones

•Envolvente del edificio de rapid ensamblaje



Proceso de Fabricación para piezas con doble curvatura

•Encofrado textil, de tejidos reforzados con fibras de vidrio.

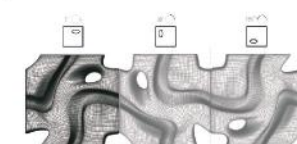
•Hormigón

•Elementos estructurales completos
•Paneles

•C.A.S.T.

•Libertad geométrica
•conformado optimo de elementos estructurales

•Paneles doblemente curvados
•Componentes complejas



Proceso de Fabricación para piezas de hormigón reforzado con polímeros

•Impresión 3d, diseño de un compuesto de cemento polímero reforzado, para impresión de componentes en bloques

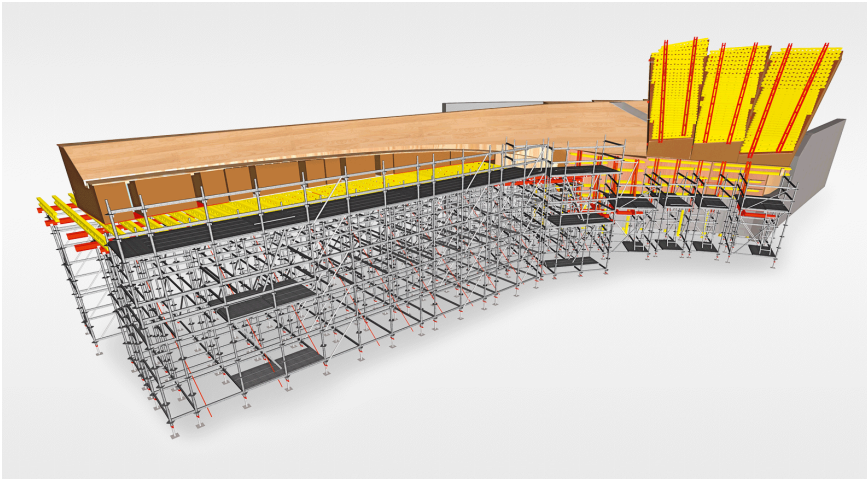
•Hormigón reforzado con fibras de polímeros en polvo, desarrollado químicamente

•Piezas de hormigón (tiles)

•EMERGING OBJECTS
BRANCH TECHNOLOGY

•No necesita encofrado
•Reduce desperdicios
•Libertad geométrica
•Facil de transportar

•Superficies complejas
•Envoltentes
•Componentes arquitectónicos



que permiten la configuración de componentes tridimensionales.

Hoy las técnicas más avanzadas de desarrollo, tanto de los encofrados como de los moldes, para la realización de arquitectura paramétrica, con tendencia a la curvatura o no, se dirigen a la variabilidad, puesto que el modelo de fabricación personalizada en masa indica un cambio de paradigma en la industrialización de estos recursos.

Proyectado

Consiste en el esparcimiento de la mezcla de hormigón por medios mecánicos, previamente diseñada con la fluidez y densidad necesaria para su proyección sobre la superficie constitutiva. Esta técnica se utiliza en generación de volumetrías que no requieren de unas prestaciones estructurales, para dar condiciones superficiales o gestar formas singulares. Un ejemplo de aplicación que direcciona a su posible desarrollo es su utilización en formación de volúmenes en parques temáticos y de viviendas singulares. Este requiere de un hormigón premezclado, que puede ser líquido o seco, para fraguar por la presión de su proyectado.

Impresión 3d

La impresión de hormigón, trae consigo la generación de nuevas mezclas de aplicadas junto a las tan nombradas "tintas", propias de diversas patentes de fabricación aditiva, específicamente impresión 3d. Esta consiste en un vertido del material en su estado fluido,

vía un cabezal de vertido conducido por una máquina dirigida digitalmente. Actualmente estas técnicas están en proceso de desarrollo con ejemplares en diversas escalas, ya realizados.

La idea de vincular una armadura robótica en gran pódico para impresión 3D con hormigón está siendo explorado por varios equipos diferentes en todo el mundo. Una ventaja obvia para la industria del hormigón en su conjunto es la eliminación potencial de encofrado de la ecuación. La impresión tridimensional requiere una vía sin obstáculos para la cabeza de deposición de capas a moverse cuando el hormigón.

La mezcla de concreto aplicada para estas técnicas, debe ser de composición capaz de fraguar a una velocidad tal que cada capa sucesiva puede apoyar la anterior en un tiempo muy corto. Por esto los casos experimentales generan sus propias mezclas personalizadas.

2.2.2 Industriales

A nivel industrial para uso de nuestro sector, se presentan diferentes muestras de desarrollo potencial, para usos no necesariamente destinados al sector construcción, pero si aplicados en casos específicos.

Encofrados

* Encofrados 3d: Unidades especiales de encofrado hecho a medida para realización de formas multi-curvas



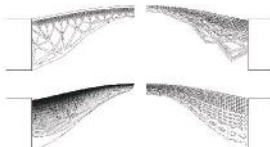
singulares, componentes volumétricas pre-ensamblados con superficie encofrante de tableros de madera y vigas de aglomerados de madera como estructura. Permite la realización de una gran cantidad de formas curvas complejas, con la planificación y modelado previo del encofrado, para su fabricación.

Algunos ejemplares y sus fabricantes: 3d Formwork Unit; PERI, DokaShape; DOKA, etc.

* Encofrado radial vertical: Encofrados de tablero de contrachapado fenólico, sobre estructura mixta de vigas de madera y perfiles de acero, permite la realización de paredes curvas de un mínimo de 2,5m o 1 m de radio según el fabricante. Por su condición vertical solo permite realizar curvas en parámetros.

Modular con tensores multi-radio: Sistema formado por módulos compuestos por tablero fenólico, vigas de rigidización y tensores que confieren a voluntad la curvatura. Con dos gamas -la que encofra la cara externa del muro y la interna, algo más corta-. Los módulos se unen con grapas como los modulares rectos. Pueden llevarse pre-montados a obra.

Algunos ejemplares y sus fabricantes: Multiform; ALSINA, Rundflex; PERI, Encofrado Circular H20; DOKA, Multicurvo RP; ANDAMIOS IN, Flector; ULMA, etc.

	Proceso	Material	Presentación	Fabricante	Propiedades	Aplicación
 <p>Tecnologías Industriales para estructuras de hormigón a medida</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Encofrado de elementos de cera reusada, formada con molde ajustable por sistema de accionado robotico 	<ul style="list-style-type: none"> •Hormigón seco con aditivos superplastificantes •Cera termoplastica industrial personalizada 	<ul style="list-style-type: none"> •Panel de hormigón de 80x80cm 	<ul style="list-style-type: none"> •UNIKABETON 	<ul style="list-style-type: none"> •Permite el vertido in situ con andamiaje regular •Reduce el desperdicio •Permite la formación libre de paneles 	<ul style="list-style-type: none"> •Superficies y elementos de formas complejas
 <p>Conformado en moldes perdido de superficie singular</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Moldes textiles para conformado singular de baldosas de revestimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> •Hormigón reforzado con fibras personalizado, con aditivo fluidificante 	<ul style="list-style-type: none"> •Piezas conformadas con características de superficies singular 	<ul style="list-style-type: none"> •PWALL 	<ul style="list-style-type: none"> •La realización de superficies con características de relieve. 	<ul style="list-style-type: none"> •Paneles y revestimiento.
 <p>Impresión espacial de acero por soldado</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Impresión 3d, espacial por soldadura de metales. 	<ul style="list-style-type: none"> •Aluminio, bronce y acero inoxidable. 	<ul style="list-style-type: none"> •Estructuras metalicas y posibles armaduras. 	<ul style="list-style-type: none"> •MX3D METAL 	<ul style="list-style-type: none"> •Permite el vertido la contruccion •espacial, sin ningun tipo de moldeado de las marduras •metalicas. 	<ul style="list-style-type: none"> •Armado continuo
<p>Proceso de Fabricacion para piezas con doble curvatura</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Molde de elastomeros para componentes esculturales. 	<ul style="list-style-type: none"> •Hormigón 	<ul style="list-style-type: none"> •Componentes columetricos estructurales de hormigón. 	<ul style="list-style-type: none"> •RECKLI 	<ul style="list-style-type: none"> •No necesita encofrado •Reduce desperdicios •Libertad geométrica •Facil de transportar 	<ul style="list-style-type: none"> •Paneles doblemente curvados •Componentes complejas

Moldes

* Moldes de resinas de poliéster reforzado con fibras de vidrio: Se constituyen generalmente, por una estructura base de chapa metálica que luego es recubierta con laminados de resinas epoxi reforzadas por fibras de vidrio. Estos también son revestidos con gomas para un acabado superficial mejorado. Un fabricante de estos es: Decomol

* Molde de poliéster y silicona: Para dar soluciones al asunto del acabado aparece esta tipología de moldes con silicona que permite mejor terminación.

* Moldes de elastómeros: Otra versión de molde con base en plásticos, que ofrece mejor acabado.-

* Moldes y contra moldes metálicos: Realizados con chapa metálica, y encofrado estructural de barras de acero o planchas y perfiles metálicos, generalmente en su superficie encofrante se le aplican terminaciones de elastómeros o resinas plásticas. -Decomol

* Molde de resina vinilester

2.2.3 Experimentales

Encofrados

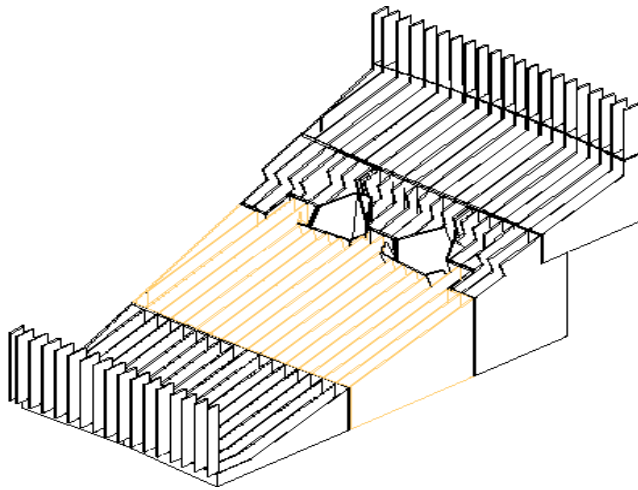
* C.A.S.T.: Encofrado textil. Es una tecnología de construcción que implica el uso de membranas estructurales como el material de revestimiento principal para moldes de conformado de hormigón. A diferencia del encofrado tradicional, el material es altamente flexible y puede flexionarse bajo la presión del hormigón fresco. Exhiben formas de curvatura resultante, así como excelentes acabados de superficie que generalmente no se asocian con estructuras de hormigón. (VEENENDAAL, BLOCK, & WEST, 2011)

Moldes

* Molde flexible reconfigurable: Parte de la fabricación orientada a componentes. Este método de encofrado flexible se basa en un principio que ya se utiliza en las industrias automotriz y aeroespacial con fines de creación rápida de prototipos: un material se deforma, de una pieza plana en una forma

curva deseada, pulsando una alfombra de goma moldeada por una cama de alfileres con alturas variables. Esto permite la reutilización y reconfiguración de los moldes y el conformado de paneles de hormigón curvado. Diversas investigaciones se presentan en dirección a este tema, ya sea con uso de tensores o con accionado robótico de alfiles actuantes.

* TailorCrete: Tecnologías Industriales para estructuras de hormigón a medi-



da. Posee un sistema de conformado del hormigón en paneles de 80 x 80 cm, mediante la generación de un encofrado para formación libre del hormigón, con elementos de cera reusada, previamente formados en un molde ajustable por un sistema de accionado robótico.

Consiste en un encofrado sin residuos, que permite la reutilización de la cera y puede ser también montado en andamiaje regular una vez curado el hor-

migón previamente vertido en el molde reconfigurable. Requiere de hormigón seco con aditivos super-plastificantes, cera industrial personalizada, andamios convencionales, y moldes de accionado robótico. Entre sus características destacan:

- o Elimina la necesidad de utilizar materiales de construcción costosos y marginalmente reciclables como la madera y chapa de acero, mientras sustituye los materiales tradicionales para el

encofrado de hormigón por la cera. Al mismo tiempo, reduce los residuos relacionados con la construcción de encofrado casi a cero.

- o Reduce considerablemente el enorme volumen de trabajo manual necesario para producir encofrados complejos de hormigón porque los robots toman la mayoría de la carga de trabajo.

- o No hay prácticamente ningún límite en cuanto a la forma tridimensional de elementos prefabricados de hormigón con un grado hasta entonces inimaginable de precisión.

- o Después de utilizado el encofrado, los elementos de cera pueden ser reutilizados por refusión y moldear nuevas formas.

* Cast on Cast: Utiliza un sistema de parametrización en el que algoritmos matemáticos subdividen elementos tridimensionales en componentes más pequeños que se pueden apilar en torres. Además, el elemento anterior se utiliza para moldear la forma del elemento subsiguiente.

Este método de fabricación controlada por CNC se basa en el proceso consecutivo de elementos de fundición utilizando la tecnología de fabricación digital. Estas torres de los elementos son entonces transportados al sitio donde se separan y se ensamblan en la forma espacial deseada.

* Procedural Landscapes: Procesado robótico de arena para creación de moldes. Mediante un presurizado de





aridos se consiguen texturas deseadas que luego sirven de molde para un material con memoria de forma como la cera. Este luego se aplica como encofrante para el hormigón.

Fabricación aditiva

* Smart Dynamic Casting: Consiste en el deslizamiento de fundición con robótica inteligente, de una hormigón personalizado, reforzado con fibras. Para formado de elementos verticales.

* Contour Crafting: Como antes mencionada en las técnicas de fabricación aditiva, esta técnica patentada por Behrokh Khoshnevis, trabajando en colaboración con la Universidad del Sur de California, realiza una extrusión para crear la superficie perimetral del objeto y luego un relleno mediante la inyección de un hormigón hecho a medida, al centro del elemento constructivo. La conexión de la cabeza para el brazo robótico en el pórtico XYZ hace de este un resultado altamente personal-

izable en términos de geometría y de una manera muy rápida y eficiente de controlar la distribución del hormigón. Su método de fabricación, permite la realización de componentes continuos de la edificación, sin necesidad de seccionado por paneles.

* Freeform Construction: Iniciado por el grupo de Innovative Manufacturing and Construction Research Centre (IMCRC) de la Universidad de Loughborough y es financiado por el UK Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC). También forma parte de una serie de socios industriales como Foster + Partners y Buro Happold. Consiste en un método de impresión 3d, que utiliza un tamaño de deposición menor de 6 mm de alto por 9 mm de ancho y proporciona una capacidad de impresión de un cabezal de impresión dual donde proporciona la capa de acumulación, mientras que el otro cabezal es capaz de depositar una



capa de soporte que se puede quitar después de la finalización.

La introducción de la posibilidad de la doble impresión fomenta la capacidad de explorar una gama más amplia de las geometrías no euclidianas que podrían requerir apoyo preliminar mientras ocurre el curado y deposición del hormigón. En los últimos 4 años una máquina de fabricación aditiva se ha desarrollado y es capaz de producir grandes (2mx2mx2m) piezas de hormigón.

* Winsun 3d: Es una técnica de impresión 3d introducida por Yingchuang, una empresa de construcción China, que ha desarrollado construcciones a gran escala de edificaciones de viviendas con un método propio de impresión 3D en 24 horas. Su impresora es de 20 pies de alto, 33 pies de ancho y 132 pies de largo. Su sistema consiste en la impresión de componente, como mar-





Algunas características del sistema son:

- o La libertad proporcionada por la extrusión espacial posibilita que la estructura de malla resultante sea conforme a los requerimientos de comportamiento estructural, espacialmente adaptando su densidad.

- o Puede procesar diferentes tipos de materiales termoplásticos.

- o El cambio conceptual de deposición basada en capas a extrusión espacial tiene implicaciones importantes: en áreas donde el sistema de capas se mantiene genérico, el sistema de deposición espacial reduce tiempo, se vuelve más específico para el sector construcción y es más parecido a la forma habitual de construcción.

- o La extrusión directa in situ permite mayor complejidad geométrica, simplificando el proceso, reduce la cantidad de material necesaria y elimina al mínimo los desperdicios.

Este sistema permite que la estructura de malla sirva de encofrado de fuga, permitiendo el filtrado con las características específicas de dimensionado de la malla y viscosidad de la mezcla. En este proceso dos requerimientos separados el refuerzo y el encofrado son plegados en un proceso de fabricación robótica in situ.

2.3. TÉCNICAS DE ARMADO CONTEMPORANEO

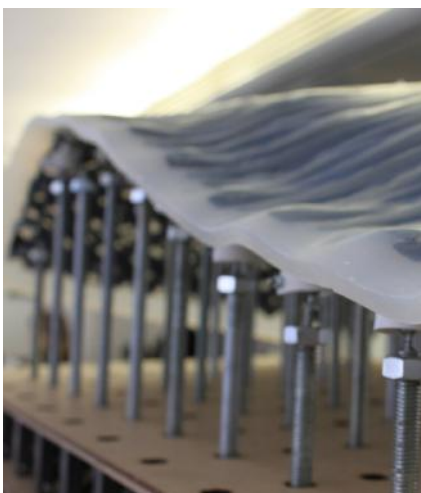
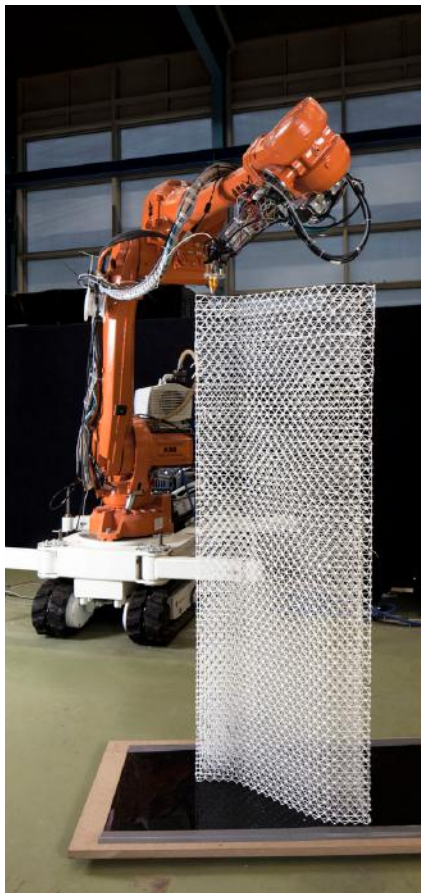
El armado tradicional de barras de acero encuentra en la actualidad el requerimiento de su doblado mecánico, pues las geometrías complejas ameritan de curvaturas específicas de sus elementos de armado. De igual manera con este tratamiento superficial de las envolventes y bajo el concepto de piel continua, el armado se direcciona a una homogeneidad, permitiendo la utilización de mallas de refuerzo.

Pero es necesario resaltar que la planificación de colocación del armado y la logística entorno a esto aún no suple las limitaciones de la técnica en sí. Frente a un desarrollo avanzado de la

co, la pared se imprimen por separado. Su mezcla se basa en cemento y residuos de la construcción para la construcción de las paredes por capa.

* Emerging Objects: Objetos Emergentes, que se encuentra en Oakland, Calif., Y el trabajo con la Universidad de Berkeley, ha iniciado una dirección alternativa a la aplicación de hormigón impreso en 3D. Dirigido por Ron Rael y Virginia San Fratello, Emergent Objects ha optado por utilizar la tecnología de impresión existente 3D, pero trabajar más intensamente con lo que han descrito como una materialidad digital. "Bloom" es la mayor instalación, de forma orgánica, construida con 840 bloques realizados a medida, vía impresión 3d con impresora convencional del material propuesto por Emergent objects, que es un cemento de polímero.

* Mesh mold: Extrusión espacial de material plástico, en la realización de mallas encofrantes perdidas que sirven de armado del panel, para una clase de hormigón denso. Un robot industrial extruye filamentos en el espacio, y produce unas estructuras de malla 3d controladas digitalmente. En el caso realizado se presenta un panel de 1.80 m de altura por 1m de ancho con un hormigón reforzado con fibras de vidrio y un armado plástico (PLA plastic, ABS plastic,).



conformación singular del hormigón, se requiere lo mismo para con los armados.

Deben dejar atrás el preformado de la mallas, para direccionarnos al desarrollo de mallas generadas con impresión espacial. Pero antes de esto presentamos a nivel industrial y experimental, las alternativas de armado y los posibles focos de avance.

2.3.2 Industriales

- Fibras de acero: Como las fibras se distribuyen de manera aleatoria en la mezcla, el refuerzo de fibras de acero no puede sustituir el armado de acero convencional. Pero puede ser utilizado como complemento del armado convencional para grandes deformaciones o sólo para pequeñas deformaciones. Las fibras sólo tienen un efecto evitando el agrietado, abarcando la posible grieta y anclándose a ambos lados a lo largo de necesidad de su longitud. También incrementan la ductilidad del hormigón.

- Fibras Sintéticas: De igual manera mejoran el comportamiento del hormigón frente a las grietas y aportan mayor resistencia al impacto, e incrementan la ductilidad del componente estructural solidificado. Existe una gran variedad de fibras sintéticas y son objeto de constante mejora. Se utilizan principalmente en sistemas normales con alto índice de trabajabilidad y en morteros de hormigón proyectado, solado y enyesado.

Cada tipología de fibra sintética es un campo de desarrollo y su utilización dependerá de las propiedades de su material específico, algunos casos presentan características como:

- o Fibras de Polipropileno: Son usadas para mejorar la resistencia al fuego, especialmente en hormigones de alta resistencia

- o Fibras de Poliamida y polinitrilo: Mejoran las propiedades del hormigón respecto a la resistencia de tracción y módulo elástico.

- o Fibras de Poliacrilonitril: Poseen propiedades técnicas importantes, logrando mayor resistencia a la tracción que el armado de acero convencional.

- o Fibras de carbono: Son altamente resistentes a la corrosión, su resistencia a la tracción y su módulo elástico exceden por mucho, las del armado convencional. (PECK, 2014)

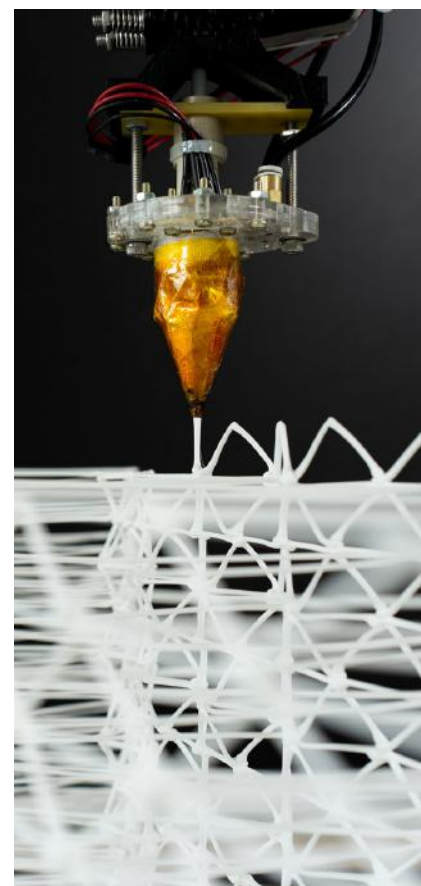
- Fibras de vidrio: Están hechas de vidrio fundido finamente hilado. Son resistentes a la alcalinidad y raramente aplicadas por si solas para fines estructurales porque la acción del agregado las dañaría. Podemos apreciarlas como refuerzo del mortero proyectado de hormigón de alta resistencia y también como refuerzo de las losas de fibrocemento.

Estas fibras se pueden hilar en espigas o mechas que pueden utilizarse para hacer diversas formas de tejidos tridimensionales, con vertido a continuación de mortero de cemento o pasta, para formar un componente estructural.

- Armado de Tejidos de Fibras: Dentro de los textiles se engloban actualmente muchas de las fibras que han estado presentes como alternativa en la construcción, fibras de vidrio, de polímeros, de carbono, etc. Pero ahora se adoptan en un compuesto tejido que elimina el problema de su esparcimiento aleatorio en la mezcla, que ha sido una de las debilidades para su prestación estructural. Esta orientación en direcciones específicas con posicionado y distribución controlada, permite la rigidez necesaria para incorporarlas al mortero de hormigón. (PECK, 2014)

Los tejidos de fibra de carbono, aramida o vidrio son textiles trenzados sin matriz de resina. Se puede considerar la disposición de sus fibras unidireccional porque un porcentaje mínimo se dispone en dirección contraria para el cosido.

Los tejidos tienen normalmente un espesor de entre 0,1 y 0,5 mm. Se pre-





sentan con anchos de entre 200 y 600 mm, en rollos de entre 40 y 100 m, que posteriormente se cortan en obra en las dimensiones deseadas. El tejido se extiende sobre la superficie de hormigón y se adhiere con resinas epoxi fluidas. Esta fluidez permite a la resina penetrar entre las fibras del tejido, impregnarlas y formar el material compuesto. Esta forma de efectuar el refuerzo requiere de manipulación en obra y por lo tanto, una mayor complejidad en la aplicación. (GIL, 2014)

Los procedimientos de conformado contemporáneos, direccionados a los encofrados y moldes flexibles, requieren un tipo de refuerzo que pueden deformarse junto con el hormigón. De manera que los textiles presentan una oportunidad para este desafío. El hormigón armado con textiles consiste en haces de fibras (hilos) que están estructurados en una malla y tienen una baja rigidez de flexión, para luego ser incorporadas a un mortero de hormigón denso. (KOK, 2013)

- **Compuesto de polímeros reforzados con fibras:** Los refuerzos con compuestos polímeros reforzados por fibras (Fiber Reinforced Polymers) son una tecnología basada en la fabricación y puesta en obra de materiales compuestos en el sector de la construcción. Es en el ámbito del refuerzo de estructuras de hormigón donde más rápidamente

y con mayor éxito se está aplicando la tecnología del FRP. Sobre todo por las propiedades ventajosas que presentan, entre otras, la resistencia a la corrosión y la relación resistencia/peso que se traduce en un ahorro en el transporte y la puesta en obra para la misma capacidad portante. (GIL, 2014)

o **Refuerzo con Laminados preconformados:** En esta tecnología el material compuesto se presenta habitualmente en forma de laminados con fibras dispuestas unidireccionalmente embebidas en una matriz de resina. Normalmente tienen un espesor de entre 1 y 2 mm, y una anchura entre 50 y 150 mm. Se presentan en rollos de longitud entre 100 y 500 m lineales que después se pueden cortar en obra a medida. (GIL, 2014)

- **Pretensado:** Consiste en el tesado o puesta en tracción de armaduras activas previo al endurecimiento del hormigón. Es propio de la prefabricación, con un vasto catálogo de aplicaciones (vigas, losas, componentes) en la construcción orientada a componentes.

- **Postesado:** Consiste en el tesado de armaduras activas posterior al endurecimiento del hormigón. La dificultad para adaptar el módulo dimensional prefabricado a la geometría particular de los diferentes proyectos, deja el campo libre a la incorporación de esta técnica. (JURADO, 2007) Cuando las

superficies son subdivididas en paneles, o en tramados estructurales por piezas prefabricadas, es muy propicio recurrir al postesado, como método de arriostramiento estructural.

- **Manta flexible de hormigón:** Una nueva alternativa de revestimiento de Hormigón Armado. Tejido flexible impregnado de hormigón cerámico armado en fibra que, al agregar agua se tiene un hormigón H40. Un producto con estas características es Polytrade. Esta es una vía de desarrollo posible de una aplicación de hormigón para superficies pero que también puede cambiando las características resistentes del hormigón tener aplicaciones más relevantes en términos estructurales.

2.3.3 Experimentales

- * **Barras de resinas reforzadas con fibras de vidrio y carbono:** Esta es una de las opciones experimentales en desarrollo, que proyecta una solución aplicable a diferentes tipos de barras de polímeros previamente confeccionadas para casos de armado de superficies y componente.

- * **MX3d Metal:** Consiste en la impresión espacial mediante soldado de barras de acero. Esta técnica se presencia en instalaciones esculturales experimentales y se observa como una alternativa potencial de su utilización en la construcción, pues permitiría la real-

ización de formas espaciales complejas, gracias a la impresión no limitada en el espacio y a la continuidad de su construcción. Se proyecta como complemento del desarrollo de impresión continua de superficies en hormigón que actualmente se realiza.

* Mesh mold: Esta extrusión espacial de material plástico, ante descrita, plantea una alternativa a la utilización aleatoria de fibras y posee potencial de sustitución de armado convencional mediante la confección de la mezcla que constituye la malla encofrante. Ya que se parte de la extrusión robótica de filamentos en el espacio, en la producción de las estructuras de malla 3d, estas pueden tener un control digital preciso de su disposición para los fines de un armado planificado de paneles. En términos del futuro de armado, esta tecnología presenta un foco interesante de desarrollo, en la mejoría del material de extrusión. Valiéndose de análisis de sus prestaciones estructurales y explorando opciones de optimizado. Actualmente esta tecnología forma parte del desarrollo de un de un nuevo panel que consta de la estructura impresa en 3d y luego un vertido de hormigón y colocación de aislantes y revestimiento interior.

2.3. PUESTA EN OBRA

Amasado, vertido, vibrado, fraguado y curado son las fases para crear y madurar el hormigón. Estas requieren de una constante implicación de la mano de obra, para su respectiva puesta in situ.

No obstante el manejo y colocación de encofrados y moldes, requiere de mecanismos de seguridad en su momento de colocación, pues estos están sometidos a presiones del hormigón en su vertido.

El desarrollo de arquitectura paramétrica con hormigón armado, en el momento de su puesta en obra requiere usualmente de mayor vibrado, de bombeado del hormigón por los densos armados y de una meticulosa planificación y modelado de los encofrados y el armado.

3. CAPÍTULO III: ESTUDIO DE CASOS

PROCESO CONCEPTUAL Y DE DISEÑO |
PARÁMETROS | PROCESO DE ITERACIÓN |
SOLUCION CONSTRUCTIVA | TRADUCCION |
PUESTA EN OBRA

3.1. ESTACION DE AUTOBUSES DE
CASAR DE CÁCERES

3.2. BANCO LUNGO MARE + ESCOFET

3.3. O-14

3.4. SAGRADA FAMILIA

3.5. COMPARATIVA



ESTACIÓN DE AUTOBUSES DE CASAR DE CÁCERES

FICHA TÉCNICA

Nombre del proyecto: Estación subcomarcal
de autobuses de Casar de Cáceres

Cliente: Consejería de Urbanismo, Vivienda
y Transporte

Arquitecto: Justo García Rubio

Estructura:
Jaime Cervera Bravo, Dr. Arquitecto

Constructora:
Grupo Empresarial Magenta SA.

Jefe de obra: Jesús Carrero Sánchez, Arq.
técnico.

Topógrafo: Juan Morollón.

Función: Conjunto de anden, vestíbulo y
servicios de estación de autobuses

Localización: Casar de Cáceres, Cáceres,
España

Año de construcción: 2003

Superficie: 1190 m²

Relevancia de Hardware: Técnica construc-
tiva antecedente bóveda de sillería, basada
en encofrado de madera no industrializado y
armado de mallas de acero.

Parámetros relevantes: Geometría de hiper-
boloides regladas.

DESCRIPCIÓN / PARÁMETROS

Esta obra de arquitectura, basada en la concepción de la forma por el manejo de parámetros geométricos, ultima en un “bucle” de hormigón, como umbral doble de recepción de pasajeros.

Su origen conceptual no se es implícitamente basado en la arquitectura paramétrica contemporánea, pero resulta relacionable su concepción de la forma y los parámetros geométricos tomados en cuenta, para su realización, con el antes resaltado pensamiento paramétrico. Además el análisis de la construcción de estas formas, en un tiempo y contexto cercano, pero con base en unas técnicas constructivas del pasado (basada en la bóveda de sillería), resulta un punto propicio para el sentido del cuerpo investigativo, y de la exploración de las técnicas constructivas desde un pensamiento paramétrico en cierto sentido primitivo.

“La maravilla de la arquitectura se da cuando es la forma lo que soporta un edificio y no el material. En la estación de Casar, es la forma de la lámina plegada de hormigón lo que la sustenta, no el hormigón”.

Justo García Rubio

La realización de esta cinta esbelta plegada de hormigón, en términos constructivos, sus desafíos y proceso, son una oportunidad de visualización de los antecedentes técnicos y los problemas y soluciones de estas técnicas.

“Nosotros no tenemos encofrados capaces de asumir cualquier forma. Nuestra geometría es la de los años cincuenta, y los encofrados, los de tablitas” Justo García Rubio

El proceso constructivo consiste en la construcción previa de un artilugio de madera (el encofrado), luego se apoya milimétricamente en puntales, para evitar que la presión del hormigón en el momento de vertido, genere un desplome de la construcción.

La cinta se pliega cobijando los andenes, con una luz de 34 m y vuelve a doblarse de manera oblicua, para una luz de 20 m que cubre el vestíbulo.



- I.1 Fotografía Paramétrica
- I.2 Influencia de otras industrias
- I.3 Graficos de Razones
- I.4 Matriz de Paramétrica



PROCESO DE ITERACIÓN

El diseño parte del concepto de lámina auto resistente de hormigón armado, con base en la resolución geométrica habitual de las cáscaras y membranas de hormigón antecedentes y la construcción de bóvedas de sillería.

De manera que en sus parámetros iniciales se presenta la geometría como medio de resolución y exploración de la forma y las limitaciones constructivas. El proceso de diseño se ve dominado por la definición de las superficies, mediante figuras geométricas de revolución. Lo que en la documentación gráfica evidencia, el hallazgo de formas geométricas y encuentros, producto de la exploración de la forma direccionada a la solución reglada, para fines constructivos.

El proceso de iteración muestra lo siguiente:

Se observa como punto de partida, la intención de resolución de las formas principales (hiperboloide grande y pequeño) mediante la construcción de hiperboloides con superficie reglada de su sistema de generatrices y directrices.

Luego aparecen como consecuencia de la resolución de la transición entre ambos y de sus encuentros con los apoyos, superficies aproximadas por medios de conos.

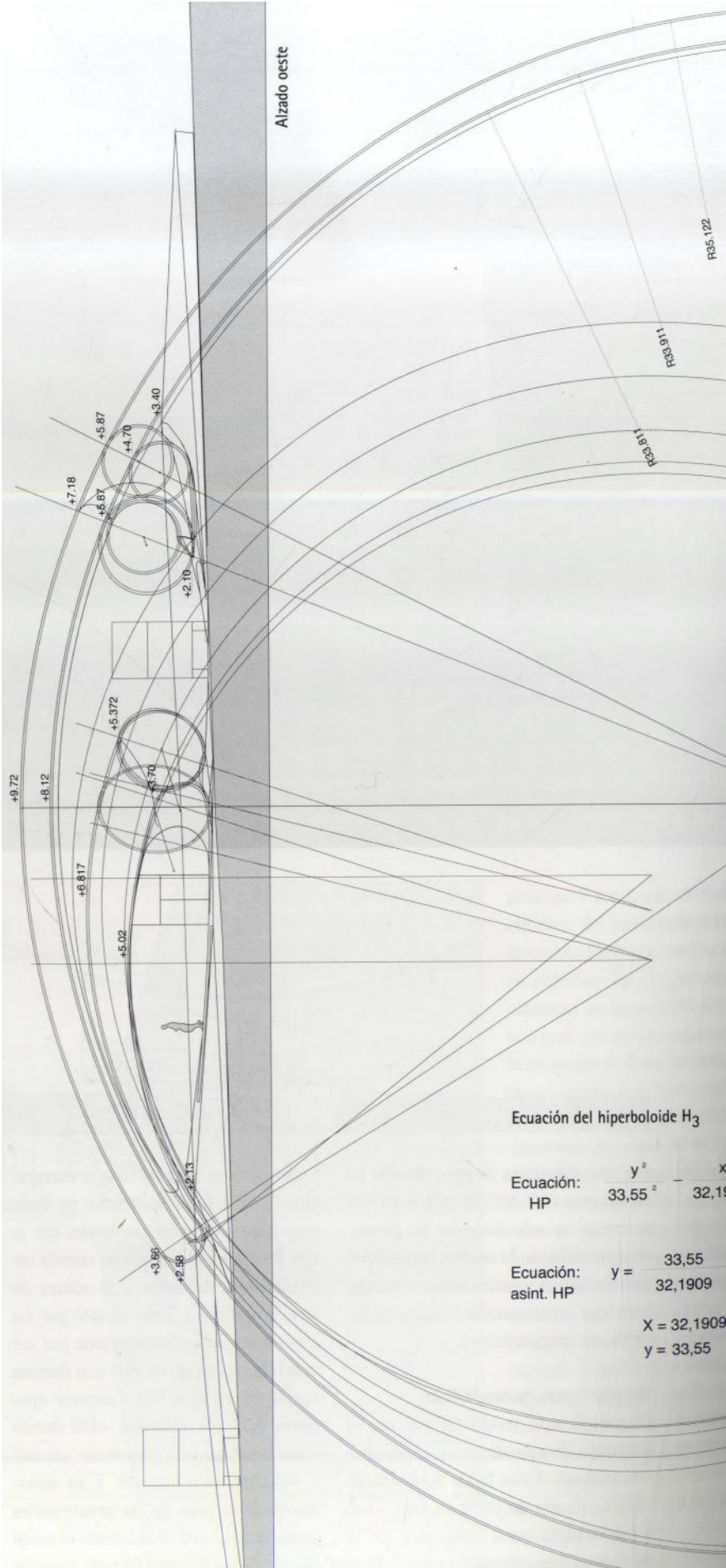
Esto se evidencia en la generación de desvíos de la circunferencia, en tramos

de encuentro del hiperboloide con el cono (desvió de 1,2 cm por encuentro del hiperboloide mayor con la superficie de cono).

El resultado final de la cinta está compuesto por 8 superficies distintas, que se reduce a 8 encofrados distintos, a lo que hay que sumar las trompas cónicas (dos por apoyo).

- *El apoyo A se configura mediante dos hiperboloides, uno exterior (h1) y otro interior (h2)*
- *El apoyo C, se configura por h6 y h5 respectivamente*
- *El vano mayor se resuelve con el hiperboloide h3, y el vano menor, girado, con el h4.*
- *El apoyo B lo configuran dos superficies, exterior e interior (C1 y C2), que se aproximan a la de un hiperboloide, pero en realidad son resultado de empalmar varios troncos de cono, debido a la imposibilidad de encontrar una hipérbola que sirviese de transición del hiperboloide grande h3 al pequeño h4.* (JURADO, Proyectos: Estación de Autobuses de Casar de Cáceres, Justo García Rubio, 2004)

De los distintos hiperboloides que componen la superficie de la cinta, solo dos, el h3 y el h4 tienen función estructural, ya que los de los apoyos no trabajan y esconden una serie de costillas en su interior.



Ecuación del hiperboloide H_3

Ecuación: $\frac{y^2}{33,55^2} - \frac{x^2}{32,1909^2}$
 HP

Ecuación: $y = \pm \frac{33,55}{32,1909} x$
 asint. HP

$X = 32,1909$
 $y = 33,55$

SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA

Por las características del hormigón y las técnicas al alcance, se opta por la conformación del mismo en encofrado hecho a media con técnica tradicional y definición geométrica del replanteo manual. Se recurre del hiperboloide reglado de revolución, pues sus generatrices son líneas rectas y sus directrices circunferencias, lo que facilitaba el replanteo y la construcción de la superficie.

Dicho encofrado se realiza con una estructura, encostillado base de vigas de madera colocadas en dos direcciones, sobre puntales de acero, con superficie encofrante de tablas de madera.

Este procedimiento se aplica para los 8 encofrados distintos, de los distintos hiperboloides, a lo que hay que sumar las trompas cónicas (dos por apoyo), que requirieron de variación en el encofrado.

La aproximación a la solución de la superficie desde el reglado para fines de encofrado, permite una aproximación por escalas y capas sucesivas, ajustadas a las dos familias de generatrices de rectas que se cruzan: una primera de viguetas de 20 x 10 cm y cruzada la segunda de tablas de 15 x 15 cm, para luego volver sobre la primera y confor-

mar la superficie con tablillas de 10 x 2,5 cm. (JURADO, Proyectos: Estación de Autobuses de Casar de Cáceres, Justo García Rubio, 2004)

Esta obra, como es observable, presenta un replanteo complejo. De manera que el replanteo, en el hardware de esta obra, cobra una gran importancia, pues la resolución geométrica previa, solo puede ser edificada con la disposición precisa de los puntos de referencia y proyección de generatrices, en el espacio de obra.

Luego notamos, se dispone un armado general de doble malla de 15 mm de diámetro cada 15/20 cm proyectado con zonas de refuerzo según las directrices diagonales del hiperboloide y se refuerza en la zona de entrega de los apoyos y el eje próximo, y en los bordes del tramo central.

También vemos que las limitaciones constructivas y estructurales redefinen los apoyos, e incluyen el postesado de los mismos.

PUESTA EN OBRA

La puesta en obra parte de un replanteo arduo y meticuloso de los puntos de referencias de asíntotas, directrices y generatrices de las formas.

Se modifica el terreno para el encuentro con los puntos de apoyo y se procede al montaje del encofrado sobre los nombrados puntales, que así u vez se divide en tres fases:



- 1ra. Fase, estructura primaria: formada por una primera familia de generatrices. Se dispone la primera viga (20 x 10 cm) de encofrado en la dirección de la asíntota de la hipérbola, tomando una línea base que pasa por el cruce de los ejes de la misma, y por los puntos fijos en los bordes (arcos 1 y 2). Esta línea base es horizontal, y a partir de ella se trazan el resto de líneas de la estructura primaria. Para su colocación es preciso fijar los puntos por los que pasa cada viga, en los arcos de borde (que son circunferencias de distinto radio) para lo que ambas se dividen en 88 partes, que dan lugar a la separación de 2,4-2,5 m, según cada arco. Finalmente contamos con 21 líneas o vigas, sobre la superficie a encofrar.
- 2da. Fase, estructura secundaria: Formada por familias de generatrices paralela a la segunda asíntota de la hipérbola. El replanteo es idéntico al anterior, Las 84 viguetas de 15x5 cm se colocan en una separación de 60 cm, resultado de dividir las circunferencias o arcos de los bordes en 354 partes.
- 3ra. Fase, superficie encofrante: El entablado de 10 x 2,5 cm se coloca en la misma dirección que la estructura primaria, separadas 1,6-1,7 m, obteniendo 30 sectores,

resultado de dividir los arcos 1 y 2 en 130 partes iguales. Cada sector se rellena con 11 tablas colocadas en paralelo, pero ligeramente albeadas para adaptarse a la curvatura. La última de ellas tiene forma de cuña para asumir el desfase provocado por el propio espesor de la tabla. (JURADO, Proyectos: Estación de Autobuses de Casar de Cáceres, Justo García Rubio, 2004)

Después del montaje del encofrado se procede al armado con mallas antes mencionado y sus refuerzo en los extremos hacia los apoyos.

Se realiza el hormigonado, logrando un espesor de 12 cm de la lámina, para el cumplimiento del recubrimiento mínimo del armado.

Posterior al vertido de hormigón para la construcción de la lámina de cubierta, se postearon los apoyos, provocando una contraflecha que como estaba previsto se ajustaría al perfil óptimo, 3 cm más arriba. Facilitando el desencofrado.

BANCO LUNGO MARE | BENEDETTA TAGLIABUE Y ENRICH MIRALLÉS + ESCOFET
FICHA TÉCNICA

- Nombre del proyecto:** Banco Lungo Mare
- +Escofet y el desarrollo de mobiliario con formas complejas
- Arquitecto:** Benedetta Tagliabue y Enric Miralles EMBT
- Fabricante:** Escofet, Barcelona
- Jefe de Proyecto:** Makoto Fukuda
- Función:** Mobiliario urbano
- Relevancia de Hardware:** proceso de fabricación, fabricación del molde y armado
- Año de construcción:** 2000



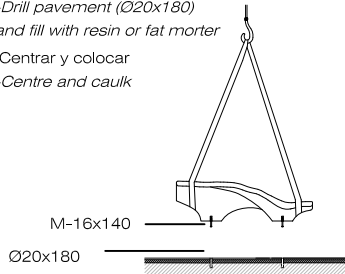
DESCRIPCIÓN / PARÁMETROS

Partimos en esta sección de analizar el proceso de construcción del banco Lungo Mare y una breve vista de otras aplicaciones realizadas por Escofet y que involucran similares complejidades como es el caso del banco Slope y de piezas prefabricadas de la Sagrada Familia realizadas por el mismo fabricante.

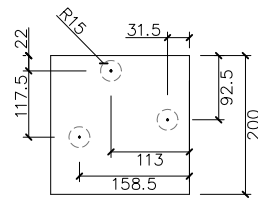
El diseño y construcción de este banco no parte de una lógica paramétrica de su realización. Sin embargo sirve de referencia en base a los procesos de fabricación y prototipado necesarios para obtener producto terminado óptimo, de componentes de hormigón prefabricado. Resulta de interés la visualización de la fabricación a una escala menor en comparación con la edificación de formas con tales complejidades. Para extrapolar este aprendizaje a la posible confección de componentes de obra.

El Banco Lungo Mare parte la idea conceptual de los arquitectos de emular una alfombra voladora. Por su condición de mobiliario urbano podía aparecer en diferentes entornos urbano.

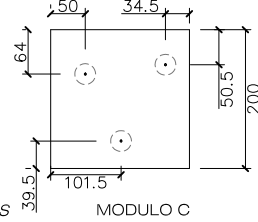
- Roscar los 3 tornillos a fondo M-16x140
- Tightly screw the 3 stud bolts M-16x140
- Taladrar el pavimento (Ø20x180) y llenar con resina o mortero rico
- Drill pavement (Ø20x180) and fill with resin or fat mortar
- Centrar y colocar
- Centre and caulk



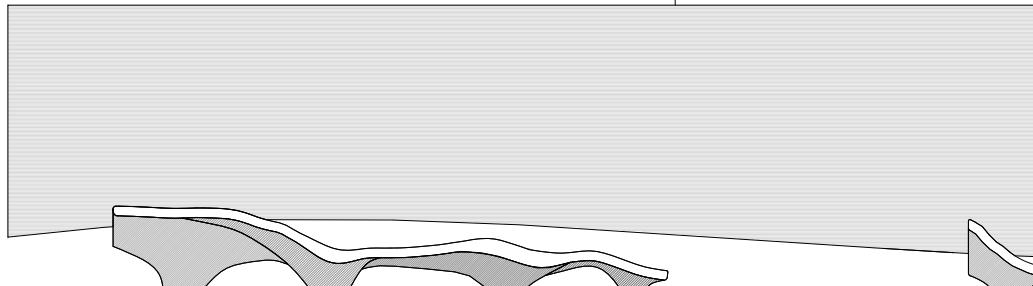
MODULOS B y C ANCLADOS
ANCHORED B and C MODULES

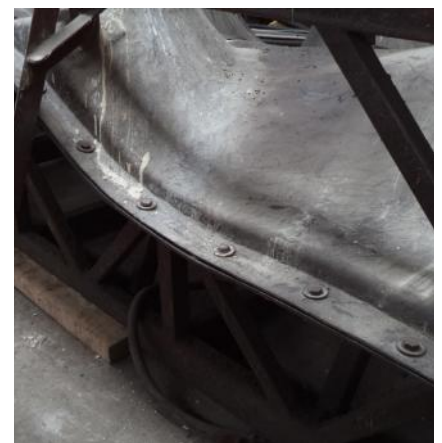
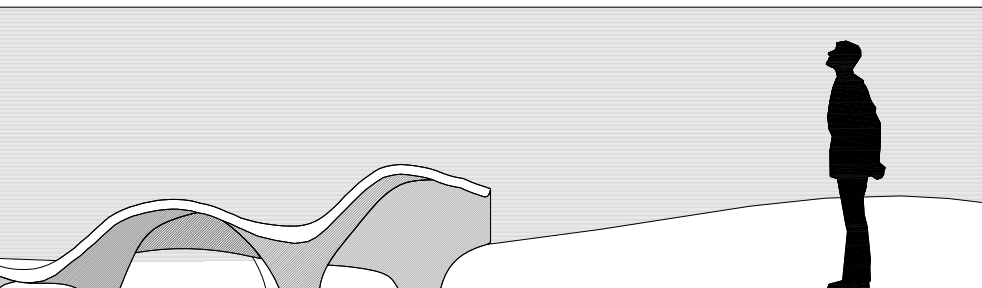
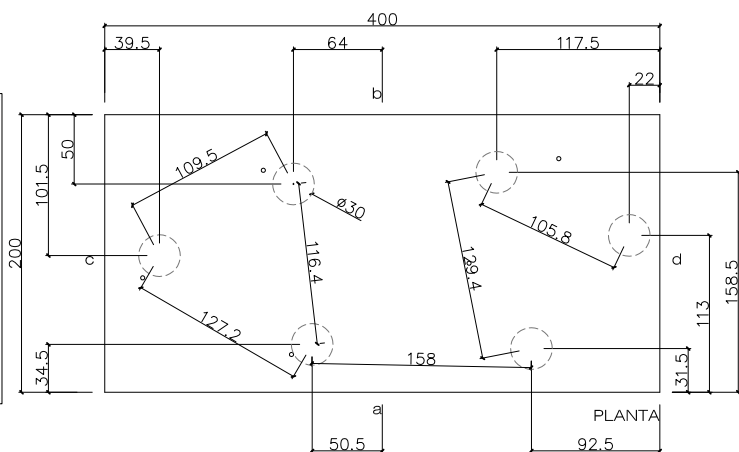


MODULO B



MODULO C





www.escofet.com
escofet
j.01

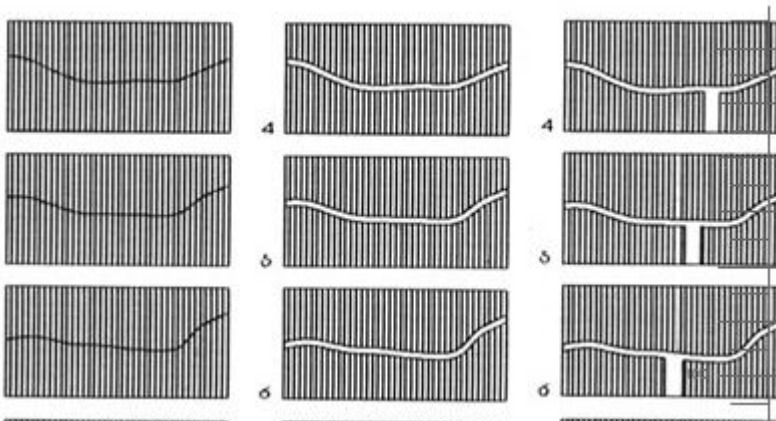
PROCESO DE ITERACIÓN

Se necesitaron más de dos años para finalizar el diseño de la obra y fue empleado en un taller de prototipos; en un diálogo estimulante entre la industria y los arquitectos, este podría ser considerado el proceso de iteración en el diseño. En una etapa previa a la fabricación se planificó el proceso en base a una resolución de las posibilidades de materializarla.

FABRICACIÓN

El proceso parte de una idea inicial, que fue explorada desde su geometría tridimensional de manera análoga, mediante sketch y luego una serie de secciones y planos 2d de diseño.

A partir de esto, se procede a la representación en 2d del sólido volumétrico mediante secciones planas o costillas equidistantes. Con estas se procede a la fabricación de prototipo y el posterior modelo a escala real que servirá de soporte a los siguientes procesos.



En esta fase se sigue hacia la construcción del prototipo de escayola, que posteriormente fue escaneado digitalmente en busca de la información tridimensional necesaria para crear el modelo.

El modelo a escala real se construyó como patrón para la creación del molde y para la soldadura del armado. Este se generó mediante el corte de madera de los perfiles o costillas planas y equidistantes, formando un esqueleto aproximado al elemento final, que debía ser pulido o rellenado hasta conseguir el resultado esperado. Luego se prosigue a la confección del molde.

Los moldes de poliéster reforzados por fibra de vidrio se confeccionan aplicando sucesivamente capas de poliéster y fibra sobre la superficie física del modelo antes realizado, hasta crear un caparazón que resulta ser el negativo de la pieza. El poliéster es un material polimérico que se utiliza en este caso en forma bi-componente (resina y endurecedor) que al mezclarlo endurecen (proceso de reticulación) dándonos un tiempo de trabajabilidad de margen para su aplicación. La fibra se aplica en forma de láminas.

Este proceso se realiza para las dos mitades y a cada una se le preparan las esperas en el perímetro de junta de preñse.

Como la resistencia de este composite es limitada, necesita reforzarse mediante bastidores metálicos, tomando en cuenta que debe resistir la presión del hormigón (densidad del hormigón cercana a 2500Kg/m³).

El bastidor metálico de soporte, sirve de base de transporte y como lugar de alojamiento de los vibradores neumáticos para la compactación del hormigón, que son requeridos en el proceso de vertido.

Por su parte el siguiente proceso de armado consiste en barras de acero inoxidable que son conformadas sobre el modelo a escala real y soldadas para conseguir la curvatura de la forma.

Luego es colocada en el recipiente ya generado del molde para proceder al vertido de hormigón, que consiste en una mezcla de hormigón con de aditivos superplastificante, áridos finos y nano sílices.

De manera que se procede al llenado, secuencialmente se realiza el vibrado con vibradores neumáticos, como el molde tiene previsión de huecos para estos procesos. Se continúa con el proceso de curado y una vez listo, se



extrae el molde.

Por último se hace proceso de decapado suave en la superficie para una terminación óptima final.

O-14 | REISER+UMEMOTO
FICHA TÉCNICA

Nombre del proyecto: O-14

Cliente: Creekside Development Corporation

Arquitecto: Reiser + Umemoto, RUR
Arquitectura, PC

Estructura: Ysrael A. Seinuk, PC

Constructora: Dubai Contracting Company LLC

Ingenieros MEP: ERGA Progress

Armado: Barras de acero.

Función: Edificio de Oficinas

Localización: Dubai, UAE.

Año de construcción: m

Superficie: 27,900 m²

Altura: 22 niveles con 106 m del altura

Relevancia de Hardware: Moldes, hormigón y armado empleado para construcción.

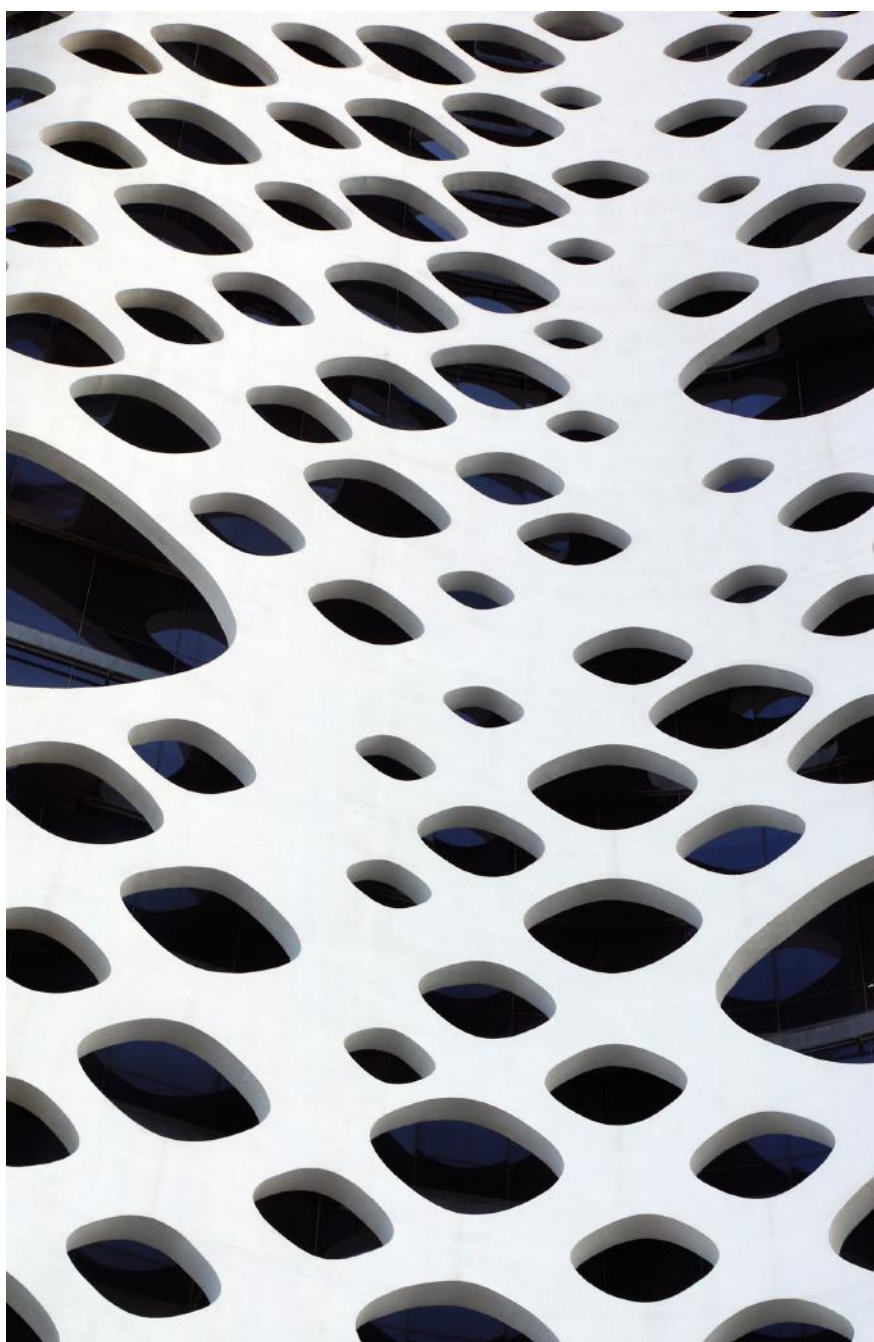
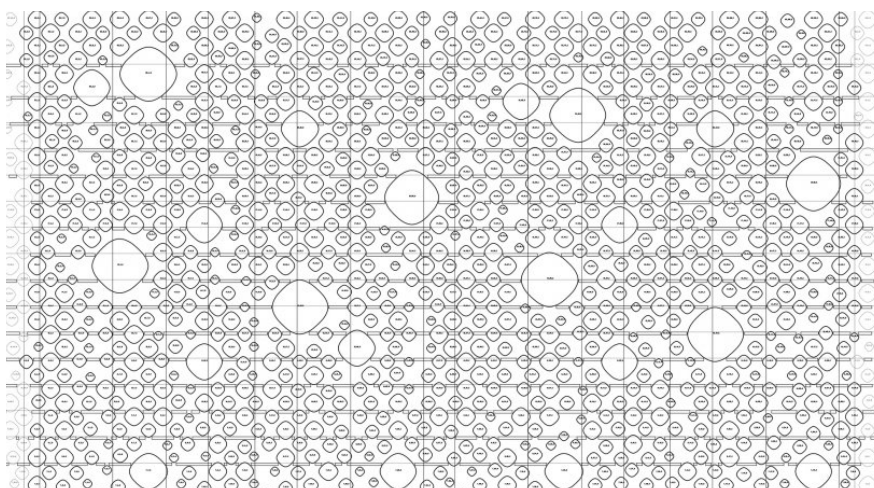
Parámetros relevantes: Optimización de huecos en la fachada.

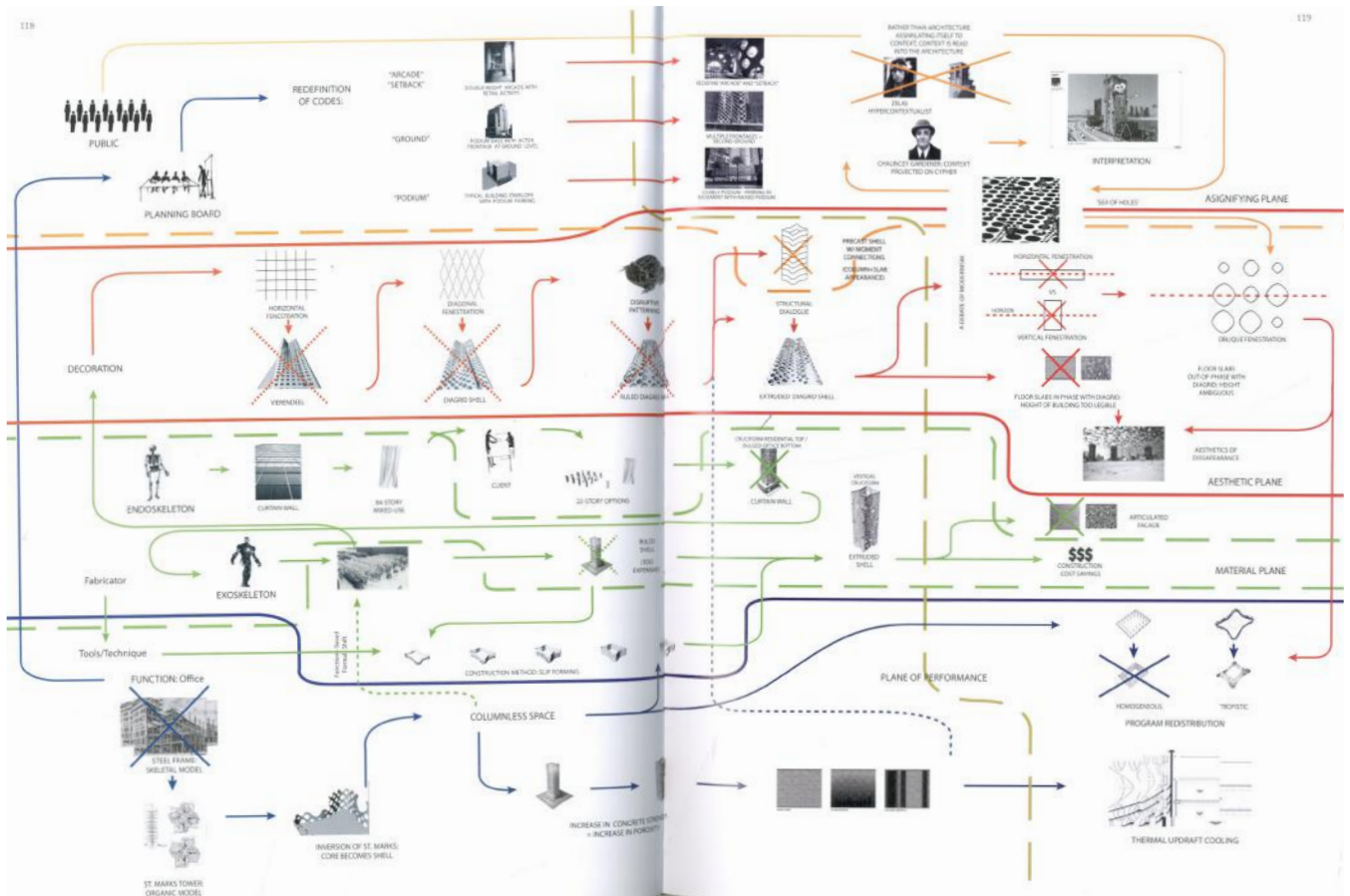
El O-14 es un edificio de 22 niveles de para uso de oficinas con una estructura basada en una piel multifuncional, con prestaciones estructurales, de apertura y cerramiento. Este denominado exoesqueleto libera la superficie interior de elementos estructurales, portando todas las cargas del edificio a excepción del núcleo de acceso.

Su fachada-piel de 40 cm de espesor, poblada de 1326 huecos dispuesto según parametrización de la superficie en base a la solución más óptima en términos estructurales, estéticos y entrada de luz, es el desafío constructivo mas significativo en términos de conformado del hormigón y armado.

DESCRIPCIÓN/ PARÁMETROS

Para los fines de esta investigación, este edificio, tiene de relevante su proceso de iteración que parte de unos





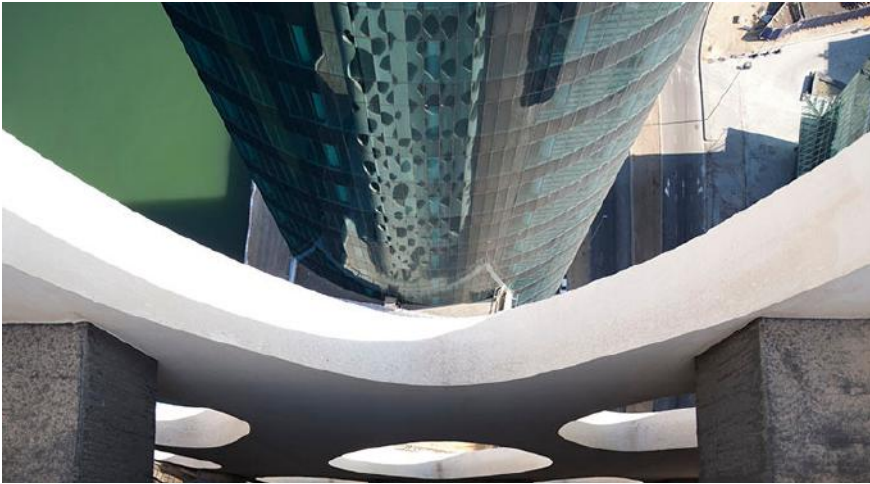
parámetros establecidos en su inicio, los cuales delinearon los procesos conclusivos de la solución integral final. A pesar de adoptar un proceso en cierta medida paramétrico, que de hecho fue funcional para agilizar y fundamentar la fabricación de los huecos y de las soluciones constructivas, se recurre al cierre y conclusión del conjunto en función de la primacía e imponencia de lo estético. Esto denota que el método de diseño paramétrico solo puede plantear indicaciones y propuestas posibles en función de los parámetros considerados, mas no te restringe ante una solución, plantea posibilidades con razones. De manera que una vez más el proceso paramétricos de diseño en este proyecto, es una forma de diseño en la que se pueden contrarrestar diferentes factores de interés, pero denota que la decisión formal y constructiva depende el arquitecto. En términos constructivos y de puesta

en obra, se generó en el proceso la necesidad de proyectar manualmente las dimensiones de piezas de poliestireno expandido para forma de los huecos. Hay un factor organización que siempre está presente en el proceso paramétrico puesto que al considerar parámetros desde el inicio los resultados finales que son los que permiten la toma de decisiones, no son a antojo o manipulables, surgen emergen de la experimentación y del simple hecho de considerar estos parámetros en principio. Estructura, protección solar, material, incidencia de vientos, Visuales = estética

PROCESO DE ITERACIÓN

El sistema de aberturas del edificio resulta de la aplicación de cinco escalas diferentes de agujeros a la superficie cambiante del armazón. La muy específica geometría convexa en las esqui-

nas y con áreas cóncavas y planas, así como las áreas transicionales entre lo plano, lo convexo y lo cóncavo. El armazón se desarrolló vía un proceso iterativo intensivo con un sistema suficientemente flexible para manejar los cambios en muchos niveles. Si se introducía una apertura mayor, las aperturas ubicadas inmediatamente debajo tenían que volverse más sólidas. Las variaciones en las fachadas fueron resultado de un intercambio activo con los ingenieros estructurales. Sobre el curso del diseño de fachada, las rutas de cargas fueron elaboradas relativas a la retícula diagonal. Se generó un eje central en la retícula diagonal y las aberturas podrían derivarse en torno a las líneas de la cuadrícula para una distancia máxima, permitiendo líneas de flujo para desplazarse en el campo de los agujeros de una manera fluida. Las reglas locales de derivación de aberturas, permitieron la composición de flujos generales en la



fachada que eran móviles y no fijos en los ejes centrales.

Primero se trató la colocación con proyección, luego trataron de localizarlos en el espacio y nivelarlos usando traslaciones. Pero al final como esperado, se trabajó contra la geometría de una elevación proyectada para alinear las formas vacías.

“Pudimos haber separado y tratado de equilibrar todas las demandas de eficiencia estructural, eficiencia de protección solar y la eficacia de material dentro de las rutinas paramétricas. Ciertamente esto era técnicamente posible y de hecho el scripting fue usado ampliamente para el O-14, para actualizar automáticamente los planos y para automatizar las rutinas del corte de poliestireno expandido, por ejemplo.” (REISER, KIPNIS, KWINTER, LAVIN, & STEELE, 2012)

Esa vía de desarrollo-intento y abandono- parece resumir las ambiciones de aquellos involucrados con paramétricas asociativas en el proyecto.

En tal régimen el trabajo encuentra su justificación en el puro rendimiento y en el manejo sistemático de variables que compiten (protección solar, estructura, vistas, etc). Por decir lo menos, los resultados de estas operaciones fueron estéticamente débiles. De manera que el uso de rutinas paramétricas para modular gradientes en la fachada fue tan incómodo y desigual, que para reducir las reglas nulas, se formó un nue-

vo script alrededor de cada pequeña zona de la fachada.

Esto evidencia dicho sistema como tonto, pues al final la guía de uso de procesos aleatorios solo puede ser lograda a través de la atención activa de los efectos pictóricos. (REISER, KIPNIS, KWINTER, LAVIN, & STEELE, 2012) Afortunadamente la decisión de usar el armazón de retícula diagonal perforada en un 40% de aperturas (independientemente de que los gradientes resultaran por rendimiento o estética) hizo que funcionara lo suficientemente bien; fue lo suficientemente flexible para suplir las necesidades prácticas, permitiendo un mayor grado de libertad en la expresión del patrón. Los sistemas de mallas tienen una redundancia constructiva, de manera que las fuerzas encuentran distintas maneras de distribirse y por ende es garantizada la función de la retícula diagonal. (REISER, KIPNIS, KWINTER, LAVIN, & STEELE, 2012)

En este caso se prioriza el resultado estético ante el resultado óptimo dado por los métodos paramétricos.

SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA

El conformado de la piel curva se realizó mediante la utilización de encofrado industrial modular para muro multicurvo, trepante. Este encofrado posee una estructura de vigas alveolares metálicas y una superficie encofrante

metálica.

Para la construcción de la matriz de armadura estructural, se eligió trabajar con el armado diagonal de barras de acero. Conformando una matriz de refuerzo diagonal acorde a los decidido en el proceso de iteración.

Se cortan con una máquina de control numérico (CNC) los volúmenes de los huecos, para ser colocados en la matriz de refuerzo de la piel inmediatamente antes de la elevación de los encofrados modulares.

Una vez posicionados los encofrados, se procede al vertido con bombeo de la mezcla superfluida autocompactante de hormigón con fibras.

Después del fraguado se desliza el encofrado y se retiran los molde de poliestireno, y este proceso continua de manera ascendente hasta alcanzar la altura total.

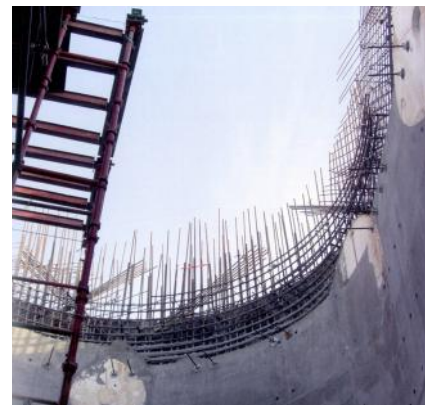
Lo interesante de la construcción de esta piel curva es que conjuga varios factores funcionales en sí misma y se integra a la tendencia de pieles multifuncionales y complejas de nuestros días.

PUESTA EN OBRA

Los subcontratistas descartaron los scripts y laboriosamente re proyectaron la geometría de las formas de los vacíos manualmente usando un ejército de mano de obra barata en sus instalaciones en Beijing. La geometría

fue luego reingresada en su software personal para accionar la máquina de cortado automático de los componentes de poliestireno expandido en Dubai. Al final el encofrado fue perfecto.

En la puesta en obra se descubre que el gradiente de presión en el vertido de concreto en encofrados causa una deformación en aumento de las formas de vacío de la parte inferior, lo que resulto en huecos deformados en el concreto que luego fueron corregidos manualmente, rigidizando cada forma de vacío con una lámina de melanina.



SAGRADA FAMILIA FICHA TÉCNICA

Nombre del proyecto: Realización de encofrados complejos y su puesta en obra en Sagrada Familia.

Encofrados: Realizados en taller de pre montado en Galera

Localización: Barcelona, España

Relevancia de Hardware: fabricación de moldes para conformado de geometrías complejas

Parámetros relevantes: Geometrías complejas y hormigón

DESCRIPCIÓN

En la realización de los moldes de hiperboloides, paraboloides y bóvedas singulares para conformado del hormigón, vemos en Sagrada Familia la regularización de una práctica planificada, definida geoméricamente, con una real inclinación a producción personalizada en masa. Donde la traducción de las geometrías y la información manejada en la etapa de fabricación es clara, y no requiere de cambios.

El sistema de traducción de información para fines de fabricación parte de la utilización de un modelo de Rhino que vía un plugin de Grasshopper, Rhino net posibilita la transformación para fines de fabricación y se exporta al formato de alimentación para la máquina de control numérico.

La máquina de control numérico para cortes y fresados, que actualmente se utiliza, solo requiere de un documento CAD y sus respectivas indicaciones de corte.

Como aporte a la logística y planificación de procesos existe un sistema por colores y codificado de los moldes que permite identificar su colocación en obra para ahorro de tiempo evitar errores.

Aun cuando se desarrolla fabricación in situ de encofrados de grandes dimensiones se mantiene el mismo proced-





imiento de fabricación de moldes y encofrados que evaluamos a continuación.

SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA

Bóvedas de hormigón con encofrado de poliéster y fibra de vidrio

Estas bóvedas se construyen utilizando un primer modelo a escala natural elaborado por los modelistas del templo y, seguidamente, encima del mismo, se hacen moldes de poliéster, tras realizar previamente unas particiones para tener cierta comodidad tanto al montarlos como al desmoldar la bóveda. Un vez colocados en su lugar en la obra, se hace una primera proyección de mortero y luego se coloca la armadura y se hormigona. Este sistema se utiliza básicamente donde los diferentes módulos de bóveda se repetirán varias veces, y se aplica prácticamente en todo lo que son las bóvedas situadas a 30 m del

conjunto del templo.

El modelo a escala natural se realiza con escayola, por impresión 3d o mediante la subdivisión en encostillado de las superficies que son cortados con máquina de control numérico.

Los moldes de poliéster reforzados con fibras de vidrio, se hacen mediante el laminado de este compuesto sobre la superficie del modelo, esto posteriormente es montado sobre la estructura de bastidores de chapa metálica.

Bóvedas de hormigón visto con encofrados de un solo uso

Este sistema se aplica en módulos de bóveda que no se repetirán. Hay que recurrir a un sistema que se adapte a las diferentes formas que exige la geometría reglada utilizada por Gaudí, por lo que se buscan los materiales más apropiados según las formas y los tamaños.



En primer lugar, están los hiperboloides, que se pueden aplicar tanto en los capiteles como en los lucernarios de las bóvedas. Primero se recortan unas nervaduras de forma hiperbólica, las cuales, al juntarse unas con otras circularmente por diferentes niveles, forman lo que será la estructura. Luego se forra con tablero marino de 5 mm, que se puede alabear y adaptar según convenga.

En segundo lugar, están los paraboloides de grandes dimensiones, que se construyen elaborando un primer esqueleto a base de barras metálicas soldadas entre sí, que siguen las directrices y generatrices del elemento. Una vez hecha esta estructura, se forra con tablero Tablex, al que se aplica un baño de agua con acrílico para que se ablande y se adapte mejor a las formas deseadas.

En tercer lugar, están los paraboloides pequeños, que se alabean mucho, y que se forman a base de barras de acero calibrado que se sueldan una al lado de otra, formando el paraboloides. Una vez terminada esta operación, se tapan los espacios que quedan con una mezcla de resinas y arena, que acaba de dar a las barras la textura de una superficie continua.

Es importante destacar que para los casos anteriores el replanteo de las generatrices en la realización de los moldes de superficie de chapa se parte de la localización de puntos referencia para la proyección de una generatriz de referencia y luego se repiten en la superficie imaginaria armadon el reglado. Por la magnitud de esta gran obra, todas las operaciones de fabricación de moldes y la prefabricación de piezas se realizan en un taller de premontado. También existen casos de piezas que han sido realizadas por fabricantes externos como es el caso de las superficies de revestimiento de ventanas inte-

riores, realizadas por Escofet.

Ocasionalmente se ha prefabricado piezas de hormigón a pie de obra de las bóvedas de 30 metros, con reproducción de una parte de uno de los encofrados de poliéster y fibra de vidrio.

Unos paraboloides de las bóvedas del centro del crucero -piezas que habitualmente se prefabrican en taller- debido a sus dimensiones se han producido en el Templo, a pocos metros de su situación definitiva en la obra. El paraboloides ha producido con barras de acero y tablero de madera encima. El hiperboloides que encima es un encofrado perdido de yeso. Se arma con unas mallas de acero inoxidable. En la unión de las bóvedas del crucero con la torre de los evangelistas se han prefabricado superficies de paraboloides de 7 metros de altura. (FAULI)

PUESTA EN OBRA

Una vez hechos todos estos elementos, empieza otro trabajo muy complejo: situarlos en el espacio y hacer que encajen bien unos con otros. Luego, se apuntalan para que puedan recibir la presión del hormigón. Finalmente, toda la superficie que queda a la intemperie se cubre con pintura anticorrosiva para proteger al máximo todo el elemento.

En el caso de encofrados de madera, existen puntos localizados donde se requirió de mecanismos de seguridad del encofrado en el momento de su posicionado.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y VISIÓN FUTURA

PROCESO CONCEPTUAL Y DE DISEÑO |
PARÁMETROS | ITERACIÓN | PENSAMIENTO
| PARAMETRICISMO VS. FORMA CURVA |
AVANCES EN SOFTWARE

4.1. REFLEXIONES | RESUMEN

- 4.1.1. Lógica proyectual
- 4.1.2. Geometría
- 4.1.3. Software
- 4.1.4. Estrategias de envolvente
- 4.1.5. Proceso de iteración
- 4.1.6. Prefabricación vs. In-situ
- 4.1.7. Puesta en obra
- 4.1.8. Hormigón Armado

4.2. CONCLUSIONES

4.3. VISIÓN FUTURA

- 4.3.1. Predicción | Perspectiva
- 4.3.2. Líneas de investigación

4.1. REFLEXIONES-RESUMEN

4.1.1. Lógica proyectual

- La lógica del proceso reside en la ruptura de la solución fija y del proceso lineal, para la integración de un proceso basado en un circuito de retroalimentación y series de soluciones resultantes.
- Con un cambio en la idea de solución, de lo fijo a la serie, comprendemos que el resultado pasa de ser un módulo, a ser una serie de módulos variantes, lo que demanda la construcción de elementos o edificación con la calidad de un módulo prefabricado pero esta vez hecho a medida. Pasamos de la estandarización a la personalización (customization).
- La característica principal de esta lógica, es la generación de estos resultados debido a la discretización de parámetros y de sus relaciones en torno a un modelo experimental.
- El resultado arquitectónico se ve influenciado por la programación previa de su generación, en base a los parámetros tomados en cuenta y las relaciones que se plantean en la etapa de diseño y concepción del modelo dentro del software. De manera que el software y sus respectivos módulos o plug-ins de análisis, influyen directamente en la lógica proyectual.

- La lógica proyectual está basada en la resiliencia del modelo de diseño, el cual estará sometido en el proceso a cambios según las relaciones de sus parámetros, pero también cambios resultantes de su encuentro con las posibilidades constructivas. Un ejemplo sería la visualización de uso de encofrados cambiables, flexibles, antes que estandarizados industriales y repetitivos.
- Las técnicas de construcción de arquitectura paramétrica, son resultado de la búsqueda de solución a una realización más directa y congruente con la concepción digital. Una conexión más directa entre construcción y concepción.
- En la búsqueda de emular la precisión de las herramientas digitales de softwares, se recurre a herramientas digitales de fabricación.
- A consecuencia de la necesidad de construir formas complejas y de poder realizar versionado de construcciones a medida, sin que el volumen de información salga de los límites de lo manejable, se acogen y adaptan a nuestro sector, las tecnologías de software y hardware que hoy posibilitan la realización de arquitectura paramétrica y a la vez reciben constantes desafíos.

- Dentro de la construcción paramétrica surgen dos aproximaciones del hardware: Adaptación del diseño, a los productos y las prácticas habituales posibles de la construcción. Como son las técnicas de panelado, tesoado, plegado, seccionado, etc. O la adaptación de las técnicas y adopción de tecnologías de otras industrias para la realización de un diseño paramétrico preestablecido. Incurriendo en el uso de robótica, de maquinaria de fabricación digital y de estrategias constructivas de otras industrias, hasta la modificación de los materiales para la aproximación de esa construcción ideal.

4.1.2. Geometría

- Existe una latente tendencia a la construcción de las superficies y volúmenes del modelo, como pieles envolventes de la edificación, que incluyen función de estructura, cerramiento, cubierta y fachada. Esto es una consecuencia directa de la influencia de los softwares y sus tendencias al tratamiento del modelo como un todo (Rhino+Grasshopper), o de las mallas (Maya) por igual.
- La paramétrica se basa en la mayoría de los casos en la concepción geométrica de las formas, y en los casos que no parte de la geometría,

posteriormente la adopta para su realización constructiva.

- El manejo de estas grandes cantidades de información trae consigo, la necesidad de una traducción de los diferentes formatos de datos para facilitar el proceso de hardware.

4.1.3. Software

- Más allá de los costes y accesibilidad de las tecnologías, el asunto de la adaptación al conocimiento de los grupos de interés es vital para la utilización de estas técnicas en el diseño y construcción de arquitectura.
- Solo si adaptamos los softwares y las maquinarias de fabricación digital, al entendimiento de los arquitectos, podremos utilizarlos como herramientas habituales dentro del proceso de diseño. Hacer más accesible al lenguaje técnico tradicional del sector. Debe existir una apertura creativa dentro de los softwares que posibilite mayor transferencia de conocimiento y exploración, con base en nuestra naturaleza investigadora, y lejos de la limitación y la conveniencia. La arquitectura paramétrica es evidencia de lo que sucede cuando las herramientas dejan de ser limitaciones fijas y son vistas como opciones de desarrollo cambiante y adaptable.

- El nuevo hardware evita a toda costa la experimentación o aparición de errores en obra, cierra el margen de casos no deseados en obra. Por consiguiente la puesta en obra se convierte en un proceso previamente planificado, con tolerancias y dilataciones dominadas.

4.1.4. Estrategias de envolvente

- Es preciso la generación de estrategias de construcción de la forma, desde la fase de planificación, para la transformación del modelo de diseño a un lenguaje de la construcción. Sea mediante la subdivisión de las superficies, para una adaptación a las dimensiones de productos existentes, o mediante la confección de materiales y formatos únicos hechos a medida, para la realización de la edificación.

IV.1	Fotografía Parametrica
IV.2	Influencia de otras industrias
IV.3	Graficos de Razones
IV.4	Matriz de Parametrica

- Lo que se presenta en la arquitectura paramétrica como superficies curvas aleatorias, siempre tienen una base geométrica y resultan de la parametrización en el software. Estas pieles lejos de ser experimentales, son arduamente planificadas desde los parámetros geométricos, estructurales, desde el comportamiento del material, el resultado estético de las superficies, las aperturas de las mismas y su racionalización para la construcción.
- No se trata solo de un capricho o desafío constructivo en base a un estilo, también de una muestra de las capacidades y de las herramientas que hoy poseemos en la construcción. Es una apertura de las fronteras, limitaciones o barreras pragmáticas del hardware.

los talleres de pre montaje y la realización de prototipos.

- En este nuevo hardware se pasa del proceso de diseño a un nuevo integrante de la familia constructiva la fase de fabricación, para posteriormente realizar su montaje y la finalización de su construcción in situ.
- El hardware se convierte en el dominio del pre- es decir un proceso muy basado en la planificación meticulosa de cada detalle y fase del mismo. Donde la programación del mismo permite la probatoria de opciones y de variaciones de material y técnicas para el desarrollo constructivo del diseño.

4.1.5. Proceso de iteración

- Como circuito de retroalimentación, evidentemente no lineal, integra la información de los grupos de interés para la realización del objetivo de diseño, lo que constituye un manejo de información multidisciplinaria.
- Las técnicas utilizadas por la fabricación digital requieren de diseñadores, repensar el proceso de diseño, generando nuevas metodologías y enfoques no lineales de desarrollo.

4.1.7. Puesta en obra

- Existe una tendencia a la compatibilización de técnicas actuales y desarrollo habitual de la construcción, para la materialización del diseño. Esto lo vemos a través de la creación de estrategias de manejo de los materiales y de posibilidad de la fabricación.
- Tiene que existir una compatibilización, puesto que existe una tradición constructiva latente con este tipo de material, que existe desde el hallazgo del hormigón armado por Monier. Donde se evidencia la conformación del material como una vía de su desarrollo en construcción con hormigón.

4.1.6. Prefabricación vs. In-situ

- Aparece la necesidad de un pre modelado del encofrado y del armado para la planificación del pre montaje y montaje de las piezas en la construcción.
- El proceso in situ se convierte en un taller de montaje, donde las actividades realizadas in situ son meticulosamente planificadas y reducidas al mínimo, apareciendo,

4.1.8. Hormigón Armado

Evolución de las técnicas

En el conformado del hormigón se proyecta como futuro inmediato el desarrollo y mejorado de encofrados flexibles,

Debilidades

Oportunidades

Líneas de desarrollo

Conformado

Proyectado

Armado: desarrollo de fibras y de mallas y alternativas

La realización de estas formas complejas, ha tenido una repercusión importante en la complejidad del armado y de su puesta en obra, intensificando el trabajo y verificación manual de estas, e incurriendo en cierta laboriosidad. A consecuencia aparecen en la palestra alternativas de armado con fibras de diferentes materiales, dimensiones, y estrategias para su solución, lo que abre un campo de desarrollo y evidencia una necesidad latente.

Las técnicas de armado alternativas al acero que actualmente se emplean en la realización de formas complejas, son adoptadas desde una perspectiva auxiliar, pues aún no se consiguen las mismas prestaciones estructurales que con los aceros.

Esto representa una oportunidad de desarrollo de los armados y de mejorar los materiales utilizados para esto. La impresión de acero a manera de soldadura espacial, realizada por robots inteligentes, que presenta en sus instalaciones MX3D es un foco de desarrollo del armado para formas complejas.

Mediante su fabricación por medios digitales, pero en vías de su uso para construcciones más significativas, resulta importante dotarle de análisis y prestaciones estructurales.

Otro foco de desarrollo del armado es la impresión de mallas o redes del mismo como encofrado de una tipología de hormigón más densa, dejando de direccionarse el hormigón hacia la fluidez de nuestros días.

Procesado

Soluciones constructivas

4.2. CONCLUSIONES

* Nuestro sector construcción requiere de mayor apertura a las nuevas tecnologías, desde la normativa hasta la capacitación de la mano de obra.

* Se identifica la figura del arquitecto generalista profundo, un arquitecto que domine y controle, esta arquitectura avanzada que comprende las nuevas tecnologías, alternativas constructivas y softwares facilitadores del ejercicio de diseño.

* El uso de softwares y la realización en el modelado 3d de nuevas complejidades, trae consigo la información en el nuevo proceso de desarrollo constructivo. Una adopción de los recursos elite, implica una información y mejoramiento del criterio gestor del arquitecto, los ingenieros, los constructores y todo el equipo que forma parte de la planificación y materialización de la edificación.

* Nos dirigimos hacia la prag-

matización intensiva de la propuesta y concepción arquitectónica mediante la incorporación de los conocimientos dados por los softwares en las cadenas de producción continua digitales que conectan el diseño, la fabricación y la construcción y aseguran la eficiencia y el flujo de la información.

- Circuito de retroalimentación y series de soluciones
- Módulo prefabricado pero esta vez hecho a medida
- Discretización de parámetros y de sus relaciones
- Programación previa de su generación
- Software y sus respectivos módulos o plugins
- Resiliencia del modelo de diseño,
- Realización más directa
- Precisión de las herramientas
- Construir formas complejas
- Construcciones a medida
- Control de volumen de información

- Adaptación del diseño
- Adaptación de las técnicas y adopción de tecnologías
- Pieles envolventes multifuncionales
- Concepción geométrica de las formas
- Traducción de los diferentes formatos de datos
- Adaptación al conocimiento de los grupos de interés
- Apertura creativa dentro de los softwares
- Pre modelado del encofrado y del armado
- El proceso in situ se convierte en un taller de montaje
- Fase de fabricación antes de la puesta en obra
- Dominio del pre-, planificación
- Tolerancias y dilataciones dominadas.
- Transformación del modelo de diseño a un lenguaje de la construcción
- Base geométrica y resultan de la

- parametrización en el software
- Capacidades y de las herramientas que hoy poseemos
- Información multidisciplinaria
- Compatibilización de técnicas
- Conformación del material como una vía de su desarrollo

4.3. VISION FUTURA

Predicción | Perspectiva

Al permitir la generación, la integración y las estrategias de ideas creativas y las operaciones de fabricación para informarse mutuamente de una manera significativa, el potencial de la fabricación digital puede realizarse plenamente.

La clave de este desarrollo es el interés y la exploración de materiales y cómo la intención del diseño puede estar conectado o se expresa a través de su empleo.

También se presenta la paradoja, que siendo un sistema emergente del avance tecnológico y digital, de la

mano de nuevos planteamientos formales, y en busca de la optimización y resolución práctica de formas geométricamente definidas de manera compleja, pero basadas en una auto-variación coherente a sus parámetros originarios y resultante de una iteración controlada y programable; éste precise mejor desarrollo tecnológico constructivo y mayor claridad a la hora de puesta en obra.

Infográfico conclusivo, sistema de ramas o mapa conceptual con visión futura y líneas de desarrollo del hardware además de aplicaciones

Identificación de componentes
Conclusiones por tópicos de componentes o acorde a los objetivos de la investigación y a las

aplicaciones, auxiliadas de gráficos

* Componentes, Y las líneas de desarrollo del hardware

* Según la aplicación, A donde vamos

- * Encofrado less, Con encofrado mezcla
- * Conformado, Impreso
- * Parques temáticos vs. Proyecto
- * Variantes
- * Analítico, Proceso de investigación, Sistema de ramas

Resultados del estado del arte de Arquitectura Paramétrica

Resultados de Software

Debilidades y oportunidades del hardware

La figura del arquitecto y la colaboración del proceso

Técnicas de procesamiento

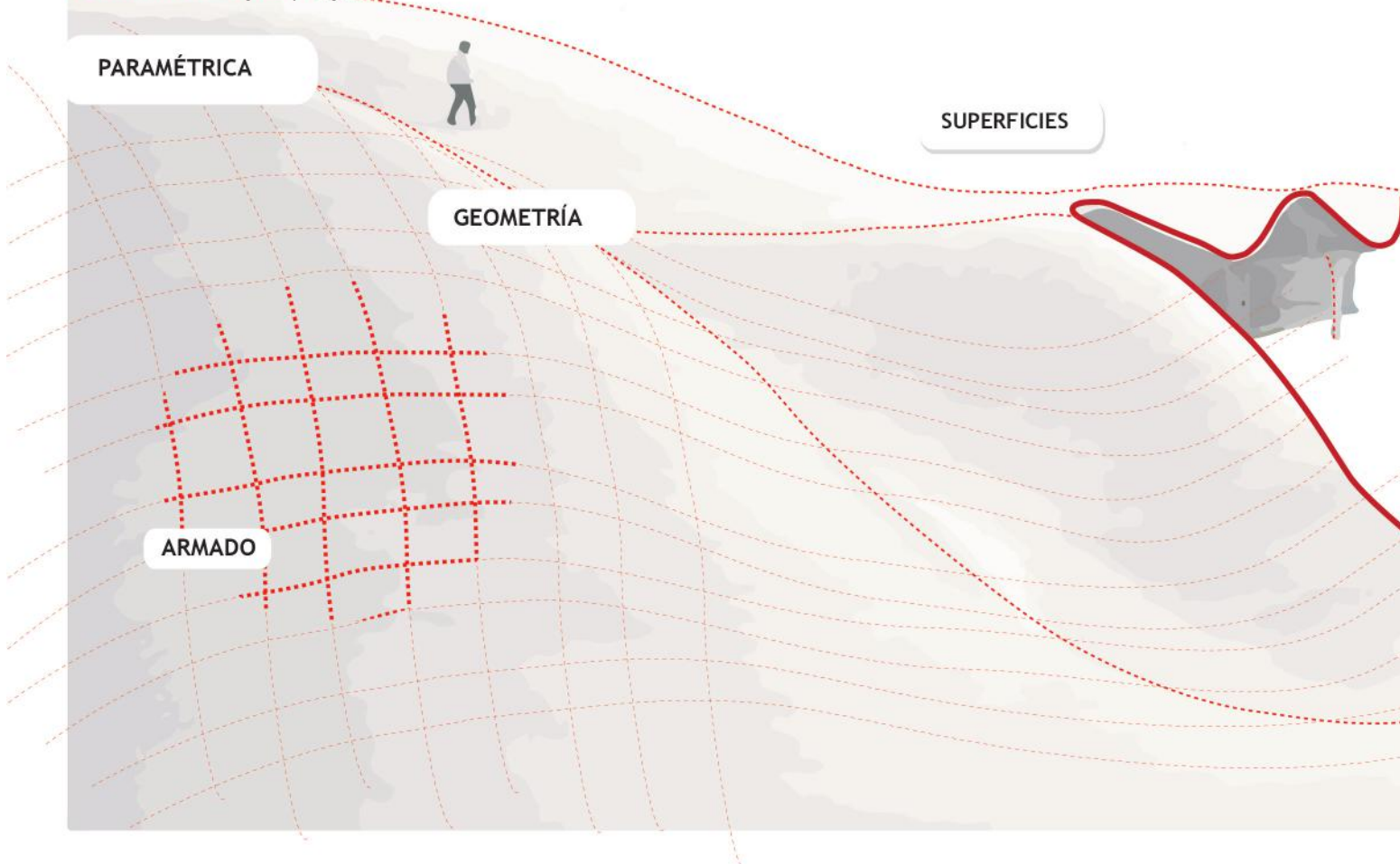
Materiales y estructuras

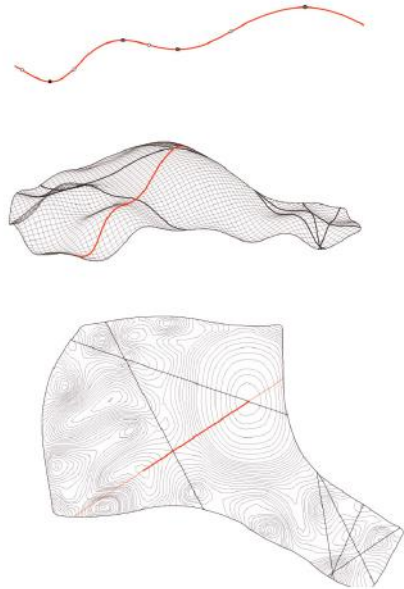
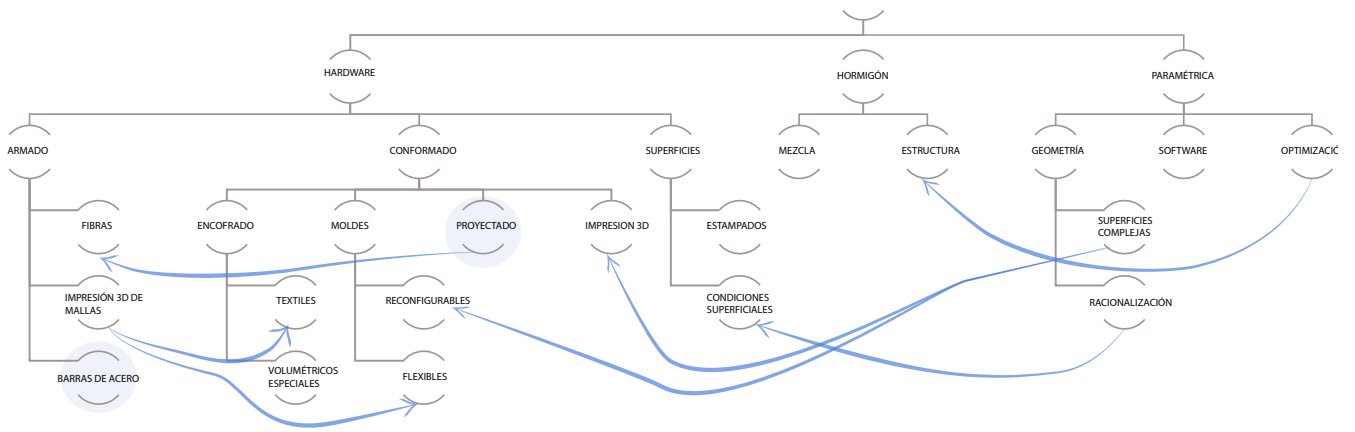
Estrategias

Líneas de investigación futura

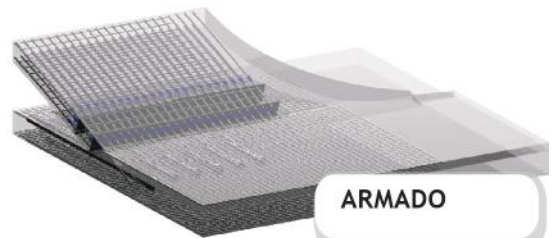
Técnicas de Armado contemporáneo

Construcción de pieles

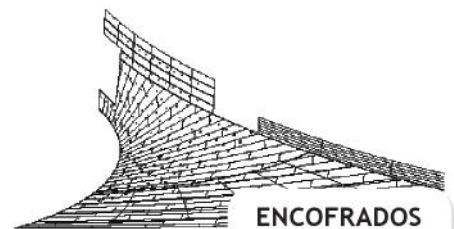




RACIONALIZACION



ARMADO



ENCOFRADOS

REPLANTEO

**HARDWARE
HORMIGÓN**

BIBLIOGRAFÍA

- ADRIAENSSENS, S., BLOCK, P., VEENENDAAL, D., & WILLIAMS, C. (2014). *Shell structures for architecture: Form finding and optimization*. New York: Routledge.
- AIACC: The American Institute of Architects, California Council. (2012, Junio 25). *Parametric Design: a Brief History*. ARCCA Archives, p. <http://www.aiacc.org/2012/06/25/parametricdesignbriefhistory/>.
- Anónimo. (1996). *Dominar la materia. Tectónica 3: Hormigón (I) "In situ"*.
- APARICIO, J. (2007). *El hormigón y Aristóteles. Tectónica 25: El hormigón (III), 2*.
- BEORKREM, C. (2013). *Material Strategies in Digital Fabrication*. New York: Routledge.
- BERNACCHI, A. (2010). *Architecture in the age of intelligent machines*. Madrid: Máster en Proyectos de Arquitectura Avanzados, Universidad Politécnica de Madrid.
- BROWN, S. (2009). *The Possibility of Craft: A study of an emerging paradigm in architectural design*. Leicester School of Architecture.
- BURRY, M. (2011). *Scripting Cultures*. Londres: John Wiley & Sons Pty Ltd.
- BURRY, M., COLL, J., ESPEL, R., FAULI, J., & GOMEZ, J. (2014). *Les Naus de la Sagrada Família: El secrets arquitectònics d'una obra irrepètible*. Barcelona: Editorial Mediterrània.
- CANEPARO, L. (2014). *Digital Fabrication in Architecture, Engineering and Construction*. Torino: Springer.
- CARPO, M. (2004, Junio). *Ten years of folding*. AD Architectural Design, *Folding in architecture 1993 Reprint*, pp. 14-19.
- CECCATO, C. (2010, 6). *Cómo construir Arquitectura Paramétrica*. DETAIL, *Analógico/Digital*, pp. 620-624.
- CECCATO, C., HESSELGREN, L., PAULY, M., POTTMANN, H., & WALLNER, J. (2010). *Advances in Architectural Geometry 2010*. Vienna: SpringerWiens NewYork.
- CEHOPU-CEDEX. (2010). *Moldes y encofrados. Hormigón Armado en España 1893-1936*. Madrid: http://www.cephopu.cedex.es/hormigon/temas/C22.php?id_tema=71.
- COLOMA, E. (n.d.). *Geometría Paramétrica Para Ganar Concursos*. (pp. 807-811). Barcelona: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona.
- DAVIS, C., BEORKREN, C., & SHIELDS, B. (2013). *Primitive Parametric: Biology as an architectural catalyst*. Charlotte: The University of North Carolina in Charlotte.
- DAVIS, D. (2013). *A History of parametric*. <http://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>.
- DAVIS, D. (2013). *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*. RMIT University.
- DAY, K. (2006). *Concrete mix design, quality control and specification (3ra. Edición)*. New York: Taylor & Francis.
- DUNN, N. (2012). *Digital Fabrication in Architecture*. Londres: Laurence King.
- FAULI, J. (n.d.). *Composició i continuïtat en les columnes i voltes de les naus del Temple Expiatori de la Sagrada Família*. Barcelona.
- FERRE, A., & SAKAMOTO, T. (2000). *From Control to Design. Parametric/Algorithmic Architecture*. Barcelona: Actar.
- FRAILE, M. (2014). *El Nuevo Paradigma Contemporáneo. Del diseño paramétrico a la morfogénesis digital*. Buenos Aires: Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires.
- FRANKEN, B. (2003). *Real as Data*. In B. KORALEVIC, *Architecture in the digital age: design and manufacturing* (pp. 122-138). New York: Spoon Press.
- FRAZER, J. (1995). *Theme VII: An Evolutionary Architecture*. Londres: Architectural Association.
- GARCIA ALVARADO, R., & LYON GOTTLIEB, A. (2013). *Diseño paramétrico en Arquitectura; método, técnicas y aplicaciones*. ARQUISUR REVISTA, Año 3, No.3, pp. 17-27.
- GIL, L. (2014). *El refuerzo de estructuras de hormigón con laminados de FRP según la FIB*. Barcelona: Omnia Publisher.
- GLYMPH, J. (2003). *Evolution of the digital design process*. In B. KORALEVIC, *Architecture in the digital age: Design and Manufacturing* (pp. 108-109). New York: Spon Press.
- GRAMAZIO, F., KOHLER, M., & WILLMANN, J. (2013). *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*. Zurich: Park Books.
- HARMENS, J. (2014). *Parametric Thesis: Is what is seen by the public as parametric architecture actually parametric? is this the future of architecture?* Leeds, UK.: Leeds Beckett University.
- HEYLIGHEN, F. (1989). *Self-Organization, Emergence and the Architecture of Complexity*. Proceedings of the 1st European Conference on System Science (pp. 23-32). Paris: AFCET.
- HOLST, R. (2012). *Think, Script, Build: Architectural engineering through parametric modelling of intelligent systems in architecture*.
- IWAMOTO, L. (2009). *Digital Fabrications: Architectural and material techniques*. New York: Princeton Architectural press.
- JURADO, J. (2004). *Proyectos: Estación de Autobuses de Casar de Cáceres, Justo García Rubio*. Revista Tectónica 17 : *Geometrías Complejas*, pp. 52-65.
- JURADO, J. (2007). *Citius, altius, fortius: Una visión actualizada sobre el uso del*

- hormigón en edificación. *Tectónica* 25: hormigón (III).
- KOK, M. (2013). Textile reinforced double curved concrete elements: Manufacturing free-form architecture with a flexible mould. Delft: Delft University of Technology.
- KOLAREVIC, B. (2003). *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. New York : Spon Press.
- KORALEVIC, B. (2001). *Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Digital Age*. ACADIA 2001 Conference. University of Pennsylvania.
- KORALEVIC, B., & KINGLER, K. (2008). *Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture*. Routledge.
- KRAUEL, J. (2010). *Arquitectura Digital: Innovación y Diseño*. Barcelona: Links.
- LECUYER, A. (1997, Diciembre). Building Bilbao. *Architectural Review*, vol.102, No.1210, pp. 43-45.
- LYNN, G. (2006). *AD Programming cultures*. Wiley Academy.
- MARBLE, S. (2012). *Digital Workflows in architecture. Design-Assembly-Industry*. Basel: Birkhauser.
- MENGES, Archim, HENSEL, Michael, & WEINSTOCK, Michael. (2006, Marzo/Abril). Techniques and technology in morphogeneric design. *AD Architectural Design*, Vol. 76, No.2.
- MEREDITH, M. (2000). Never Enough. In A. FERRE, & T. SAKAMOTO, *From Control to Design: Parametric / Algorithmic Architecture* (p. 9). Barcelona: Actar.
- MITCHELL, W., & McCULLOUGH, M. (1995). In *digital design media*. New York: John Wiley & Sons.
- MOUSSAVI, Farshid. (2011, Septiembre 21). Viewpoints: Farshid Moussavi on the need for parametric thinking. *Architectural Review*, p. <http://www.architecturalreview.com/viewpointsfarshidmoussaviontheneedforparametricthinking/8620000.article>.
- OXMAN, N. (2010, Agosto). Structuring Materiality: Design fabrication of heterogeneous materials. *AD Architectural Design, The New Structuralism: Design, engineering and architectural technologies*, pp. 78-85.
- PECK, M. (2014). *Modern Concrete Construction Manual: Structural Design Material properties sustainability*. Munich: Edition Detail.
- PETERS, B., & KESTELIER, X. (2013, Marzo/Abril). Computation works: the building of algorithmic thought. *AD Architectural design* No.22.
- PETERS, B., & PETERS, T. (2013). *Inside SmartGeometry : Expanding the architectural possibilities of computational design*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- POTTMANN, H. (2009, Diciembre). Geometry and New and Future spacial patterns. *AD Architectural Design, Patterns of architecture*, pp. 60-65.
- POTTMANN, H. (2010, Agosto). *Architectural Geometry as Design Knowledge*. *AD Architectural Design, The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural technologies*, pp. 72-77.
- REISER, J., & UMEMOTO, N. (2006). *Atlas of novel tectonics*. Princeton architectural Press.
- REISER, J., KIPNIS, J., KWINTER, S., LAVIN, S., & STEELE, B. (. (2012). *O-14: Projection and Reception*. Londres: Architectural Association Publications.
- RIIBER, J. (2011). PhD thesis: *Generative Processes in Architectural Design*. Centre for Information Technology and Architecture. Copenhagen: The Royal Danish academy of fine arts, School of architecture, Design and conservation.
- ROCKER, I. (2008). *Versioning: Architecture as series?* First International Conference on Critical Dogmat, What Matter(s)? . Boston: Harvard Graduate School of Design.
- SCHEURER, F. (2010, Agosto). *Materialising Complexity*. *AD Architectural Design, The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural technologies*, pp. 86-95.
- SCHUMACHER, P. (2008). *Parametricism Manifesto*. www.patrickschumacher.com.
- SHELDEN, D., & WITT, A. (2011, Julio/Agosto). Continuity and rupture. *Architectural Design (AD): Mathematics of Space*, pp. 36-43.
- SNOOK, R. (2012). *Volatile formations. Reclaim Resilience*stance, Log 25.
- SOLER, J. (2013, Septiembre). 'Form Finding' y Fabricacion digital en Hormigon Amado. TFM, Master de Tecnologia en la Arquitectura, Universitat Politecnica de Catalunya.
- TENORIO, A. (2014, Marzo). *The Impact of Parametricism on Architecture and Society; Entrevista a Patrik Schumacher*.
- TERZIDIS, K. (2006). *Algorithmic Architecture*. Boston, MA: Elsevier.
- VANUCCI, M. (2000). *Open systems: approaching novel parametric domains*. In A. FERRE, & T. SAKAMOTO, *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture* (pp. 118-121). Barcelona: Actar.
- VEENENDAAL, D., BLOCK, P., & WEST, M. (2011, Mayo 15). *History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting*. *Structural Concrete* 12 No.3, p. 164'177.
- WOODBURY, R. (2010). *Elements of Parametric Design*. New York: Routledge.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Introducción

0.0 Fotografía Hormigón Paramétrico (abstract)

0.1 Gráfico de Método

CAPITULO I:
ARQUITECTURA PARAMÉTRICA

Introducción

I.1 Fotografía Paramétrica

I.2 Fotografía Influencia de otras industrias

I.3 Gráfico de razones

I.4 Gráfico Estado concept board

Definición

I.5 Fotografía burbuja de Frei Otto

I.6 Tabla Taxonomía de Parámetros en Pág. 21 de García Alvarado

I.7 Gráfico del 2d a la simulación o fotografía Pág. 41 Nick Dunn

I.8 Fotografía Sketchpad

I.9 Fotografía propagación de cambios, grasshopper espacio 3d

I.10 Fotografía Diseño Generativo

I.11 Fotografía Relaciones causales en cascada Grasshopper

I.12 Gráfico proceso de iteración, nuevo proceso de diseño no lineal

I.13 Fotografía Principios codificados

I.14 Fotografía sketches, modelos

I.15 Fotografía Master Builder

I.16 Gráfico del módulo a la serie, versionado

I.17 Fotografía simulación y análisis

Antecedentes

I.18 Fotografía Paramétrica Primitiva

I.19 Fotografía Paramétrica Digital

I.20 Fotografía Maqueta funicular colonia Güell, Gaudí

I.21 Fotografía Frei Otto Catenaria Invertida

I.22 Fotografía fabricación en serie

I.23 Fotografía del plano al cad al 3d

I.24 Fotografía formas optimas

I.25 Fotografía prototipo

I.26 Gráfico Timeline Geometría y desafío de la forma

I.27 Fotografía

I.28 Fotografía

I.29 Fotografía

I.30 Gráfico tabla de geometrías complejas

Teorías, conceptos y líneas de Paramétrica

I.31 Fotografía estadio M, Luigi Moretti

I.32 Fotografía diseño codificación ecuaciones, scripting

I.33 Fotografía parametricismo ejemplo

I.34 Fotografía morfogénesis

I.35 Fotografía dinamización de material

I.36 Fotografía

I.37 Fotografía

I.38 Fotografía

I.39 Fotografía

I.40 Gráfico

I.41 Fotografía

I.42 Fotografía

I.43 Fotografía

Actualidad en Software

I.44 Fotografía

I.45 Fotografía

I.46 Fotografía

I.47 Fotografía

I.48 Fotografía

I.49 Fotografía

I.50 Gráfico

I.51 Fotografía

I.52 Fotografía

I.53 Fotografía

I.54 Fotografía

I.55 Fotografía

I.56 Fotografía

I.57 Fotografía

I.58 Fotografía

I.59 Fotografía

CAPITULO II: HORMIGÓN Y SU CONFORMACIÓN

Introducción

II.1 Fotografía Hormigón y su conformación

II.2 Fotografía de componentes de la mezcla

II.3 Grafico comparativo de estados del compuesto

II.4 Grafico analítico de geometría, Restaurante Los Manantiales, Xochimilco, México D.F. 1957. Con base en grafico del libro "Candela: The Shell Builder" por Colin Faber.

II.5 Fotografía de encofrado, Restaurante Los Manantiales, Xochimilco

II.6

II.7

II.8

II.9

II.10

Nuevos Hormigones

CAPITULO III: ESTUDIO DE CASOS

III.1 Fotografía Hormigón y su conformación

III.2 Fotografía Hormigón y su conformación

CAPITULO IV: CONCLUSIONES

IV.1 Conclusiones graficadas

IV.2 Infográfico de análisis y visión