

'FORM FINDING' Y FABRICACIÓN DIGITAL EN HORMIGÓN ARMADO

MÁSTER UNIVERSITARIO DE TECNOLOGÍA EN LA ARQUITECTURA. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.
JORDI SOLER SOLÀ. BARCELONA, SEPTIEMBRE DE 2013.

‘Form Finding’ y Fabricación Digital en Hormigón Armado

Jordi Soler Solà

Máster Universitario de Tecnología en la Arquitectura
(UPC) jsolerbcn@gmail.com

Jaume Avellaneda i Díaz Grande

Máster Universitario de Tecnología en la Arquitectura
(UPC) jaume.avellaneda@upc.edu

RESUMEN

Este trabajo parte de la obra de actores como Antoni Gaudí, Eduardo Torroja, Félix Candela o Frei Otto que, desde la buena comprensión de la relación que existe entre Forma y comportamiento Óptimo, forjaron la base teórica de lo que ahora conocemos como el ‘Form-Finding’.

El hormigón armado, al que por su condición líquida se le reconoció la capacidad de construir Formas Libres, ha sido un material protagonista en ésta aventura. Sin embargo, la necesidad del encofrado ha supuesto tal lastre, que hoy en día, todavía no superado este hándicap, se tiende a otras tecnologías para la construcción de estructuras ligeras. Aun así, hemos seguido confiando en sus capacidades para la construcción de algunos de los edificios más altos hasta ahora levantados, por lo que todo apunta a que éste no es ni mucho menos un material ya obsoleto para las estructuras de alto rendimiento.

El presente documento pretende explorar, centrando la atención en el hormigón armado, cómo la aventura de encontrar la Forma ha evolucionado hasta nuestros días, y cómo hoy, con las tecnologías de las que disponemos, podemos construir según éstos mismos principios.

En un primer bloque se expondrán y se pondrán en relación los métodos para obtener la Forma Óptima, desde los primeros aparatos analógicos hasta las ya más avanzadas técnicas computaciona-

les, dirigidos o no a la construcción en hormigón armado, pero que puedan ser de aplicación en éste material.

En un segundo bloque, se pretende establecer, a partir del análisis de casos prácticos que estén relacionados o no con el ‘Form Finding’, un estado del arte de las tecnologías de construcción en hormigón armado, desde los métodos CAD-CAM aplicados a la confección del encofrado, hasta las propuestas más experimentales de impresión 3D a gran escala, que puedan ser de aplicación para la ejecución industrializada y eficiente de las Formas Libres a través de las cuales se expresa lo Óptimo.

PALABRAS CLAVE

3D Concrete Printing, CAD-CAM, CNC, Diseño Paramétrico, Encofrado, Fabricación Digital, Forma Libre, Form-Finding, Hormigón Armado, Modelo Industrial, Optimización.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	5
CAPÍTULO 2. ENCONTRAR LA FORMA.....	9
2.1. EL GAUDÍ PARAMÉTRICO.....	11
2.2. GOMETRÍA DESDE EL ANÁLISIS	12
2.3. FREI OTTO. SINERGIA Y FORMA.....	13
2.4. DEL ANALÓGICO AL DIGITAL	16
2.5. ARQUITECTURA DE LAS ENVOLVENTES	18
2.6. PARAMETRICISMO	19
2.7. SINERGIA Y FORMA 2.0	21
2.8. ALGORITMO GENÉTICO Y ‘MACHINE LEARNING’.....	23
2.9. OPTIMIZACIÓN EVOLUTIVA ESTRUCTURAL.....	25
CAPÍTULO 3. FABRICACIÓN DIGITAL Y HORMIGÓN ARMADO.....	29
3.1. LA CADENA DIGITAL	30
3.2. C.A.M. Y FORMAS LIBRES EN HORMIGÓN ARMADO	31
3.3. ESTRATEGIA #1. AYUDAS CAD-CAM AL ENCOFRADO CONVENCIONAL.....	32
3.4. ESTRATEGIA #2. EL ENCOFRADO TEXTIL	36
3.5. ESTRATEGIA #3. IMPRESION 3D DE GRAN ESCALA.....	39
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES FINALES	43
4.1. EL ARMADO.....	43
4.2. ¿CUALES SERAN LOS RETOS DEL FUTURO?	44
4.3. FORM FOLLOWS WHAT?.....	46
CAPÍTULO 5. REFERENCIAS	49

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo parte de mi admiración hacia la obra del arquitecto mexicano Félix Candela. He tenido la suerte de poder viajar algunas veces a México y conocer de la mano del doctor arquitecto y apreciado amigo Jesús de León (profesor en la Universidad Autónoma de México UNAM), algunas de las obras que Candela dejó en este país. Es imposible no sentir admiración al contemplar la elegancia y la simplicidad de estas estructuras de hormigón armado, finas losas curvas que con escasos 15 centímetros de espesor cubren de forma extraordinaria luces imposibles. Son estructuras límite que expresan, desde la buena comprensión del material, la Forma de lo mínimo necesario. Y la prueba de que la Forma no es fortuita está en que la gran mayoría de estas estructuras han sobrevivido a los ahí tan comunes terremotos -el más devastador, el de 1985, llegó a 8.1 grados Richter hundiendo gran parte de las construcciones del Distrito Federal-.

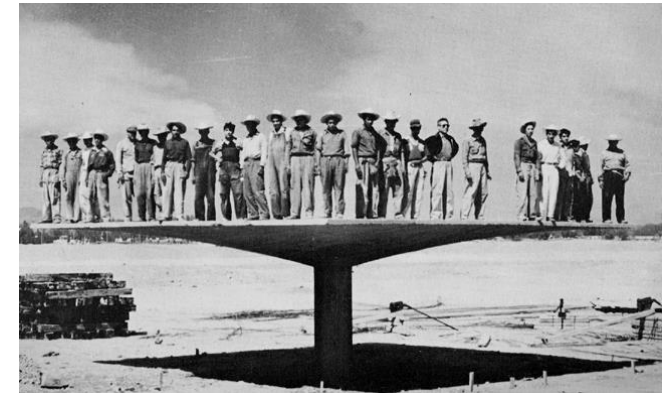
El éxito de Candela y de su empresa 'Cubiertas Ala' se debió, como lo expresaba el mismo arquitecto, a que con su tecnología conseguían hacer más que su competencia pero con mucho menos.

Efectivamente el uso de cubiertas ligeras de hormigón, tecnología que heredó del que fue su profesor en Madrid antes de su exilio, Eduardo Torroja, aplicadas a geometrías 'estructuralmente seguras' como hizo de forma intensiva con el Paraboloides Hiperbólico, le dieron a la empresa una clara ventaja respecto a sus competidores permitiéndole realizar durante los 20 años de actividad una extensísima obra que roza el millar de estructuras realizadas.

Eduardo Torroja y Félix Candela fueron actores clave en la comprensión de un material relativamente joven, cuya primera patente se atribuye a William Wilkinson en 1854 y al que en un principio no se le confiaba mayor capacidad estructural que a la madera.



[fig.01] Capilla de Nuestra Señora de la Soledad. Coyoacán, México. Félix Candela, 1955.



[fig.02] Candela y veinticuatro obreros se balancean sobre una estructura de Paraboloides Hiperbólico, 1953.

Igual que no es hasta mediados del XIX que el Palacio de Cristal para la Gran Exposición de Londres nos descubre las posibilidades de unos materiales ya muy propios de una Era Industrial como son el hierro y del vidrio -hasta ahora, recordemos la Biblioteca de Santa Genoveva, solo se habían incorporado a la Arquitectura subordinados a las tecnologías y al lenguaje anteriores a la Revolución Industrial-, el hormigón armado será objeto de ensayo e evolución hasta encontrar la Forma propia en la que el nuevo material se expresa.

El Expresionismo vio en éste material que en su estado líquido es fácilmente manipulable la ventaja de poderle dar casi cualquier forma imaginada. No obstante, a esta gran ductilidad y libertad formal que el material ofrecía le acompañaba la necesidad de conformar un encofrado. La mayor de las veces, esta era la parte más laboriosa de todo el proceso por lo que en algunos casos -como lo fue la torre Einstein (Erich Mendelsohn. 1921. Potsdam, Alemania)- la coherencia entre un nuevo lenguaje y la técnica que le es propia se vio frustrada habiendo que recurrir a falsas estructuras de hormigón a base de mampostería y revoco de cemento.

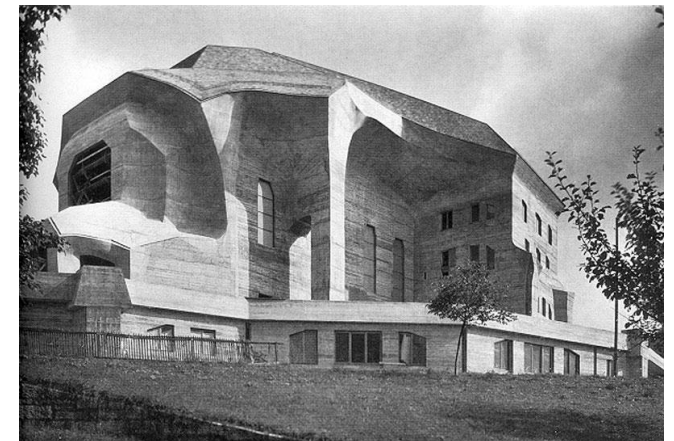
Pero no es desde la Arquitectura sino desde la Ingeniería que se establece un compromiso más íntimo entre la nueva tecnología y la Forma Óptima en que esta se expresa. Así es como un siglo después los ingenieros Erich Schelling y Ulrich Finsterwalder incorporan a una arquitectura racionalista una cubierta suspendida de hormigón mostrando con sus 15cm. de espesor las posibilidades reales de este material y abriendo de esta manera una etapa de exploración y explotación intensiva del hormigón armado desde este matrimonio encontrado entre Forma y comportamiento estructural.

Esta aventura parece encontrar su límite escasos veinte años más tarde con la Ópera de Sídney, en la que Utzon pretende trasladar a la gran escala el potencial demostrado por el sistema de cáscara de hormigón armado, pero el proyecto se

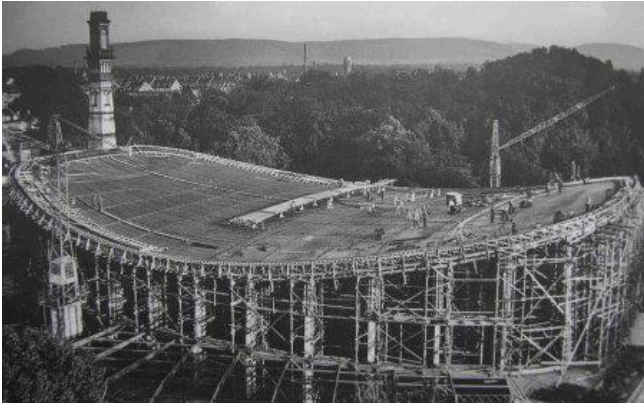
ve paralizado durante más de una década al juzgarse económicamente inviable realizar el encofrado de la estructura con métodos tradicionales. Finalmente es el equipo de Ove Arup que desbloquea la situación. Se resuelve abandonar la forma libre de la cubierta original y buscar una nueva geometría a base se secciones de esfera que se le aproxime. Solución ésta más racional, permitiendo de este modo reducir su ejecución a un número limitado de piezas prefabricadas de hormigón armado, ensambladas mecánicamente en la obra.

Así pues lo que en un principio se le atribuyó al hormigón armado como una ventaja, el hecho de poder verter un material líquido en molde para lograr Formas Libres, se descubrió al final como un gran hándicap respecto a otras tecnologías.

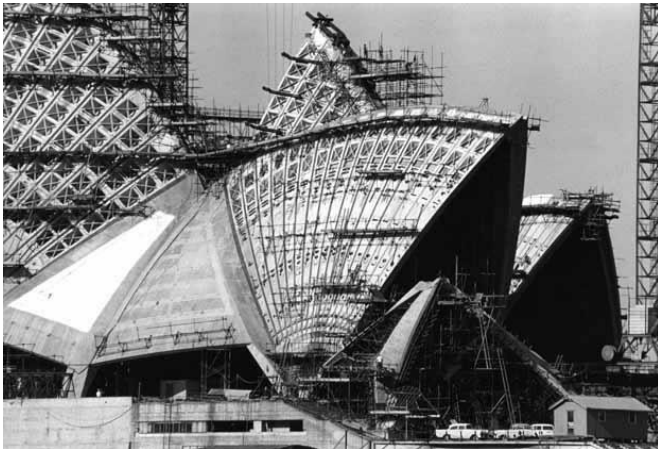
De aquí surge pues la pregunta que intenta responder este trabajo: ¿Cómo, con las tecnologías de las que hoy disponemos, podemos trabajar el hormigón armado a partir de estos mismos principios de Forma Óptima que la obra de Félix Candela nos sugería?



[fig.03] Goetheanum. Dornach, Suiza.
Rudolf Steiner, 1923.



[fig.04] Schwarzwaldhalle. Karlsruhe, Alemania.
Erich Schelling; Ulrich Finsterwalder, 1953.



[fig.05] Casa de la Ópera de Sídney. Sídney, Australia.
Jørn Utzon; Ove Arup, 1958-1973.

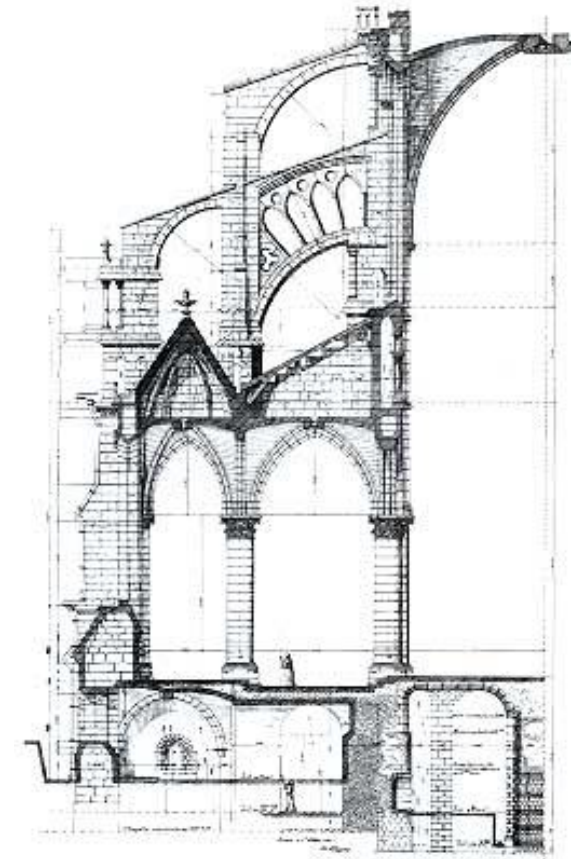
CAPÍTULO 2. ENCONTRAR LA FORMA

La imagen abajo [fig.06] es ilustrativa de como el buen entender de una tecnología deriva, cuando ésta trabaja al límite, en unas formas y no en otras. La catedral gótica tiene la Forma que les corresponde. Nada falta y nada sobra.

El doctor arquitecto José Luis González Moreno-Navarro (profesor de Historia de la Tecnología en la UPC) suele jugar con sus alumnos planteándoles que tal vez estas catedrales que hoy contemplamos con admiración y a las que les reconocemos el mérito de haber sobrevivido al paso del tiempo, son éstas y no las que han caído objeto de nuestro elogio por el simple hecho de seguir ahí.

Pero lo cierto es que el buen diseño de estas estructuras no es en absoluto aleatorio. Aunque la versión estándar es que estos maestros góticos se amparaban en la tradición y en la experiencia acumulada, defiende el doctor arquitecto Santiago Huerta Fernández (profesor de Historia de la Construcción en la UPM), y así es aceptado entre la comunidad experta, la hipótesis de que aunque no existían entonces métodos de cálculo documentados –los primeros manuscritos que se conservan pertenecen al Gótico tardío, s. XV y XVI -, sí que existían reglas geométricas para dimensionar los muros, pilares y estribos de sus construcciones -elementos que concentraban el 85-90 % de la fábrica, consumiendo las bóvedas sólo el 10-15 % restante-.

Entendiendo la tecnología como ‘el esfuerzo que se hace para evitar el esfuerzo’ –por desgracia no recuerdo el autor de a mi parecer tan acertada definición-, y considerando que el esfuerzo repercute en un coste sino humano cuando la mano de obra es barata, por lo menos sí en un coste material, sin duda que en algunos casos la economía debía ser también, junto a la estática, un imperativo de suficiente peso como para merecer de recursos tecnológicos más escrupulosos que la tradición y la mera suerte a la hora de asegurar la buena construcción de éstas estructuras.



[fig.06] Sección Transversal de la Catedral de Chartres (Francia, 1194 – 1260).

Extracto de ‘La Catedral Gótica’. Otto Von Simson, 1982.

La Revolución Científica y después la Revolución Industrial representan un cambio importante de paradigma. La invención de la imprenta y de la máquina de vapor se supone como un gran catalizador hacia un mundo globalizado, donde las personas y la información viajan con rapidez y en el que la tecnología rompe las barreras de lo local y trasciende a un nivel mundial.

Un cada vez mayor control de la energía -del calor y de la electricidad- repercute en un cada vez mayor control sobre la fuerza y sobre la materia.

Aparecen nuevos materiales, el hierro, el vidrio y más adelante el hormigón, que se imponen rápidamente a los más tradicionales. Las tecnologías cambian, evolucionan y se vuelven obsoletas antes incluso de verificarse después que agotada su vida útil.

Así como en la era pre-industrial fue en la Arquitectura donde se exhibía el poder tecnológico -y por consiguiente la fuerza- de una civilización, en la Era Industrial raramente la Arquitectura es protagonista en el desarrollo tecnológico. Las construcciones emblemáticas de la era industrial son ahora un expositor de los logros alcanzados por las estructuras de producción industrial.

Sin embargo, en nuestro campo, el de la Arquitectura, debemos destacar el papel de ciertos agentes especialmente activos en el ejercicio de la investigación tecnológica -Gaudí, Torroja, Candela, Fuller, Frei Otto, et al.- que realizaron un esfuerzo extraordinario para trasladar a la Arquitectura los avances tecnológicos de la época, que desde una visión holística asumieron nuevos retos y desde un prisma científico -que no puramente expresionista- dieron Forma a las que debían de ser las arquitecturas de los nuevos tiempos.

Las catedrales ceden el trono a los estadios, a los aeropuertos y a los rascacielos pero el espíritu de traspasar el límite de lo posible permanece. Es en estas nuevas arquitecturas

singulares donde entran en crisis algunos de métodos analíticos conocidos -la estática tradicional- teniendo que recurrir a nuevos modelos de cálculo -Análisis de Elementos Finitos, Sistemas de Partículas, etc.- desarrollados en otros campos -la industria naval, la aeronáutica, y la automovilística principalmente- y abrir de esta manera nuevas vías de ensayo dentro de la Arquitectura.

Este trabajo pretende recoger algunas de las múltiples estrategias exploradas por estos autores para encontrar la Forma en que una tecnología funciona de manera Óptima. Desde los arriba mencionados Gaudí y Frei Otto, padres del ahora conocido como 'Form Finding', -también Optimización Topológica- hasta la adaptación de los principios en los que éstos se basaban a los procesos típicos de nuestra Era Digital.

La invención del 'bit de información' ha sido el otro gran invento de la Revolución Industrial. Así como motor eléctrico marca el inicio de la Segunda Revolución Industrial, la invención del chip supone la entrada a la Tercera Revolución Industrial o Revolución Digital. La cada vez mayor capacidad de gestionar la información nos ha permitido simular y anticipar con facilidad el comportamiento de las construcciones que proyectamos. El chip ha cambiado la manera como interactuamos -Internet, el 2.0, la Economía Global, etc.-, la manera como diseñamos -el CAD, la infografía, el Diseño Generativo, etc.- y la manera como producimos -Fabricación Digital, Lean Manufacturing, Mass Customization, Open Source Hardware, etc.-

En este mundo cada vez más digital, tecnologías como la del acero, el vidrio o la madera se han adaptado al cambio con notable éxito. Parece que no es así con la tecnología del hormigón armado. Es por eso que vamos a centrar la atención en este material, un peso pesado en el mundo de la construcción pero que parece que se está quedando atrás en la carrera de la Fabricación Digital.

2.1. EL GAUDÍ PARAMÉTRICO

Antoni Gaudí fue quizás el primer arquitecto paramétrico de la historia. El interés que demostró tener por la tecnología está presente en toda su obra, pero es sobre todo en su etapa más tardía –desde la Colonia Güell en adelante– que parece derivar su creación hacia un enfoque menos expresionista y asumir un mayor compromiso con la técnica constructiva.

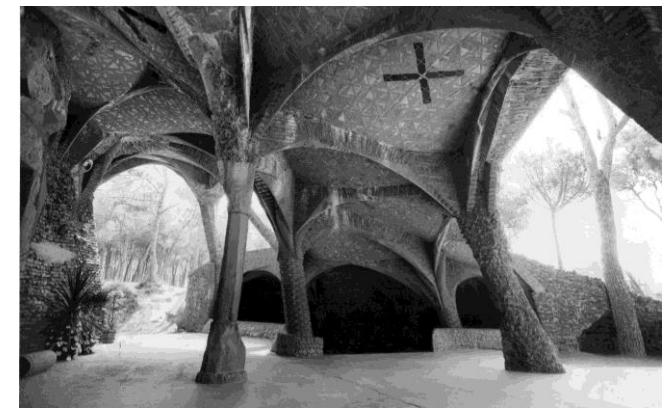
Frecuentemente, en su obra tardía podemos encontrar formas complejas, que aseguraban por geometría el buen comportamiento de sus estructuras –generalmente buscando inscrito en ellas el arco y el trabajo a compresión–. Así podemos encontrar arcos parabólicos (Casa Batlló, Pedrera), paraboloides hiperbólicos (Cripta de colonia Güell) [fig.08], helicoides (escalera en la Sagrada Familia), hiperboloides (Lucernarios SF), conoides sinusoidales (escuelas SF), etc. La mayoría de ellas superficies complejas de doble curvatura pero de relativa sencillez de ejecución al ser todas ellas superficies regladas.

Uno de los recursos más llamativos de los que se sirvió fue el uso de modelos catenarios [fig.07]. Ya era conocido que la forma cercana a la parábola que adapta una cadena trabajando a tracción pura, cuando invertida, permite el trabajo a compresión pura. Podemos encontrar aplicaciones de este principio en algunas iglesias del alemán Heinrich Hübsch poco anteriores a la obra de Gaudí, sin embargo, éste aplicó este principio a modelos invertidos, combinados en las dos direcciones de la horizontal, y que le permitieron adivinar en sistemas de gran complejidad cuál era la Forma Óptima para alcanzar la mayor luz posible con un material a compresión como es la piedra.

A pesar de la actitud mostrada por Gaudí a la hora de incorporar los últimos avances técnicos a sus arquitecturas, resulta curioso cómo, a pesar de ser un gran amigo de la familia Güell, éste no mostró el mismo interés por el hormigón armado, tecnología a la que solo le reconoció la capacidad para ejecutar formas libres con facilidad y que solo le confió la realización de los pináculos de la Sagrada Familia.



[fig.07] Maqueta Funicular para la Iglesia de la Colonia Güell. Barcelona. Antoni Gaudí; Joan Bertrán, 1898-1908.



[fig.08] Cripta de la Colonia Güell. Santa Coloma de Cervelló. Barcelona. Antoni Gaudí, 1898-1908.

2.2. GOMETRÍA DESDE EL ANÁLISIS

Es de a mano de la Ingeniería donde se produce un mayor entendimiento de la tecnología y un mayor avance en la exploración de la Forma a partir de los nuevos materiales.

El suizo Robert Maillart y su concepción de las estructuras como un sistema integrado marcaron un camino que muchos ingenieros seguirían. Sus puentes rompieron la visión de las estructuras como un sistema que combinaba de manera yuxtapuesta por un lado las cargas útiles –la carretera y el peso propio- y por otro lado la estructura para sostenerlas, sino que entendiendo estas dos partes como un todo integrado. Esto se traducía en puentes de extrema elegancia, líneas muy puras y gran economía de material.

Le siguieron de cerca otros ingenieros como Eduardo Torroja o Pier Luigi Nervi, Candela, Eladio Dieste, que también desde una visión analítica y de gran intuición estructural alcanzaron un dominio excepcional del hormigón demostrándose el compromiso necesario entre material y Forma.

R. Buckminster Fuller, aunque con una aproximación más geométrica, centrándose en el acero y los sistemas de barras, introduce al trabajo de los anteriores nuevos conceptos como Reciprocidad y Sinergia. Sistemas como el Tensegrity [fig.12] en los que la resolución de la estructura no es lineal y jerárquica –losa, biga, pilar- sino que los componentes de la estructura actúan todos sobre todos añaden al problema una gran complejidad. Como la tensegridad, las estrategias que Fuller bautizó como ‘Energetic Synergetic Geometry’ (E.S.G.) usaban la geometría para crear sistemas estructurales que conseguían el máximo trabajo con el mínimo material.

Frei Otto profundizará en la exploración de las estructuras recíprocas recurriendo al uso de aparejos analógicos diseñados con el fin de poder reproducir de manera controlada

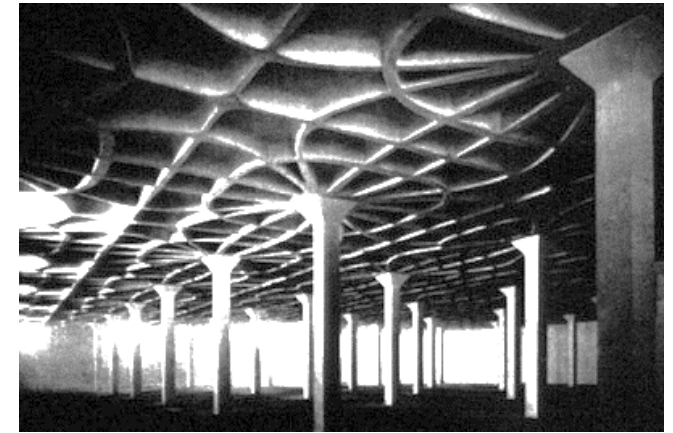
procesos ya existentes en la naturaleza que implican sinergias entre gran número de componentes. Aparejos que devuelven de manera casi inmediata una Forma Óptima que de modo analítico sería infinitamente más laborioso obtener.



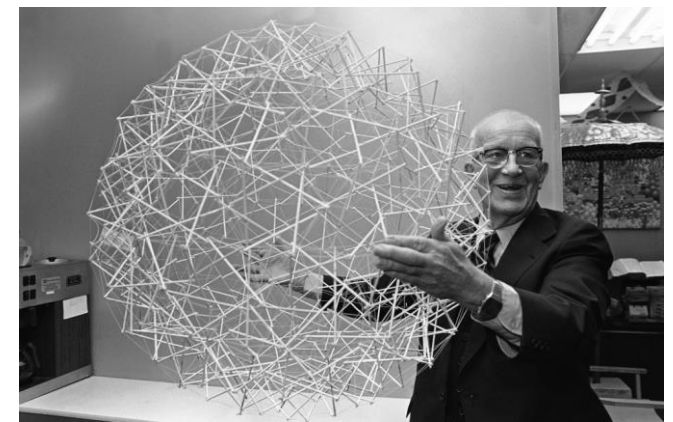
[fig.09] Puente Salginatobel. Schiers, Suiza. Robert Maillart, 1930.



[fig.10] Hipódromo De La Zarzuela. Madrid. Eduardo Torroja, 1934-1941.



[fig.11] Fábrica Gatti. Roma, Italia. Pier Luigi Nervi; Carlo Cestelli Guidi, 1951.



[fig.12] Modelo de S.T.A.R.S. (Spherical Tensegrity Atmospheric Research Station). Richard Buckminster Fuller, 1979.

2.3. FREI OTTO. SINERGIA Y FORMA

Ya desde el principio de su carrera, a finales de los años cuarenta, Frei Otto empieza a experimentar con modelos de cadena suspendida para el análisis y realización de estructuras de bóveda, extremadamente extensas y ligeras.

Desde entonces, conjuntamente con el Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart Trabaja en la reconstrucción de estructuras históricas de bóveda para su análisis y reparación. Esta experiencia sentará las bases para la definición de futuras construcciones de 'Grid Shells'.

Estos experimentos incluyen una gran variedad de materiales. Telas impregnadas de escayola, redes de cadena, membranas de goma, telas elásticas y soluciones de agua y jabón.

En 1996, junto a Bodo Rasch, arquitecto con el que trabajó en el Instituto de Estructuras Ligeras, publicará 'Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal', libro que recoge gran parte de lo explorado en esta aventura y desvela los principios de la Forma Óptima.

Aunque su obra se centra sobre todo en las estructuras tesa-das, estructuras en las que el elemento activo es el tensor o la membrana, trabajando a tracción pura, también explorará sistemas a flexo-compresión o a compresión pura.

A continuación describimos algunos de ellos.

Superficies mínimas

Este es el método que Frei Otto más explotará para su obra. Para obtener la superficie mínima - aquella que cierra un contorno dado con el menor área posible- un modelo con una estructura perimetral de hilo o de alambre rígido se sumerge en una solución de agua y jabón. Al extraer el

aparejo del líquido, cerrando el contorno aparece la superficie deseada [fig.13]. Las partículas de jabón se desplazan libremente a través de la membrana que ellas mismas forman de manera que las tensiones a lo largo de toda ella son constantes.

Esto es especialmente útil para la correcta definición geométrica de las estructuras tesadas. Cuando el perímetro de partida no es regular, resulta muy difícil adivinar cuál debe ser la Forma de la 'tienda' para que la tela trabaje con tensiones homogéneas. Cuando no es así, la estructura se deforma mostrando pliegues y arrugas indeseadas en la lona.

Sistemas de catenaria invertida.

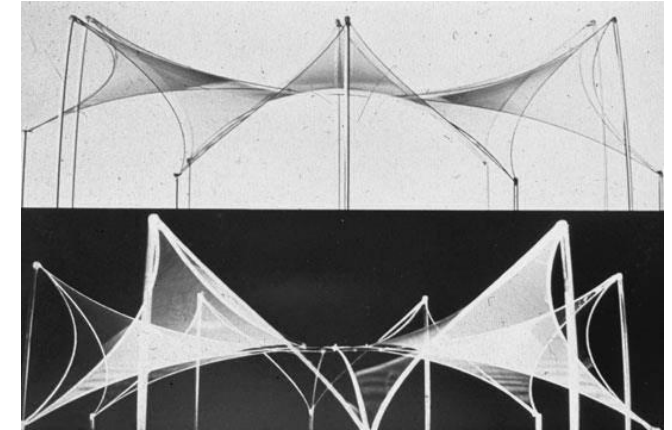
Como buen conocedor de la obra de Gaudí, Frei Otto recuperará algunos de los experimentos de cadena suspendida realizados por el arquitecto catalán. En 1982, desde el Instituto de Estructuras Ligeras, trabajan en la reconstrucción del modelo para la Iglesia de la colonia Güell, ahora expuesto en el museo de la Sagrada Familia [fig.42].

En el Multihalle de Mannheim aplicará estos principios para el que será hasta el momento la mayor construcción existente a compresión. Una 'Grid Shell' -cáscara en celosía- de barras de madera que funciona a flexo-compresión durante el montaje y la manipulación de estas correas y que tiende a funcionar a compresión pura cuando la estructura está consolidada y la madera seca.

Aunque para el desarrollo de este proyecto ya pudieron contar con la ayuda de ordenadores para el cálculo estructural, éstos no disponían por el momento de la suficiente potencia de computación para resolver tan complejos sistemas estructurales por lo que se tuvo que volver al modelo analógico para encontrar la Forma a construir [fig.15].

Realizará también -aunque de forma excepcional- modelos suspendidos para hormigón armado [fig.17]. Uno de éstos

se desarrolla junto al grupo de arquitectos Christoph Ingenhoven and Partner y en calidad de consultor para el proyecto de ampliación de la estación de trenes de Stuttgart -por el momento el proyecto está paralizado-.



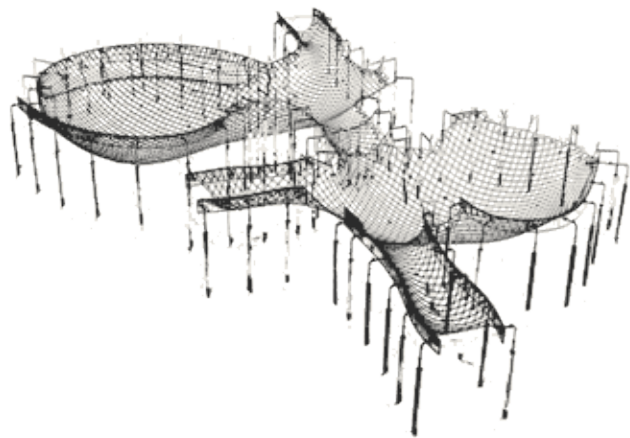
[fig.13] Modelo de Superficie Mínima en Jabón para el Tanzbrunnen. Frei Otto, 1957.



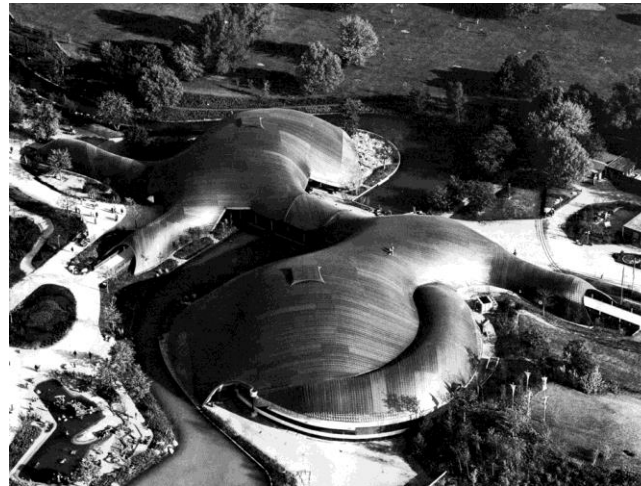
[fig.14] Tanzbrunnen. Colonia, Alemania. Frei Otto, 1957.

Estructuras neumáticas

Se recorta el perímetro deseado en una plancha –de madera contrachapada o metacrilato, por ejemplo- y se sitúa pegada a su cara inferior o atrapada entre esta y otra igualmente recortada una membrana elástica, se vierte encima pasta de yeso y se espera a que ésta solidifique. La forma obtenida será muy parecida a la obtenida por el sistema de catenaria. Aunque podemos considerar válido el procedimiento como alternativa a la catenaria si esta no es posible. Hay que tener en cuenta que la forma obtenida no obedece al principio de la cadena suspendida, la forma es el resultado del equilibrio entre el empuje en todas direcciones del líquido y la tensión de la membrana por lo que el resultado debe de ser interpretado a conciencia. Un empuje excesivo puede provocarnos resultados indeseables –efecto globo- que invertidos y sometidos ahora a gravedad –fuerza de componente únicamente vertical- probablemente no trabajen como previsto.



[fig.15] Modelo Catenario para Multihalle de Mannheim. Frei Otto, 1973-1975.



[fig.16] Multihalle de Mannheim. Mannheim, Alemania. Frei Otto, 1973-1975.



[fig.17] Modelo Suspending para la Nueva Estación de Trenes de Stuttgart. Stuttgart, Alemania. Christoph Ingenhoven and Partner; Frei Otto, 2000.

Estructuras ramificadas

Otra de las exploraciones que Frei Otto realizó -que aunque principalmente dirigidas a estructura metálica, también de posible aplicación al hormigón armado- son las estructuras ramificadas basadas en Sistemas de Trayectoria Mínima o de Mínimo Desviamiento (‘Optimized Path Systems’).

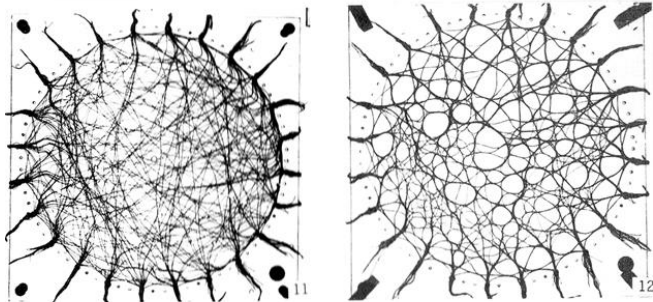
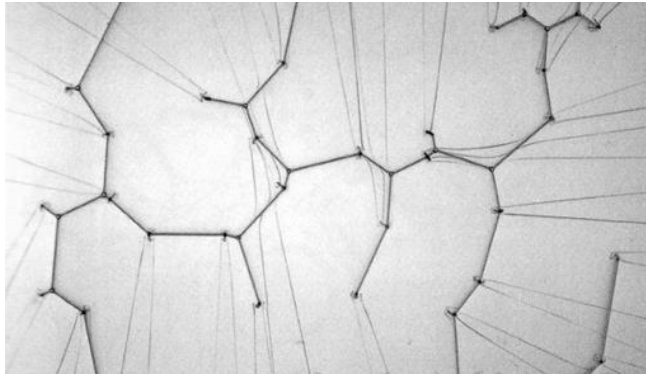
Como alternativa al sistema típico de pilares en el que cada punto de carga conecta directamente a un punto de descarga siguiendo el camino directo –la vertical-, podemos establecer un sistema en que permitiendo una cierta desviación, cierto conjunto de puntos compartan una vía de descarga a un único punto. Con esto conseguimos, aumentando ligeramente la desviación de la descarga de cada punto, reducir enormemente el circuito para el total de los puntos del grupo y por consiguiente reducir enormemente el material necesario para construir la estructura que resuelva el problema.

Para obtener este sistema de ramificación, Frei Otto nos propone algunos métodos.

Si clavamos en un cristal –o metacrilato- un conjunto de alfileres [fig.18] a modo de puntos de carga y sumergimos sus puntas en una solución de agua y jabón hasta hacer contacto la superficie transparente –de modo que no exista aire atrapado- al separarlos de nuevo el jabón describirá el camino mínimo que conecta estos puntos. El modo como coloquemos estos puntos nos establecerá una jerarquía u otra -debemos buscar la analogía con el sistema de puntos de carga y descarga del sistema que buscamos resolver-.

Otro modo de obtener una forma válida es mediante hilos empapados [fig.19, 20]. Si colocamos entre dos planos encarados un conjunto de hilos a los que conferimos cierta capacidad de tensión superficial, éstos tenderán a agruparse para formar un conjunto ramificado. Dependiendo de su capacidad elástica, de cuanta holgura les demos y de la tensión propia del líquido que los empapa, el equilibrio de

fuerzas nos dará un u otro resultado. El óptimo será –como describíamos al principio- el que en su conjunto describa la menor longitud del total de las ramas resultantes.

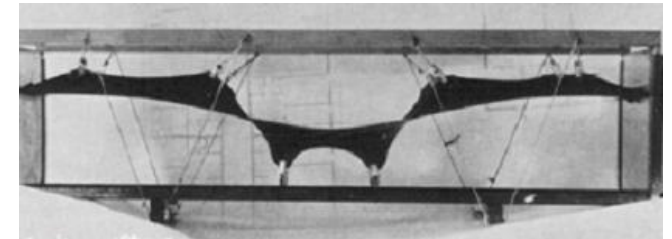
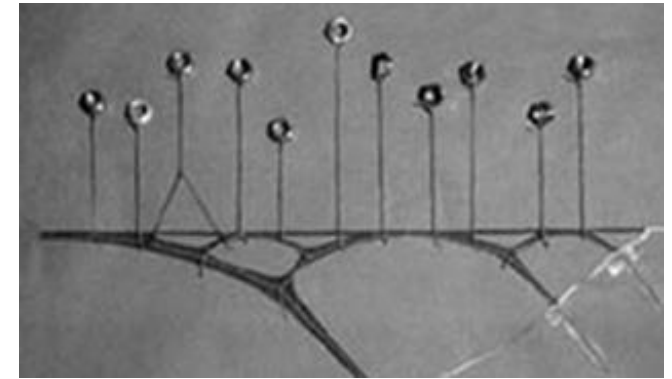


[fig.18,19,20] ‘Optimized Path Systems’ y Estructuras Ramificadas. Frei Otto; University Stuttgart, 1958-1964.

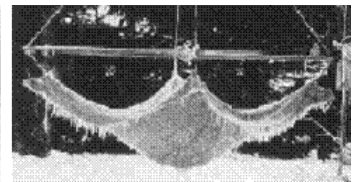
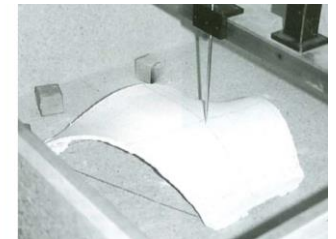
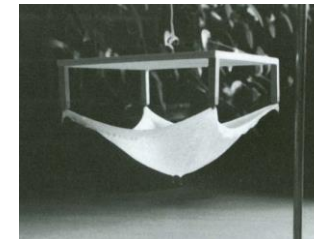
Frei Otto centró su atención sobre todo en el desarrollo de estructuras ligeras y aunque muchos de sus procedimientos son también válidos para el hormigón armado, no existe en su obra realizada ningún ejemplo de aplicación directa con este material.

Sin embargo algunos de estos principios de ‘Form Finding’ explicados, fueron explorados en paralelo por otros ingenieros como el italiano Sergio Musmeci –quien había trabajado con Pier Luigi Nervi- o el suizo Heinz Isler. Musmeci experimentó en varias ocasiones con telas flexibles como el neopreno [fig.21, 22] para el diseño de sus puentes. Una de sus obras más significativas y un buen ejemplo de aplicación de éstas técnicas al hormigón armado es el Viaducto de Basento (Potenza, Italia, 1969).

Isler exploró un gran número de variantes geométricas de ‘Concrete Shells’ obtenidas por la inversión de tejidos pesados endurecidos [fig.23, 24]. Uno de ellos fue reproducido intensivamente –y a partir de un mismo encofrado- para la construcción de cubiertas para pistas deportivas.



[fig.21,22] Modelo Catenario y en Neopreno. Sergio Musmeci, 1960’s.



[fig.23,24] Modelos Catenarios en Tela y Hielo. Heinz Isler, 1960’s- 1980’s.

2.4. DEL ANALÓGICO AL DIGITAL

Explica la ley de Moore que el número de transistores capaz de albergar un chip se duplica –y su coste se divide a la mitad- cada dos años.

Desde el primer ordenador de tarjetas perforadas –el Atanasoff Berry Computer, en 1942-, pasando por la invención del PC –entre 1980 y 1984 los ordenadores IBM y Macintosh dieron el salto a los hogares-, hasta hoy, la ciencia de la computación ha gozado de un ritmo de desarrollo vertiginoso y sin precedentes en otros campos. La misma potencia de computación utilizada en 1967 para la primera operación Apollo –sumando los recursos de computación del MIT y de la NASA-, la llevamos muchos ahora en el bolsillo haciendo funcionar nuestros Smartphone.

No obstante la computación que ahora entendemos como tradicional –la basada en el silicio- parece estar cerca de sus límites. La corriente eléctrica, a escala nano, ya no es tan domesticable, el espacio hasta ahora continuo se comporta como discreto y el electrón escapa de las paredes que lo encierran por efecto túnel.

Ante éste panorama, la ciencia –y la industria- de la computación ya hace tiempo que están haciendo sus deberes y nos hablan de la computación cuántica como la tecnología que jubilará al silicio. El chip cuántico promete un salto enorme en la potencia de computación respecto a la computación tradicional pero, pronostica el Max-Planck Institute for Quantum Optics que, aunque ya tienen un dominio aceptable del átomo, todavía podemos esperar unos quince años hasta poder hablar de ordenadores que funcionen con tecnología cuántica real. Hasta el momento parece que el nanotubo de carbono nos regala algo de tiempo –pues se trata de una tecnología compatible con la del silicio-.

Igual que el ordenador ha sido desde sus principios una herramienta que se ha adivinado crucial para el desarrollo

de muchas ingenierías –la aeroespacial, aeronáutica, naval, automovilística- , la Arquitectura –aunque mucho por detrás- ha visto en la computación un buen aliado. Primero como herramienta de cálculo estructural –recordemos que en la Ópera de Sídney el uso de ordenadores fue decisivo para la resolución de tan compleja estructura que, aunque de manera computarizada, ésta consumía alrededor de 18 horas de cálculo- y luego progresivamente para incorporar al diseño geometrías que de modo analógico serían muy difíciles de gestionar.

SketchPad, proyecto del MIT al que podemos considerar como el primer sistema de CAD, fue la primera máquina que permitía introducir geometría de forma interactiva [fig.26]. Rápidamente, a estos modelos digitales les hemos podido asociar propiedades físicas y simular su comportamiento.

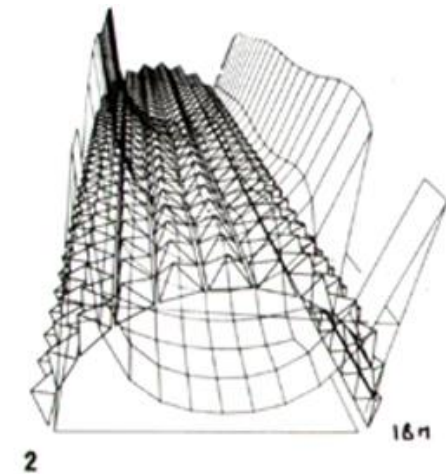
Se antoja casi premonitorio cómo el pabellón itinerante de IBM nos anticipaba ya la relación que desde entonces existiría entre Computación y Arquitectura –como también con el resto de nuestras actividades diarias-. Tan es así que en la fase de diseño del proyecto se incorporó el uso de computación para la simulación de las condiciones lumínicas dentro del cuerpo transparente del pabellón [fig.27].



[fig.25] Trazado de una Spline en el Boeing Engineering Department antes de la definición matemática de De Casteljau (para Citroën) y de Pierre Bézier (para Renault) en 1959.



[fig.26] Programa SketchPad funcionando en el Ordenador Lincoln TX-2. MIT, 1958.

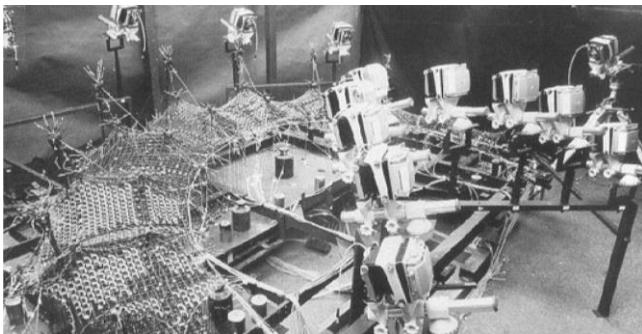


[fig.27] Simulación de las condiciones lumínicas para el Pabellón Itinerante de IBM. Renzo Piano, 1982-1984.

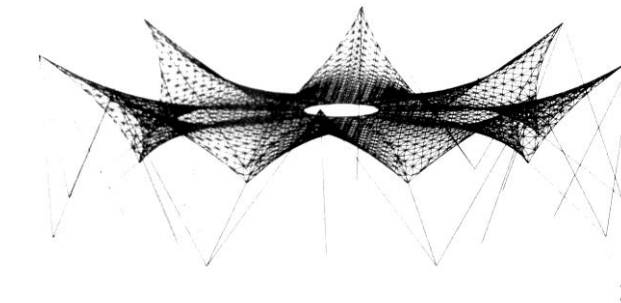
Frei Otto no tardará en incorporar el CAD a su metodología. Los modelos analógicos para el 'Form Finding', aunque nos proporcionan información fiable y no requieren de tecnologías sofisticadas para su ensayo, sí requieren de métodos muy sofisticados para su transcripción geométrica al papel.

Para capturar las formas realizadas en jabón, el equipo de Otto tuvo que recurrir a representaciones ortogonales de sus modelos mediante cámaras fotográficas especiales [fig.28] o a instrumental propio como la que bautizaron como Caja de Luz. Ésta, una cámara estanca y con una atmosfera controlada aseguraba poder estabilizar la membrana de jabón el tiempo necesario para ser medida. Para lograr la representación plana de esta estructura de jabón, y mediante una lente especial, se lograba con iluminación artificial un haz de luz paralela y así proyectar el objeto contra un cristal para su calco.

El cálculo computacional permitía definir matemáticamente estas mismas superficies mínimas obtenidas hasta entonces de manera analógica además de facilitar enormemente la gestión de la geometría obtenida. No obstante, Frei Otto no abandonara el modelo analógico como método de partida, base para el modelo digital, e instrumento de verificación de los resultados obtenidos por la vía analítica.



[fig.28] Fotografiado de modelo estructural para el Estadio Olímpico de Múnich. Frei Otto, 1972.

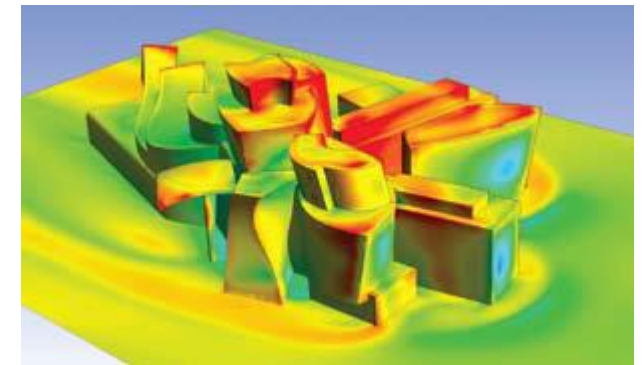


[fig.29] Infografía para el Star-Wave Tent. Thuwal, Arabia Saudí. Bodo Rasch; Frei Otto, 1991.

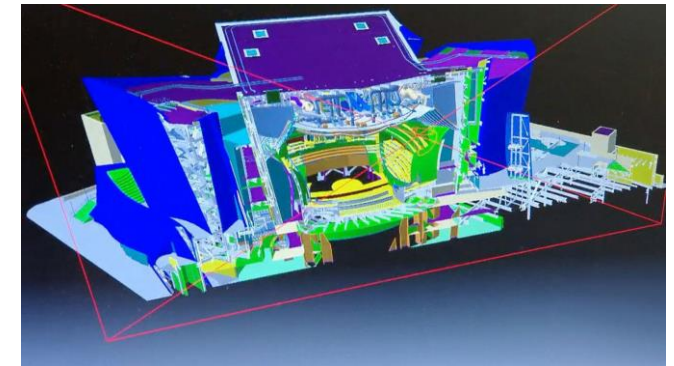
Un agente especialmente relevante -aunque con un enfoque creativo totalmente distinto, típico del deconstructivismo- es el arquitecto Frank Gehry. En el museo que proyecta para Vitra se da cuenta de la dificultad de representar las formas que él imaginaba mediante el sistema tradicional de representación en secciones ortogonales. A partir de este momento incorpora a su trabajo instrumentos propios de la Ingeniería aeronáutica como el software CATIA, aplicación CAD desarrollada desde 1977 por la constructora aeronáutica francesa Avions Marcel Dassault y adquirido poco después por la americana Boeing para gestionar de manera íntegra todo el diseño y construcción de sus aviones. Esto le permite no tan solo poder gestionar de manera eficiente su tan compleja arquitectura [fig.31] sino poder ensayar su comportamiento ante múltiples situaciones ambientales.

Bilbao fue especialmente relevante en la medida que estableció un precedente importante en la incorporación al ejercicio de la Arquitectura de simulaciones complejas. La atmósfera de la ciudad se advirtió especialmente agresiva con la arquitectura propuesta del arquitecto por lo que fue necesario comprobar la envolvente frente efectos de turbulencia por la acción de viento, frente al riesgo especial de erosión por impacto de partículas y frente a la oxidación y alteración del aspecto de la fachada metálica ante una atmósfera tan hostil [fig.30].

En esta línea de acción, junto a Frank Gehry, también destaca el trabajo de arquitectos como Norman Foster y más adelante Toyo Ito, que siempre de la mano de la ingeniería -y abalados por nombres tan notables como Ove Arup o Mutsuro Sasaki- han establecido un referente en el uso de las tecnologías CAD-CAM y la incorporación del que serán las futuras herramientas BIM (Building Information Modeling) a la práctica común de nuestro oficio.

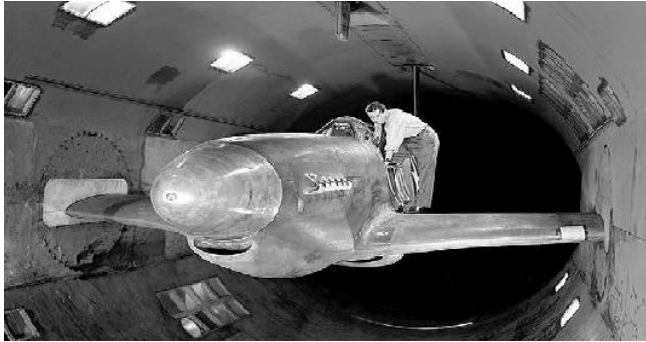


[fig.30] Simulación por CFD (Computational Fluid Dynamics) de la erosión por impacto de arena para el Museo Guggenheim de Bilbao. Frank Gehry, 1997.



[fig.31] Modelo en CATIA para el Walt Disney Concert Hall, Los Angeles, EEUU. Frank Gehry, 2003.

2.5. ARQUITECTURA DE LAS ENVOLVENTES



[fig.32] Ensayo de la respuesta aerodinámica de un avión en un túnel de viento.

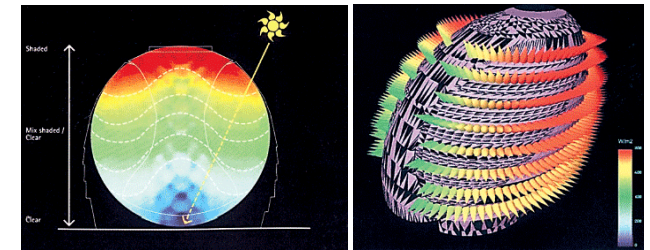
La cada vez mayor capacidad de cálculo de los ordenadores que ya hemos incorporado al oficio de la Arquitectura nos está permitiendo cargar a la geometría del modelo digital un cada vez mayor número de capas de información y de propiedades.

El banco de pruebas analógico desaparece en beneficio de la simulación digital repercutiendo directamente en un ahorro importante de medios y aumentando exponencialmente las posibilidades de diseño respecto al proyectar sobre modelos físicos.

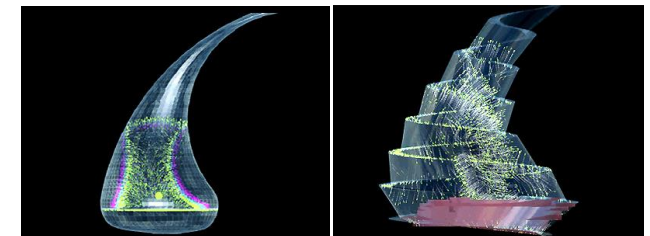
Tanto el City Hall de Londres como la torre Swiss Re, ambas obras de Foster and Partners, son ejemplos muy ilustrativos del potencial que implican estos métodos para el diseño de las envolventes. Más allá de poder anticipar con fiabilidad las condiciones de asoleamiento y comportamiento térmico del edificio proyectado, una cada vez mayor capacidad de cálculo nos permite integrar –y así se hizo en el City Hall [fig.33]- estos procesos en la fase de diseño y poder ensayar cuantas veces se desee la Forma como elemento generador de proyecto.

La envolvente del auditorio del mismo proyecto se diseñó por el mismo proceso de aproximación a la Forma Óptima mediante el reiterado ensayo y análisis [fig.34], con el fin de controlar la buena dispersión del sonido reflejado y por tanto conseguir la mejor acústica.

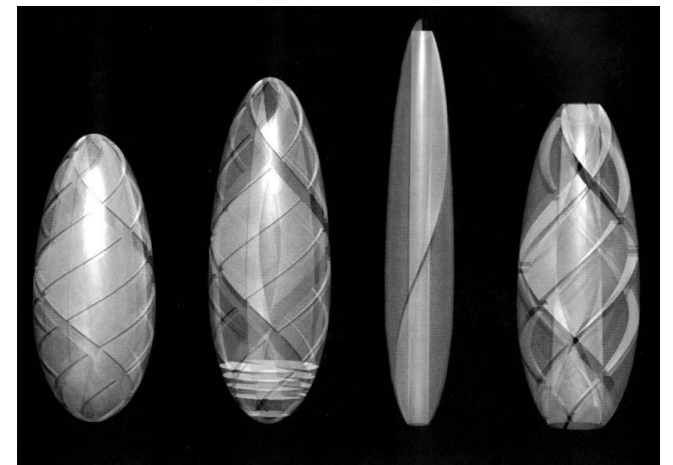
Por el mismo procedimiento, la torre Swiss Re fue objeto de consecutivos ensayos para alcanzar la Forma que garantizara el mejor comportamiento frente al empuje del viento. Con el fin de evitar las tensiones que aparecen en las esquinas cuando un prisma es sometido a una presión de viento, Foster and Partners partió de varias geometrías fusiformes [fig.35] que tras consecutivos ensayos fueron derivando a la que será la forma final del edificio. Este proceso que de manera digital resulta razonablemente ágil, hubiera implicado un esfuerzo enormemente mayor si se hubiera hecho de manera analógica en un túnel de viento.



[fig.33] Simulación del comportamiento térmico para el City Hall de Londres. Norman Foster, 1998-2002.



[fig.34] Simulación acústica para el City Hall de Londres. Norman Foster, 1998-2002.



[fig.35] Ensayo de varios modelos digitales de partida para la torre Swiss Re. Norman Foster, 2001-2003.

2.6. PARAMETRICISMO



[fig.36] Formaciones Hexagonales de Basalto en el Giant's Causeway, Irlanda.

El uso del término 'paramétrico' dentro del contexto del diseño computacional surge y se populariza en la década de los setenta referido a la manera como poder representar curvas complejas –splines, NURBS- a través de definiciones matemáticas y variables manipulables denominadas 'parámetros'.

El uso del término puede parecer desafortunado para algunos. A menudo se ha renegado del concepto Arquitectura Paramétrica alegando a que, entendiéndolo como así lo define la RAE que Parámetro es un 'Dato o factor que se toma como necesario para analizar o valorar una situación.' toda arquitectura es paramétrica en el sentido que parte de parámetros –ambientales, geográficos, de programa, etc.-.

Por supuesto que el uso del término no se refiere a que se tengan en cuenta o no estos parámetros sino más bien a que lo que lo distingue es que el actor no interviene directamente sobre la geometría sino sobre estos parámetros iniciales, a través de reglas geométricas o algoritmos.

No es la mano alzada sino el conjunto de parámetros y reglas que genera la Forma. Y si se modifica alguno de los parámetros o alguna de las éstas reglas, de manera automática se regenera el objeto final.

Así resulta que el proceso de diseño no es destructivo –en el sentido de ejercicio lineal en que cada acción destruye el estado anterior de diseño- sino que permite revisar -o simplemente intervenir en- cualquier punto del proceso de diseño sin romper la cadena entera.

En éste sentido, si se quiere y se considera menos ambiguo, podemos sustituir el término 'paramétrico' por 'generativo'.

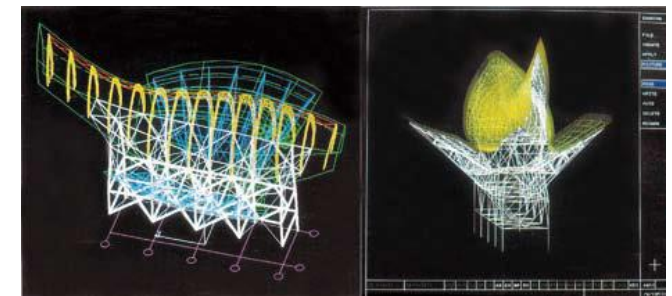
Los ejemplos más tempranos que podemos encontrar sobre la aplicación de éstos procesos de definición paramétrica en Arquitectura son seguramente el Olympic Fish de Frank Gehry y la ampliación de la terminal de trenes de Waterloo de Nicholas Grimshaw.

Ambos casos son ilustrativos de como mediante programación, el diseño computacional nos permite realizar procesos geométricos de manera automatizada sobre un gran número de elementos diferentes pero de igual topología como punto de partida.

El Olympic Fish consiste en una estructura formada por dos partes bien diferenciadas. La primera, el elemento representativo, la abstracción de un pez en forma de una piel en celosía siguiendo una superficie de doble curvatura. La segunda, una estructura ligera de elementos lineales que la sustenta.

Se trata de la primera obra en la que el equipo de Frank Gehry recurre a un software con capacidad de trabajo paramétrico como es CATIA [fig.37], en éste caso buscando la manera de trabajar de manera ágil e integrada la definición y manipulación de la superficie representativa del pez y la definición paramétrica de su detalle constructivo.

La propuesta de Grimshaw para el proyecto de ampliación de la estación terminal de Waterloo tenía como elemento característico una cubierta ligera que encerraba en bóveda las cinco nuevas vías formando una superficie de Forma Libre y sección irregular.

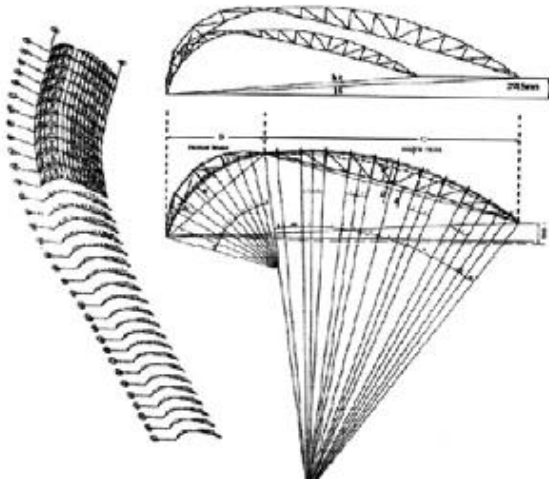


[fig.37] Modelo en CATIA para el Olympic Fish de Barcelona. Frank Gehry, 1992

La planta estaba condicionada por el trazado de un patio de vías existente en uno de los costados y el vial de la ciudad ya consolidada del otro, representados ambos por curvas spline –y por tanto de curvatura diferencial- .

Con el fin de resolver de manera conjunta y de forma paramétrica cada uno de los pórticos que conforman la estructura –cada uno con una luz distinta- se estableció para todo el sistema la misma regla [fig.38]. Esto es para cada sección, un pórtico tri-articulado formado por la combinación de dos arcos de circunferencia –uno por cada orientación, el lado este íntegramente de vidrio- unidos en la cumbre tangentes con el plano horizontal, y con radio y altura en función de la luz que se cubre en su sección.

El conjunto de estos perfiles conforman una superficie continua en su definición matemática que para su construcción se resolvió de manera semidiscreta –es decir por secciones de curvatura simple- en su parte opaca y de manera discreta –es decir mediante el teselado de la superficie original en elementos planos- en su parte vidriada.



[fig.38] Estación de Waterloo. Londres, Reino Unido. Nicholas Grimshaw, 1993.

Lo que en un principio se utilizó como método para resolver problemas geométricos de manera automatizada –todavía vigente hoy, en el Aeropuerto Internacional de Shenzhen Bao'anpor, se recurre al mismo tipo de procedimiento para resolver una estructura de aproximadamente 400 mil elementos distintos [fig.39]- en una segunda etapa se empieza a entender ya no únicamente como una manera de generar Forma desde la propia Forma sino una manera de generar Forma a partir de capas de información no relacionadas directamente con la geometría.

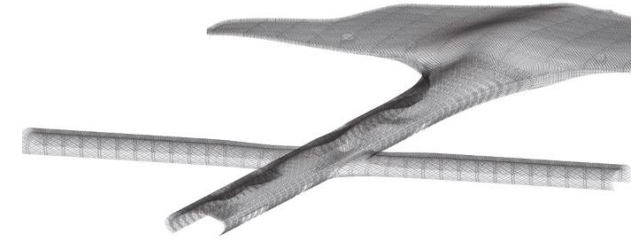
El Pabellón Dynaform, para BMW pretendía ser un espacio que comunicara al visitante la sensación de dinamismo y velocidad propios de sus automóviles. La forma del pabellón surge de la solidificación de la turbulencia –obtenida mediante simulación [fig.40]- que origina un automóvil al cruzar el espacio del recinto de exposición.

En la Bienal de Arquitectura de Venecia de 2008, Patrick Schumacher, socio de Zaha Hadid Architects, defiende en su ‘Manifiesto Parametricista, el Parametricismo como estilo’, el parametricismo como un movimiento arquitectónico ya consolidado y capaz de “organizar y articular la creciente complejidad de la sociedad post-fordista”.

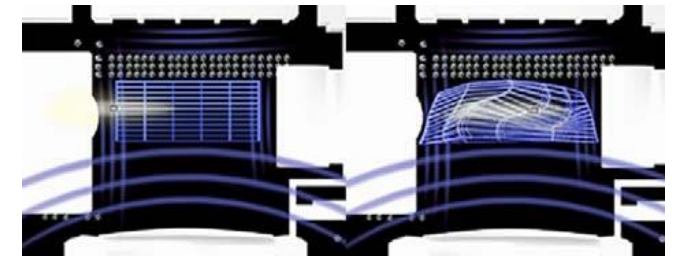
Añade que “la sociedad de masas caracterizada por unos sencillos y casi universales estándares de consumo ha evolucionado hacia la heterogénea sociedad de la multitud” y propone el Parametricismo como estilo –entendiendo como estilo un programa de diseño e investigación colectivo y coherente con una estructura teórica común- desde el que poder dar respuesta al nuevo paradigma mediante una heurística íntegramente paramétrica.

En la base del parametricismo existe una manera de actuar inversa a la tradicional. Nuevos conceptos como ‘script’, ‘down-up’, emerger, iteración, mutación, evolución, genotipo, fenotipo, se convierten en herramientas habituales en un estilo que ve en los procesos naturales de generar Forma –y al que hace constantes alusiones- la mejor referencia

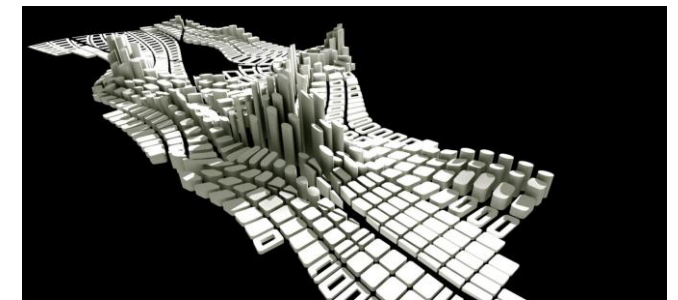
para resolver los problemas de una sociedad cada vez más orgánica.



[fig.39] Aeropuerto Internacional de Shenzhen Bao'anpor. China. Massimiliano and Doriana Fuksas, 2008-2015.



[fig.40] BMW Dynaform Pavilion. Frankfurt, Alemania. Bernhard Franken , 2001.

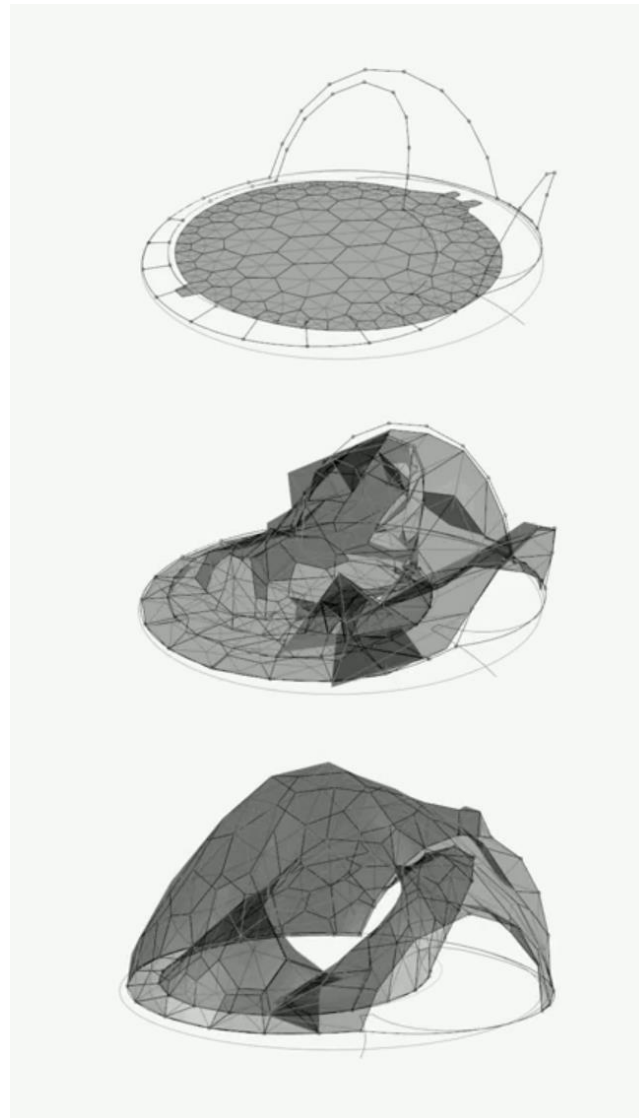


[fig.41] Extracto del ‘Parametricist Manifiesto’ Patrik Schumacher, 2008

2.7. SINERGIA Y FORMA 2.0



[fig.42] Reconstrucción de la Maqueta Funicular de Antoni Gaudí y Joan Bertrán para la Iglesia de la Colonia Güell.



[fig.43,44] ICD/ITKE Research Pavilion. Stuttgart, Alemania. Universidad de Stuttgart, 2011.

La geometría programada nos permite recrear, ahora en un modelo digital, estos mismos procesos de ‘Form Finding’ que desde Gaudí hasta Frei Otto se realizaron de manera analógica. Sistemas geométricos en los que a cada elemento se le puede atribuir un comportamiento físico, en los que podemos asignar a cada punto un conjunto de fuerzas y vectores que nos desplacen la geometría, recalculando la nueva situación en cada iteración, hasta alcanzar el estado de equilibrio y reposo.

La capacidad de los métodos analógicos para gestionar las complejas sinergias derivadas de la combinación de fuerzas naturales, ahora se nos amplía con la posibilidad de inventar nuevas fuerzas –como igualar longitud, igualar área, hacer plano, etc. –que extrañamente podríamos encontrar de modo literal en el mundo real, pero que en el mundo digital podemos definir con facilidad dando al parámetro deseado una energía potencial que entre en sinergia con el sistema.

En este sentido, podemos encontrar algunas primeras experiencias como el ICD/ITKE 2011 Research Pavilion en los que se ha trasladado de manera casi literal [fig.43] los principios de ‘Form Finding’ propios de la generación analógica. En muchos de los casos se trata de ejercicios académicos de relativa sencillez en la estrategia pero de un indiscutible valor pedagógico.

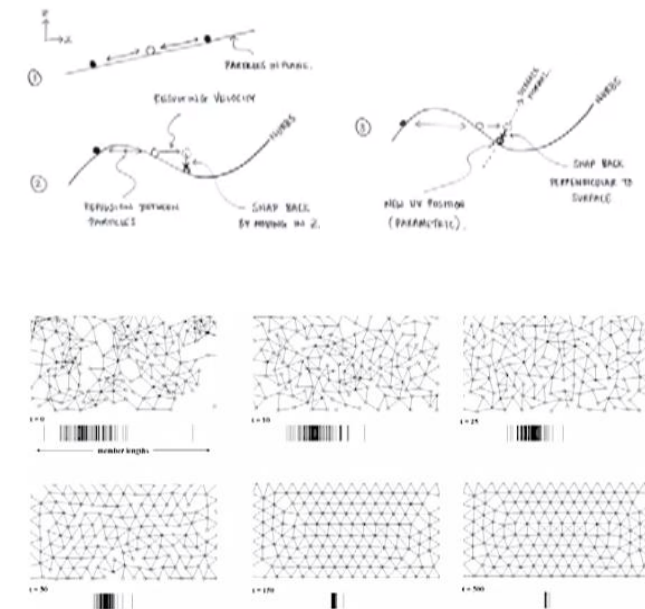
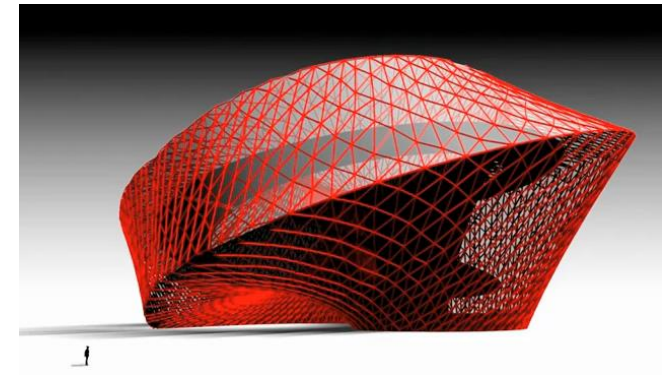


En una segunda etapa, y a otra escala mucho más exigente existen otras experiencias en las que la estrategia definida contempla estos mismos principios de equilibrio pero a un nivel mucho más abstracto y sofisticado.

Vale la pena conocer el trabajo de la Ingeniería Ramboll Computational Design para la resolución de la fachada de la Biblioteca Presidencial de Astana. Ésta se plantea como una estructura de malla triangular que define una superficie continua plegada alrededor del cuerpo principal de la Biblioteca en forma de cinta de Moebius.

Una malla regular implica un comportamiento no uniforme a nivel estructural y eso implica o bien un sistema de secciones variables o bien un sistema sobredimensionado. La malla deseada debía de ser la que permitiera mediante elementos de igual sección trabajar de la manera más uniforme posible [fig.45].

La estrategia utilizada tiene que ver con algunas de las experiencias para resolver sistemas de ocupación ya exploradas anteriormente por Frei Otto en las que se utilizaban como nodos boyas flotantes cargadas magnéticamente. Ahora, sin embargo podemos curvar digitalmente la superficie de agua [fig.46] de manera que la tensión superficial que mantiene la partícula unida a la superficie ya no se limita al plano horizontal sino que se extiende a múltiples elementos -superficies o líneas curvas- que se combinan y se resuelven conjuntamente.



[fig.45,46] Estrategia de Optimización Estructural para la Biblioteca Presidencial de Astana. Astana, Kazajistán. BIG Architects; Ramboll Computational Design, 2009.

2.8. ALGORITMO GENÉTICO Y ‘MACHINE LEARNING’



[fig.47] Ejemplos de Endoesqueletos de diversos animales.

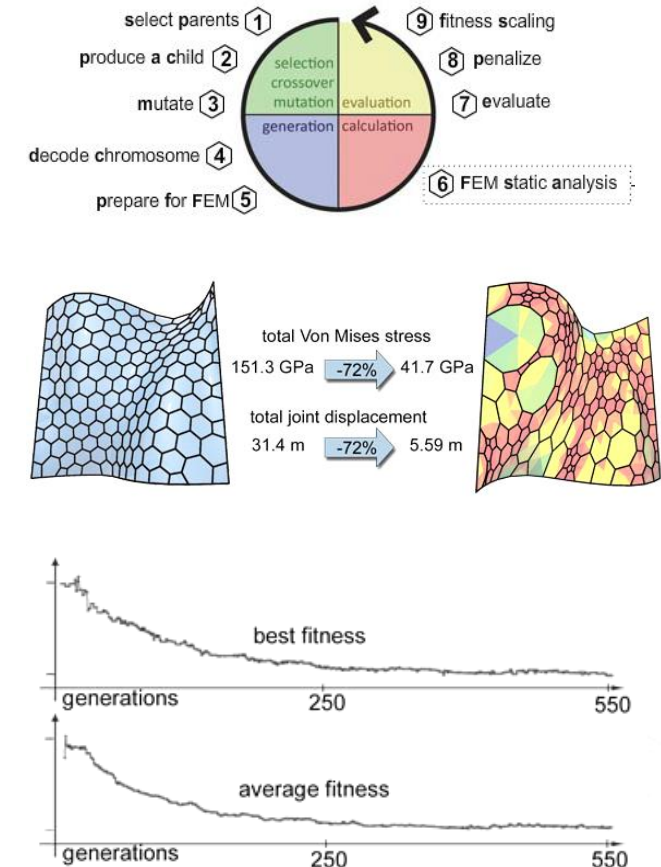
En los años 70 surgió, de la mano de John Henry Holland, doctor en ciencias de la computación de la Universidad de Michigan, la que sería una de las líneas más prometedoras de la Inteligencia Artificial, la de los Algoritmo Genéticos (GE). El método, inspirado en los procesos evolutivos naturales, se basa en la mutación y selección de una población de individuos con el fin de resolver un problema específico.

El programa crea a partir de un genotipo inicial un conjunto de variantes que, según un criterio establecido, se analizarán con el fin de encontrar a la que mejor se adapta. Según la clase de algoritmo, el proceso puede ser más o menos complejo. Desde el simple uso de la ‘fuerza bruta’ de computación para la generación y análisis de un gran número de variantes hasta procesos en los cuales al análisis y selección se les añade cierta intención a modo de cómo se cree que funciona la selección natural.

Explica Greg Lynn (profesor en la Universidad de Artes Aplicadas de Viena), uno de los padres del diseño generativo, el concepto de Algoritmo Genético, a partir del ejemplo del pez martillo. Éste, igual que muchas otras especies, no apareció fruto de la progresiva diferenciación de sus predecesores, mutación tras mutación, hasta reconocerse como una especie diferente. La versión más aceptada dentro de la biología evolutiva es que el pez martillo surgió de una sola mutación que le diferencio de sus antecesores por tener una morfología diferente a ellos. Éste sobrevivió ya a partir de él, se considera, se produjeron pequeñas variaciones –a base de consecutivas nuevas mutaciones- que permitieron a la nueva especie una cada vez mejor adaptación al entorno.

El trabajo de Milos Dimcic para la optimización de mallas estructurales es ilustrativo de cómo estos métodos nos pueden ser útiles para encontrar geometrías más eficientes. Su tesis “Structural Optimization and Design of Free Form Grid Shells Based On Genetic Algorithms” demuestra como mediante el uso de Algoritmos Genéticos, combinados con métodos de análisis estructural basados en Elementos Finitos

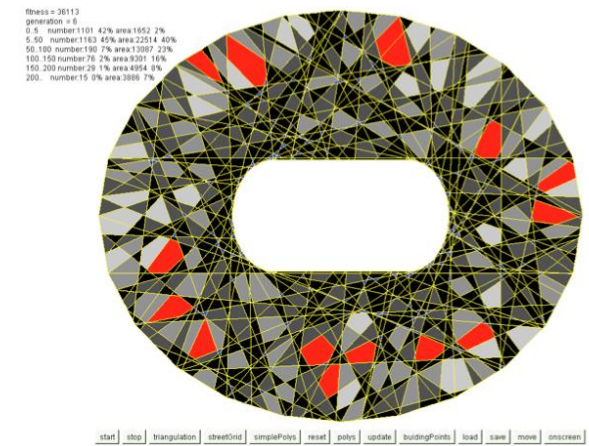
(FEM), podemos optimizar nuestras estructuras en una parte muy significativa –para la malla expuesta [fig.48], una disminución de los esfuerzos de hasta tres cuartas partes, o bien del desplazamiento en la misma proporción-.



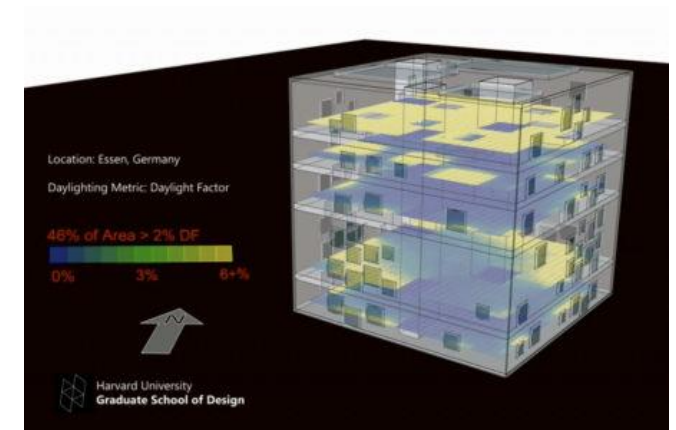
[fig.48] Extracto de ‘Structural Optimization and Design of Free Form Grid Shells Based On Genetic Algorithms’. Milos Dimcic, ITKE (Universidad de Stuttgart), 2011.

Cuenta Ludger Hovestadt (profesor de Computer Aided Architectural Design (CAAD) del Swiss Federal Institute of Technology) como se aplicaron técnicas similares para resolver la estructura de Herzog & De Meuron para el Estadio Olímpico de Pekín. Ésta, tal y como representada en la imagen ganadora del concurso, no era una estructura construible. Con el tipo de retícula propuesta, cuando la distribución de barras y agujeros era satisfactoria desde uno de los frentes de la estructura (el mostrado en el render), desde el frente opuesto no lo era. Para encontrar la combinación aleatoria de barras satisfactoria y que permitiera a la vez ser construible, se escribió un programa definiendo algebraicamente las condiciones de diseño y composición [fig.49] de manera de poder descartar todos los resultados no válidos obtenidos iteración a iteración durante varios días de cálculo y así obtener un conjunto de resultados válidos y construibles.

El trabajo de SANAA para la Zollverein School of Management and Design en Alemania, nos demuestra como la computación evolutiva puede aplicarse también en Arquitectura para la resolución de problemas más allá del ámbito estructural. Los huecos de fachada se distribuyen libremente por la envolvente del edificio con el fin de lograr unas condiciones lumínicas específicas en su interior [fig.50]. Como en el caso anterior el programa gestiona el total de resultados validos e inválidos dentro de los parámetros establecidos, en ambos casos asumiendo un amplio rango de aleatoriedad en el diseño.



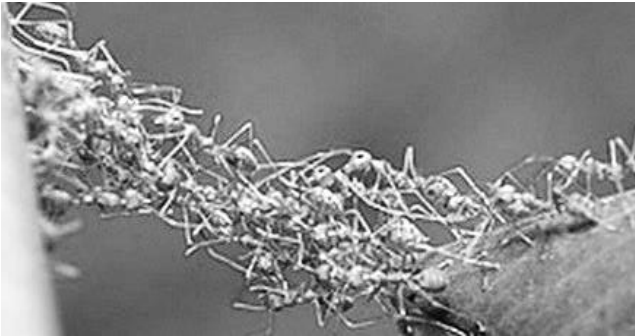
[fig.49] Estadio Nacional de Pekín. Pekín, República Popular China. Herzog & De Meuron; Ove Arup and Partners, 2008.



[fig.50] Escuela de Gestión Empresarial y Diseño de Zollverein. Essen, Alemania. SANAA, 2006.

Extracto de 'Animated Building Performance Simulation'
K. Lagios, J. Niemasz & C.F. Reinhart (Universidad de Harvard), 2010.

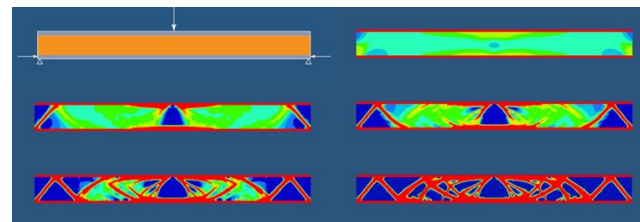
2.9. OPTIMIZACIÓN EVOLUTIVA ESTRUCTURAL



[fig.51] Ejemplo de Auto-Organización e Inteligencia Colectiva en un Enjambre de Hormigas.

Una de las aplicaciones de la computación evolutiva y que ha derivado en una disciplina muy específica es la de la Optimización Evolutiva Estructural –también conocida como Optimización Topológica para no ser confundida con otras aplicaciones del método descrito en el capítulo también dentro del campo de las estructuras-. La técnica desarrollada en el RMIT durante la década de los 90 por los Profesores Mike Xie and Grant Steven, persigue la condición de que para un estado de cargas, unas propiedades mecánicas determinadas y unas condiciones de espacio y de galibo dadas, el material ineficiente se elimina resultando la Forma Óptima [fig.52].

Según la primera definición del procedimiento, las partículas del sistema se eliminan tras consecutivas iteraciones y análisis F.E.M. de los estados intermedios hasta lograr un sistema que funcionara uniformemente a compresión o tracción pura. Desde esta primera definición hasta ahora, la técnica ha gozado de un notable desarrollo desde múltiples nuevas estrategias –sistemas de partículas que se desplazan, o que actúan como autómatas autónomos modificando su estado según el de sus partículas vecinas- o con la combinación de los esfuerzos- pudiéndose trabajar ahora con compuestos de varios materiales y por lo tanto con ambos esfuerzos –de tracción y compresión- combinados.



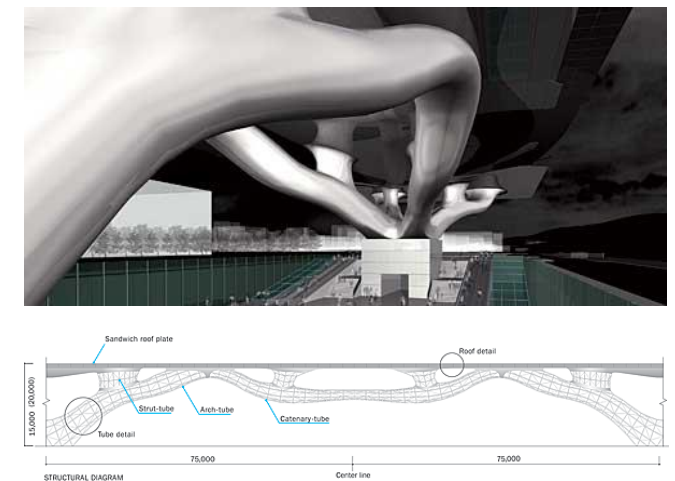
[fig.52] Ejemplo de ‘Evolutionary Structural Optimization’ (ESO) para una biga biapoyada con una carga central. Professors Mike Xie; Grant Steven, 1992.

En el campo del diseño industrial, el método está ya presente y de manera consolidada tanto para la optimización de componentes mecánicos –el chasis de los automóviles,

fuselajes de avión- como para la definición conceptual y punto de partida para el diseño de nuevas piezas. Sin embargo, en el campo de la Arquitectura y de la Ingeniería civil, son todavía muy pocos los ejemplos construidos.

Arata Isozaki, junto con el ingeniero Mutsuro Sasaki es quizás el arquitecto que más esfuerzos ha realizado para incorporar y ensayar esta tecnología en la Arquitectura. Ya desde tiempos tempranos en que el método era todavía relativamente novedoso existen los primeros intentos – como la propuesta para el concurso de la Nueva Estación de Florencia [fig.53]- de trasladarlo a la gran escala, pero no es hasta una década después que el arquitecto construye su primera estructura tal y como planteada inicialmente.

Sí que existe algún ejemplo realizado dentro de este período, como el Akutagawa West Side Project [fig.54], un pequeño ensayo con la participación de la universidad de Nagoia, pero realizado a una escala mucho más modesta y aplicado a procedimientos constructivos ya conocidos como es un encofrado plano de hormigón armado.



[fig.53] Concurso para la Nueva Estación de Florencia. Florencia, Italia. Arata Isozaki; Mutsuro Sasaki, 2002.

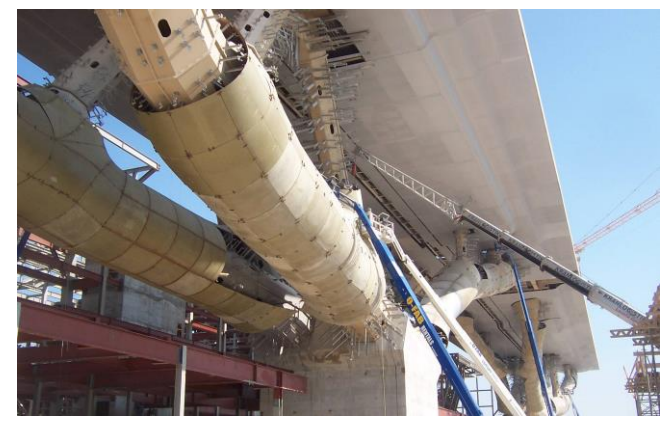
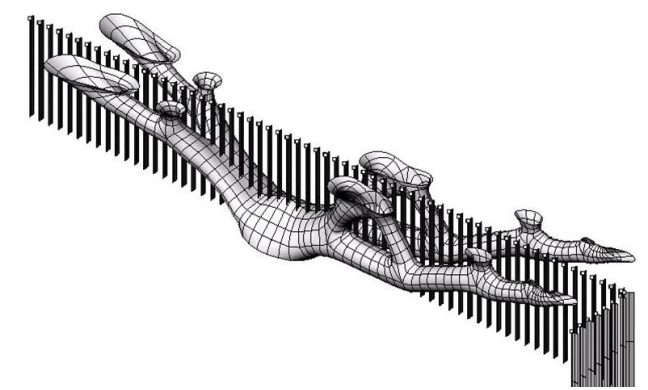


[fig.54] Akutagawa West Side Project. Osaka, Japan. Iijima Architects; Universidad de Nagoia, 2002-2005.

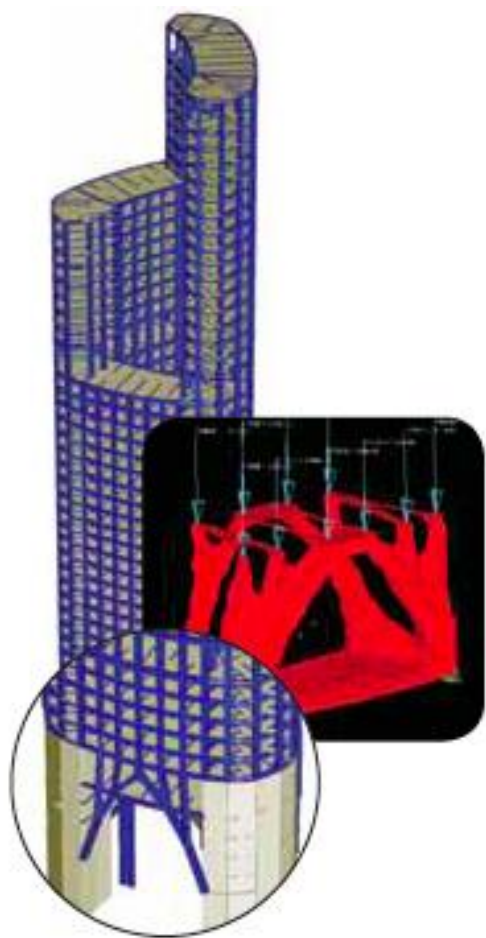
La estructura construida por Isozaki y Sasaki para el Centro Nacional de Convenciones de Catar consiste en una gran plataforma plana que hace de cubierta, soportada simétricamente por dos subestructuras ramificadas idénticas [fig.55]. Éstas están construidas por una doble piel metálica, la capa exterior, una representación casi literal de la geometría obtenida del cálculo, eso es una superficie continua, orgánica y de doble curvatura, y la interior, el alma estructural, una representación simplificada mediante elementos planos.

En la mayoría de los casos de aplicación del método – por ejemplo la solución para el arranque de la estructura de hormigón de la torre Burj Khalifa- existe un trabajo de interpretación y estilización del resultado obtenido para que éste pueda ser construido. Tanto en la pequeña escala del diseño industrial como en la gran escala de la Arquitectura y la Ingeniería, la realización de las geometrías libres típicas de la Optimización Topológica es de difícil y costosa ejecución. El rango de variantes entre lo óptimo y lo estándar es amplísimo y la Forma final dependerá de una manera muy íntima de las tecnologías implicadas en su fabricación.

Aunque la propuesta formal de Isozaki parece ser la de la representación literal del resultado obtenido por el método de Optimización Topológica, en la realidad existe un esfuerzo importante para refinar y estilizar la Forma tal como resultado directo del cálculo de optimización. Para poder ofrecer la imagen orgánica deseada, no solo hubo que disgregar la estructura en dos partes –la representativa y la estructural- sino también hacer un esfuerzo para reducir al mínimo el número de secciones con doble curvatura.



[fig.55,56] Centro Nacional de Convenciones de Catar. Doha, Qatar. Arata Isozaki; Mutsuro Sasaki, 2011.



[fig.57] Torre Burj Khalifa. Dubái, Emiratos Árabes Unidos.
SOM Architects, 2004-2010.

CAPÍTULO 3.

FABRICACIÓN DIGITAL Y HORMIGÓN ARMADO

Si el primer pilar de la Revolución Digital era –como se ha desarrollado en el capítulo anterior- la capacidad de gestión de la información, el segundo es la Fabricación Digital.

El invento del bit como sistema de lenguaje basado en la corriente eléctrica nos ha permitido no solamente controlar con eficiencia la información sino también la fuerza. Las máquinas de cómputo que primeramente se construyeron para realizar operaciones de cálculo, en una segunda etapa nos sirvieron también para controlar el motor eléctrico.

Uno de los primeros pasos que se dieron en esta dirección fue como proyecto de investigación del MIT en la década de los 40. Ésta primera máquina de fresado operada por Control Numérico [fig.58] no estaba estrictamente conectada a un ordenador sino que funcionaba con información introducida por bandas perforadas de manera que podía realizar un trabajo determinado idénticamente repetidas veces. No es hasta 1959 que la empresa Kearney & Trecker lanza la primera máquina CNC -la Milwaukee-Matic-II [fig.59]- para uso comercial.

Aunque demostrado el gran potencial que ofrecían estas máquinas, su inclusión al sistema productivo no fue inmediata. La necesidad de conocimientos especiales tan alejados de los sistemas de fabricación tradicionales, más el hecho de que no existiera un lenguaje de programación universal para su manipulación se entendió en un primer momento como un hándicap importante.

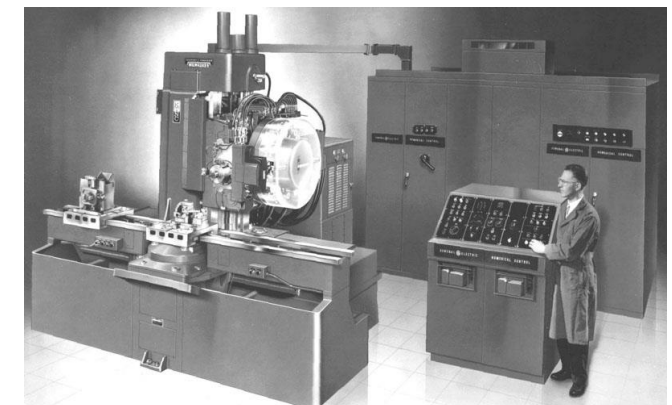
Durante la década de los 60, la popularización de los microordenadores –para nosotros, ahora, no tan micro- , la aparición del CAD y del G-Code –lenguaje de Control Numérico desarrollado también por el MIT y reconocido como protocolo universal-, dan a la nueva tecnología el impulso que necesitaba para su consolidación.

La entrada de la tecnología CNC ha cambiado desde entonces la manera como fabricamos. Empezando en la industria aeronáutica y del automóvil, el uso del CAM (Computer

Aided Manufacturing) ha penetrado hasta nuestros hogares –la impresora es quizás el ejemplo más paradigmático de este cambio- y puesto en crisis el viejo modelo Fordista. Como expresa Jesús Anaya (Doctor Arquitecto y profesor en Universidad Politécnica de Madrid UPM), “estamos en el camino en que costara lo mismo fabricar uno mil veces, que fabricar mil veces uno”



[fig.58] Recorte de Prensa sobre la 1ª Máquina CNC. MIT, 1946



[fig.59] Milwaukee-Matic-II de Kearney & Trecker, 1959.

3.1. LA CADENA DIGITAL

En Arquitectura los primeros ensayos relevantes que se realizan en ésta dirección proceden del ímpetu innovador del arquitecto Norman Foster.

La primera de las aventuras fue la construcción durante la década de los 80 del Banco de Shanghai en la que el equipo de Foster asumió el reto de construir el cerramiento de fachada con tecnología CNC simplemente porque podían hacerlo. El cliente demandaba un edificio singular que fuera representativo de su marca, y aunque aquello implicaba un sobrecoste en I+D, el presupuesto no fue un impedimento.

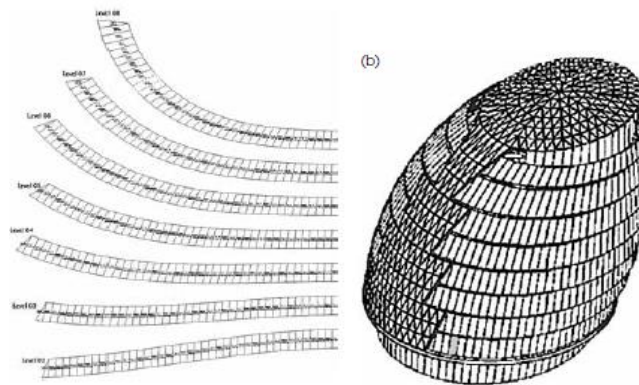
Las dos fachadas iguales que cierran la planta diáfana y el techo acristalado del porche de acceso a la torre obedecían a un orden muy racional en el despiece, con prioridad en la repetición de piezas iguales y ortogonales, de manera que la mayor dificultad no residía en la geometría sino en la adaptación de las tecnologías CNC a los procesos tradicionales de construcción.

En la construcción del London City Hall, se incorpora al ensayo el factor geometría. Un proyecto desarrollado ya mediante dibujo paramétrico en el que cada pieza de fachada se repite solamente una vez –puesto que el edificio es simétrico- pero que fallo como primera tentativa de establecer una Cadena Digital coherente –es decir sin pérdida de información- a lo largo de todo el proyecto, desde el diseño del modelo digital al corte mecanizado de sus componentes.

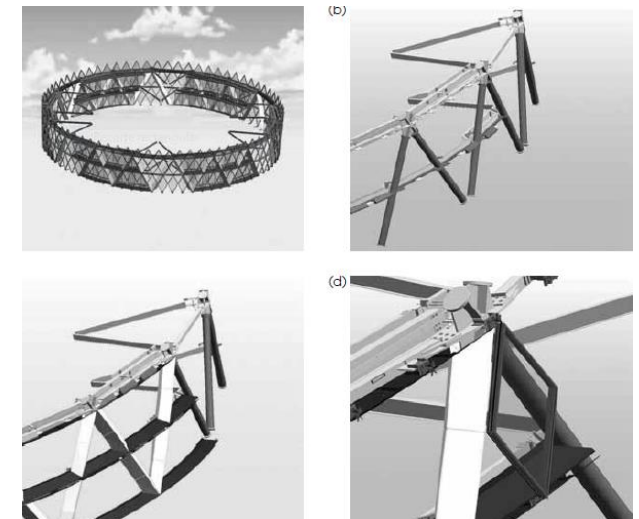
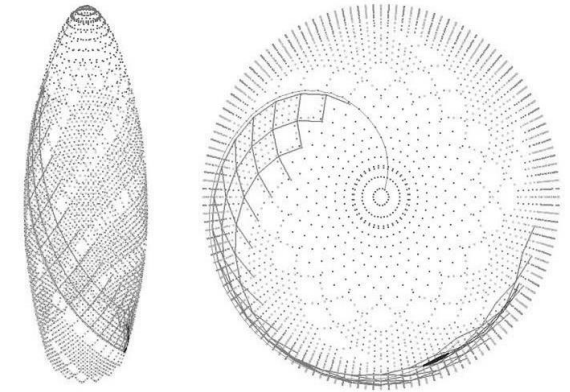
El concepto de Cadena Digital se materializa por primera vez en la construcción del Boeing 777, primer avión diseñado y construido mediante CAD-CAM –proyecto gestionado con CATIA- y sin la utilización de prototipos ni simulaciones analógicas, demostrándose su impacto en una mayor productividad y menores costes.

La empresa suiza Schmidlin, responsable de la construcción del sistema de fachada, recuerda como a pesar de poder disponer de herramientas CAD-CAM para la definición del detalle constructivo de cada módulo de fachada –cada uno compuesto por casi 200 elementos-, el trabajo de transcripción de la geometría base, de cada uno de los 650 diferentes paneles, desde el modelo digital hubo que realizarse de manera artesanal –con la pérdida de información y de precisión que esto implica- por falta de un protocolo coherente entre las dos partes, diseño y fabricación.

En la construcción de la fachada para la torre Swiss Re, reparado ya el eslabón roto, se consigue establecer por fin una Cadena Digital totalmente operativa –y extremadamente eficiente- para el diseño [fig.61] y construcción de forma íntegramente digital ya no solo de la fachada sino también de toda la estructura metálica del edificio [fig.62].



[fig.60] London City Hall. Londres, Reino Unido. Norman Foster, 1998-2002.



[fig.61,62] Torre Swiss Re. Londres, Reino Unido. Norman Foster, 2001-2003.

3.2. C.A.M. Y FORMAS LIBRES EN HORMIGÓN ARMADO

Las técnicas constructivas basadas en el corte son las que mejor se han adaptado a los sistemas de Fabricación Digital. Los metales y la madera, cuya manipulación en la fabricación tradicional se basa en la acción puntual de la herramienta –de corte, fresado, doblado, etc.- sobre el material, son los que han admitido con mayor facilidad el cambio. La herramienta que antes era gobernada por la mano humana, ahora, adaptada al cabezal de una maquina CNC, lo está por un conjunto de servos eléctricos.

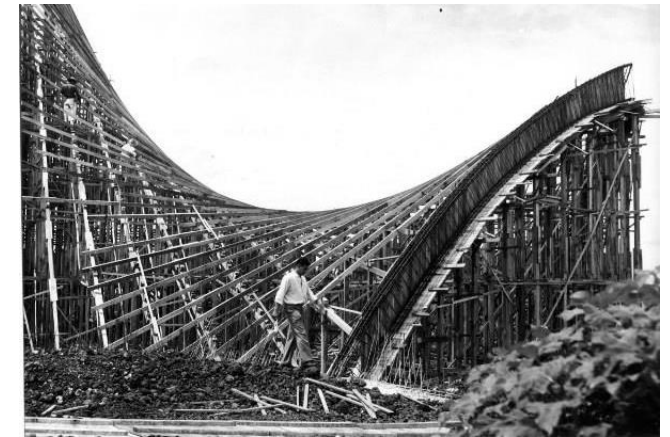
Así técnicas como el corte con láser, plasma, sierra radial, hilo de diamante, el fresado, el torneado, el punzonado, el doblado de barras o de chapas metálicas, el doblado simple de vidrio, el martillado de planchas metálicas se han combinado con facilidad con máquinas CNC que permiten con suma precisión desde el movimiento más elemental en 2 ejes –de una impresora o un plotter de corte, por ejemplo- hasta una libertad de movimiento en el espacio total en 6 ejes –de los típicos brazos robóticos tipo Kuka que ejecutan las soldaduras en los chasis de nuestros coches-.

Las técnicas existentes para la ejecución de Formas Libres, sin embargo, no han tenido la misma suerte [fig.63]. La realización de superficies continuas y de doble curvatura, ya se trate de vidrio, chapa metálica o de hormigón armado, implica la mayoría de las veces la necesidad una matriz especial, un molde o encofrado hecho a partir de otro material más dócil, que sea capaz de transmitir la forma al material final.

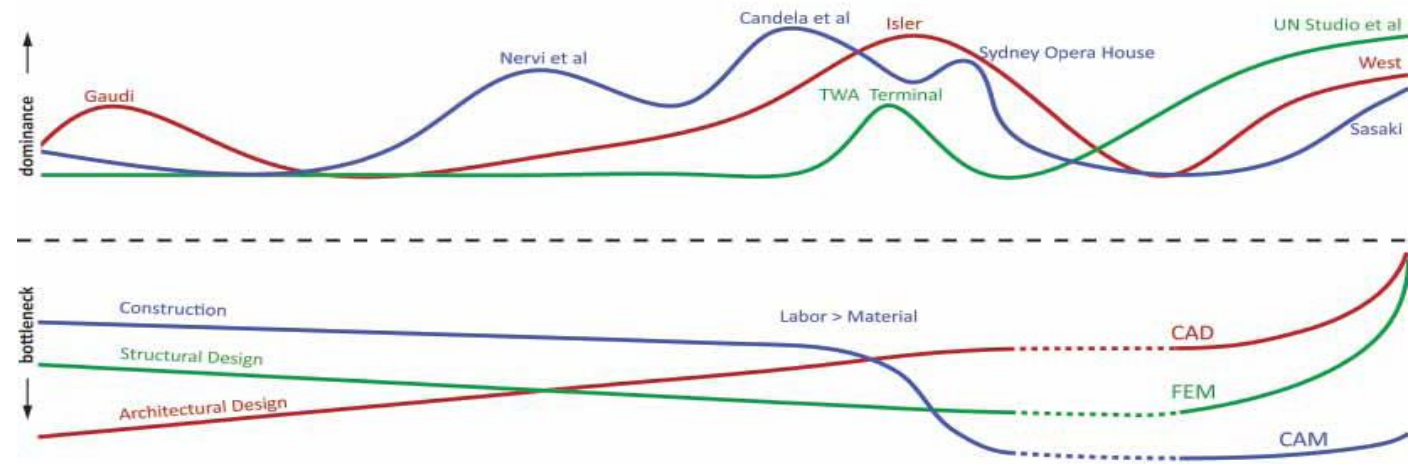
El hándicap que suponía el encofrado en historia más temprana del hormigón armado [fig.64], todavía hoy no ha sido superado. El encofrado supone todavía, cuando nos apartamos de lo estándar para la ejecución de estas Formas Libres, la parte más laboriosa del proceso de construcción.

Éste capítulo pretende recoger algunos casos de estudio que nos puedan facilitar herramientas y recursos para la construcción eficiente en hormigón armado de la Forma Óptima –objeto de este trabajo- cuando ésta se expresa –y así es normalmente- como una Forma Libre.

Agrupadas en tres estrategias o líneas de aproximación distintas, las experiencias analizadas, contemplan desde las técnicas más consolidadas a las que todavía forman parte del campo más experimental, que tengan relación directa o no con los métodos de ‘Form Finding’ y Fabricación Digital o no, puedan ser aplicados como tal.



[fig.64] Encofrado para el Restaurante Los Manantiales. Xochimilco, México. Félix Candela, 1958.

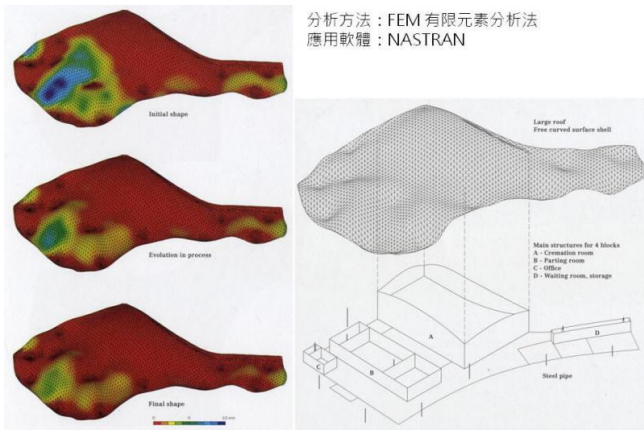


[fig.63] Extracto de ‘Free Forms in Concrete. The fabrication of free-form concrete segments using fabric formwork’. Rob Verhaegh, Universidad de Eindhoven, 2010.

3.3. ESTRATEGIA #1. AYUDAS CAD-CAM AL ENCOFRADO CONVENCIONAL

Después de la experiencia adquirida en el proyecto del parque Gringrin (Fukuoka, Japón, 2003-2005), el equipo de Toyo Ito con la colaboración de la ingeniería de Mutsuro Sasaki consigue con éxito, en el Crematorio Meiso no Mori (Kakamigahara, Japón 2004-2006), la realización de una cascara de hormigón armado con superficie de curvatura libre, mediante procesos constructivos y costo racionales, consiguiendo en su acabado la continuidad y la suavidad deseada [fig.67].

Igual que en el proyecto anterior, esta estructura de forma libre, topología a la que Sasaki se refiere como Flux Structure, se obtiene de la optimización por Análisis Sensitivo – una especie de Algoritmo Genético- por la cual la forma propuesta por la mano del arquitecto se modifica buscando un mejor comportamiento [fig.65].



[fig.65] Optimización Estructural mediante ‘Análisis Sensitivo’ y F.E.M. para la cubierta del Crematorio Meiso no Mori.

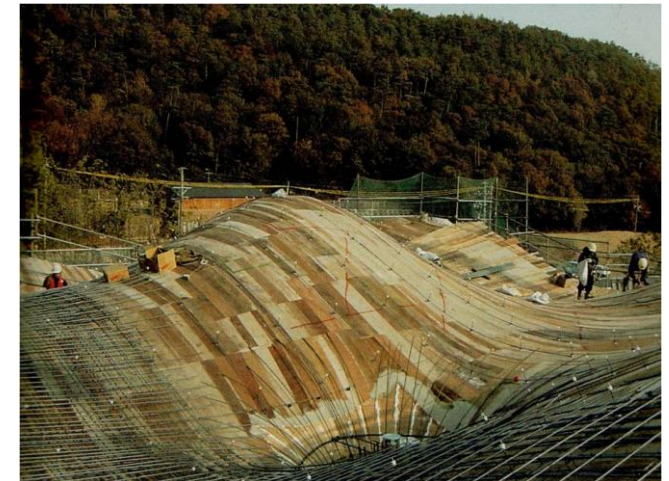
Haciendo un uso intensivo de los recursos CAD-CAM, se fabricó un encofrado especial donde el entablado madera contrachapado [fig.68] se sostenía sobre una malla de bigas curvas de madera, las primeras, en una dirección, cada 25 cm y las segundas, en la otra dirección, cada metro. Los pilares –elementos todos iguales, donde se concentraba la mayor curvatura y, por contener los bajantes, también una mayor complejidad en el detalle constructivo- se solucionaron con un único encofrado a modo de encajonado de madera [fig.66]. Con todo esto se consiguió una superficie continua, con una alta definición en su curvatura y de tan solo 20cm de espesor.



[fig.66] Encofrado de pilares para el Crematorio Meiso no Mori.



[fig.67] Crematorio Meiso no Mori. Kakamigahara, Japón. Toyo Ito; Mutsuro Sasaki, 2004-2006.



[fig.68] Encofrado para el Crematorio Meiso no Mori.

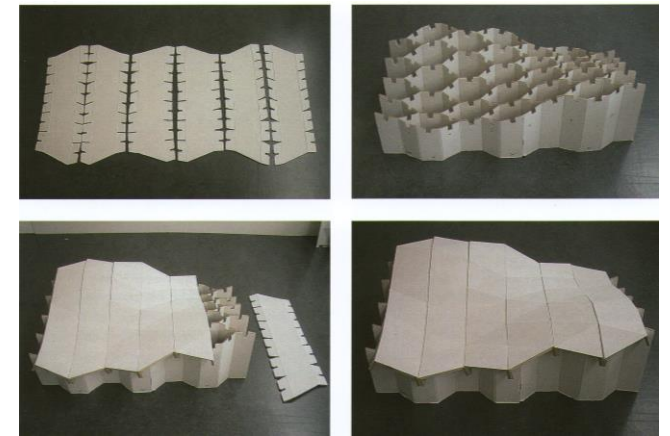


[fig.69,70] Sistema de encofrado para el Museo Mercedes Benz. Stuttgart, Alemania. UNStudio, 2001-2006.

Cabe destacar también el trabajo realizado por el equipo de arquitectura UNStudio junto a la empresa alemana de encofrados PERI para la realización del Museo Mercedes Benz de Stuttgart, donde se demuestra el potencial de los recursos CAD-CAM, cuando combinados con los sistemas estándar y muy industrializados de encofrado y andamiaje, para la ejecución de estructuras libres de mayor envergadura [fig.69].

El edificio se concibe como una gran rampa, una doble espiral entrelazada que se eleva en varias plantas conformando un complejo sistema estructural de hormigón armado donde apenas existe la línea recta. Aquí el sistema estándar de encofrado se combina con el sistema abierto de la madera mecanizada [fig.70] y admite con facilidad la incorporación de los módulos volumétricos fabricados mediante CAD-CAM.

Las herramientas de corte CNC nos permiten de una manera relativamente sencilla y mediante tecnologías ya prácticamente universales -como pudiera ser un plotter de corte de dos ejes- construir a partir de elementos planos como la madera estructuras de geometría compleja como las de los encofrados que nos ocupan. Vale la pena fijarnos en el esfuerzo hecho por proyectos de investigación como el de la Universidad de Liechtenstein –con la colaboración del fabricante de Skateparks alemán Rudolph Concrete- para dar un paso más en la democratización de estas técnicas y explorar las posibilidades de trabajar con un material tan dócil –y tan reciclable- como el cartón ondulado [fig.71] como soporte geométrico para la construcción de superficies de libre curvatura en su caso de hormigón armado [fig.72], pero también posibles –existen otras líneas de investigación similares, desde el Swiss Block Research Group de la Universidad de Zurich o del grupo australiano Supermanoeuvre, para la ejecución de bóveda catalana- en otros métodos constructivos.



[fig.71,72] Patrones de corte para encofrado de Formas Libres en cartón ondulado. Universidad de Liechtenstein, 2008

Pese a todas las ayudas que el mecanizado pueda ofrecer al encofrado tradicional, el ejercicio de materializar por la aproximación de una superficie de doble curvatura teóricamente continua a una superficie semidiscreta –a base de elementos de curvatura simple unidos de manera no continua- como es un entarimado de madera, sigue siendo un trabajo un tanto laborioso. Con el afán de superar las limitaciones del encofrado tradicional, métodos alternativos como el fresado de espumas de poliestireno y ceras de modelado están dando el salto a la gran escala y le están ganando protagonismo a la madera cuando ésta no puede responder a los imperativos de Forma en este trabajo explorados.

El proyecto de Frank Gehry para el complejo de oficinas Neuer Zollhof (Düsseldorf, 1996-1998) es un buen ejemplo de cómo conciliar con éxito un proceso constructivo altamente industrializado como es el del hormigón armado prefabricado con el concepto ‘One of Kind’ –es decir producción de piezas no estándar, únicas cada una-.

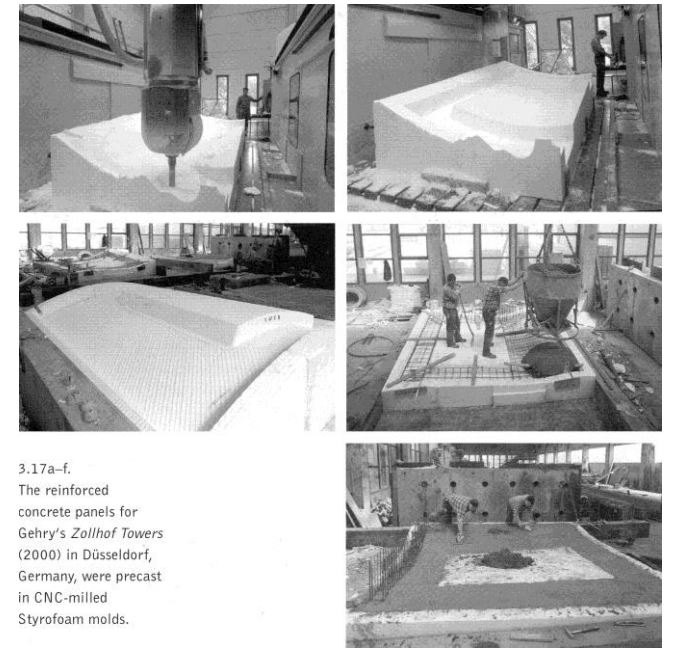
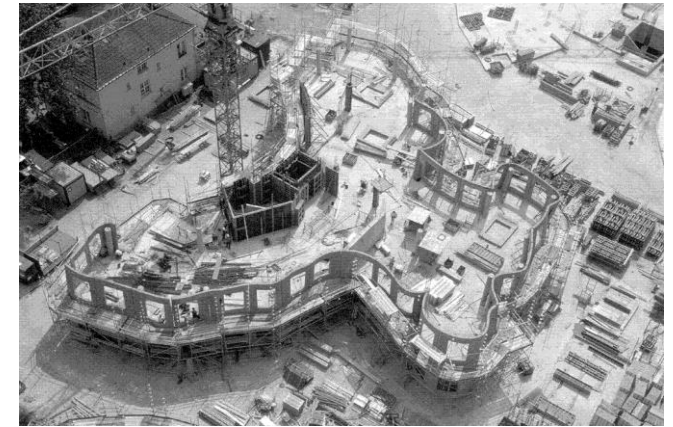
Un total de 1.355 paneles curvos de hormigón armado, distintos todos, de 25 cm de espesor y con capacidad de carga [fig.74, 75], cierran la fachada conformando con el resto de la estructura un conjunto monolítico para cada uno de los tres edificios –el más alto de 14 plantas-. Para fabricar el molde para cada uno de ellos, la geometría de doble curvatura generada a través de CATIA se volcaba a una máquina fresadora controlada por CNC que la esculpiría sobre un bloque de XPS de alta densidad [fig.76]. El equipo de Gehry y, otra vez, la empresa de encofrados PERI destacan del proceso su alta eficiencia considerados desaparecidos los problemas de simultaneidad propios del molde reutilizable, además del alto grado de eficiencia del material utilizado puesto que las mermas –tanto del hormigón vertido como del Foam utilizado, pues tanto el molde ya usado como la ‘viruta’ del fresado permiten un fácil reciclaje para la elaboración de nuevos moldes- son mínimas.



[fig.73] Neuer Zollhof, Düsseldorf, Alemania
Frank Gehry, 1996-1998



[fig.74,75] Ensamblaje en obra de los paneles de hormigón para el Neuer Zollhof.



3.17a-f.
The reinforced concrete panels for Gehry's Zollhof Towers (2000) in Düsseldorf, Germany, were precast in CNC-milled Styrofoam molds.

[fig.76] Fabricación de los paneles de hormigón para el Neuer Zollhof.

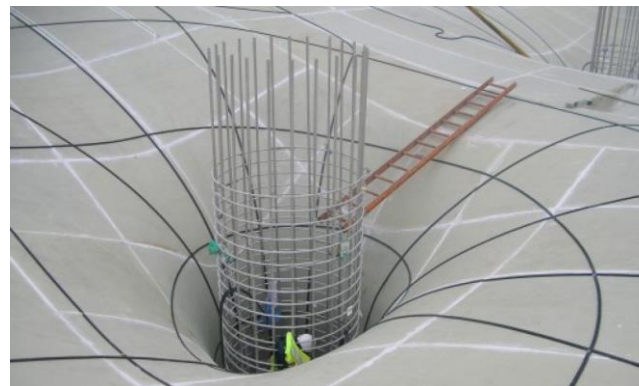
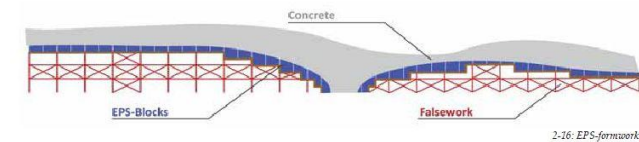
Obras más recientes como el Spencer Dock Bridge, del equipo Future Systems Architects y la ingeniería de Ove Arup -reconocido con el premio al mejor diseño estructural por el premio LEAF de 2009- o el Unikabeton Prototype son representativas de como el uso del modelado sustractivo con espumas de alta densidad nos permite la materialización de formas con unas curvaturas tales [fig.78, 80] que con los sistemas tradicionales nos resultarían imposibles.

El Unikabeton, proyecto del arquitecto A. Søndergaard y el ingeniero P. Dobernowsky con la colaboración de la Aarhus School of Architecture pretende demostrar las bondades de la tecnología CNC que cuando combinada con métodos de Optimización Topológica Estructural nos permite reducir enormemente el uso de material utilizado –cuantificados entre un 60 y un 70% del hormigón utilizado para la construcción del prototipo comparado con una estructura de igual tipología pero construida por métodos tradicionales-, esfuerzo que queda justificado no tan solo por el ahorro económico sino también por una reducción en casi la misma proporción de las emisiones de CO2 derivadas de todo el proceso de construcción.

La correcta manipulación de estas espumas, mediante finas pasadas en el fresado además de la aplicación de pinturas de Epoxi en la superficie en contacto con el vertido, nos permite ahora la construcción in-situ de estas estructuras de hormigón armado de forma libre garantizando, cuando el material queda expuesto –y así se demuestra en los dos ejemplos anteriores-, una resolución geométrica y una calidad en el acabado excelentes.



[fig.77] Puente Spencer Dock. Dublin, Irlanda.
Future Systems Architects, 2009.



[fig.78] Encofrado para el Puente Spencer Dock.



[fig.79] Unikabeton Prototype. Aarhus, Dinamarca.
A. Søndergaard; P. Dobernowsky, 2011.

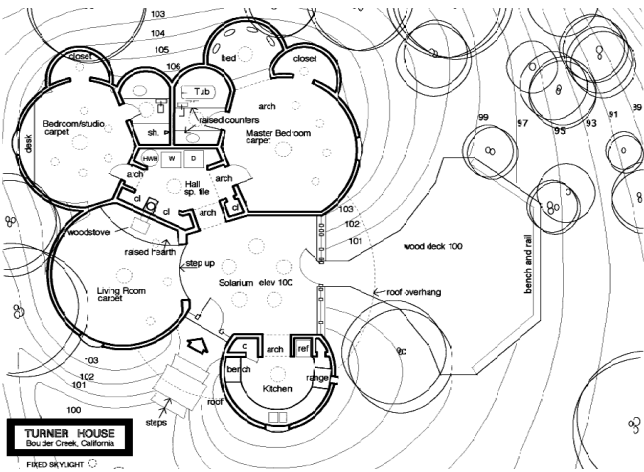


[fig.80] Encofrado para el Unikabeton Prototype.

3.4. ESTRATEGIA #2. EL ENCOFRADO TEXTIL



[fig.81] Estructura neumática usada en las Airform House. Los Angeles, EEUU. Wallace Neff, 1940's



[fig.82] Turner House. Boulder Creek, EEUU. Lloyd Turner, 1960's.

Los trabajos realizados desde los tempranos años 40 por el arquitecto Hollywoodiense Wallace Neff alrededor del uso de estructuras neumáticas como soporte para la construcción de cascaras ligeras de hormigón armado suponen un paso más lejos en el esfuerzo de reducir los costes derivados del encofrado al mínimo posible.

El sistema patentado por Wallace pretendía dar respuesta a la demanda de vivienda generada por el regreso de los soldados terminada la segunda Guerra Mundial y por el 'Baby Boom' que se produjo después, ofreciendo una alternativa de construcción rápida y de bajo coste. El sistema de las Airform House construidas a partir de 1946 –de las cuales ya solo se conserva una- substituye el molde de madera por una estructura inflable en forma de cúpula de 12 pies de altura –hecha a partir de una tela de goma armada Goodyear para globos aerostáticos e hinchada a baja presión- sobre la cual se proyectaba hormigón –sin armaduras- [fig.81], una vez endurecido se retiraba el textil, se colocaba el aislante térmico y finalmente se ejecuta una última capa exterior de hormigón.

Más adelante y sobre todo en la década de los 60, otros arquitectos como el también americano Lloyd Turner o el australiano Dante N. Bini se incorporarán al camino abierto por Wallace mejorando la primera patente y ampliándola en tamaño y complejidad topológica.

En las casas burbuja de Turner se lee perfectamente la relación que existe entre éste sistema constructivo y el 'Form Finding', relación que el arquitecto expresa manifiestamente subrayando en sus diseños el analogismo que existe entre las estructuras que forman las burbujas de jabón y la forma propia de su solución constructiva [fig.82].

Las cúpulas que Dante N. Bini bautizó como Binishells se explotaron intensivamente durante los años 70 bajo la promoción del ministerio de educación australiano para la construcción de escuelas e instalaciones deportivas. El conjunto de sistemas desarrollados y patentados por Bini -

alguno de ellos permite el montaje en menos de 2 horas de estructuras neumáticas hemisféricas que podían llegar a los 40 metros de diámetro- se construían según los mismos principios que sus predecesores pero incluyendo ahora una armadura que su monta en horizontal [fig.83], y que junto con el hormigón ya vertido y confinado todo dentro una doble membrana textil se alza mediante bombas neumáticas de alta presión [fig.84], adquiriendo en pocas horas y sin más operaciones su forma final –que más allá de las formas hemisféricas o toriesféricas, el sistema amplía ahora las posibilidades a las Formas Libres- .



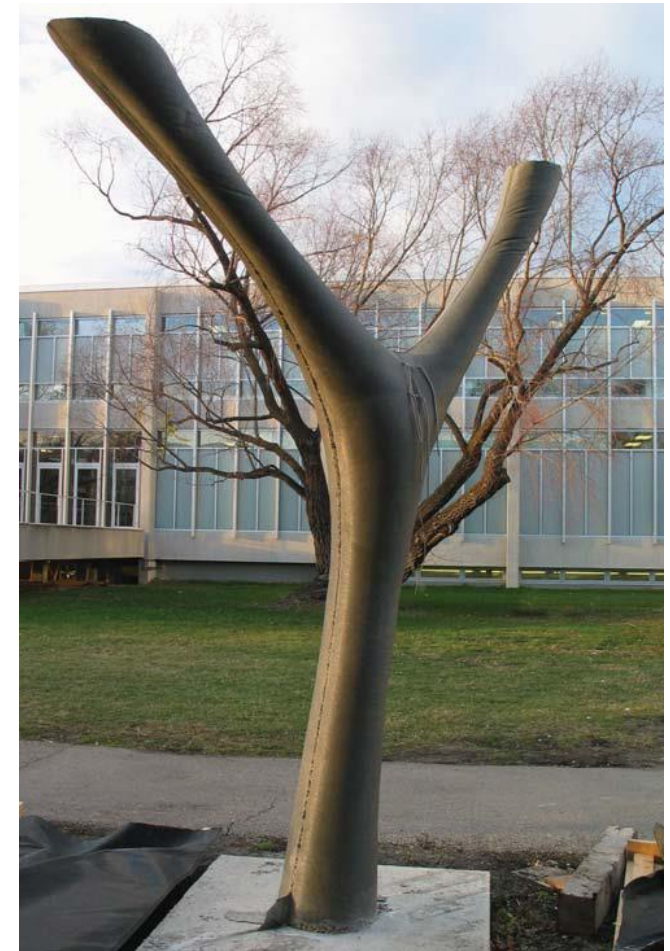
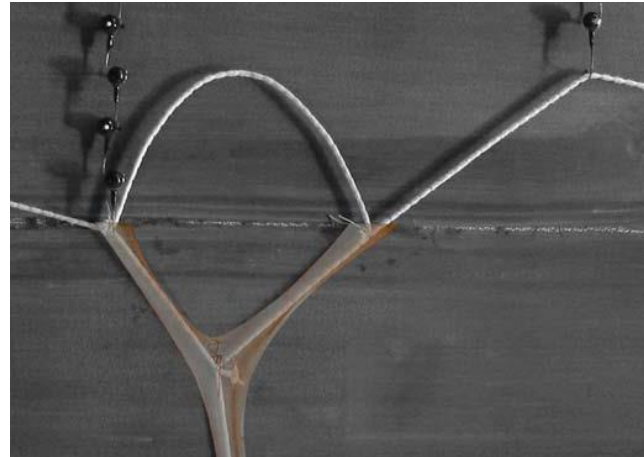
[fig.83,84] Preparación y levantamiento de una Binishell. Dante N. Bini, 1960's

Experimentos más recientes, como son los realizados en el Departamento de Estructuras Ligeras de la Universidad de Manitoba, exploran las posibilidades de los encofrados textiles para la construcción de estructuras ramificadas con hormigón armado [fig.85].

Su investigación parte de la dificultad que manifiestan detectar en los sistemas constructivos estándar de secciones rectas y regulares para la construcción de estas estructuras ramificadas –de geometrías por naturaleza no racionalistas- y de la base teórica del ‘Form Finding’ para la definición geométrica de sistemas estructurales que tiendan a la compresión pura [fig.86]. Centrando la atención en el desarrollo de encofrados textiles para ramificadas inscribibles en un plano –pues trabajar con ramificaciones en varios planos se vuelve más complicado-, el sistema propuesto consiste el uso de una tela geotextil de polietileno como molde flexible que atrapado en sus contornos por un panel de contrachapado [fig.87], tras el vertido del hormigón – se utilizó un hormigón autocompactante, aunque el geotextil permite un cierto vibrado manual desde el exterior, además de permitir también, por ser poroso, el escape del aire y el acceso de agua atrapados- adopta por la propia tensión del líquido la Forma prevista.

Tanto por el discurso sobre la obtención de la Forma como por el sistema de ejecución que recuerda casi literalmente al aparejos propuesto por Otto para explorar las formas de las estructuras neumáticas -explicado en el capítulo dedicado al arquitecto- está claro que el sistema constructivo propuesto por el equipo canadiense tiene una relación muy íntima con los procesos naturales del ‘Form Finding’. Es tanto así que ciertos fenómenos propios de estos procesos, como pueden ser deformaciones no deseadas debido a las diferencias de presión por la columna de agua a lo largo de la sección, nos pueden jugar en contra del objetivo perseguido cuando estos no se tienen en cuenta. Así mismo, cabe tener presente – y hay que ser escrupulosos en cómo interpretar los principios del ‘Form Finding’- que la forma que adquiere por sí misma la pieza encofrada no tiene que ser forzosamente la

Forma Óptima para el sistema estructural. La forma que obtendremos tras el hormigonado obedece -además de la solución al conjunto de tensiones- al patronaje con que hayamos confeccionado nuestro molde y esto sale del diseño estructural, sea cual sea el método que usemos, que hay que hacer previamente.



[fig.85] Prototipo de Estructura Ramificada. Manitoba, Canadá. Universidad de Manitoba, 2010.

[fig.86] Modelo Catenario para Estructura Ramificada.

[fig.87] Encofrado Textil para Estructura Ramificada. Manitoba, Canadá. Universidad de Manitoba, 2010.

Otro enfoque diferente acerca de las capacidades que nos proporcionan los encofrados textiles nos lo ofrecen proyectos como el Fabric Formwork, desarrollado por R. Verhaegh desde la Universidad de Tecnología de Eindhoven [fig.88], o el Adaptive Mould de la empresa danesa Adapa [fig.90]. Ambos exploran desde dos estrategias diferentes la manera de generar mediante deformación controlada de láminas textiles flexibles las superficies de curvatura libre que la Arquitectura demanda y que hasta ahora solo podíamos realizar con moldes desechables.

El primero de ellos parte de dividir la Forma Libre deseada en secciones de superficie que se puedan reproducir mediante la deformación por tensión de una lámina elástica según un contorno determinado. La lámina tenderá a describir una superficie mínima dentro del contorno fijado además de la posible deformación que pueda infligir el peso del hormigón vertido en el molde, que quedara compensado según se desee mediante la presión de un líquido por el lado opuesto de la membrana.

El segundo, consiste en la deformación de la lámina elástica mediante el desplazamiento en vertical de ciertos puntos de control ligados a una superficie deformable. Una matriz de pistones dispuestos debajo la lámina y en todo su contorno permite controlar de forma digital la curvatura resultante y aproximarla con gran precisión –ayudándose de un lector láser- a la geometría deseada.

El molde adaptativo de Adapa, a diferencia del anterior, parece no estar limitado a un solo estado de deformación sino que admite una mayor libertad para reproducir curvaturas complejas, con varios valles y montes combinados en una misma superficie [fig.89]. Por su naturaleza, el sistema parece no tener límite alguno en cuanto a su extensión, por lo que promete ser un sistema muy eficiente para realizar tanto secciones curvas de tamaño reducido –paneles de GRC y otros ‘composites’, termoformados de plástico, vidrio, etc.- como moldes de mayores dimensiones para

elementos volumétricos –piezas estructurales de hormigón armado-.

Aunque algunos de los sistemas textiles vistos no han sido desarrollados desde estrategias de fabricación digital, todos ellos tienen la ventaja de ser fácilmente susceptibles de mecanización, tanto en lo que se refiere al obtener digitalmente la Forma propia de las estructuras tensiles o neumáticas como en la manera de obtener desde éstas formas, obtenidas digitalmente, patrones de corte para ser producidos mediante CNC.



[fig.88] Fabric Formwork. Eindhoven, Países Bajos. Rob Verhaegh; Eindhoven University of Technology, 2010.



[fig.89] Forma Libre realizada por Secciones mediante Tecnología Adaptive Mould (Adapa)

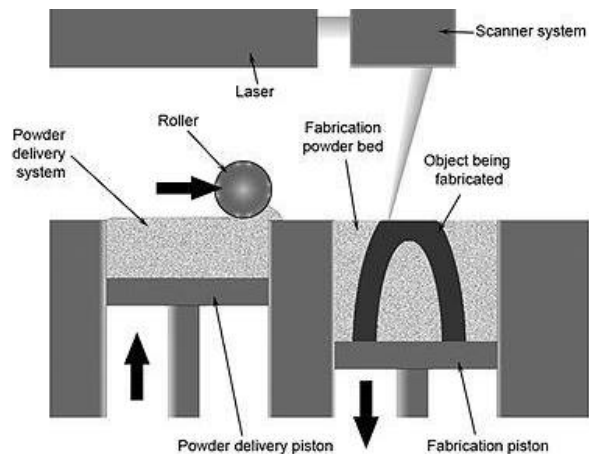


[fig.90] Adaptive Mould Machine. Aalborg, Dinamarca. Adapa, 2010.

3.5. ESTRATEGIA #3. IMPRESION 3D DE GRAN ESCALA

La primera impresora 3D fue creada por Charles W. Hull a mediados de los años 80. Ésta usaba una técnica llamada estéreo-litografía (SLA) en la cual un láser se proyectaba sobre la superficie de un líquido fopolímero sensible al UV, trazando mediante CAD-CAM secciones consecutivas del objeto a crear que al contacto solidificaban.

Durante más de 30 años, esta tecnología primitiva de impresión 3D, que era especialmente valorada para el prototipado rápido y para la fabricación de prótesis médicas a medida pero que carecía de suficiente rigidez como para la fabricación de objetos útiles, ha ido evolucionado hacia otras dos tecnologías, el Sinterizado Selectivo Láser (SLS) - que se han acabado consolidando en la producción industrial- y las de extrusión o 'Fused Deposition Modeling' (FDM) -máquinas de bajo coste dirigidas a sector doméstico-, ampliándose enormemente sus campos de aplicación.



[fig.91] Esquema de Funcionamiento de una Impresora 3D de Sinterizado Selectivo Láser (SLS).

Ahora más allá del prototipado rápido, podemos imprimir piezas con capacidad mecánica en metales como el acero, el aluminio o el titanio; en plásticos como el PLA, el ABS, Metacrilato; podemos imprimir piezas de joyería en oro, plata; imprimir objetos comestibles en azúcar, chocolate; y hasta se han conseguido imprimir tejidos vivos como vasos sanguíneos. El sector de la construcción no se ha mostrado indiferente a las posibilidades que ofrece la impresión 3D y desde diferentes iniciativas está explorando la manera de trasladar éstas tecnologías a la gran escala.

Inspirado en la impresión 3D por sinterizado [fig.91], D-Shape es la primera de éstas iniciativas. Finalizado con éxito en 2008, el sistema desarrollado por el italiano Enrico Dini consiste en la inyección de una resina estructural sobre sucesivas capas de arena -de entre 5 y 10mm de espesor- dibujando, sección a sección [fig.93], de manera casi ininterrumpida y a un ritmo de entre 150 y 200mm en altura por día de trabajo, la estructura deseada.

Tras 24 horas de endurecido, se puede retirar la pieza [fig.92] del vaso de arena. El material resultante, según los ensayos, goza de unas propiedades mecánicas de compresión, tracción y flexión ligeramente superiores a las del cemento Portland. El arquitecto holandés Janjaap Ruijsenaars (Universe Architecture), que junto a la ingeniería Arup pretende construir el primer edificio -la Landscape House- con impresión 3D, reconoce en ésta tecnología la capacidad de poder levantar una estructura impresa y autoportante la cual nos puede servir de bastidor para insertar otro material resistente -unas barras de armadura o un hormigón armado- que le confiera la capacidad estructural necesaria para su uso.

Una de las mayores ventajas de la impresión mediante polvo o arena es la de poder realizar casi cualquier geometría, con cuerpos volados por ejemplo, sin necesidad de soportes adicionales ya que es la propia arena sobrante la que mantiene la parte impresa en su posición. En contrapartida, el sistema tiene como hándicap la gran demanda de arena que

exige para formar todo el vaso contenedor por lo que el sistema parece quedar limitado a la fabricación de partes inscribibles en este volumen -hasta ahora de 3x3x3m- y no tanto a la fabricación de una estructura completa.



[fig.92] Prototipo para el Radiolaria Pavilion, Pisa, Italia. Andrea Morgante (Shiro Studio); Enrico Dini (D-Shape), 2009.



[fig.93] Impresora 3D de D-Shape, Pisa, Italia. Enrico Dini (D-Shape), 2008.

El proyecto 3D Concrete Printing (3DCP), iniciado por la Universidad de Loughborough con la colaboración de Foster & Partners, Buro Happold y Hyundai, se basa, en cambio, en la tecnología de impresión 3D por extrusión. En éste caso, el cabezal, en vez de inyectar cola sobre una matriz de arena, deposita de forma controlada un hilo de un mortero de cemento especial que va dibujando por capas planas la pieza a construir [fig.94].

En 2010 se exhibe ‘Wonder Bench’ [fig.95], una pieza de forma libre en hormigón armado de unos 1x2x0.8m y con una capacidad estructural de aproximadamente un 95% de su equivalente en un hormigón armado tradicional. Una segunda generación, actualmente en desarrollo, ha ampliado sus capacidades a un volumen de 2x2.5x5m y a una libertad de movimiento de 7 ejes permitiendo de esta manera una mayor precisión y velocidad de impresión además de la posibilidad de impresión por capas no planas.

Una de las ventajas del sistema, explica el doctor ingeniero y director del equipo Richard Buswell, es que éste permite construir objetos no macizos por lo que se pueden incluir ya integrados los pasos para las instalaciones, además de, según como dispongamos el material en el interior del cuerpo, controlar sus propiedades térmicas.



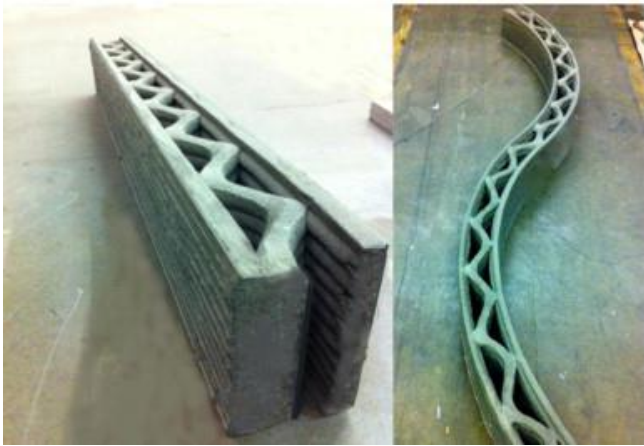
[fig.94] Freeform Construction Project. Loughborough, Reino Unido. Universidad de Loughborough, 2010.



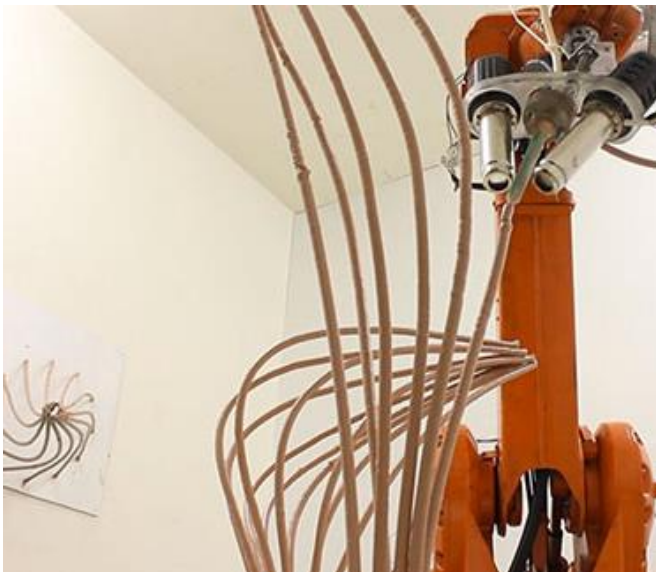
[fig.95] Wonder Bench. Loughborough, Reino Unido. Universidad de Loughborough, 2010.

Existen otras líneas de investigación en la misma dirección también muy dignas de atención como el Contour Crafting, proyecto promovido desde la Universidad del Sur de California con la colaboración de la NASA [fig.96]; o el proyecto MatAerial, desarrollado por Petr Novikov y Saša Jokić desde el Instituto de Arquitectura Avanzada de Catalunya, con la colaboración del Joris Laarman Lab [fig.97].

Éste último, sistema bautizado por los autores como Anti-gravity Additive Manufacturing y publicado en 2013, es especialmente interesante por el paso adelante que éste representa respecto a la relación entre la disposición del material durante la impresión de la pieza y la manera en que esta trabaja estructuralmente. MatAerial propone servirnos de la libertad de movimiento de los brazos de 6 ejes para disponer el material no ya en capas planas e indiferentes al comportamiento del objeto sino disponiendo las fibras libremente en el espacio de acuerdo con las líneas de tensión. Esta es sin duda una propuesta muy a tener en cuenta que es muy posible que abra la puerta a una nueva manera de entender la impresión 3D.



[fig.96] Contour Crafting. Los Angeles, EEUU.
Universidad del Sur de California (USC), NASA, 2012.



[fig.97] MatAerial Anti-Gravity Additive Manufacturing. Barcelona. Petr Novikov; Saša Jokić (IAAC); Joris Laarman Lab, 2013.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES FINALES

4.1. EL ARMADO

Éste trabajo ha centrado especialmente la atención en el encofrado y no tanto en la calidad del material vertido, pues es esta primera la parte que concentra más dificultad en el ejercicio de construir Formas Libres en hormigón armado.

Hemos visto como en función de la estrategia tomada, y especialmente cuando el encofrado como molde solido deja de existir, la composición del hormigón se modifica. Según el caso se recurre a mezclas autocompactantes, se substituyen los áridos tradicionales por arena para facilitar la extrusión del material, o los cementos por resinas como aglomerantes. Estos cambios derivan en materiales muy distintos entre sí que, siendo rigurosos con la definición de Hormigón, tal vez no todos estaríamos de acuerdo en seguir llamándoles como tal, pero que todos ellos comparten con éste un comportamiento estructural principalmente a compresión.

El armado, sin embargo, es la parte que queda todavía pendiente de evolución. La mayoría de las construcciones visitadas en este trabajo, tanto los prototipos más experimentales como las soluciones ya acabadas, han eludido el problema del armado cuando éste sirve a estructuras de Forma Libre, recurriendo para su manipulación y en completa desintonía con los métodos de modelado a los que acompaña, a trabajos sino artesanales mucho menos industrializados. En algunos de los casos que ha sido así, el armado se ha dejado en el tintero de forma expresa y manifiesta por los autores, reconociéndose necesario un esfuerzo en esta dirección. En otros casos, simplemente, este esfuerzo no se ha considerado necesario. Quizás la Ópera de Taichung (Toyo Ito; Ove Arup, 2009-2013) es uno de los ejemplos

más paradigmático, obra en la que los esfuerzos hechos para encontrar una solución constructiva eficiente se han visto frustrados debido al bajo coste económico que en algunas economías implica hacer el mismo trabajo utilizando fuerza humana.

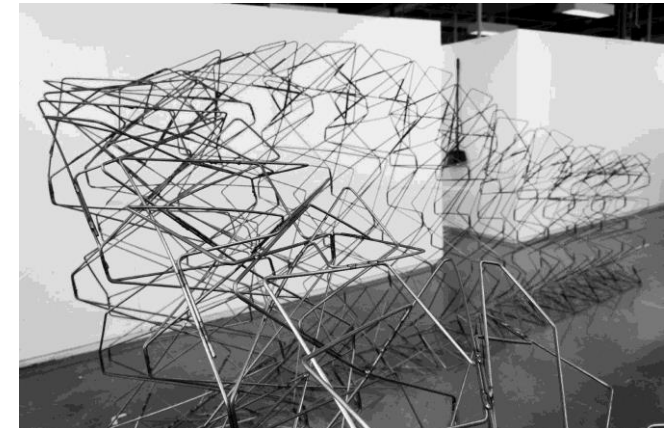
Aunque queda mucho que resolver, existen ya alternativas al armado convencional - como el postesado con cable de acero, o el armado con fibras de acero, fibra de vidrio o de polipropileno- y que conviven mejor que este con las tecnologías vistas. La fabricación de jaulas de acero para el armado -tanto el doblado como el soldado de las barras- en muchos casos es un trabajo hecho ya robóticamente mediante maquinaria específica [fig.98], sin embargo existen experiencias, como la presentada por Matter Design Studio en la Bienal de Venecia del 2012, o la instalación ARC de Lauren Vasey, que exploran las capacidades de máquinas de 6 ejes para trabajar el doblado de barras de una forma más libre [fig.99, 100].



[fig.98] Máquina de soldadura automática de jaulas de pilotes para armaduras redondas, cuadradas y poligonales. Apilion Machines.



[fig.99] Clouds of Venice Instalation para la Bienal de Venecia. Wes Mcgee (Matter Design Studio), 2012.



[fig.100] ARC Architectural Research Collective. Michigan, EEUU. Lauren Vasey; Universidad de Michigan, 2012.

4.2. ¿CUALES SERAN LOS RETOS DEL FUTURO?

Siempre es difícil adivinar en qué medida las nuevas propuestas tecnológicas van a trascender en el futuro. Si las técnicas más experimentales ensayadas en prototipos y pabellones se materializaran o no en construcciones de pleno uso, o si aquellas que ya lo han hecho superaran el ámbito de la Arquitectura singular para consolidarse como técnicas normales.

Es cierto que la construcción es un sector económico más bien conservador. Toda nueva construcción requiere de unas grandes inversiones de esfuerzo y capital por lo que en el ejercicio normal de la profesión cualquier cambio tecnológico es recibido con prudencia.

La Arquitectura no suele ser generadora de tecnología sino que es más bien parásita de los avances que se realizan en otros campos –del aeronáutico, naval, o automovilístico– propios de la producción industrial. La Arquitectura está ahora apenas incorporando tecnologías bien consolidadas en el sector industrial, algunas con más de medio siglo de antigüedad –en 1934, el Citroën Traction Avant fue el primer coche en incorporar un chasis monocasco totalmente metálico; en 1934, el Chrysler CW Airflow Custom Imperial fue el primer automóvil con un vidrio parabrisas curvo; en 1962, Pierre Bézier escribe para Renault la expresión matemática de la B-Spline; en 1946 el MIT presenta la primera máquina de Control Numérico por Computadora CNC- y que fuera de un contexto industrial, como desde la Arquitectura, se nos antojan todavía como tecnologías futuristas.

Esto no significa que este todo hecho y no existan desde la Arquitectura nuevas líneas de investigación tecnológica que desarrollar. Según destaca el arquitecto australiano Mark Burry de su experiencia como consultor en la Sagrada Familia –donde se ha substituido el trabajo manual de la pie-

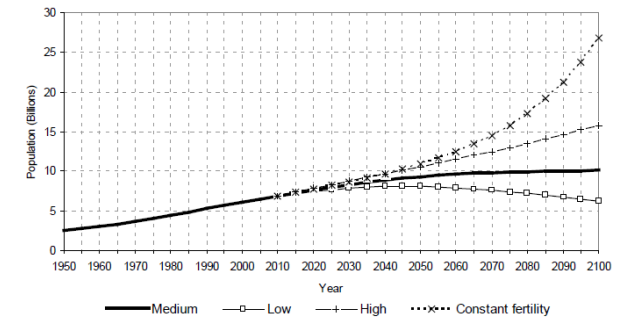
dra por técnicas robotizadas-, el ejercicio de trasladar éstas tecnologías a nuevos campos como el de la Arquitectura para realizar trabajos que no les son propios, favorece a la serendipia, al accidente –en sentido más positivo- y por consiguiente al desarrollo de nuevas tecnologías.

Independientemente de sus aplicaciones concretas, todo apunta a que la Fabricación Digital es un modelo que tiende a ganar relevancia en medio de los modelos tradicionales de producción. Me sirvo del discurso de Enrique Azpilicueta (Doctor Arquitecto y profesor en Universidad Politécnica de Madrid UPM), que apoyándose en los pronósticos demográficos de la ONU defiende la tenencia hacia sistemas de producción más tecnificados. La hipótesis más probable estipula un crecimiento de la población mundial de aproximadamente un 28% hasta la mitad de siglo, estabilizándose en 2050 en los 9 mil millones de habitantes [fig.101]. Según estos datos, las economías emergentes –ahora Asia y América Latina y más adelante el continente africano- tenderán a los estándares occidentales, con un bajo índice de mortalidad infantil y una esperanza de vida próxima a los cien años [fig.102]. Esto implica, de cumplirse las previsiones, nuevas ciudades, planificadas y más densas –se entiende que en los países emergentes, no en Europa-, más demanda de recursos y una población más envejecida. Los modelos de ocupación y de producción van a evolucionar –como lleva sucediendo desde los principios de la Revolución Industrial– hacia una mayor demanda del trabajo intelectual y hacia un trabajo de fuerza más mecanizado.

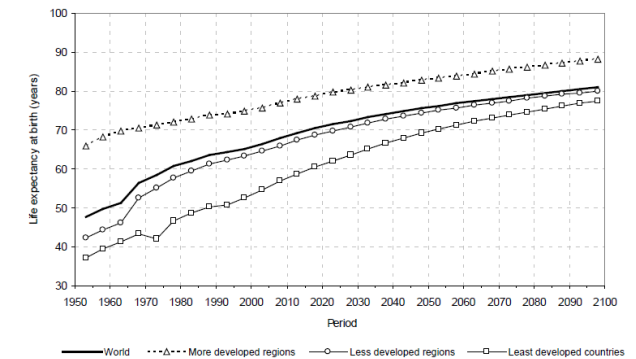
Dentro de este paradigma, el hormigón armado, material abundante, de bajo coste económico y con capacidad para construir en gran altura –recordemos que, como las Torres Petronás de César Pelli (Malasia, 1988-1998), algunos de los edificios más altos levantados hasta ahora están contruidos principalmente en éste material-, promete seguir conservando su posición protagonista en la construcción de estas nuevas ciudades verticales, donde los métodos de optimización estructural y de optimización de recursos -

como lo son los aquí explicados- pueden ser una ayuda muy valiosa.

Carlo Ratti, director del proyecto ‘Senseable City Lab’ del MIT reconoce en la Fabricación Digital y en la popularización de los nuevos conceptos de producción –Lean Manufacturing, Mass Customization, FabLab, Open Source Hardware, DIY, etc- que le acompañan la capacidad de transformar las estructuras industriales existentes en la dirección de unas estructuras de producción descentralizada y deslocalizada, integradas de nuevo y de manera más limpia en el tejido urbano existente.



[fig.101] Estimación de la Población Mundial entre 1950 y 2100 ONU World Population Prospects, 2010 Review



[fig.102] Estimación de Esperanza de Vida al Nacer entre 1950 y 2100. ONU World Population Prospects, 2010 Review



[fig.103] Dymaxion Car y cúpula de ojo de mosca. Richard Buckminster Fuller, 1930's.

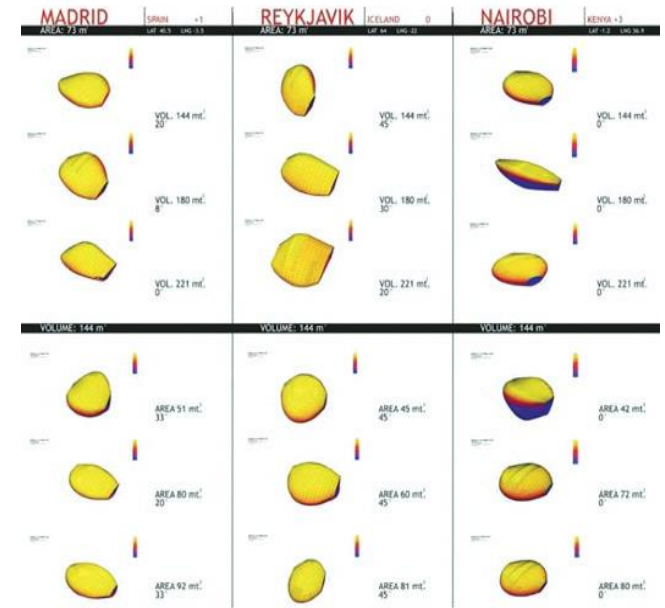
La Tercera Revolución Industrial –o Revolución Digital– tiende a un modelo más sostenible, el Sistema de Producción Toyota o Lean Manufacturing, en el que la Obsolescencia Programada y los grandes tirajes ya no son necesarios para recuperar la gran inversión que implica el uso de la maquinaria específica –máquinas de transferencia o transfer- típica de los Sistemas de Producción Taylorista y Fordista, y garantizar así la supervivencia de su estructura industrial. La tecnología CNC típica del nuevo modelo implica maquinaria con potencial para realizar una amplia variedad de trabajos, lo que supone, además del funcionamiento multi-tarea en condiciones normales de producción, una mayor capacidad de adaptación al cambio y por consiguiente mayores opciones de supervivencia ante una situación de crisis.

Desde el enfoque tradicional de las viviendas de venta por catálogo “Sears Modern Homes” (Sears, Roebuck and Co., 1908–1940) hasta las propuestas más racionalistas de la Casa Citróhan (Le Corbusier, 1920) y la Casa Dymaxion

(Richard Buckminster Fuller, 1929-1945), la Arquitectura ha manifestado –y sigue manifestando- el deseo de trasladar a la construcción los modelos de producción en masa propios del sector industrial [fig.103].

Si bien se ha logrado someter la Arquitectura a una industrialización en el sentido más Taylorista –es decir a una producción en masa de los componentes, además de establecer un sistema de convenciones y estándares prácticamente universales que permiten la buena coordinación dimensional entre éstos-, no se ha logrado igual en el sentido más Fordista –es decir de la producción en cadena del producto acabado-. Sí que existen algunos ejemplos exitosos, y no son pocos, de arquitectura producida en serie, pero lejos de poderse considerar un sistema de edificación consolidado, estos no pasan de ser episodios puntuales, casi anecdóticos en medio del escenario general.

El modelo de producción en serie no ha sabido solucionar los problemas que la arquitectura entendida como objeto único que da respuesta a un programa y un lugar específicos plantea. Sin embargo la Fabricación Digital nos presenta –a través de propuestas como el FabLab House- un nuevo paradigma en el que el proyecto arquitectónico deja de ser un objeto definido sino una relación entre sus partes, un conjunto de normas y condiciones, un algoritmo, que integrando de manera indisoluble la fabricación en el diseño y a través de una Cadena Digital coherente, resuelve de manera mecanizada ya no solo la producción sino también una solución geométrica específica para un input de programa y lugar determinados [fig.104]. Éste es sin duda un panorama cuanto menos prometedor dentro del cual, si conseguimos trasladar a la gran escala algunos de los principios del Mass Customization, del Pull System o del Just In Time propios de Lean Manufacturing –conceptos ya consolidados en la producción de bienes de consumo-, tal vez logremos superar por fin la enorme brecha que todavía existe entre producción arquitectónica y producción industrial.



[fig.104] Generación de la Forma según Parámetros de Emplazamiento para la FabLab House. IAAC, 2010



[fig.105] Fab Lab House, Solar Decathlon Europe. Barcelona / Madrid. IAAC, 2010

4.3. FORM FOLLOWS WHAT?

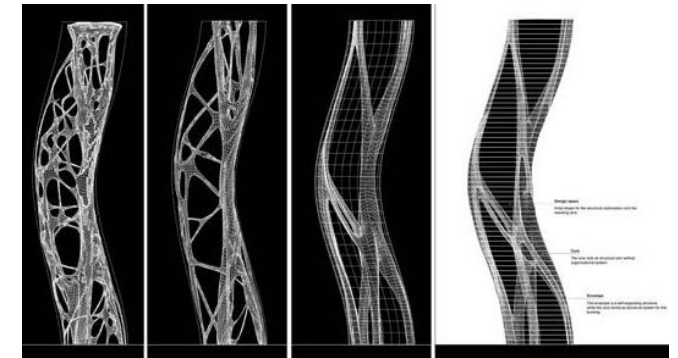
Compartiendo el mismo espíritu del grupo Archigram o del Metabolismo Japonés, sigue existiendo ahora un diálogo entre Arquitectura y Tecnología a través del cual, en un intercambio de propuestas y contrapropuestas entre éstos dos polos y en ambas direcciones, se pretende adivinar cuales son las posibilidades que la Innovación Tecnológica nos brinda y cuáles serán las Formas con las que se expresarán éstas nuevas tecnologías.

De éste ejercicio de especulación –en el mejor sentido de la palabra- se derivan nuevos modelos de aplicación arquitectónica, algunos, utopías que no pretenden forzosamente trascender del papel sino que nacen con la intención de derribar muros y dibujar nuevos horizontes lejos del imaginario arquitectónico habitual. En el caso que nos ocupa –el del hormigón armado- predominan las construcciones verticales, la fibra, fachadas que trabajan como un exoesqueleto, estructuras orgánicas que, emulando a la naturaleza, abandonan la idea de pilar, muro y biga como elementos de forma y comportamiento diferenciado, fundiéndose éstos en un sistema continuo e integrado.

En éste sentido, los discursos de nuevos nombres como Greg Lynn, Tom Wiscombe o Neri Oxman nos invitan a pensar la Arquitectura libres de las limitaciones impuestas por la estandarización, la coordinación dimensional y la separación de capas necesarios dentro del marco de las capacidades de diseño, calculo y producción de antaño pero ya superadas, y abogan por la integración de los distintos sistemas que conforman el edificio en beneficio de lo Óptimo.

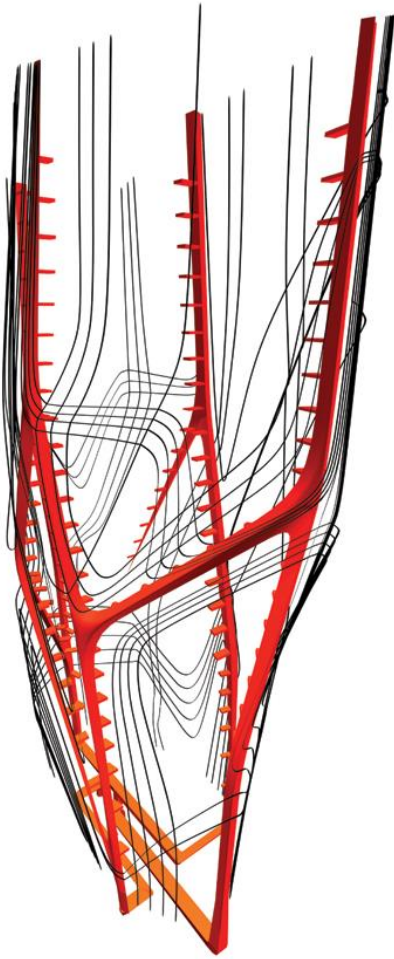
El panorama actual pone en crisis otra vez el postulado funcionalista de que ‘la Forma SIGUE SIEMPRE la función’ ampliando el segundo miembro de esta ecuación con nuevos y múltiples parámetros. Frei Otto nos habla de sinergias y añade a la expresión el término Fuerza; Enric

Ruiz Geli, de ‘Performance’, -en el sentido de comportamiento, respuesta o reacción a un estímulo-; Vicente Guallart, contrapostula que ‘la Forma sigue a la Energía’. Por supuesto, ésta ecuación no da uno sino infinitos resultados. Algo que ha aprendido la Arquitectura postmoderna de los fracasos de un racionalismo extremo es la importancia de lo subjetivo, y de la calidad comunicativa que reside inevitablemente en la arquitectura como consecuencia de la acción siempre subjetiva de sus autores. Por lo que me atrevo a añadir -aunque éste no es el objeto de este trabajo- que la Forma sigue siempre la expresión.



[fig.106] Evolutionary Computation Tower. Moh Architecture, 2007.





[fig.108] Huaxi Urban Center Tower. Guiyang, China.
Tom Wiscombe (Emergent), 2009.

[fig.107] Protohouse 2.0. Softkill Design, 2013.

CAPÍTULO 5. REFERENCIAS

BIBLIOGRAFIA:

OTTO, Frei; RASCH, Bodo. Finding Form. Towards An Architecture Of The Minimal: Edition Axel Menges, 1996.

FERRE, Albert; SAKAMOTO, Tomoko. From Control To Design. Parametric/Algorithmic Architecture: Actar, 2000.

GLYNN, Ruairi; SHEIL Bob. Fabricate. Making Digital Architecture: Riverside Architectural Press, 2011.

SAUTER, Marion; PAWLOFSKY, Tom; FRITZ, Oliver. Computergeschützte Produktion Von Freiformen In Der Architecktur. CAM Of Freeforms In Architecture: Petersberg Imhof, 2008.

KOLAREVIC, Branko. Architecture In The Digital Age: Design And Manufacturing: Spon Press, 2003.

DUNN, Nick. Proyecto Y Construcción Digital En Arquitectura: Blume, 2012.

VERHAEGH, Rob. Free Forms In Concrete. The Fabrication Of Free-Form Concrete Segments Using Fabric Formwork: Eindhoven University Of Technology. Department Of Architecture, Building And Planning, 2010.

ABEL, Chris. Birth Of A Cybernetic Factory. Architecture, Technology and Process: Elsevier, 2004.

WEST, Mark. Branching Structures. Cast From Flat Fabric Sheet Molds: University Of Manitoba's Centre For Architectural Structures And Technology, 2010.

HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago. Mecánica De Las Bóvedas De La Catedral De Gerona: Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Estructuras, 2004.

World Population Prospects. The 2012 Revision: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2013.

AUDIOVISUALES:

ANAYA DÍAZ, Jesús. La Arquitectura De Las Envolventes Curso De Verano De La UPM 2011 nº 306 El Paradigma De La Arquitectura Sostenible: ETSAM, UPM, 2011.

AZPILICUETA ASTARLOA, Enrique. Energía Y Materiales. Optimización Energética. Curso De Verano De La UPM 2011 nº 306 El Paradigma De La Arquitectura Sostenible: ETSAM, UPM, 2011.

POLLACK, Sydney. Sketches of Frank Gehry: Sony Pictures Classics, 2005.

WISCOMBE, Tom. Emergent: Texas A&M's Architecture Lecture Series, 2011.

OXMAN, Neri. Materialecology. On Designing Form: PopTech, 2009.

LYNN, Greg. Form. Future of Design: University of Michigan's Taubman College of Architecture and Urban Planning, 2009.

OTROS:

Además de las referencias expuestas arriba, se ha consultado también el sitio web de algunos de los autores mencionados en éste trabajo.

