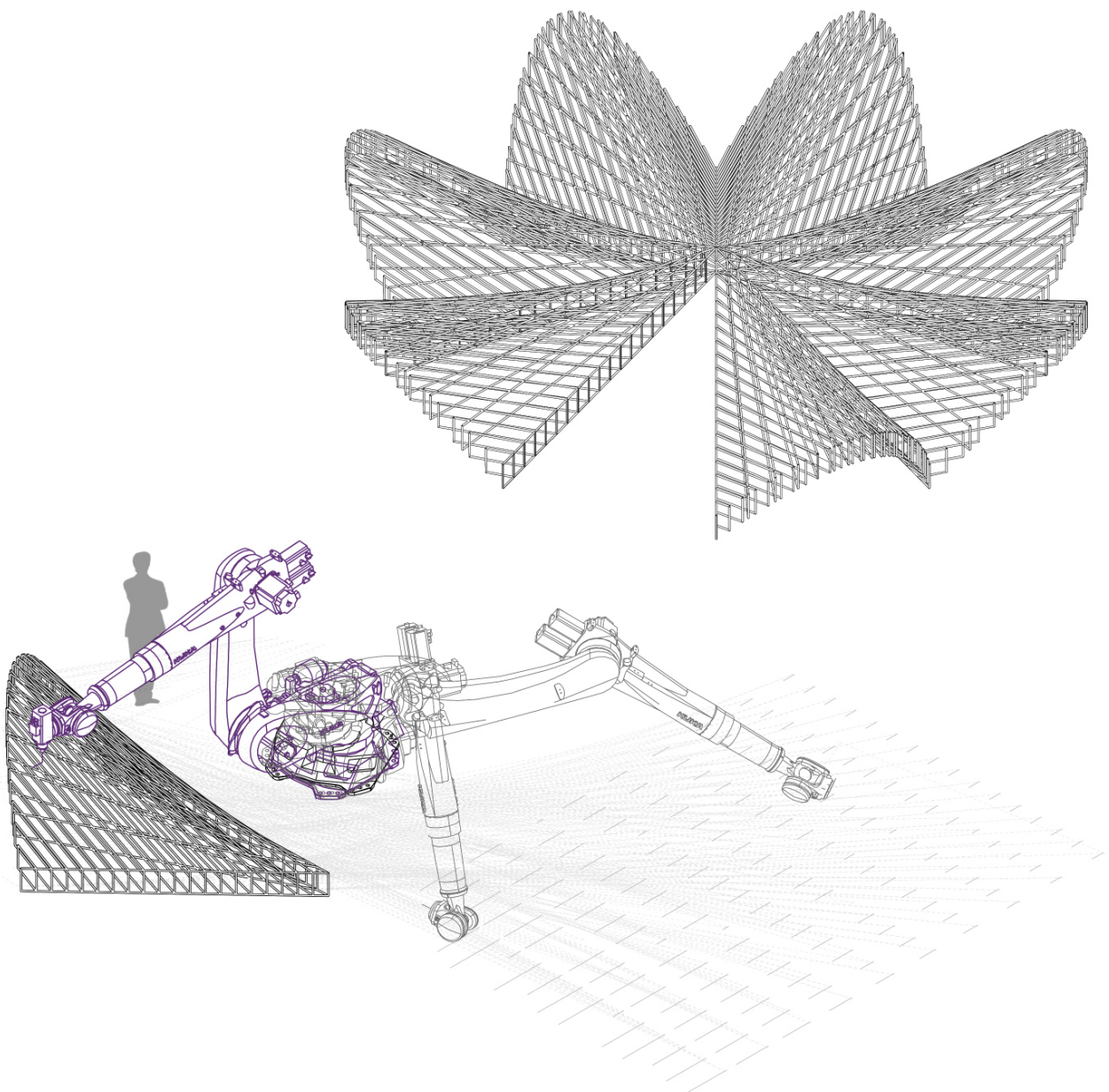


LA MANO ROBÓTICA EN ENCOFRADOS DE HORMIGÓN ARMADO

Marina Domingo Martín



Trabajo Fin de Grado
Enero 2023

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

Marina Domingo Martín

La mano robótica en encofrados de hormigón armado

TÍTULO TFG: LA MANO ROBÓTICA EN ENCOFRADOS DE HORMIGÓN ARMADO.

Estudiante

Marina Domingo Martín

Tutora

María Barbero Liñán

Departamento de Matemática Aplicada

Aula TFG 5

María Barbero Liñán, *coordinadora*

José Antonio Flores Soto, *adjunto*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

Enero 2023

Índice

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

METODOLOGÍA Y OBJETIVOS

ESTADO DEL ARTE

1. SUPERFICIES DE FORMA LIBRE Y REGLADAS

Superficie de forma libre

Superficie reglada

2. PRECEDENTES. ENCOFRADOS DE FORMA LIBRE EN EL S.XX

Félix Candela

Eduardo Torroja

Miguel Fisac

3. EL BRAZO ROBÓTICO EN ENCOFRADOS DE HORMIGÓN ARMADO

El brazo robótico como manipulador industrial

Construcción digital

4. CASO DE ESTUDIO. EL RESTAURANTE DE LOS MANANTIALES

CONCLUSIONES

FUENTES

Bibliografía y recursos digitales

Procedencia de las ilustraciones

Resumen

Los programas de diseño geométrico asistido por ordenador permiten pre-visualizar y modificar de forma dinámica el proyecto a construir antes de empezar. El avance tecnológico en el mundo digital y de la robótica en los últimos años ha impulsado la construcción digital y robotizada, dándole un nuevo significado a la construcción tal y como se había entendido hasta ahora. El desarrollo de nuevos procesos constructivos a partir de materiales tradicionales permite la creación de formas arquitectónicas que hasta ahora habían sido imposibles, tanto a nivel de ejecución como económicamente hablando.

Este documento pretende introducir al lector en el funcionamiento y las posibilidades que presenta la introducción del brazo robótico en la construcción. Partiendo del estudio teórico de los métodos tradicionales de construcción de superficies regladas no desarrollables, se llegará a simular con un brazo robótico la fabricación de dichas superficies de forma más sostenible, reduciendo los residuos derivados de la construcción de encofrados.

PALABRAS CLAVE

Construcción digital · Superficie de forma libre · Diseño paramétrico · Encofrado de hormigón · Brazo robótico

Introducción

La arquitectura robótica y los softwares de modelado 3D presentan un gran potencial de cara a la construcción de superficies de forma libre a partir de hormigón. Su implementación en la forma de proyectar permite obtener formas completamente innovadoras con un coste y una generación de residuos en el proceso más reducida. Esta temática resulta de gran interés ya que supone un antes y un después en la construcción de edificios, por eso se ha decidido dedicar este trabajo de investigación a la misma. Para dar una idea global del tema, este Trabajo de Fin de Grado se ha dividido en dos partes.

En primer lugar, para entrar en materia, se han analizado los métodos de construcción con hormigón que se han empleado a lo largo del siglo XX. Para ello, se han escogido tres referentes españoles que centraron gran parte de su obra en la construcción de arquitecturas de hormigón, convirtiéndose en pioneros de la construcción de superficies de doble curvatura, dando comienzo a la era de las estructuras de cáscara, una nueva forma de construir que aprovechaba las capacidades geométricas que presentan las superficies regladas para cubrir grandes espacios, con un gasto de material mínimo, ya que permiten la construcción de grandes luces sin apoyos intermedios, con un grosor de la lámina de hormigón muy reducido en proporción a su dimensión en longitud. Estos fueron Félix Candela (arquitecto, 1910-1997), Eduardo Torroja (ingeniero, 1899-1961) y Miguel Fisac (arquitecto, 1913-2006). Se han escogido algunas de las obras más representativas para los objetivos de este Trabajo de Fin de Grado de cada uno para analizar las características geométricas que presentan, los procesos constructivos que fueron llevados a cabo y las diferentes problemáticas a las que se enfrentaron.

Como contraposición de estos métodos tradicionales, se ha realizado un estudio y análisis sobre las nuevas investigaciones que se están llevando a cabo en el ámbito de la construcción digital, centrada en los manipuladores robóticos. Este estudio se ha centrado en dos tecnologías que aportan una solución eficaz y sostenible a la construcción de encofrados de hormigón armado para superficies de forma libre, ambas llevadas a cabo en los laboratorios del ETH Zúrich.

La primera se denomina Mesh Mould, y consiste en la fabricación de una malla de acero de retícula fina cuya función es doble, como encofrado para el vertido del hormigón, y como refuerzo estructural una vez el hormigón ha fraguado. La posibilidad de que el encofrado se pueda convertir en armadura de la estructura reduce los residuos generados en el proceso a prácticamente ninguno, además la fabricación a partir de un brazo robótico aumenta la precisión y la libertad geométrica del resultado final.

La segunda técnica estudiada se basa en la fabricación de encofrados a partir de impresoras 3D, esta se puede realizar con diferentes materiales como plástico o tela. Ambos materiales permiten un amplio abanico de posibilidades en cuanto a superficies de forma libre con una producción de residuos mínima; el encofrado de plástico permite la reutilización del material aplicando calor, y el de tela, al ser un material flexible, permite adoptar diferentes formas según como se tense. Estas nuevas formas de fabricación digital de los encofrados de hormigón redefinen por completo el proceso constructivo, así como las formas de proyectar arquitectura de forma libre.

En la segunda parte de este trabajo de investigación, se ha llevado a cabo un caso práctico en el que se hace uso de uno de los métodos de construcción digital estudiados en el apartado anterior para la reconstrucción de los cascarones del Restaurante de los Manantiales de Félix Candela. Para ello, ha sido necesario el aprendizaje del programa Grasshopper de modelización paramétrica. Este proceso a su vez ha sido dividido en dos, primero se ha aplicado a una superficie de doble curvatura más sencilla para que sea más fácil el entendimiento de la trayectoria generada para el brazo robótico; una vez asimilada, se ha puesto en práctica con la obra seleccionada de Candela.

El documento se ha estructurado en un estado del arte de la construcción digital en el momento actual. El capítulo 1 introduce unas nociones mínimas de la curvatura de superficies parametrizadas para después introducir las superficies de forma libre y las superficies regladas. El segundo capítulo presenta los métodos constructivos tradicionales para encofrados de hormigón armado a través de tres arquitectos famosos del siglo XX. El tercer capítulo introduce los brazos robóticos y sus usos en fabricación digital y el cuarto y último capítulo desarrolla el caso de estudio.

Metodología y objetivos

Este Trabajo de Fin de Grado se estructura en dos partes que se corresponden con el desarrollo del mismo a lo largo del semestre y la metodología empleada para el desarrollo de cada una. La primera parte, más teórica, consistirá en el estudio y la investigación del estado de la cuestión actual en la construcción de superficies de forma libre de hormigón armado. Se describirán los precedentes y los métodos que han sido puestos en práctica por diferentes arquitectos que decidieron adentrarse en este mundo, presentando las problemáticas a las que se fueron enfrentando durante el proceso.

Con el desarrollo de la tecnología, los robots también aparecen como herramienta constructiva para intentar dar respuesta a los problemas encontrados. Para esta primera parte, la metodología utilizada ha sido la lectura y análisis de artículos de investigación, tanto de las investigaciones desarrolladas en la actualidad, como de las que se desarrollaron a mitad del siglo pasado, de las cuales se van a presentar una serie de ejemplos ya realizados, para poder entender la evolución de la temática de estudio.

En la segunda parte, se llevará a cabo un caso práctico, el cual se centrará en la puesta en práctica de uno de los métodos robóticos de construcción de encofrados de forma libre que se han estudiado en la primera parte, y se intentará reconstruir uno de los ejemplos estudiados del siglo XX, analizando las ventajas e inconvenientes de estos métodos: viabilidad económica y constructiva, generación de residuos resultante del proceso, etc. Para ello, en esta segunda parte, será necesario el aprendizaje del software escogido, Grasshopper con el plugin Kuka PCR, de cara a poder adquirir los conocimientos necesarios para poder desarrollar múltiples encofrados de forma libre, y llevarlo a cabo en el caso de estudio seleccionado.

Los objetivos fijados para este Trabajo de Fin de Grado son tres, que han marcado el desarrollo de la investigación.

1. El análisis y entendimiento de los aportes que puede suponer para la arquitectura y la construcción de edificios la implementación de brazos robóticos en el proceso constructivo. Siendo necesario para ello una doble investigación previa, para entender tanto cómo se ha venido actuando en el último siglo la construcción de superficies regladas y de forma libre, como las últimas líneas de investigación tecnológica en el campo de la fabricación digital.
2. El aprendizaje y manejo del programa de modelización paramétrica Grasshopper (que a su vez es un plugin del programa de modelización 3D Rhinoceros) y de los plugins de este necesarios para poder realizar el código de programación de una simulación robótica. Se ha

utilizado un brazo robótico en el proceso constructivo de la superficie de forma libre de hormigón armado escogida para el caso de estudio.

3. Ser capaz de sintetizar todos los conocimientos adquiridos tanto en la parte teórica de investigación como en la parte práctica de programación para realizar una comparativa entre los métodos tradicionales y los nuevos, presentando tanto las ventajas como los inconvenientes que pueden surgir de cada uno de ellos y a partir de ello, poder proponer diferentes líneas de investigación y mejora.

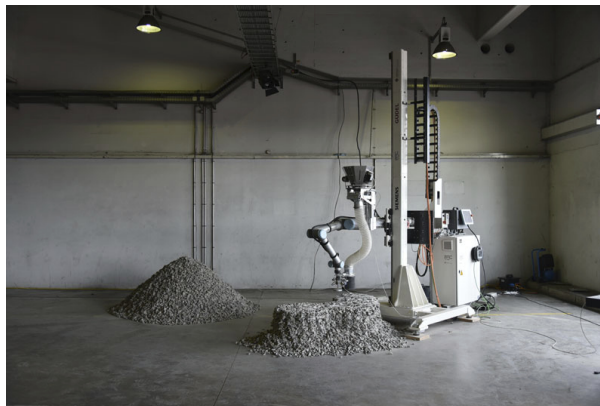
En resumen, este Trabajo de Fin de Grado presenta el brazo robótico como una herramienta constructiva en arquitectura. El hilo conductor es la construcción de encofrados de hormigón armado para superficies regladas no desarrollables, es decir, con curvatura de Gauss no nula. La arquitectura robótica es un tema de gran interés en el que están trabajando grupos de investigación en el ETH Zúrich (Suiza) y en la Universidad de Melbourne (Australia).

Estado del arte

La fabricación digital de arquitecturas basadas en el modelado paramétrico de superficies de forma libre se presenta en la actualidad como una línea de desarrollo futuro de la arquitectura y la construcción. No hace falta más que fijar la vista en las últimas edificaciones de mayor relevancia del panorama actual, para darse cuenta de que las formas buscadas en la arquitectura son cada vez de carácter más inverosímil. De la búsqueda de estas nuevas formas viene el avance e implementación de nuevas tecnologías y sistemas constructivos capaces de plasmar en la realidad los modelos parametrizados generados a partir de los softwares de diseño 3D.

Estas nuevas técnicas y avances tecnológicos plantean alternativas a la utilización de materiales más tradicionales, como pueda ser el caso del hormigón o la piedra (figs 0.1 y 0.2), de tal forma que se puedan lograr resultados más precisos, tanto a nivel estético como estructural, con una reducción significativa de los residuos generados.

Figuras 0.1 y 0.2. Ensayos de laboratorio llevados a cabo en el ETH Zurich.



Dentro de esta búsqueda de nuevas soluciones y desarrollos tecnológicos para procesos constructivos tradicionales, cabe destacar las múltiples líneas de investigación que se están desarrollando en el ETH Zürich de Suiza, principal fuente de inspiración de este Trabajo de Fin de Grado y de cuyos artículos bebe en múltiples ocasiones. Aparte de la gran variedad de investigaciones de laboratorio que se están llevando a cabo, tanto con drones, como brazos robóticos o impresoras 3D, el ETH Zürich en una iniciativa colaborativa con el Swiss National Centre of Competence in Research (NCCR) han fusionado algunas de estos nuevos procesos constructivos dando lugar a la DFAB HOUSE (figs 0.3 y 0.4), un proyecto completamente diseñado y producido de forma digital (tanto in situ como en laboratorios). En este proyecto se reúnen cinco nuevas formas de fabricación digital que,

por primera vez, han pasado de ser meramente objetos de investigación a una realidad arquitectónica:

1. El *In situ Fabricator*, un robot autónomo y versátil de construcción in situ, diseñado para adaptarse a los cambios y trabajar en los diferentes ambientes que se pueden crear en una obra. (fig 0.5)
2. *Mesh Mould*, un proceso robótico sin encofrado para estructuras de hormigón armado con acero en el que el robot va fabricando un entramado de malla de acero que sirve tanto como de encofrado para el hormigón como de refuerzo para una estructura portante, en DFAB House, esto se materializa en un muro de doble curvatura que separa y organiza los espacios en planta baja. (fig 0.6)
3. *Smart Slab*, losas de techo fabricadas con encofrado impreso en 3D, permitiendo obtener formas tanto estructural como funcionalmente optimizadas, logrando un nivel de complejidad y precisión sin precedentes en la construcción de hormigón a escala de edificios. (fig 0.7)
4. *Smart Dynamic Casting*, un proceso automatizado de encofrado deslizante de hormigón capaz de fabricar montantes de hormigón hechos a medida con diferente sección transversal en función de las cargas soportadas en cada punto. (figs 0.8, 0.9 y 0.10)
5. *Spatial Timber Assemblies*, una estructura de madera fabricada mediante la coordinación de varios drones. (fig 0.11)

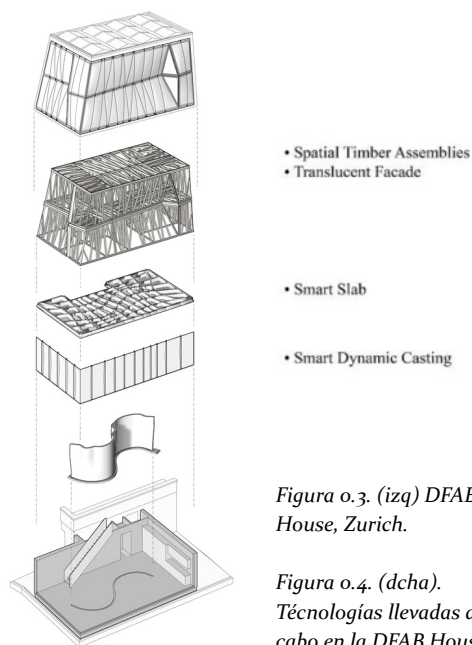


Figura 0.3. (izq) DFAB House, Zurich.

Figura 0.4. (dcha). Tecnologías llevadas a cabo en la DFAB House.

La combinación de estos procesos novedosos en un objeto construido permite poder adquirir una nueva visión frente al proceso general de planificación y construcción de edificios y explotar las ventajas inherentes a la cadena digital de diseño, planificación y fabricación, tales como la flexi-

bilidad de diseño, la economía de materiales, la eficiencia tanto a nivel de tiempo como de coste, y la innegable mejora en control de calidad final del producto. [1]

Figura 0.5. In situ Fabricator en el proceso constructivo de una Mesh Mould

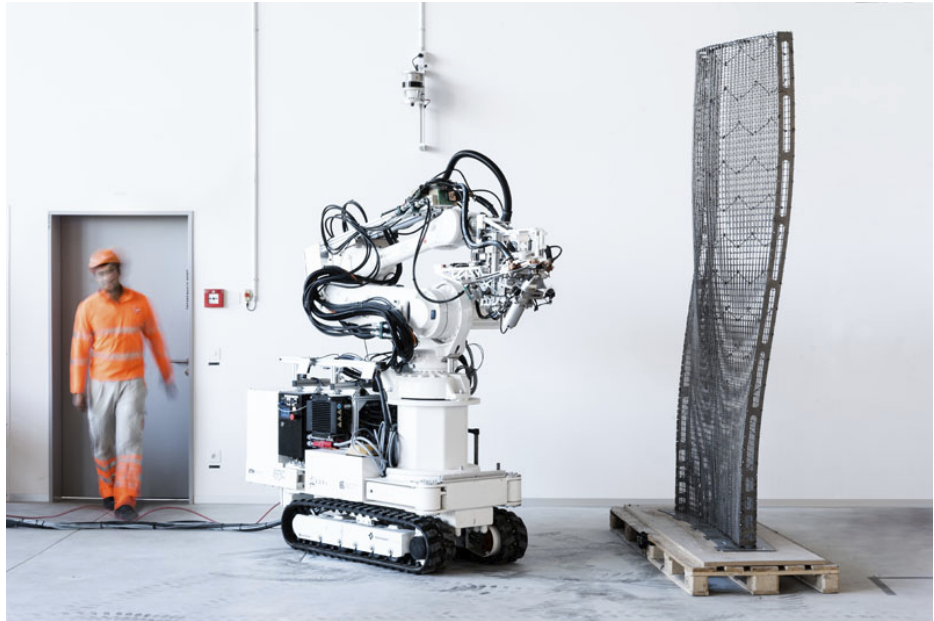
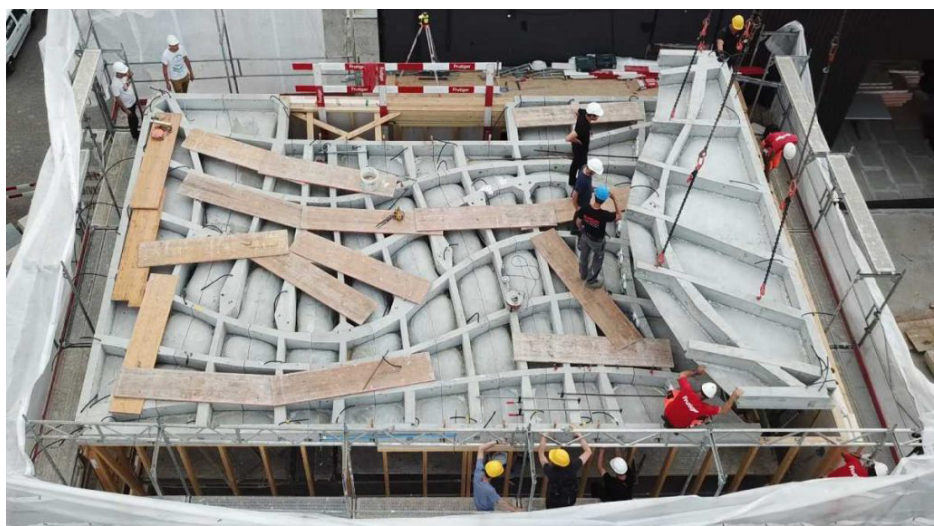


Figura 0.6. Proceso de instalacion y montaje de la malla de acero por el robot.



Figura 0.7. Proceso de instalacion y montaje de la Smart Slab.



1. Página del ETH Zurich sobre la DFAB House y las tecnologías que se implementan en ella.



Figura 0.8. (izq) Soporte de hormigón obtenido por Smart Dynamic Casting.



Figura 0.9. (superior dcha). Impresión del encofrado de hormigón con una impresora 3D.

Figura 0.10. (inferior dcha) Eliminación del encofrado de material plástico mediante calor.

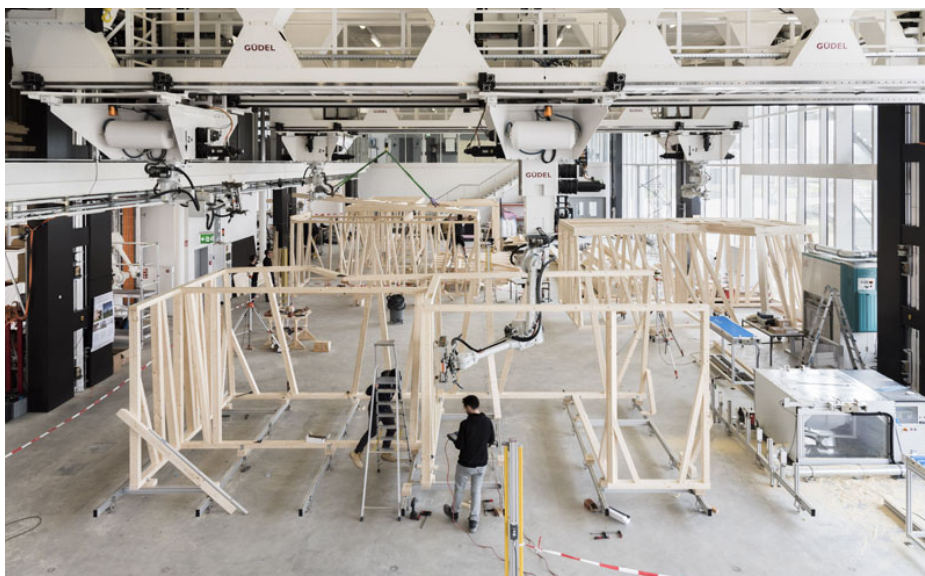


Figura 0.11. Proceso de montaje del Spatial Timber Assemblies.

Por otra parte, en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Melbourne, también están llevando a cabo varias investigaciones basadas en la búsqueda de nuevas formas de construcción con hormigón. *Robotic variable fabric formwork* es una de ellas que consiste en un encofrado textil variable desarrollado para crear junto con un brazo robótico, paneles de hormigón de doble curvatura inspirados en un paraboloide hiperbólico. El material textil se sitúa entre dos filas de barras metálicas que actúan de molde, una vez posicionadas, se vierte el hormigón dentro de la tela, de tal forma que adopta la geometría del molde (fig 0.12). Este molde está diseñado para ser extensible tanto a lo largo como a lo ancho, de tal forma que pueda dar lugar a una amplia gama de soluciones en función de lo que se busque obtener. Esta versatilidad de forma sin producir residuos en el proceso convierte a este sistema de fabricación digital en una tecnología de gran potencial (fig 0.13)



Figura 0.12. Colocación del molde en posición para realizar el vertido del hormigón.

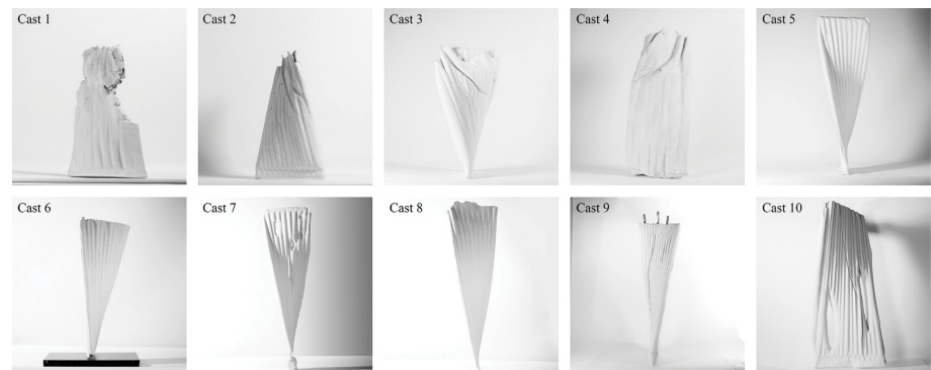


Figura 0.13. Pruebas obtenidas de los primeros experimentos.

La realidad de este trabajo de investigación gira en torno a los desarrollos digitales centrados en nuevas formas de construcción de superficies de forma libre con hormigón armado y las alternativas que se presentan frente a los encofrados tradicionales a partir de cimbras de madera. Sin embargo, también es importante mencionar y tener en el punto de mira otros métodos y líneas de investigación que se están llevando a cabo de forma paralela, tanto para obtener una visión menos sesgada del estado del arte actual, como para futuras temáticas de investigación en trabajos de fin de grado.

1 Superficies de forma libre y superficies regladas.

Con el objetivo de valorar las mejoras que presentan los procesos constructivos automatizados frente a los encofrados tradicionales con cimbras de madera, se han estudiado nociones matemáticas básicas de las superficies parametrizadas.

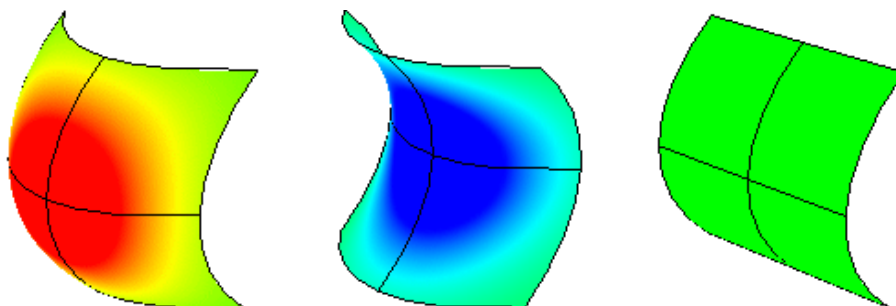
Una superficie es un subconjunto de $\mathbb{R}^3$ donde cada punto tiene un entorno similar a un trozo de plano que ha sido suavemente curvado. Se puede definir desde un punto de vista paramétrico como una aplicación $\sigma: U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ diferenciable. Dicha aplicación recibe el nombre de parametrización. La parametrización de una superficie no es única. [1]

Una superficie puede tener distintos puntos en función de la curvatura de Gauss en dichos puntos. La curvatura de Gauss es una medida intrínseca de la curvatura que no depende de la parametrización utilizada. En cualquier punto de una superficie, podemos encontrar un vector normal, ortogonal al plano tangente de la superficie. Los planos que contienen el vector normal en el punto se denominan planos normales. La intersección de un plano normal y la superficie forma una curva llamada sección normal y la curvatura de esta curva es la curvatura normal. En general, las diferentes secciones normales tendrán diferentes curvaturas y los valores máximo y mínimo de estas se denominan curvaturas principales, denominadas κ_1 y κ_2 . De tal manera que la curvatura de Gauss en un punto P de una superficie S es igual al producto de las dos curvaturas principales $K(P) = \kappa_1(P) \cdot \kappa_2(P)$. Existen tres tipos de puntos en función del valor de K , si $K > 0$ se dice que el punto es elíptico (fig 1.1) y significa que, en el entorno de ese punto, la superficie tiene forma de bol; si $K < 0$, el punto es hiperbólico (fig 1.2) y significa que la superficie en el entorno de ese punto tiene forma de silla de montar; y si $K = 0$, el punto es plano o parabólico (fig 1.3), lo que implica que la superficie contiene una recta por ese punto. [1]

Figura 1.1. (izq) Superficie en el entorno de un punto elíptico.

Figura 1.2. (centro)
Superficie en el entorno de un punto hiperbólico.

Figura 1.3. (dcha) Superficie en el entorno de un punto plano o parabólico.



Superficie de forma libre

A las curvas de CAD (Computer Aided Desing) o curvas de diseño asistido por ordenador, se las denomina curvas NURBS (Non Uniform Rational B-Spline), es decir, curvas B-Spline racionales. Las curvas NURBS son una evolución de las curvas de Bézier y de las curvas B-Spline. Todas ellas son empleadas para la generación de superficies de forma libre.

Existen dos formas de definir una curva en el espacio a partir de una serie de puntos dada, por interpolación (fig 1.4), es decir, la curva pasa por cada uno de los puntos marcados; y por aproximación (fig 1.5), los puntos marcados son los puntos de control de la curva trazada y esta no puede salirse del polígono que trazan estos puntos, al que se denomina envolvente convexa. Dentro de esta envolvente pueden trazarse distintas curvas en función del grado que tengan.

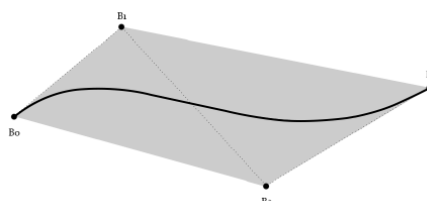
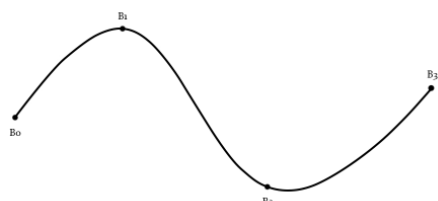


Figura 1.4. (izq) Curva de interpolación. Elaboración propia de la autora.

Figura 1.5. (dcha) Curva de aproximación. Elaboración propia de la autora.

Las curvas NURBS son las obtenidas a partir de un proceso de aproximación. Las superficies de forma libre son aquellas que están formadas por curvas de aproximación o curvas NURBS, de tal forma que, si variamos los puntos de control, se puede modificar la superficie resultante.

Curvas de Bézier.

Para definir una curva de Bézier se parte de una cantidad $n + 1$ puntos $B_0, B_1 \dots B_n$ que pueden estar situados en el plano (en R^2) o en el espacio (en R^3). Estos puntos se denominan puntos de control. El polígono de control o envolvente convexa es el polígono que obtiene tras unir los puntos de control, mediante una polilínea, tal que cualquier segmento entre dos puntos del interior o de la polilínea está completamente contenido en el polígono (fig 1.6 y 1.7).

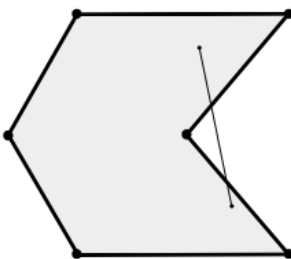
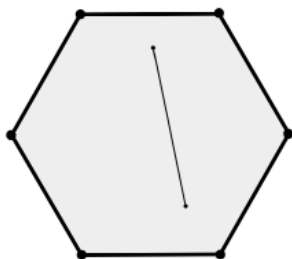


Figura 1.6. (izq) Polígono convexo. Elaboración propia.

Figura 1.7. (dcha) Polígono no convexo. Elaboración propia.

Esta parametrización se obtiene con el algoritmo de Casteljau a partir de los vértices o puntos de control, de tal manera que para 4 vértices B_0, B_1, B_2, B_3 . Sea t un parámetro en el intervalo $[0, 1]$. El algoritmo de Casteljau para parametrización de curvas de Bézier consta de tres pasos. [2]

1. Interpolar linealmente pares de puntos consecutivos para obtener la parametrización de las rectas que conforman el polígono de control.

$$Bo^1(t) = (1-t)Bo + tB_1$$

$$B_1^1(t) = (1-t)B_1 + tB_2$$

$$B_2^1(t) = (1-t)B_2 + tB_3$$

2. Interpolar linealmente pares de puntos genéricos consecutivos $Bo^1(t)$, $B_1^1(t)$, $B_2^1(t)$, para un mismo valor del parámetro t :

$$Bo^2(t) = (1-t)Bo^1(t) + t B_1^1(t)$$

$$B_1^2(t) = (1-t)B_1^1(t) + t B_2^1(t)$$

3. Interpolar linealmente los puntos genéricos de las curvas de grado 2, para un mismo valor del parámetro t , obteniendo la parametrización $P(t)$ de la curva de Bézier, que es un polinomio de grado 3:

$$P(t) = (1-t) Bo^2(t) + t B_1^2(t) = (1-t) Bo + 3(1-t)^2tB_1 + 3(1-t)t^2B_2 + t^3B_3$$

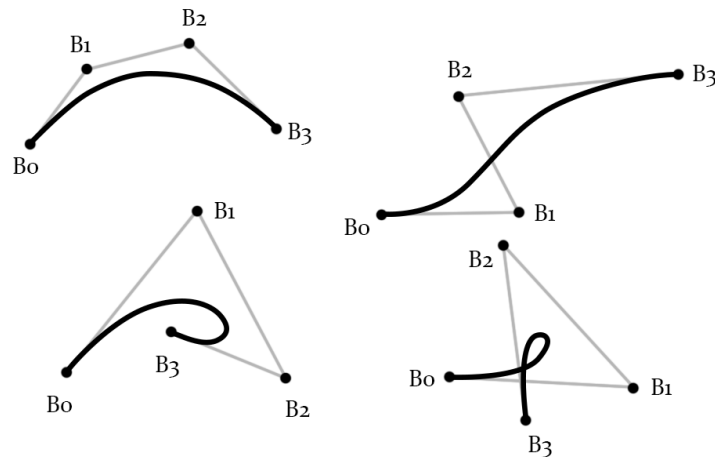


Figura 1.8. Curvas de Bézier de grado 3. Elaboración propia a partir de original de Sonia L. Rueda en Formas libres I: Curvas NURBS.

Curvas B-Spline

La utilización de polinomios de Bernstein, que son los obtenidos a partir del algoritmo de Casteljau, para la definición de una curva presenta algunas limitaciones, ya que el grado de la curva obtenida siempre es el número de puntos de control menos uno, y cualquier modificación que se aplique sobre alguno de estos puntos afecta de forma global a toda la curva. La base B-Spline corrige estas limitaciones y es la que define las curvas B-Spline.

Una curva B-Spline puede adoptar diferentes formas dependiendo de las funciones de la base B-Spline que se utilicen. Estas funciones varían en función del vector de nudos y del grado k escogidos. De esta manera, para definir una curva B-Spline se necesitan: los vértices del polígono de control $Bo, \dots, B_n$; el grado k (de orden $k + 1$) menor o igual que n ; y un vector creciente de nudos $X = (a = x_1, \dots, x_{n+k+2} = b)$.

La curva B-Spline está formada por trozos de curvas de Bézier, todas ellas del mismo grado k , que también será el grado de la curva B-Spline. [2]

Superficies NURBS o de forma libre

Las superficies NURBS son superficies B-Spline racionales. Las superficies B-Spline se definen a partir de una malla de control que permite la elección del bigrado y la elección de la base de las funciones utilizadas para definir la parametrización (figs 1.9 y 1.10). En las superficies NURBS, además de elegir el bigrado (h, k) de la superficie, podemos modificar el valor de los pesos para acercar o alejar la superficie de un vértice de la malla de control (fig 1.11). Cuando los pesos son todos iguales (pueden ser todos 1) la superficie tiene una parametrización polinómica, es una B-Spline no racional. Las elipses y las hipérbolas son curvas que no admiten una parametrización polinomial, por lo que se construyen mediante curvas B-Spline racionales. De la misma forma, la mayoría de las superficies cuádricas no son polinomiales y han de construirse mediante superficies B-Spline racionales. [3]

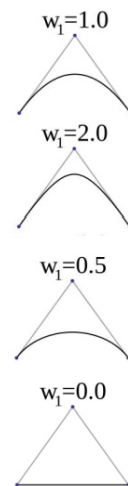
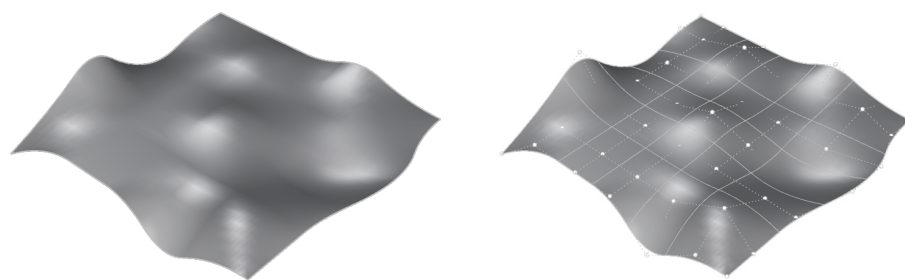


Figura 1.9. (izq) Superficie NURBS. Elaboración propia de la autora.

Figura 1.10. (dcha) Malla de puntos de control de la superficie. Elaboración propia de la autora.

Figura 1.11. (superior) Curvas NURBS con diferentes pesos en su punto de control intermedio

Superficie reglada

Dentro de las superficies de forma libre, las superficies regladas son aquellas que están formadas por una curva denominada directriz y una recta que se desplaza a lo largo de la curva, dando lugar a una serie de rectas que conforman la superficie final, a estas rectas se las denomina generatrices (figs 1.12, 1.13 y 1.14). Al estar formadas por una familia de líneas rectas, su fabricación presenta muchas ventajas, ya que se usan las generatrices para formar el molde o encofrado de la geometría a obtener.

Las superficies regladas solo pueden tener curvatura de Gauss negativa ($K < 0$), o curvatura de Gauss nula ($K = 0$), las primeras reciben el nombre de no desarrollables y las segundas de desarrollables. [1]

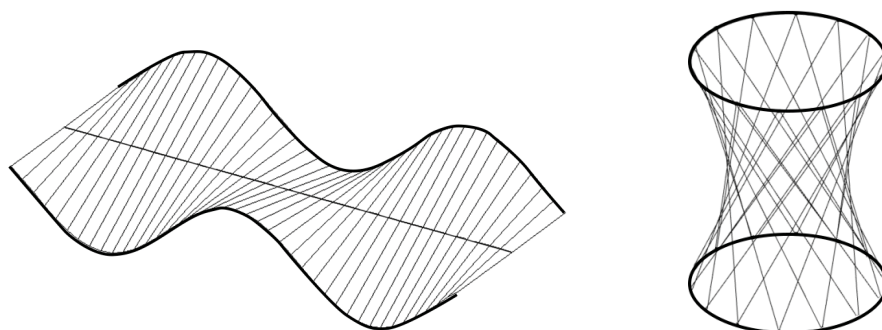


Figura 1.12. (izq) Superficie reglada a partir de una curva sinusoidal. Elaboración propia.

Figura 1.13. (dcha) Hiperboloide de una hoja. Elaboración propia.

1. Libro de Kristopher Tapp *Differential Geometry of Curves and Surfaces*.

3. Sonia L. Rueda en *Formas libres II: Superficies NURBS*

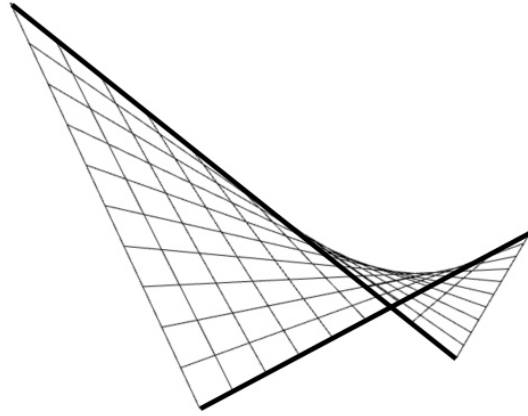


Figura 1.14. Paraboloide hiperbólico. Elaboración propia.

Las superficies regladas desarrollables, o superficies de curvatura simple, son aquellas que pueden ser desplegadas en el plano sin deformaciones o desgarros, como un cono o un cilindro. Se caracterizan por estar formadas por una familia de líneas rectas que poseen un plano tangente común en todos los puntos de una misma generatriz.

Las superficies regladas no desarrollables, o superficies de doble curvatura, no se pueden desplegar en el plano, como el hiperboloide de una hoja o el paraboloide hiperbólico.

Las cualidades geométricas que poseen las superficies regladas no desarrollables facilitan en gran medida su proceso constructivo, de tal manera que son a las que más han recurrido los arquitectos en el siglo XX para la proyección de arquitecturas innovadoras.

2 Precedentes.

Encofrados de forma libre en el Siglo XX.

Las superficies de forma libre han estado presentes en el mundo de la arquitectura desde las primeras construcciones, y muchos han sido los arquitectos que han basado su método de proyectar en las mismas, siempre buscando la eficiencia tanto estructural como estética en el resultado final. Con esta búsqueda de optimizar la construcción de superficies de forma libre, surgen las *shell structures* o también conocidas como estructuras de cáscara, a las que muchos de los arquitectos del siglo XX acuden de forma recurrente para proyectar algunas de sus obras arquitectónicas más famosas.

En la construcción de edificios se emplea el término estructura de cáscara para hacer referencia a estructuras conformadas a partir de una lámina delgada de hormigón, a la que se le dota de doble curvatura, es decir, las curvaturas principales tienen signo opuesto, para mejorar su comportamiento ante la transmisión de esfuerzos de compresión, tracción y cizallamiento situados en el plano de la superficie. Las propiedades geométricas de las estructuras de cáscara, las hace comportarse como una cáscara de huevo, permitiéndolas tener una gran resistencia frente a compresiones, además, suelen estar armadas con una malla de acero que también las hace resistir tracciones. Todo esto las convierte en estructuras autoportantes y permite además que los grosores que posean estas estructuras sean muy reducidos en comparación con las luces que pueden abarcar (fig 2.1). En resumen, una estructura de cáscara es considerada así cuando su forma se mantiene y las deformaciones no aumentan, a pesar de contar con una gran desproporción entre sus dimensiones [1]. Este tipo de arquitectura busca imitar las formas y geometrías orgánicas presentes en la naturaleza (fig 2.2), las cuales, llevadas a la construcción de edificios, permiten obtener una gran optimización del resultado, tanto a nivel funcional como estructural y estéticamente hablando, con un consumo de recursos y materiales mínimo.

1. Del libro *Shell structures for architecture. From finding and Optimisation*.



Figura 2.1. Capela Bosjes, Sudáfrica. Steyn Studio



Figura 2.2. Meiso No Mori
Municipal Funeral Hall,
Kakigahara, Japan. Toyo Ito

La construcción de cáscaras comenzó en la década de 1920 y se volvió relevante dentro del mundo de estructuras de hormigón de gran envergadura después de la Segunda Guerra Mundial. Desde entonces se han aprovechado las cualidades geométricas de formas complejas como paraboloides hiperbólicos, también conocidos como sillas de montar, para alcanzar luces de hasta 90 metros con un espesor inferior a 2 centímetros. [2]

Uno de los mayores retos a los que se han tenido que enfrentar los arquitectos en el desarrollo de estas estructuras es el convertir el modelo proyectual del diseño que se propone a una escala pequeña, en una arquitectura de dimensiones reales, y tratando de reducir al mínimo el error que se pueda producir en el cambio de escala. Para hacerse una idea del estado de la cuestión actual, es necesario entender cómo se ha venido resolviendo la construcción de este tipo de superficies en los últimos años, para ello, se han seleccionado tres arquitectos españoles que tuvieron una gran trayectoria dentro del mundo de la arquitectura de forma libre en hormigón armado durante el siglo XX: Félix Candela, Eduardo Torroja y Miguel Fisac. Se van a analizar las geometrías que conforman sus obras más significativas y los métodos constructivos que se emplearon para las mismas (fig 2.3).

2. De definición de estructura de cáscara por la Britannica.



Figura 2.3. Proceso
constructivo de una de las
cáscaras de Félix Candela

Félix Candela.

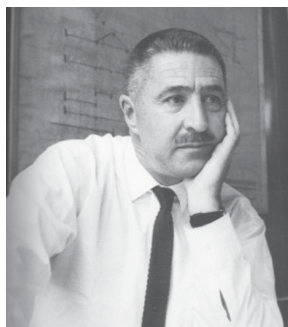


Figura 2.4. Félix Candela

Félix Candela (fig 2.4) fue un arquitecto madrileño nacido en 1910, se licenció en arquitectura en 1935 en la Escuela Superior de Madrid y estuvo trabajando sus primeros años como ingeniero. Tras la Guerra Civil Española tuvo que exiliarse a México, donde llevaría a cabo la mayor parte de sus proyectos, posteriormente se mudó a Chicago, donde trabajó en la universidad entre 1953 y 1970 y donde falleció en 1997. Su última obra y a la vez considerada una de las más importantes de su trayectoria fue el Oceanográfico de Valencia, inaugurado en 2003, la cual no llegó a ver terminada. [3]

Candela es considerado una de las figuras fundamentales de la arquitectura del siglo XX, conocido principalmente por ser uno de los pioneros en la arquitectura de las ya mencionadas estructuras de cáscara de hormigón armado, las cuales supusieron una gran aportación a la arquitectura del momento. Las superficies más empleadas por el arquitecto fueron los paraboloides hiperbólicos en todas sus variantes.

“Mi mayor satisfacción no es haber ejecutado ciertas estructuras espectaculares, sino haber contribuido a cubrir económicamente espacios habitables” [4]

Dos de las obras más emblemáticas de Félix Candela son el Restaurante los Manantiales (1958) ubicado en Xochimilco (Ciudad de México, México), y la planta embotelladora de Bacardí (1958-1960), la cual construyó en colaboración con el ingeniero Luis Torres Landa y está ubicada en Cuautitlán (México). Ambas tienen sus raíces en proyectos que ya se habían construido y para los cuales Candela depuró el sistema constructivo. En el caso del Restaurante de los Manantiales (fig 2.5), Candela toma inspiración del arquitecto René Sager y su Mercado de Royan (fig 2.6), modificando su geometría inicial con el objetivo de poder aprovechar las generatrices del paraboloide hiperbólico para facilitar su construcción y abaratar costes. Para el caso de la planta embotelladora de Bacardí (fig 2.7), Candela se inspiró en el Aeropuerto Internacional Lambert, en San Luis, Estados Unidos (fig 2.8), sustituyendo en su proyecto los semicilindros intersecados que conformaban el aeropuerto por paraboloides hiperbólicos.

3. De Biografías y Vidas. Enciclopedia biográfica de Félix Candela.

4. Cita. Félix Candela, Cuautitlán, México, 1959.

Figura 2.5. (izq) Restaurante de los Manantiales. Félix Candela

Figura 2.6. (dcha) Mercado de Royan. René Sager

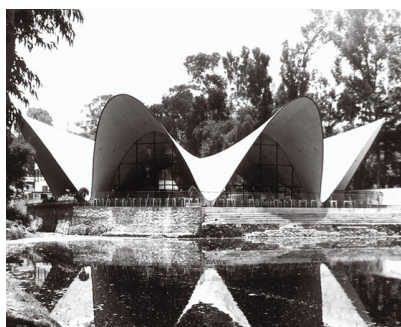




Figura 2.7. (izq) Planta embotelladora de Bacardi. Félix Candela.



Figura 2.8. (dcha) Aeropuerto Internacional de San Luis.

Para diseñar la geometría de estas arquitecturas, Candela sigue un patrón basado en la intersección de varios paraboloides hiperbólicos que giran en torno a un eje vertical (fig 2.9), de tal manera que generan una planta radial en la que se eliminan los esfuerzos horizontales ya que los módulos apoyan unos en los otros. Los arcos parabólicos generados en las intersecciones de los paraboloides transmiten los esfuerzos de los lóbulos al suelo, liberando así su borde. Para la construcción de estas geometrías Candela recurría al empleo de cimbras de madera (figs 2.10, 2.11, 2.12 y 2.13), cuya forma se componía a partir de las líneas generatrices de la superficie final que se quisiera obtener.

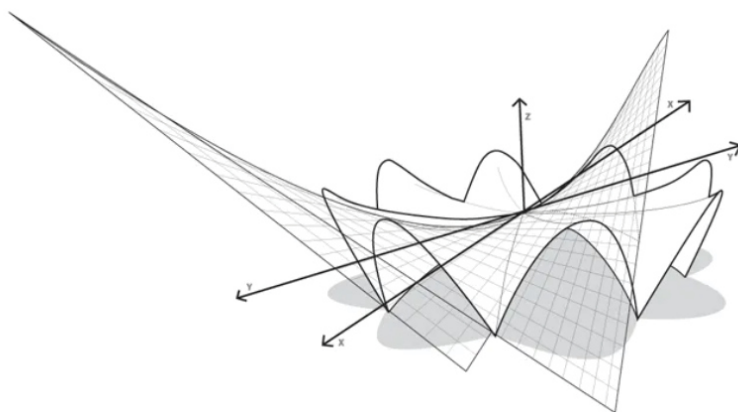


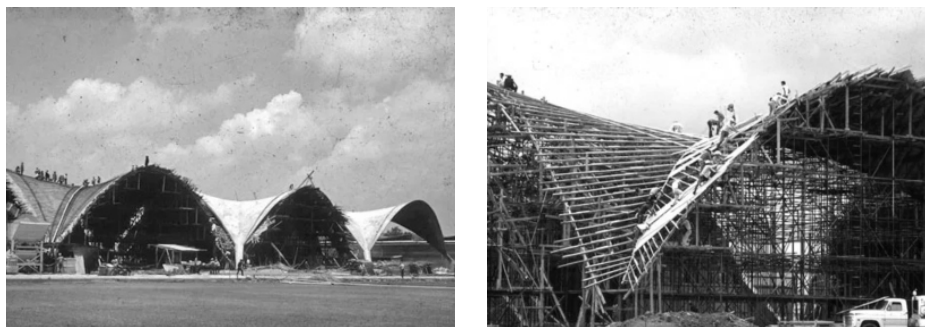
Figura 2.9. Diagrama paraboloides hiperbólicos intersecados entre sí



Figuras 2.10 y 2.11. Cimbra de madera empleada en el proceso constructivo del Restaurante de los Manantiales

El restaurante de los Manantiales se compone de la intersección de cuatro paraboloides hiperbólicos, que da lugar a ocho lóbulos. La distancia entre los apoyos es de 30 metros, pero los voladizos permiten superar la superficie a cubrir, llegando a alcanzar una separación de 42 metros para estos.

Figuras 2.12 y 2.13 Cimbra de madera empleada en el proceso constructivo de la Planta embotelladora de Bacardí



La planta embotelladora Bacardí se compone de seis bóvedas de arista de planta cuadrada que salvan de nuevo 30 metros de luz, cada una generada a partir de la intersección de dos paraboloides hiperbólicos. Los esfuerzos se transmiten al suelo gracias a unas vigas de refuerzo imperceptibles en forma de V que permiten dejar los bordes libres de nuevo. En esta obra cada uno de los paraboloides tuvo su propio encofrado, sin reutilizarlos para reducir costes. [5]

5. De Tesis doctoral *La arquitectura no construida* de Félix Candela.

Eduardo Torroja.



Figura 2.14. Eduardo Torroja Miret

Eduardo Torroja Miret (fig 2.14) fue un ingeniero, constructor, profesor e investigador madrileño nacido en 1899, se licenció en ingeniería de caminos, canales y puertos en 1923. Sus habilidades como proyectista destacaron ya desde sus primeros trabajos y pronto empezó a manifestar interés por la rama de la Arquitectura. En 1927 abre su propia oficina de proyectos en Madrid, involucrándose en varios proyectos arquitectónicos. En los próximos años desarrolla paralelamente su actividad docente y su actividad proyectista hasta aproximadamente 1948. La última parte de su vida se centra únicamente en labores de investigación en el Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento hasta su fallecimiento en 1961. [6]

Torroja es considerado como uno de los protagonistas de la revolución científica y técnica que dio pie al desarrollo del hormigón armado y pretensado en la primera mitad del siglo XX, contribuyendo en gran medida a la evolución de la industria de la construcción.

“La construcción, la arquitectura, no pueden prescindir de la realidad del fenómeno físico, esto es, de las leyes de la estática. Su belleza se funda esencialmente sobre la verdad, sobre la racionalidad de la estructura; debe, por tanto, poderse lograr sin adiciones ni ornamentaciones externas. Pero, para obtenerla, es necesario un esfuerzo largo y tenaz en el sentido de las íntimas razones de resistencia de las formas. El resultado genial de un momento de inspiración es siempre el epílogo de un drama, que frecuentemente está constituido por toda una vida de trabajo. “La obra mejor es la que se sostiene por su forma” [7]

6. De Fundación Eduardo Torroja.

7. Eduardo Torroja Miret en *Razón y ser de los tipos estructurales*, 1956, prólogo

Torroja también estudió las superficies de doble curvatura y sus propiedades estructurales, lo cual se puede ver reflejado en varias de sus obras arquitectónicas, como la marquesina del hipódromo de la Zarzuela (figs 2.15 y 2.16), la cual también podría ser considerada como una estructura de cáscara debido a que Torroja aprovecha su doble curvatura para dotarle de gran estabilidad estructural, lo que permite en este caso un vuelo de casi 13 metros con un grosor de no más de 5 centímetros en sus extremos; o en la cuba hiperbólica de Fedala (figs 2.17 y 2.18), un hiperboloide de revolución que permite un doble pretensado según sus dos familias de generatrices rectas.



Figura 2.15. Geometría de doble curvatura del hipódromo

Figura 2.16. Hipódromo de la Zarzuela.

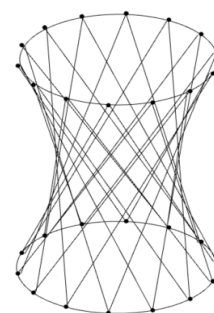


Figura 2.17. Hiperboloide de una hoja. Elaboración propia.

Figura 2.18. Cuba hiperbólica de Fedala

Para el diseño de la marquesina del hipódromo de la Zarzuela se partió de una serie de módulos conformados a partir de hiperboloides hiperbólicos de eje horizontal (fig 2.19), con los que posteriormente los arquitectos jugaron, rompiendo simetrías y sustituyendo las rectas de las hipérbolas de intersección de los sectores de hiperboloide. El resultado final del módulo obtenido no es un hiperboloide, pero a nivel estructural, al conservar la doble curvatura de la geometría inicial, su comportamiento es muy similar. [8]

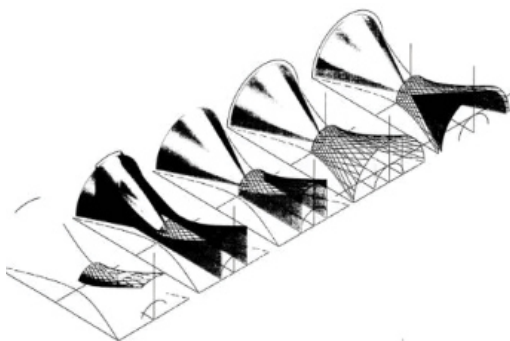


Figura 2.19. Geometría de proyecto inicial a partir de hiperboloides hiperbólicos

La cuba hiperbólica de Fedala parte de un hiperboloide de una hoja (fig 2.18) que se ensancha considerablemente en su parte superior. El proyecto consistía en el diseño de una cuba para un depósito de 3500 m² de agua, montada sobre un castillete circular de soportes ya existentes de hormigón armado. El espesor de la capa de hormigón armado va disminuyendo gradualmente, siendo de 28 centímetros en su base, se reduce gradualmente hasta llegar a 17 cm a la altura superior de la lámina de agua; el último tramo, mantiene un espesor constante de 10 centímetros. [9]

Torroja, al igual que Candela, también usa superficies regladas en su arquitectura, lo que hace relativamente sencillo su ejecución a partir de cimbras de madera (figs 2.20 y 2.21), capaces de simular la geometría deseada con bastante precisión en el resultado final. En el caso del hipódromo de la Zarzuela, la repetición de formas permitió que se pudiesen reutilizar los encofrados de madera hasta cuatro veces antes de desecharlos.

8. A partir de un informe sobre el Hipódromo de la Zarzuela en wikiarquitectura .

9. Informes de la Construcción Vol. 10, nº 98, Febrero de 1958. E.Torroja. La cuba hiperbólica de Fedala

Figura 2.20. (izq) Cimbra de madera empleada para hacer el encofrado del Hipódromo de la Zarzuela.

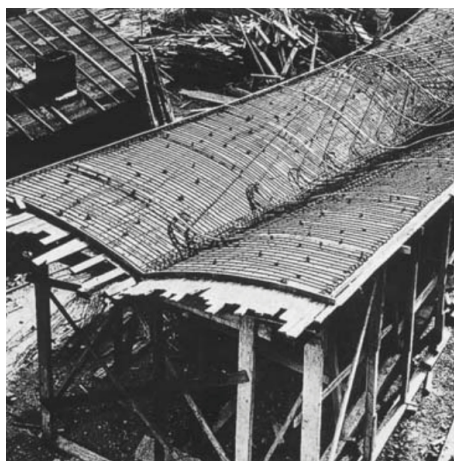
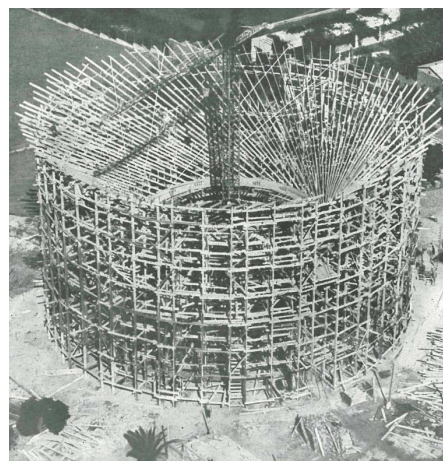


Figura 2.21. (dcha) Cimbra de madera empleada para hacer el encofrado de la Cuba de Fedala.



Miguel Fisac

Miguel Fisac (fig 2.22) fue un arquitecto, urbanista y pintor español nacido en Ciudad Real en 1913, consiguió su licenciatura en arquitectura en 1942 en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Fisac tuvo una gran trayectoria en sus más de sesenta años de profesión, abarcó todo tipo de proyectos, entre ellos obra religiosa, civil, institucional, residencial e industrial, dejando entre ellos algunos de los edificios más relevantes de la arquitectura del siglo XX y por los cuales es considerado por muchos el padre de la arquitectura moderna española. [10]

Fisac también mostró interés por otro tipo de ramas de la arquitectura, como el urbanismo o el diseño, e invirtió varios años en la investigación de las propiedades de los materiales, siendo el hormigón su favorito y con el que más experimentó. Así pudo desarrollar sus famosas vigas hueso (fig 2.23.), un elemento que fusiona arquitectura e ingeniería, fabricado a partir de hormigón pretensado de sección hueca que permitían cubrir grandes luces sin pilares intermedios. Hará uso de estas vigas en construcciones como el Centro de Estudios Hidrográficos, o el conjunto de oficinas para los laboratorios Jorba, de los cuales se hablará a continuación. También experimenta con los encofrados flexibles (fig 2.24) para dar textura a aplacados de hormigón dándoles la sensación de estar acolchados. La ventaja que presentaban este tipo de encofrados al ser de plástico era la posibilidad de recuperar su forma y ser reutilizados las veces que fuera necesario. [11]

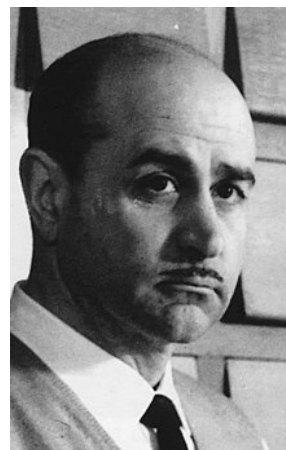


Figura 2.22. Miguel Fisac

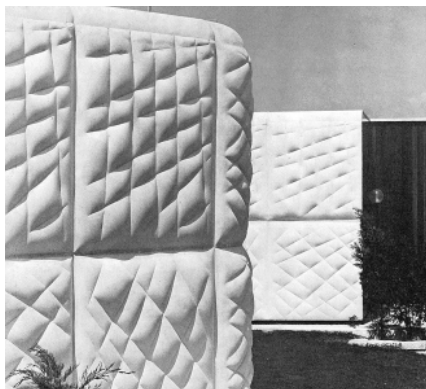
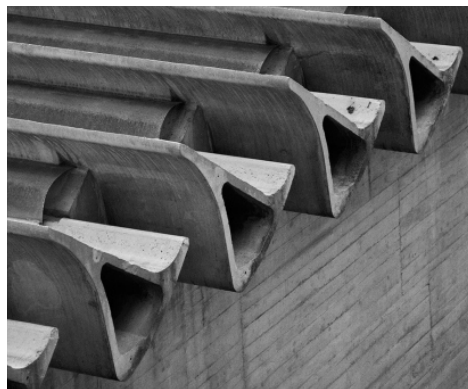


Figura 2.23. (izq) Vigas hueso

Figura 2.24. (dcha)
Paramentos de hormigón
obtenidos a partir de
encofrados flexibles

En cuanto a las arquitecturas de forma libre proyectadas por Fisac, cabe destacar las oficinas para los laboratorios Jorba, o más conocido como “La Pagoda de Fisac” (fig 2.25), que a la vez fue una de sus obras más polémicas, no solo por la época en la que se erigió (durante el régimen franquista, en 1965), sino también por la técnica que era necesaria para su levantamiento.

Este proyecto está separado en dos partes diferenciadas, tanto por su función como por su técnica constructiva. Por un lado, está la zona de producción y almacenamiento, en la que se emplea el sistema constructivo de las vigas hueso ya mencionadas; y por otro está la torre de oficinas que es

10. De biografía proporcionada por la Comunidad de Madrid.

11. TFG: La Pagoda de Fisac. Rocio Bejarano Gil.

objeto de interés de este Trabajo de Fin de Grado por el empleo de paraboloides hiperbólicos en su construcción. El paraboloides hiperbólico es considerado una de las formas más complejas e interesantes de la arquitectura (fig 2.26). Por un lado, al ser una superficie reglada, resulta muy sencillo de construir con hormigón ya que se puede obtener una superficie de doble curvatura a partir de una armadura de barras de acero rectas. Por otro lado, el paraboloides hiperbólico es una superficie que minimiza su área, es decir, permite cubrir espacios con la menor superficie posible (y el ahorro de materiales que eso supone), al mismo tiempo que optimiza al máximo la capacidad de resistir esfuerzos y tensiones provocados por la acción de cargas externas. [11]

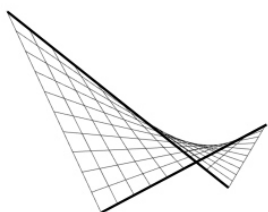


Figura 2.26. Paraboloides hiperbólico. Elaboración propia

Figura 2.25. «La Pagoda de Fiscac»



La torre consiste en una estructura de ocho plantas rectangulares, formada a partir de forjados y pilares de acero. Los apoyos quedan situados en el perímetro de la planta formando un octógono, de tal manera que liberaban las esquinas, permitiendo a las plantas girar 45° con respecto a la anterior medida que asciende (fig 2.27). Esto se repite en sus cinco plantas superiores, en las que se resuelve la transición entre plantas mediante paraboloides hiperbólicos; las tres plantas inferiores se mantienen en la misma posición en proyección horizontal.

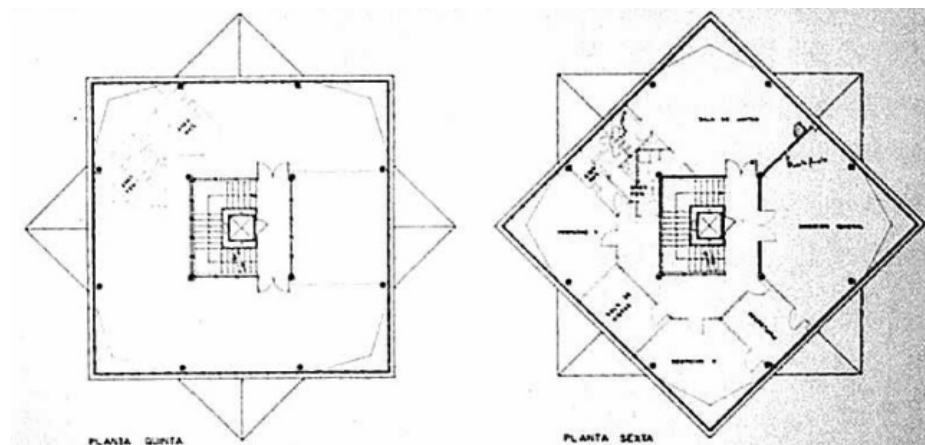
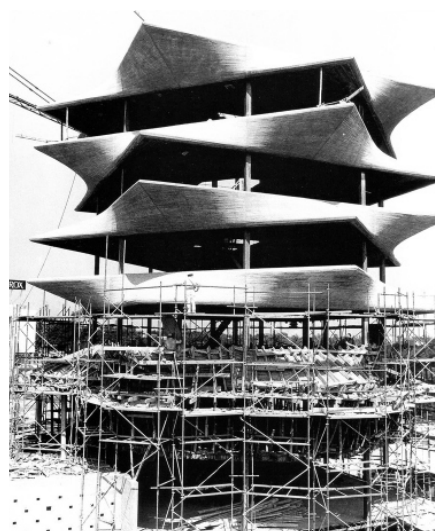


Figura 2.27. Torre de oficinas Jorba en planta

La piel de hormigón que envuelve la estructura fue ejecutada in situ con encofrado de tablilla, lo cual se puede apreciar perfectamente en la textura del acabado final del hormigón (figs 2.28 y 2.29). Al estar formada a partir de superficies regladas su ejecución es relativamente sencilla montando y girando poco a poco los listones. Fisac tuvo mucho cuidado en el proceso constructivo, ordenando su ejecución de arriba abajo, para que el hormigón que pudiera ir cayendo no ensuciara los pisos inferiores. [11].

” (...) He llegado a la conclusión de que las soluciones técnicas son las que dan pie a soluciones formales que puedan tener interés. Porque si no, salen unas formas que tienen un origen más literario que el propio formalismo arquitectónico. Yo el problema estético me lo planteo al final, cuando otras cosas que son prioritarias se cumplen en el principio del proyecto (...)” [12]



11. TFG: La Pagoda de Fisac. Rocío Bejarano Gil.

12. Extracto de entrevista a Miguel Fisac en «Encuentros digitales»

*Figura 2.28. (izq)
Construcción de La Pagoda*

*Figura 2.29. (dcha) Detalle de
textura obtenida en el acabado
final del hormigón en los
paraboloides hiperbólicos.*

De los ejemplos analizados se puede sacar como conclusión que construir un encofrado de las dimensiones requeridas en estos proyectos a partir de una superficie de doble curvatura no deja de ser un reto. Aunque se han encontrado formas de hacer posible su construcción, la desviación que se acaba produciendo entre el modelo proyectado y la ejecución final es significativa tanto a nivel estético como estructural, por no mencionar la cantidad de residuos generados en el proceso, siendo los más destacables las estructuras de madera construidas para las cimbras de los encofrados, que en muchos casos no se pueden reutilizar y acaba en vertederos.

En el siguiente capítulo se va a estudiar el desarrollo de nuevas formas de construcción digitales que ahondan en estas problemáticas que se han detectado con los métodos tradicionales y proponen nuevas alternativas.

3 El brazo robótico en encofrados de hormigón armado

La arquitectura robótica y los softwares 3d se proponen optimizar los procesos constructivos tradicionales al máximo, buscando alcanzar una mayor semejanza entre los modelos construidos y la realidad, al mismo tiempo que se reducen los tiempos y el material, logrando una arquitectura mucho más sostenible y eficiente.

El término robot fue introducido por primera vez en nuestro vocabulario por el dramaturgo checo Karel Capek en su obra de 1920 Rossum's Universal Robots. Desde entonces el término se ha aplicado a una gran variedad de dispositivos mecánicos. Prácticamente cualquier cosa que funcione con algún grado de autonomía, y por lo general bajo el control de la computadora, en algún momento ha sido llamado robot. La definición oficial que da la RAE (Real Academia Española) es "Máquina o ingenio electrónico programable que es capaz de manipular objetos y realizar diversas operaciones". El hecho de que pueda ser programable es esa cualidad que convierte a los robots en una herramienta extremadamente útil y adaptable (figs 3.1 y 3.2).

Figura 3.1. (izq) Robot empleado en industria textil como herramienta de precisión.

Figura 3.2. (dcha) Robot empleado en la industria alimentaria para cadena de producción



Este capítulo tiene por objeto hacer una breve introducción de las dinámicas detrás de un brazo robótico, así como un resumen de los tipos más comunes en el ámbito de la construcción digital. A continuación, se va a estudiar y analizar algunos de las diferentes investigaciones abiertas en la actualidad que involucran nuevos procesos constructivos a través de brazos robóticos que pretenden dar solución a diferentes arquitecturas de hormigón armado de forma libre.

El brazo robótico como manipulador industrial

Para este apartado se han tomado como referencia principal dos libros, el primero *Modelling and Control of Robot Manipulators* de los autores Lorenzo Sciavicco y Bruno Siciliano; y el segundo *Robot Modeling and Control* de los autores Mark W. Spong, Seth Hutchinson y M. Vidyasagar.

Los brazos robóticos presentan muchas restricciones en su uso, como su poca movilidad que limita considerablemente su área de movimiento. En contraposición a estos inconvenientes, presentan varias características que los hacen muy atractivos en un entorno industrial, ya que aumentan considerablemente la precisión y productividad, reduciendo los costes de mano de obra y de máquinas especializadas, ya que un solo robot presenta la flexibilidad necesaria para realizar varios trabajos (figs 3.3 y 3.4). También suponen un incremento de seguridad en las fábricas, ya que mientras que los trabajos repetitivos y aburridos acaban siendo peligrosos para el humano, son perfectos para un robot.

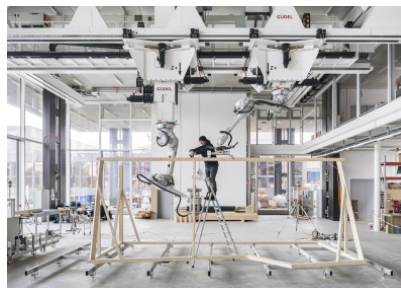
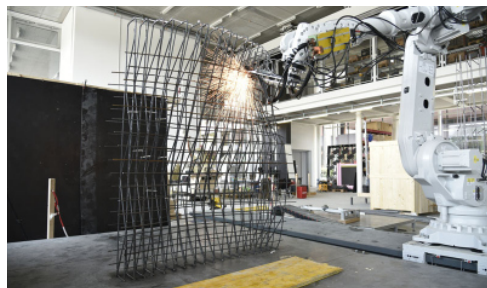


Figura 3.3. (izq) Robot colocando y soldando la armadura de un muro de hormigón prefabricado.

Figura 3.4. (dcha) Robot ensamblando una estructura de madera

Para el correcto empleo de un brazo robótico es necesario la realización de tres tareas previas, la planificación de rutas, la creación de trayectorias y el seguimiento de trayectorias. Esto permite generar un espacio de configuración, para que el robot pueda desenvolver su tarea y desplazarse de la posición inicial a la final, sin colisionar con otros elementos en el proceso. Esto se consigue gracias al control de posición, el control de fuerza y el control de visión.

El brazo robótico es principalmente un dispositivo de posicionamiento. La posición de un cuerpo rígido o volumen viene dada por las coordenadas (X,Y,Z) del centro de masas y por la orientación espacial dada por tres ángulos respecto a los ejes cartesianos de R^3 . (fig 3.5)

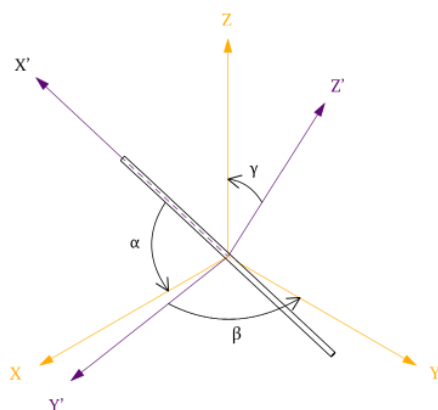


Figura 3.5. Orientación espacial de un sólido rígido. Elaboración propia.

Para poder controlar la posición de forma precisa, es necesario conocer las propiedades dinámicas del manipulador, y así poder determinar cuanta fuerza es necesaria ejercer sobre él para que se mueva. Si es escasa, el robot irá muy lento y tardará mucho en reaccionar, y si es demasiada, puede que acabe chocando con objetos o perder precisión en su posicionamiento. Obtener las ecuaciones dinámicas de movimiento de un robot es una tarea compleja, debido a la gran cantidad de grados de libertad que pueden existir en el sistema. Sin embargo, gracias a las denominadas ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange es posible derivar de forma sistemática las ecuaciones de movimiento del sistema deseado. Para poder definir de forma completa la dinámica de movimiento de un brazo robótico, es necesario determinar la dinámica producida por las fuerzas y pares necesarios para accionar el robot, así como la producida por los trenes de transmisión al transmitir la potencia desde los actuadores a los enlaces.

El control de posición de un brazo robótico supone el correcto seguimiento de la trayectoria programada sin que esta se vea afectada en ningún momento por perturbaciones externas como la fricción o el ruido. Una vez el manipulador ha llegado a la ubicación deseada, debe seguir la trayectoria fijada, manteniendo en todo momento una fuerza constante normal a la superficie. Es posible, que, conociendo la ubicación del objeto y la forma del contorno, uno podría mantener esa fuerza empleando únicamente el control de posición, aunque en la práctica sería bastante difícil, ya que el manipulador en sí es un elemento bastante rígido y cualquier error de posición debido a la incertidumbre de la posición exacta de la superficie, daría lugar a fuerzas extremadamente grandes que podrían dañar tanto la superficie como al robot.

El control de visión del robot se realiza mediante cámaras que actúan como sensores de proximidad del robot. En algunos casos lo que se busca es controlar el movimiento del manipulador en relación con algún objeto de la sala, y en base al cual el robot se va moviendo a través del espacio libre. En este caso, el control de fuerza no puede ser usado, en su lugar se usa la visión a través del ordenador para controlar el movimiento.

Los brazos robóticos (fig 3.6) se pueden clasificar de acuerdo con diferentes criterios, como su fuente de energía, la geometría, su espacio de configuración o su método de control. En función de como estén clasificados, será más fácil determinar cuál es el robot adecuado para cada tarea. Por ejemplo, un robot hidráulico no sería adecuado para la manipulación de alimentos, ya que su velocidad de respuesta los hace muy imprecisos, pero los hace muy útiles a la hora de levantar cargas pesadas. En este caso se va a explicar cómo se clasifican los diferentes tipos de brazos robóticos en función de su geometría, es decir, su forma de mover sus articulaciones en el espacio tridimensional.

La mayor parte de los brazos robóticos puestos en funcionamiento en la actualidad, tienen hasta seis grados de libertad (fig 3.6), y su clasificación viene dada en función de las tres primeras articulaciones que incluye. En función del movimiento que realice cada serie de articulaciones, se puede distinguir entre estos tipos de manipuladores industriales: articulado (RRR),

esférico (RRP), SCARA (RRP), cilíndrico (RPP), o cartesiano (PPP). Se usa la letra R para hacer referencia a una articulación rotativa, la cual actúa como una bisagra y permite el giro entre dos eslabones; y la letra P para hacer referencia a una articulación prismática o traslacional, la cual permite el movimiento lineal entre dos enlaces.

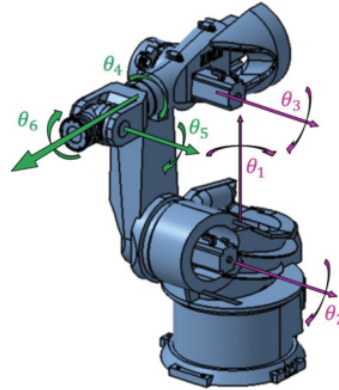
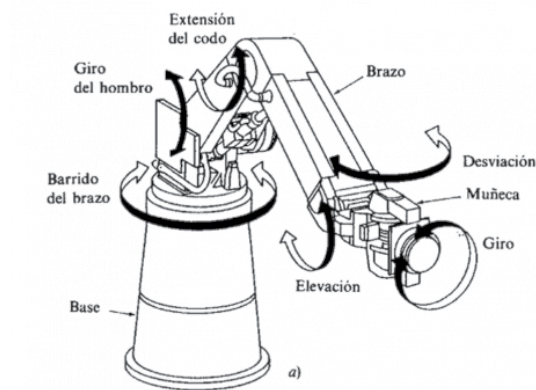


Figura 3.6. (izq) Diagrama de partes de un manipulador industrial.

Figura 3.7. (dcha) Diagrama de los grados de libertad existentes en un brazo robótico

Manipulador articulado (RRR)

También denominado manipulador antropomórfico, ya que su movimiento se asimila al de un brazo humano. Este brazo cuenta con seis grados de libertad ($Z_0, Z_1, Z_2, \theta_1, \theta_2, \theta_3$) (fig 3.8), lo que proporciona una gran libertad de movimiento incluso en espacios compactos (fig 3.9).

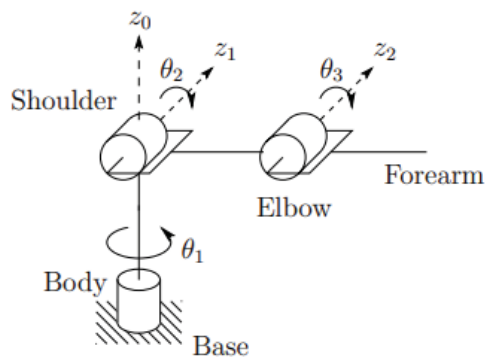


Figura 3.8. Diagrama de articulaciones de un manipulador RRR.

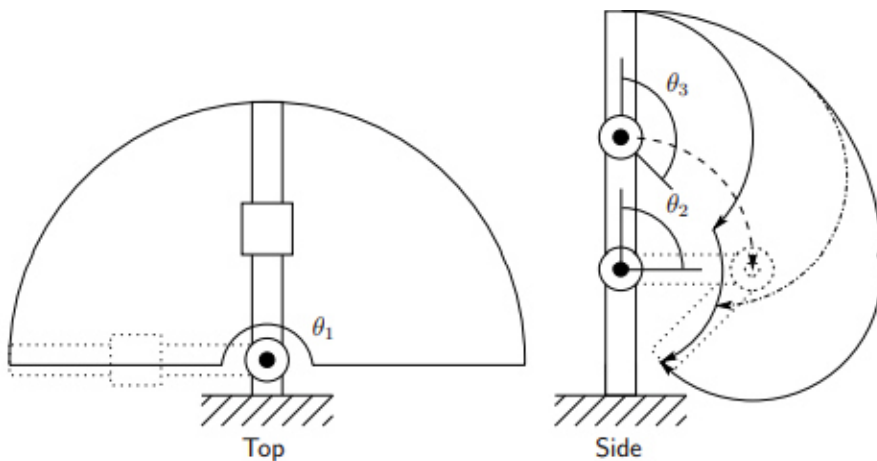


Figura 3.9. Diagrama de rango de movimiento del manipulador RRR.

Manipulador esférico (RRP)

En este caso, la tercera articulación rotativa del caso anterior se reemplaza por una prismática, dejando al brazo con cinco grados de libertad (Z_0 , Z_1 , Z_2 , θ_1 , θ_2). (fig 3.10)

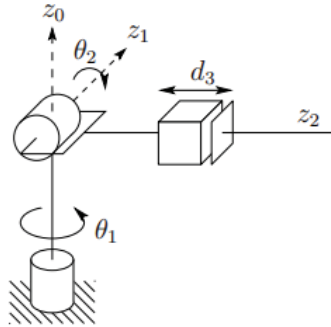


Figura 3.10. Diagrama de articulaciones de un manipulador RRP.

SCARA (RRP)

SCARA hace referencia a Selective Compliant Articulated Robot for Assembly. Este robot, a pesar de contar con una estructura RRP, es bastante diferente del manipulador esférico (fig 3.11), tanto en su apariencia como en su rango de aplicaciones. A diferencia del manipulador esférico, que tiene Z_0 perpendicular a Z_1 y Z_1 perpendicular a Z_2 ; el SCARA tiene Z_0 , Z_1 y Z_2 paralelos entre sí, cubriendo el espacio tridimensional de forma totalmente distinta. (fig 3.12)

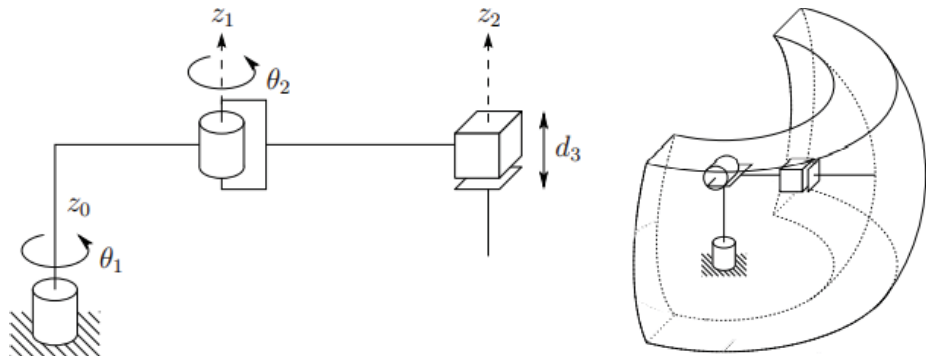


Figura 3.11. (izq) Diagrama de articulaciones de un manipulador SCARA.

Figura 3.12. (dcha) Diagrama de rango de movimiento de un manipulador SCARA.

Manipulador cilíndrico (RPP)

En este brazo, la primera articulación es rotatoria, produciendo un giro sobre la base, mientras que las otras dos articulaciones son prismáticas, cubriendo su espacio de trabajo de forma cilíndrica, como su propio nombre indica (fig 3.13).

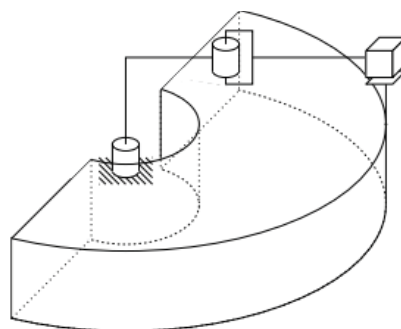


Figura 3.13. Diagrama de rango de movimiento de un manipulador RPP.

Manipulador cartesiano (PPP)

Cuenta con tres articulaciones prismáticas (fig 3.14), siendo el robot con la cinemática más simple de los mencionados. Este robot resulta muy útil para aplicaciones de montaje en mesa, y, al igual que los manipuladores Gantry o robots pórtico, para el traslado de material o carga.

Los manipuladores Gantry son un tipo de manipulador fijo dispuesto en forma de pórtico que cubre un espacio cúbico mediante movimientos lineales verticales y horizontales (fig 3.15). Este robot presenta muchas limitaciones de movimiento, lo que lo inhabilita para muchas tareas, sin embargo, resulta muy útil para otras, como la investigación académica por su precisión en el posicionamiento de la muñeca.

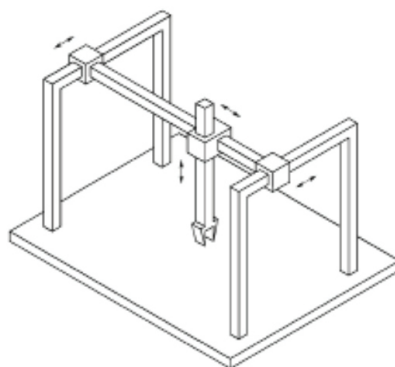
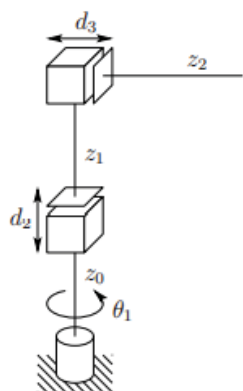


Figura 3.14. (izq) Diagrama de articulaciones de un manipulador PPP.

Figura 3.15. (dcha) Diagrama de movimiento de un manipulador Gantry.

Para el desarrollo del caso práctico de este Trabajo de Fin de Grado se ha escogido un brazo robótico de la marca Kuka Robotics de tipo articulado (RRR) para mayor facilidad de movimiento y alcance. Dentro de la industria robótica, Kuka es una de las empresas más consolidadas, disponiendo de una amplia gama de robots que abarcan diferentes sectores del mercado (fig 3.16). Además, Kuka dispone de un plugin dentro del programa Grasshopper que será el utilizado para las simulaciones del caso práctico (Capítulo 4 de este Trabajo de Fin de Grado).



Figura 3.16. Gama de robots de Kuka Robotics.

Construcción digital

La construcción digital es la aplicación de la tecnología de datos en el proceso de construcción para informar de todos los aspectos de un proyecto, desde el diseño hasta la entrega. La digitalización en el sector de la construcción está suponiendo una revolución tanto a nivel tecnológico como industrial, los procesos constructivos convencionales no permiten la fabri-

cación eficiente de superficies de forma libre a partir de hormigón. En esta búsqueda de la optimización arquitectónica, han surgido varias investigaciones que cambian radicalmente el concepto de proceso constructivo que se tiene en la actualidad.

A continuación, se van a describir algunas de las distintas posibilidades que ofrecen los brazos robóticos en cuanto a procesos de construcción digital con hormigón que existen en el panorama actual, como el Mesh Mould en el que el encofrado queda integrado dentro de la propia estructura final o la generación de encofrados a partir de impresoras 3D, que permite la completa reutilización de materiales. Se van a analizar los procesos constructivos que se desarrollan en cada uno de ellos, ambos han tenido la oportunidad de pasar de investigaciones de laboratorio a proyectos arquitectónicos reales, por lo que se puede hacer una comparativa directa entre ellos, así como de las ventajas e inconvenientes que pueden presentar al llevarlos a una escala más humana.

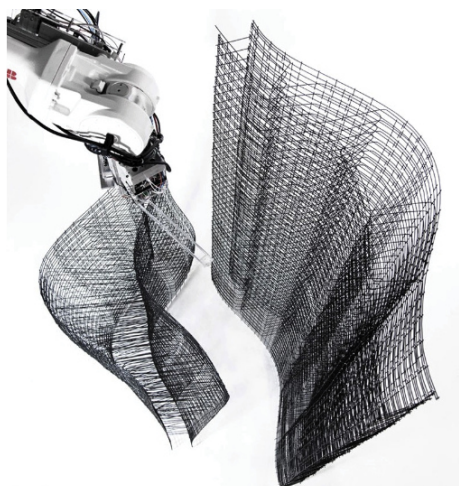
Estos procesos parten del diseño de la superficie de forma libre deseada con ayuda de un software 3D y la posterior discretización de esta, es decir, la descomposición de la superficie de doble curvatura en cuadriláteros o polígonos formando una malla con una forma equivalente. Cuanto mayor sea la discretización de una superficie, más exacto será el modelo final.

Mesh Mould.

Las geometrías curvas son, en realidad, estructuralmente más eficientes que las estructuras planas. Sin embargo, con los medios de producción actuales, la fabricación de encofrados y armaduras para geometrías de forma libre requiere mucha mano de obra, elevados costes de producción y una generación importante de residuos.

Mesh Mould redefine por completo los procesos constructivos tradicionales y aborda estas problemáticas al combinar armadura y encofrado en un único sistema de construcción in situ fabricado a partir de un brazo robótico. El robot construye una estructura a partir de una malla de acero que una vez vertido el hormigón, actuará como encofrado y como refuerzo estructural (fig 3.17). [1]

Figura 3.17. Brazo robótico tejiendo un entramado de malla de acero.



1. De los artículos de la página del ETH Zurich sobre el Mesh Mould y el In-situ fabricator.

Se parte de la superficie discretizada y se genera una malla de acero de retícula fina (unos 4 centímetros), la cual se duplica para dar a la superficie el grosor deseado en función del uso que vaya a tener o del aspecto final deseado. Una vez definida la geometría final, se emplea el brazo robótico de seis grados de libertad para ir tejiendo la malla por planos verticales. Una vez terminada la jaula metálica, se proyecta el hormigón al interior empleando una manguera (a esta técnica se le llama gunitado), la alta densidad de la malla permite retener el hormigón y darle forma. Una vez se ha completado el rellenado de hormigón es necesario un proceso de acabado para eliminar imperfecciones y obtener una superficie lisa. La malla queda dentro del hormigón y actúa como refuerzo estructural.

Debido a la precisión y eficiencia del brazo robótico, se pueden construir geometrías complejas, así como estructuralmente eficientes sin apenas costes adicionales, al mismo tiempo que los desechos generados en la construcción tradicional se eliminan del proceso.

Como se mencionaba al principio de este apartado, este sistema de construcción in-situ ha tenido la oportunidad de materializarse en un proyecto arquitectónico finalizado. En la DFAB House se ha realizado mediante esta técnica un muro de 12 metros de largo y 3 metros de alto que actúa como principal elemento portante del conjunto (fig 3.17;8). Se aprovechan las ondulaciones para endurecer el muro y aumentar su resistencia ante fuerzas como cargas verticales o pandeo. La geometría del muro le permite aguantar aproximadamente 100 toneladas de carga, provenientes de la losa de hormigón que actúa como techo del espacio generado por el muro (figs 3.19 y 3.20); y de la estructura de madera de dos alturas que se encuentra sobre él. [2]

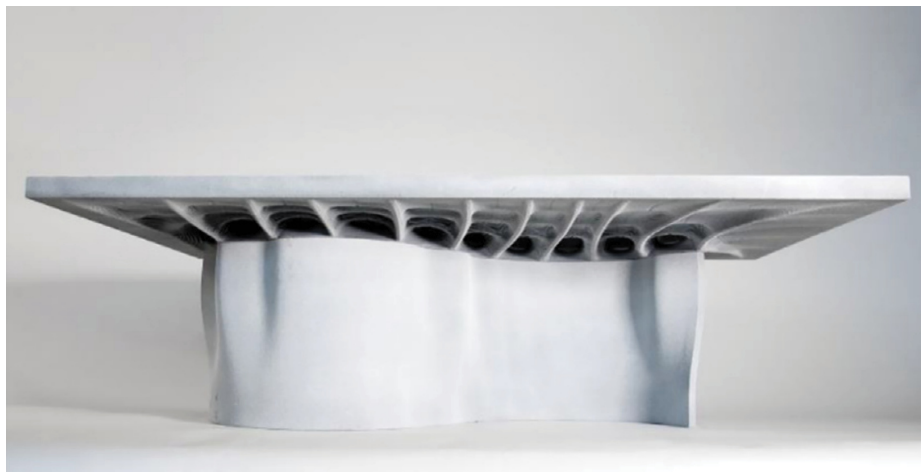
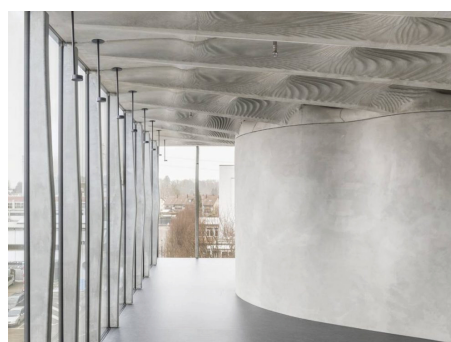


Figura 3.18. Conjunto de muro portante de Mesh Mould y forjado de losa Smart Slab.



Figuras 3.19. y 3.20. Espacio acabado de la primera planta de la DFAB House.

2. Del artículo *Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of non standard concrete structures: A real scale architectural demonstrator* publicado en *Automation in Construction*.

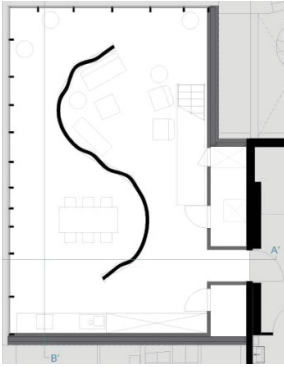


Figura 3.21. Primera planta de la DFAB House.

En cuanto al diseño paramétrico el muro de la DFAB House, se partió de la idea inicial de que la capacidad portante de la estructura la asumiese un único muro que al mismo tiempo configurase su aspecto en planta (fig 3.21). Para determinar su geometría final, se tuvieron en cuenta desde las primeras fases de ideación las posibles limitaciones que pudiera presentar este proceso constructivo en el flujo de trabajo del robot, de cara a evitar una posterior racionalización del diseño. Este enfoque integrado restringió las posibilidades configurativas del espacio únicamente a soluciones construibles por el robot. Una vez conocidas las limitaciones de este proceso, se aprovechó al máximo la gran libertad geométrica que ofrece este proceso de fabricación robótica, que se usó para diseñar una doble curvatura en el muro de cara a aumentar su rigidez. Se parte de una curva dibujada por el usuario, que servirá de base para la generación de una superficie NURBS, sobre la que se aplicarán las modificaciones paramétricas oportunas para definir las ondulaciones locales de la superficie. Sobre la superficie obtenida se realizarán dos análisis; el primero para comprobar la capacidad estructural; y el segundo para detectar posibles colisiones o conflictos que se puedan generar en el proceso entre el robot y la malla y resolverlos. Por último, se genera la geometría final. [2]

Proceso constructivo del Mesh Mould de DFAB House.



Figura 3.22. Diseño paramétrico del muro portante.

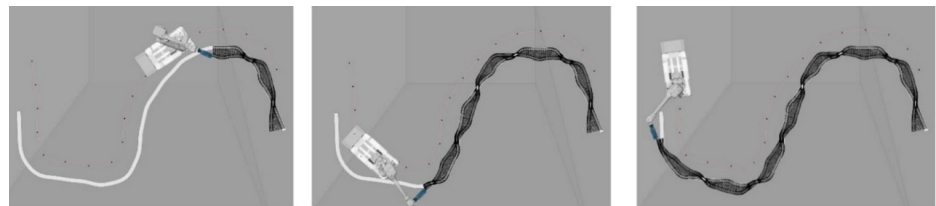


Figura 3.23. Trayectoria de ensamblaje del robot por planos verticales.

Figura 3.24. (izq) Robot ensamblando la malla de acero.



Figura 3.25. (dcha) Proyección pro gunitado del hormigón al interior de la malla.



2. Del artículo *Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of non standard concrete structures: A real scale architectural demonstrator* publicado en *Automation in Construction*.



Figura 3.26. Muro terminado.

Impresión 3D de encofrados para estructuras de cáscara.

La creación de encofrados flexibles para estructuras de cáscara de hormigón armado es una técnica constructiva novedosa que consigue reducir la generación de residuos en el proceso constructivo a cero. Existen varias líneas de investigación respecto a este concepto que emplean diferentes materiales para la conformación del encofrado.

El primero del que se va a hablar, emplea la impresora 3D para realizar un entramado a partir de plástico modificado ABS. En este proceso constructivo, después de discretizar la geometría deseada (fig 3.27), se imprime en 3D por partes (fig 3.28) (debido a limitaciones de tamaño de las impresoras 3D) con materiales sostenibles que permiten su completa reutilización una

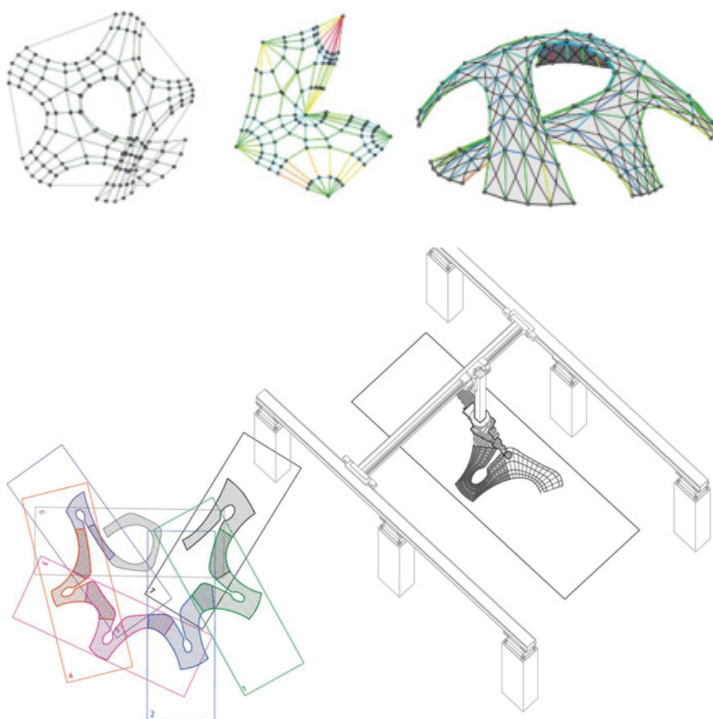


Figura 3.27. Discretización de la superficie de doble curvatura.

Figura 3.28. Impresión 3D del encofrado por piezas utilizando un manipulador de Gantry.

vez finalizado el proceso. Una vez impresas todas las piezas, se ensamblan entre sí adoptando la forma final que se usará como encofrado sobre el que posteriormente vamos a verter el hormigón. Para mejorar la rigidez estructural del plástico, se flexiona el plano impreso dotándole de doble curvatura para aumentar su resistencia a fuerzas exteriores. Como la flexibilidad del material plástico es limitada y la impresión se hace por planos, en el proceso de diseño de piezas a imprimir, es necesario convertir la pieza final de doble curvatura en una superficie desarrollable, que se pueda desplegar en el plano sin deformaciones o desgarros y que una vez impresa pueda moldearse con la forma deseada. Como refuerzo, se suele añadir estructura auxiliar a modo de cimbra. Los materiales con los que se construye la impresión 3D permiten un aprovechamiento posterior del 100%. En un futuro se espera que este método pueda aplicarse en proyectos de cáscaras cada vez más delgadas y eficientes.

Antes de diseñar la geometría final, hay que tener en cuenta dos aspectos; el patrón de hilo que va a tejer la impresora 3D a partir de la superficie discretizada, buscando aquel que aporte una mayor rigidez al conjunto; y que la geometría final de una estructura de cáscara normalmente cuenta con una doble curvatura, por lo que la geometría inicial debe sufrir las modificaciones necesarias para poder desarrollarse en una geometría plana. Una vez obtenidas las piezas de impresión 3D se ensamblan y se vierte la lámina de hormigón GRC (Glass Reinforced Concrete) sobre el encofrado (fig 3.29).

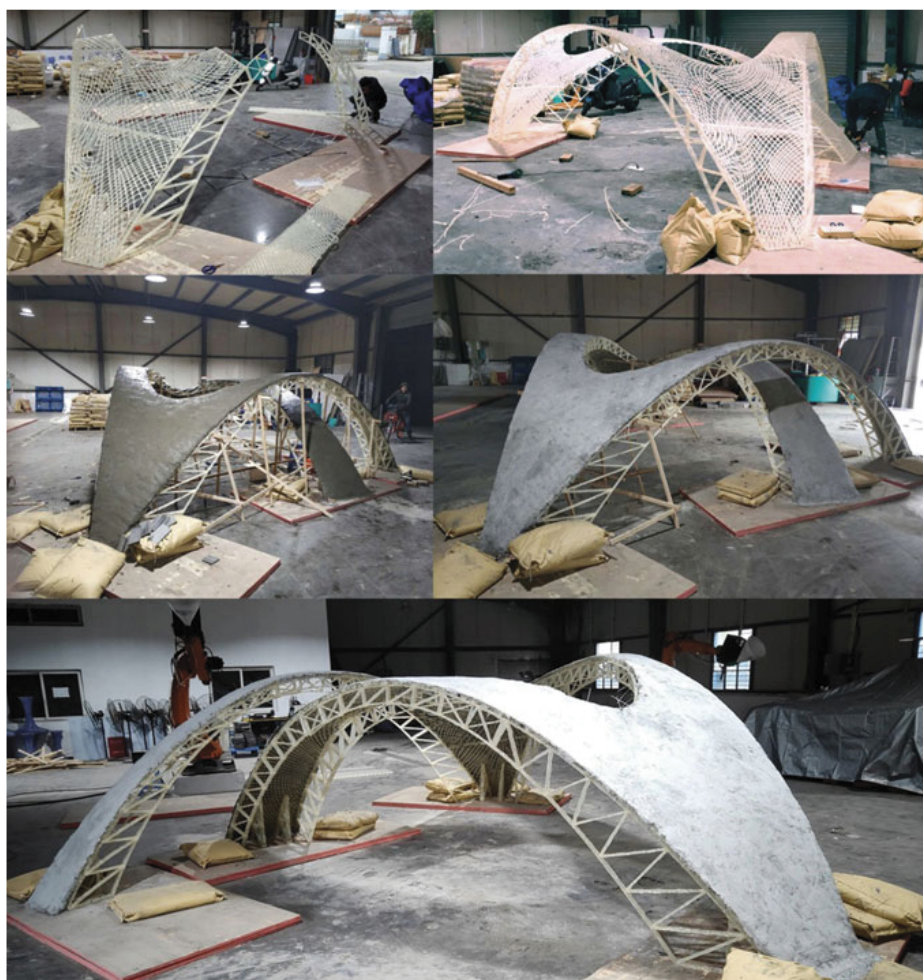


Figura 3.29. Proceso de ensamblaje del encofrado y posterior vertido y endurecimiento del hormigón.

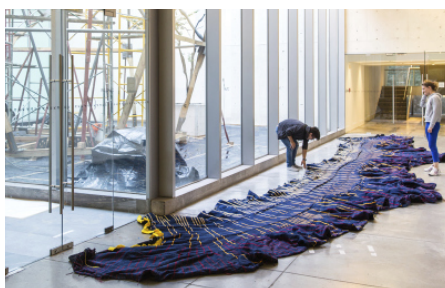
Como se menciona al principio de este apartado, existen otras líneas de investigación basadas en la impresión 3D que emplean otros materiales para realizar el encofrado, como la denominada KnitCrete, que genera el encofrado a partir de tela y cables. Esta técnica ha sido puesta en práctica por Zaha Hadid Architects (en colaboración con el ETH Zúrich), en la exposición en homenaje al arquitecto Félix Candela que tuvo lugar en 2018 en el Museo Universitario de Arte Contemporáneo (MUAC), en Ciudad de México, con una obra llamada KnitCandela, donde se muestra la libertad geométrica que ofrece esta nueva metodología de construcción con hormigón. (fig 3.30 y 3.31)



Figuras 3.30. y 3.31.
KnitCandela

KnitCandela es una estructura de hormigón de doble curvatura de casi 50 metros cuadrados de superficie y con un peso de 5 toneladas que fue montada in situ en el MUAC. Para su fabricación se parte de una red textil fabricada a partir de impresión 3D para ello utilizan un tejido técnico personalizado, tricotado en 3D, esta red será tensionada por cables hasta alcanzar la forma deseada y recubierta con una pasta de cemento especial para crear un molde rígido. Una vez esté posicionado el encofrado, se procede a su cubrición con pasta de hormigón dando como resultado final una cáscara fina de doble curvatura. Este proceso se pudo realizar en 36 horas y con una generación de residuos prácticamente nula (figs 3.32, 3.33, 3.34, 3.35 y 3.36).

Mientras que Félix Candela acudía a las superficies regladas de los paraboloides hiperbólicos para sus arquitecturas de cáscara, KnitCrete ofre-



Figuras 3.32, 3.33, 3.34 y 3.35.
Proceso constructivo del
KnitCandela: Impresión 3D
del tejido, tensado con cables
y vertido del hormigón.

ce al mundo de las estructuras laminares una nueva gama de posibilidades geométricas, ya que, con este sistema de encofrado a partir de tela y cable, ahora se pueden construir superficies de hormigón con formas libres, sin la necesidad de moldes complejos.



Figura 3.36. Estructura laminar terminada.

Existe un gran potencial en los métodos de fabricación digital en cuanto a temas formales, estructurales, económicos y ecológicos de un proceso de fabricación y diseño de sistemas de encofrado de hormigón armado, y aunque la construcción digital de la mano de robots todavía tiene limitaciones, estas son superadas por el abanico de posibilidades que se pueden llegar a alcanzar.

Una vez estudiadas y analizadas estas dos líneas de investigación de fabricación digital de encofrados de forma libre, el siguiente paso es aprender los softwares de modelado 3D para poder ponerlos en práctica en la simulación de un caso de estudio.

4 Caso práctico. El Restaurante de los Manantiales



Figura 4.1. Logotipo de Rhinoceros 3D.



Figura 4.2. Logotipo de Grasshopper.



Figura 4.3. Logotipo de Kuka PCR.

A partir de los conocimientos adquiridos en los capítulos anteriores, en este capítulo, se va a realizar un caso práctico que consiste en una simulación robótica que reconstruye el Restaurante de los Manantiales de Félix Candela mediante la técnica Mesh Mould estudiada en el capítulo 3.

El primer paso de esta segunda parte ha sido estudiar y aprender los softwares necesarios para la realización de esta simulación. Para ello se ha hecho uso del programa Grasshopper, un plugin de Rhinoceros 3D, que en su versión 7.21. ya viene con él incluido. Rhinoceros 3D (fig 4.1) es un software de CAD (Computer Aided Design) para modelado en 3D a partir de curvas NURBS. Grasshopper (fig 4.2) es un lenguaje de programación visual por componentes y cables que permite diseñar modelos paramétricos, esto hace posible la elaboración de diseños completamente dinámicos, siempre y cuando se identifiquen correctamente los parámetros definidos como deslizadores, que definen el algoritmo.

En el caso de este Trabajo de Fin de Grado, los conocimientos de Grasshopper eran escasos, por lo que ha sido necesario un aprendizaje cuidadoso de este, así como del plugin de robótica empleado para la simulación, Kuka PCR (Parametric Robot Control). Kuka PCR (fig 4.3) es un plugin de la asociación alemana Robots in Architecture, que integra en el entorno de Grasshopper toda la gama de productos desarrollados por la empresa Kuka. Posee un simulador robótico que permite visualizar de forma inmediata los resultados del programa de desplazamientos generado, detectando posibles fallos o colisiones que puedan ser generados en la trayectoria.

El objetivo de este capítulo es conseguir reproducir un encofrado para la geometría del Restaurante de los Manantiales. Como se analizó en el capítulo 1 de este Trabajo de Fin de Grado, Candela hace uso de paraboloides hiperbólicos intersecados entre sí y recortados por sus extremos, por lo que, primero se va a explicar cómo funciona el programa generado con una superficie de doble curvatura sencilla y con pocos puntos, y poco a poco se va a ir complejizando hasta obtener los famosos cascarones de Félix Candela.

El robot de la gama Kuka escogido para esta simulación es el modelo Kuka Quantec KR 120 R3900 K (fig 4.4), un brazo robótico de seis grados de libertad, con un alcance máximo de 3904 milímetros y una capacidad de carga de hasta 300 kilogramos (fig 4.5 y 4.6). La elección de este robot ha sido basada en dos criterios, que fuera de tipo articulado (RRR) para tener más libertad de movimiento; y que su rango de aplicación fuera lo más amplio posible, ya que las superficies con las que se van a trabajar son de gran dimensión. Por lo que la búsqueda se ha centrado en encontrar el robot de más alcance dentro de la gama de brazos robóticos articulados.

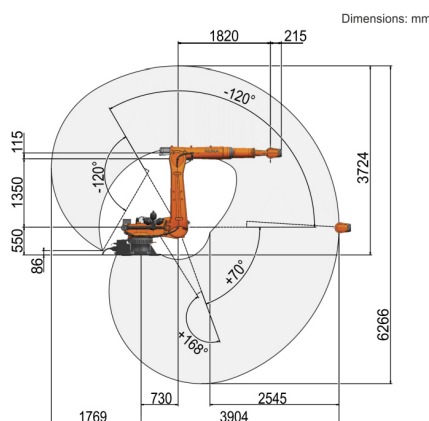


Figura 4.4. (superior izq)
Robot de la gama Kuka modelo
Quantec KR 120 R3900 K.

Figura 4.5. (superior
dcha) Área de movimiento
del brazo robótico Kuka
Quantec KR 120 R3900 K.

Datos técnicos

Alcance máximo	3904 mm
Carga nominal	120 kg
Carga máxima	146 kg
Máxima carga adicional columna giratoria/brazo de oscilación/brazo	300 kg / 130 kg / 150 kg
Repetibilidad de posición (ISO 9283)	± 0,05 mm
Número ejes	6
Posición de montaje	Suelo
Superficie de colocación	754 mm x 754 mm
Peso	aprox. 1280 kg

Figura 4.6 (Inferior izq)
Datos técnicos del modelo
Quantec KR 120 R3900 K.

Datos de los ejes

Rango de desplazamiento	
A1	±185 °
A2	-120 ° / 70 °
A3	-120 ° / 168 °
A4	±350 °
A5	±125 °
A6	±350 °
Velocidad con carga nominal	
A1	105 °/s
A2	101 °/s
A3	110 °/s
A4	190 °/s
A5	180 °/s
A6	260 °/s

Figura 4.7. (Inferior dcha)
Datos de los grados
de libertad del modelo
Quantec KR 120 R3900 K.

Mesh Mould en una superficie de doble curvatura.

La simulación del brazo robótico funciona transmitiendo al robot los valores relacionados a la posición y a la orientación inicial y final de los objetos que se están desplazando. La superficie a obtener en este primer acercamiento al programa será un paraboloide hiperbólico, para el que conformaremos la malla a partir de sus generatrices. En este caso para que sea más fácil de visualizar y entender, se le dará a la malla pocos puntos. Sin embargo, para el proceso constructivo de la Mesh Mould, es necesario obtener una retícula fina para contener el hormigón proyectado en su interior, por lo que el segundo paso, será dar a la malla inicial obtenida mayor densidad añadiendo un mayor número de puntos.

Para la obtención de una malla con forma de paraboloide hiperbólico, se van a aprovechar sus cualidades geométricas y se construirá a partir de sus generatrices para facilitar el proceso y optimizar el resultado. Se ha dividido la simulación en seis pasos, que se traducen en cuatro movimientos realizados por el brazo robótico al que se le darán los parámetros correspondientes a los puntos iniciales y los puntos finales de cada movimiento y a partir de ahí el robot trazará la trayectoria entre ellos.

Paso 1:

Se define la superficie de doble curvatura que se desea obtener a partir de un plano vertical de 1,40 metros de alto y 2,80 metros de ancho (fig 4.8). Se le aplica un giro de 45 grados al lado superior del muro respecto al eje vertical por el punto medio (fig 4.9). Las armaduras de acero necesarias para obtener la malla se colocarán en las generatrices del paraboloide obtenido. A partir del lado girado y la base se obtiene una superficie reglada cuyas generatrices no tienen la misma longitud que el muro inicial. Para la construcción de la malla de acero en la posición inicial, se tomarán los valores de longitud correspondientes a las generatrices de la superficie reglada no desarrollable de la Figura 4.9. (fig 4.10).

Figura 4.8. (superior izq) Plano de partida con generatrices.
Elaboración propia.

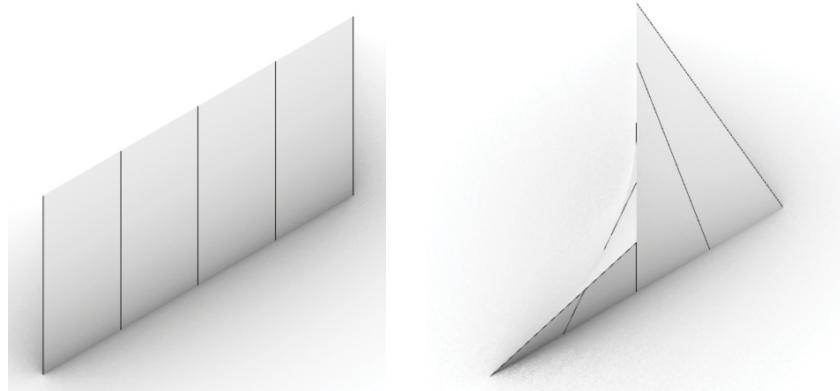
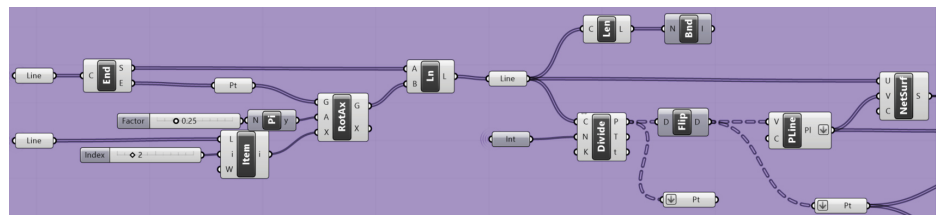


Figura 4.9. (superior dcha) Superficie reglada no desarrollable..
Elaboración propia.

Figura 4.10. (Inferior) Script de Grasshopper para generar la segunda superficie.
Elaboración propia.

**Paso 2:**

Con los valores obtenidos en el paso uno, se parte de las cinco generatrices en posición vertical (fig 4.11). El primer movimiento del robot será desplazar los extremos superiores de los cables de acero de la posición inicial en la que se encuentran (fig 4.12), a los puntos marcados por superficie final, de tal forma que conformen las verticales de la malla. (figs 4.13 y 4.14)

Figura 4.11. (izq) Plano generado con las nuevas longitudes de las generatrices.
Elaboración propia.

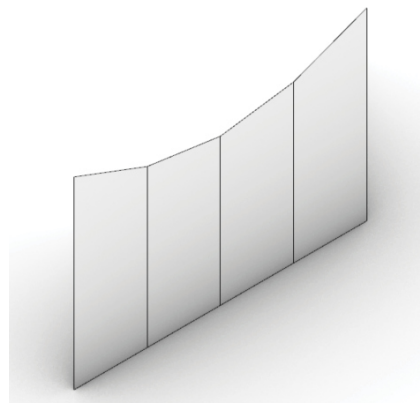
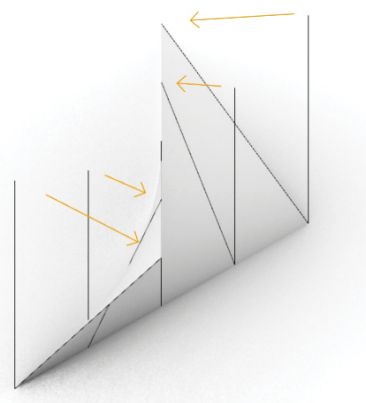


Figura 4.12. (dcha) Giro de las generatrices para obtener el plano deseado.
Elaboración propia.



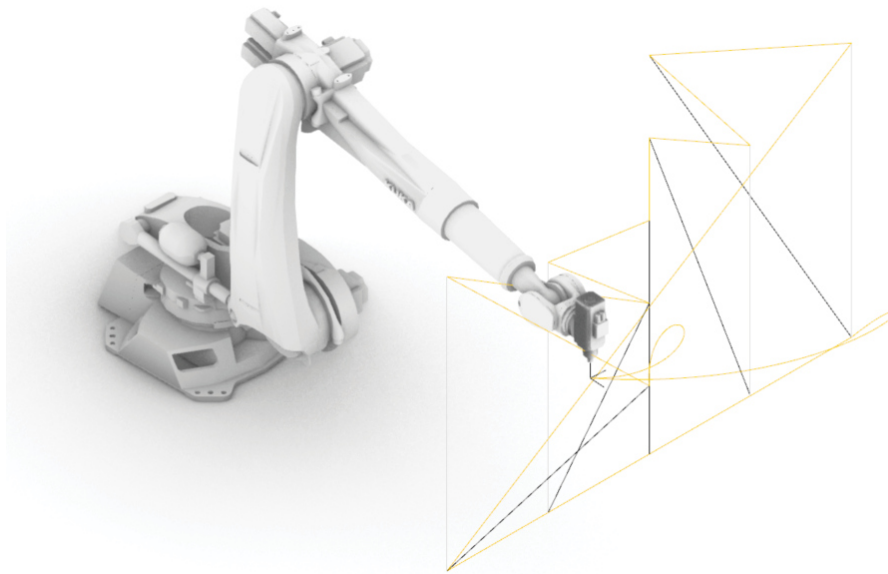


Figura 4.13. Primer movimiento del robot. Elaboración propia.

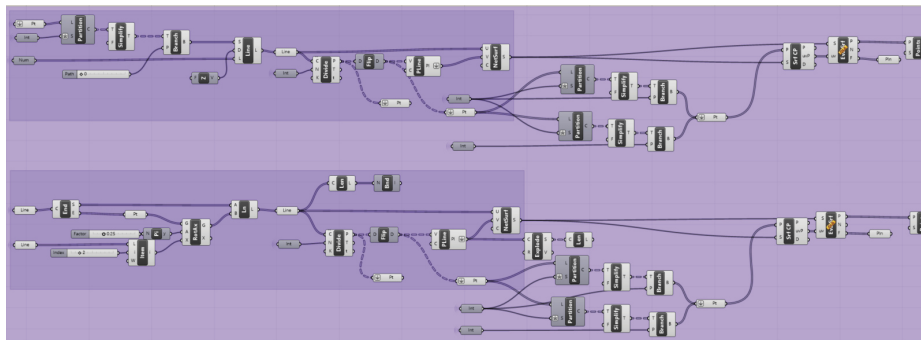


Figura 4.14. Script de Grasshopper para obtener la trayectoria. Elaboración propia.

Paso 3

Para fijar la posición de las verticales obtenidas en el paso 2, las horizontales se van a componer a partir de segmentos de longitud igual al espacio entre verticales que el robot irá soldando en los puntos marcados para dar rigidez al conjunto. Se parte de los segmentos de cable de acero situados en un plano a la izquierda del robot. El segundo movimiento a realizar será desplazar estos segmentos orientados en el eje Y, cogiéndolos por su punto inicial, a los puntos que subdividen cada cable de acero para ir conformando la malla del paraboloide hiperbólico, pero manteniendo la orientación inicial de los segmentos. (figs 4.15 y 4.16)

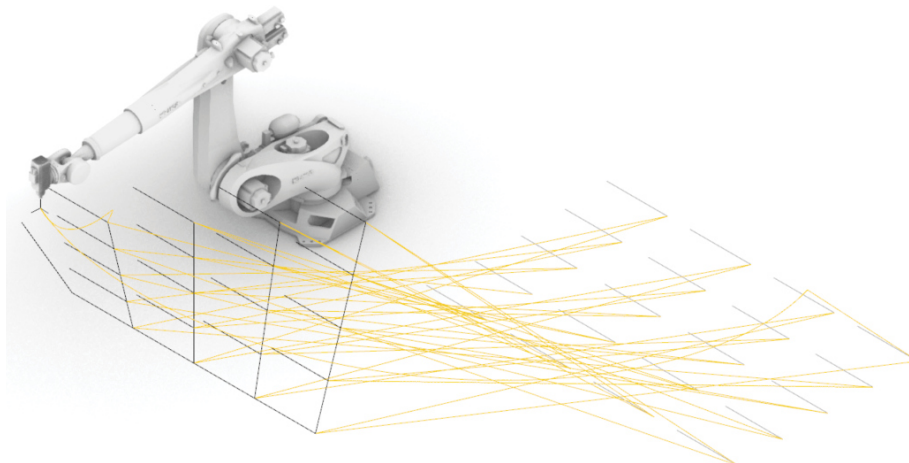
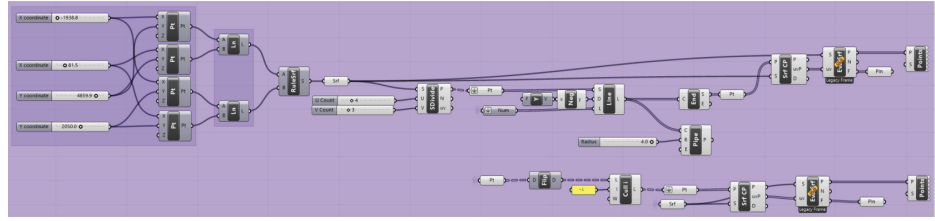


Figura 4.15. Segundo movimiento del robot. Elaboración propia.

Figura 4.16. Script de Grasshopper para obtener la trayectoria.
Elaboración propia.



Paso 4

Para completar la malla el tercer movimiento del robot será desplazar y fijar los puntos finales de los segmentos horizontales que en el paso 3 quedaron orientados al eje Y, a su posición final prevista en la malla. La familia de curvas horizontales y verticales da lugar a una retícula rígida y con uniones resistentes. (figs 4.17 y 4.18)

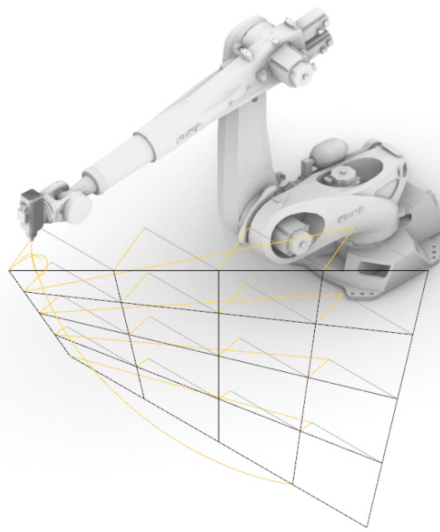
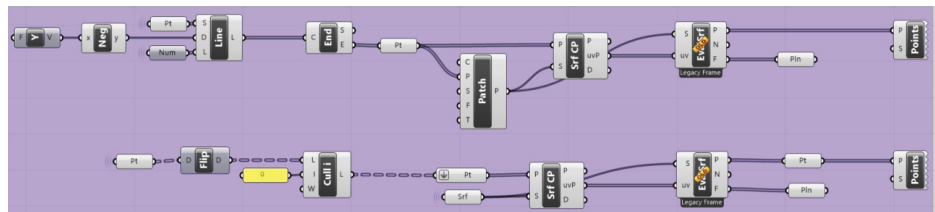


Figura 4.17. Tercer movimiento del robot. Elaboración propia.

Figura 4.18. Script de Grasshopper para obtener la trayectoria.
Elaboración propia.

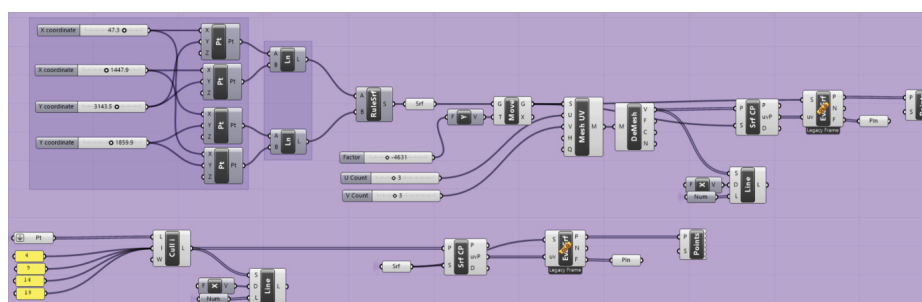
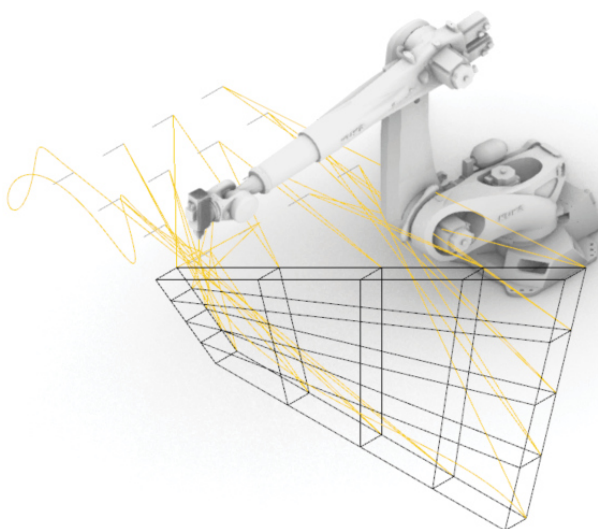
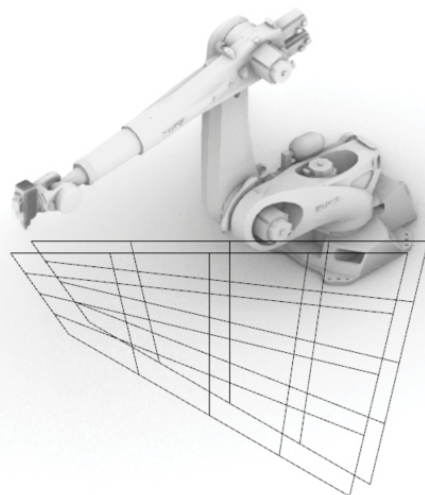


Paso 5

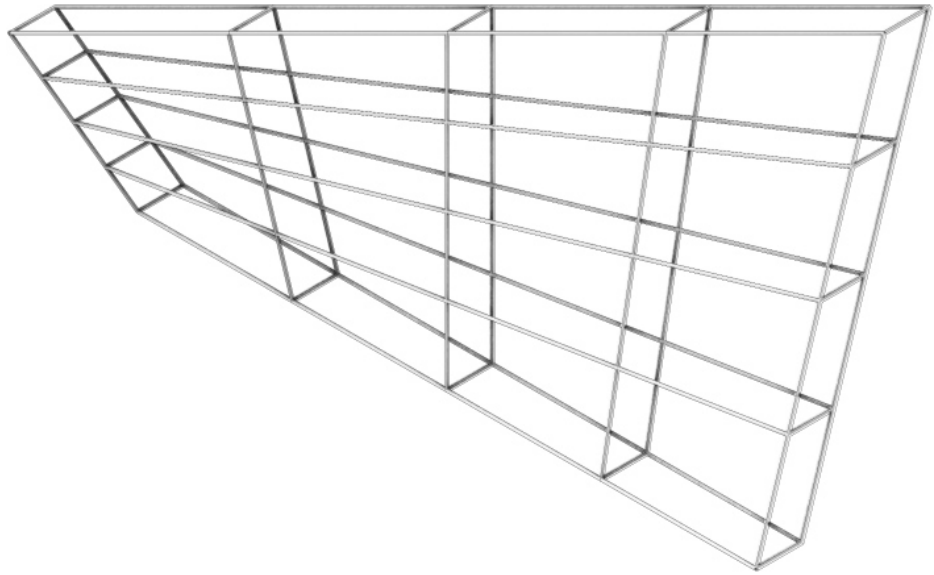
Se repite el proceso anterior para duplicar la malla del paraboloide hiperbólico y se colocan enfrentados entre sí 20 centímetros para generar una jaula que contenga al hormigón armado. (fig 4.19)

Paso 6

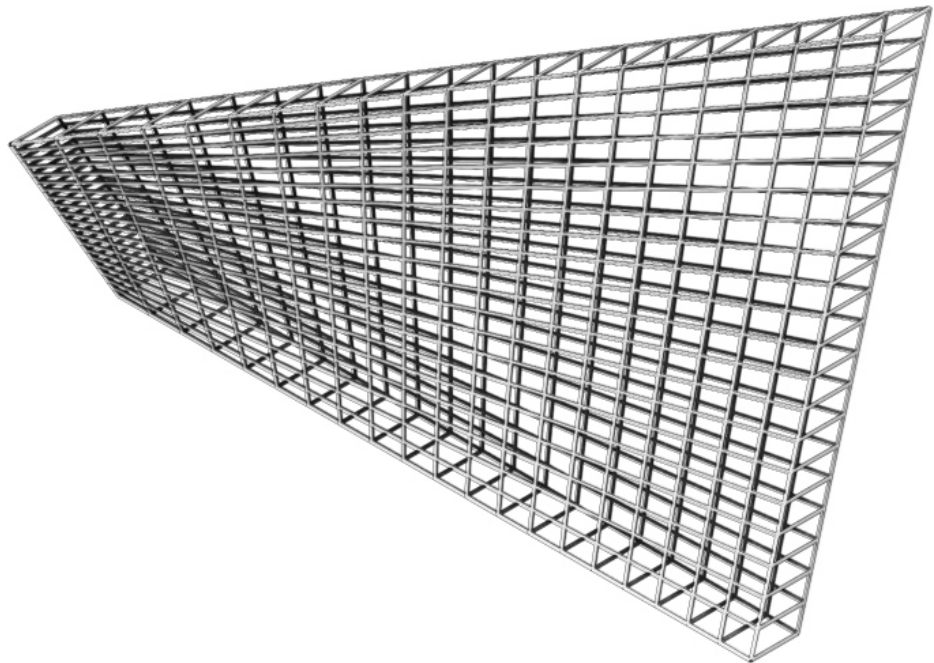
El cuarto y último movimiento del robot será para unir las dos mallas y terminar de conformar la jaula de acero. Este consistirá en colocar una serie de cables de acero de 20 centímetros y fijarlos en los puntos perimetrales enfrentados de las retículas de los dos paraboloides hiperbólicos, de tal forma que se obtenga una estructura de acero rígida que actuará al mismo tiempo como encofrado del hormigón y como refuerzo estructural. (figs 4.20 y 4.21)



Si sobre estos mismos pasos, se aumenta el número de generatrices de la superficie inicial de 5 a 40, automáticamente el programa rehace todos los pasos y se obtiene la misma jaula de malla de acero, que es la que se necesitaría para obtener la densidad de retícula requerida para el proceso de fabricación digital Mesh Mould. Esta es una de las mayores ventajas de trabajar con un software paramétrico. Para realizar esta nueva jaula de 40 generatrices con el programa Rhinoceros 3D se tendría que haber rehecho el modelo por completo, mientras que con Grasshopper con cambiar los parámetros iniciales ya te genera la nueva retícula. (figs 4.21 y 4.22)



*Figura 4.22. Jaula final
obtenida a partir de
cinco generatrices.
Elaboración propia.*



*Figura 4.23. Jaula final
obtenida a partir de
cuarenta generatrices.
Elaboración propia.*

Mesh Mould para reconstruir el restaurante de los Manantiales

Para poder reproducir los cascarones de Candela (fig 4.24) de manera robotizada, se va a repetir el mismo proceso explicado en el anterior apartado, pero con algunas modificaciones en el código, ya que en el caso anterior se trataba de un paraboloides hiperbólico sin seccionar, mientras que en este caso los paraboloides han sufrido el corte por un plano que da lugar a los arcos parabólicos tan característicos de esta obra. La modificación principal reside en el primer paso ya que, debido a este corte, la retícula se tiene que calcular sobre las longitudes de las generatrices seccionadas, a diferencia del caso anterior que se calculaba con las generatrices completas. Se va a realizar el encofrado de malla de acero de uno de los lóbulos (fig 4.25).

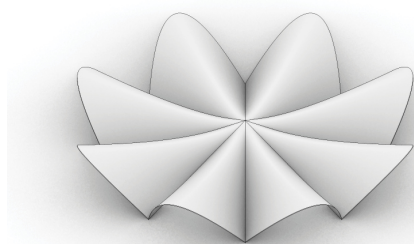


Figura 4.24. (izq)
Cubierta del Restaurante
de los Manantiales.
Elaboración propia.

Figura 4.25. (dcha) Diagrama
de un lóbulo del Restaurante
de los Manantiales.
Elaboración propia.

Paso 1

Se coloca el paraboloide hiperbólico adecuadamente para realizar el corte por un plano y calcular la longitud de las generatrices de la superficie a encofrar (figs 4.26 y 4.27)

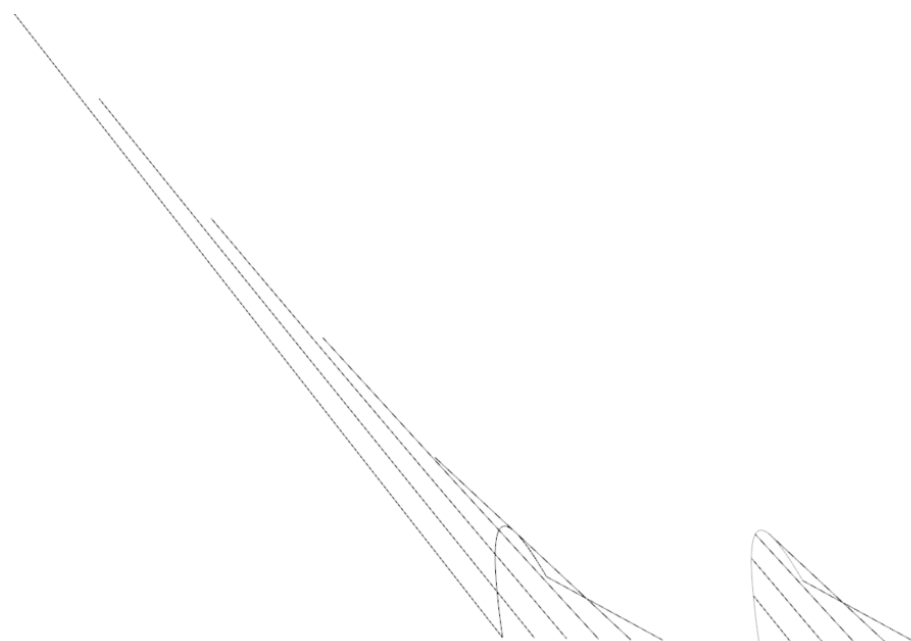


Figura 4.26. Corte de las
generatrices del paraboloide de
partida. Elaboración propia.

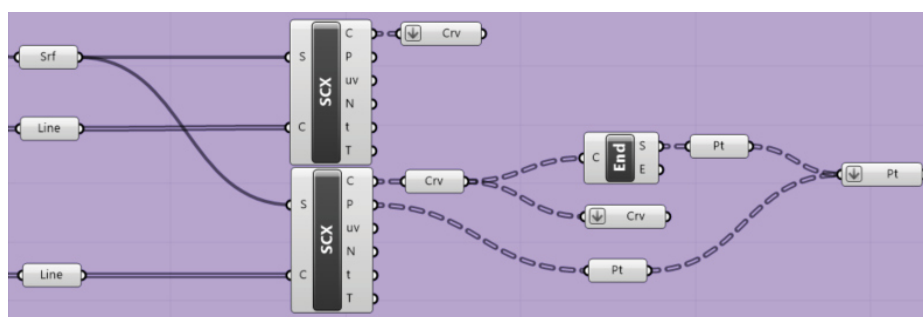


Figura 4.27. Script de
Grasshopper para obtener el
corte. Elaboración propia.

Una vez obtenidos los valores correspondientes a las longitudes de las generatrices seccionadas los siguientes pasos y movimientos del robot siguen la misma lógica que en el caso anterior expuesto, con modificaciones mínimas en el código de programación.

Paso 4 (figs 4.32 y 4.33)

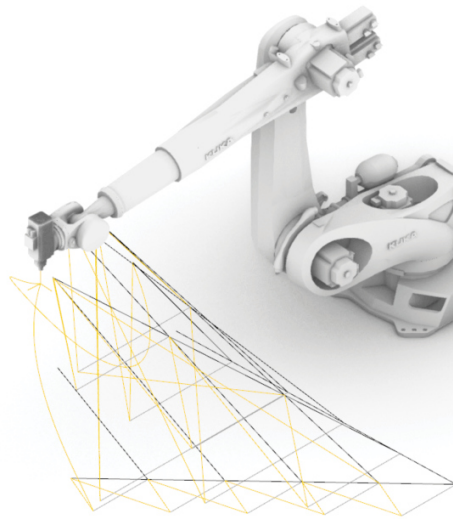


Figura 4.32. Tercer movimiento del robot. Elaboración propia.

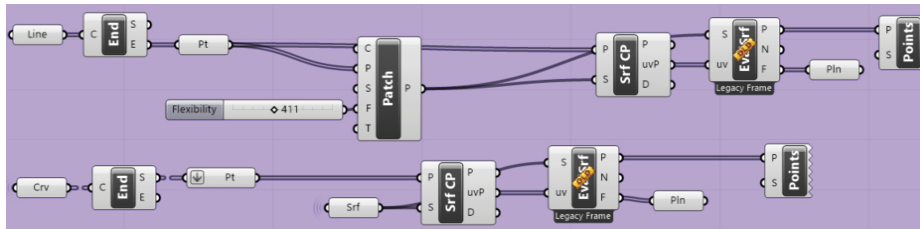


Figura 4.33. Script de Grasshopper para obtener la trayectoria. Elaboración propia.

Paso 5 (fig 4.34)

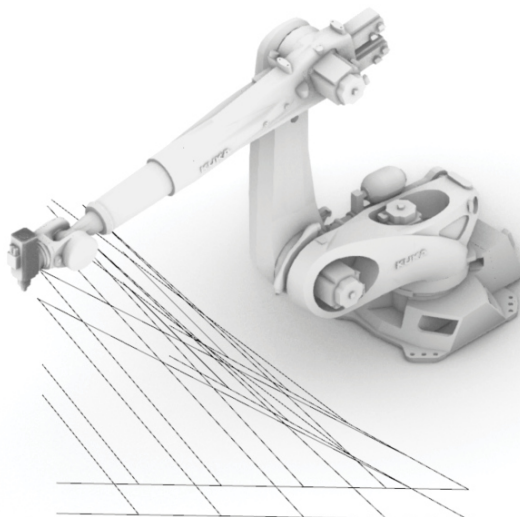


Figura 4.34. Duplicado de la retícula a 20 centímetros. Elaboración propia.

Paso 6 (figs 4.35 y 4.36)

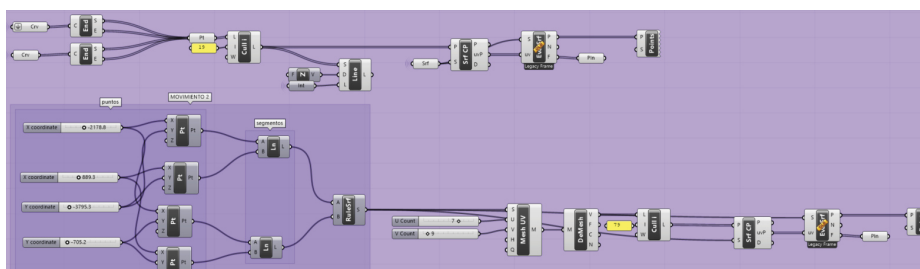
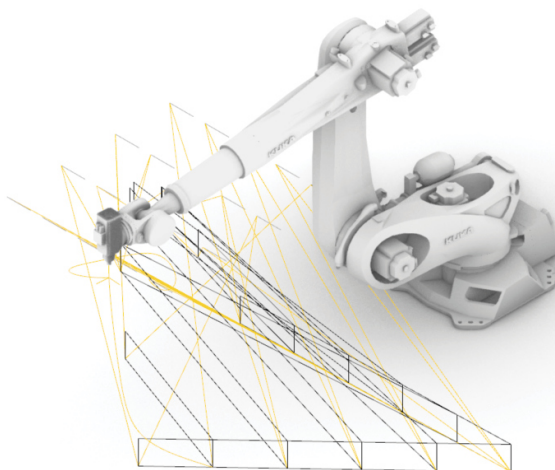
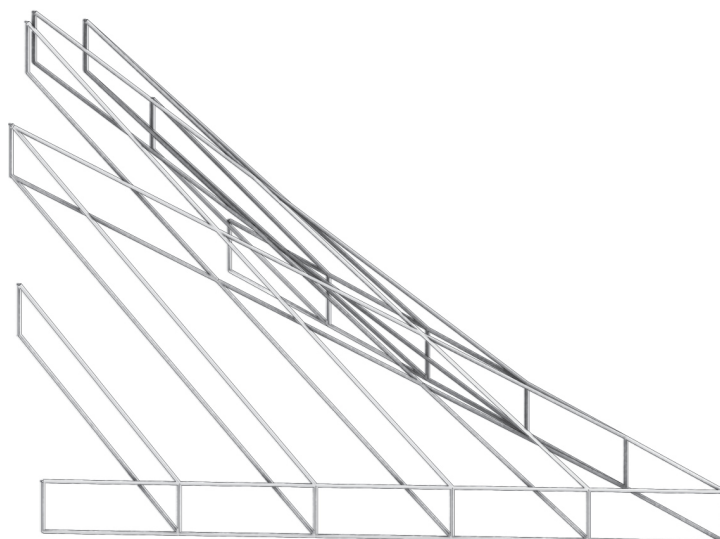


Figura 4.35. Script de Grasshopper para obtener la trayectoria. Elaboración propia.

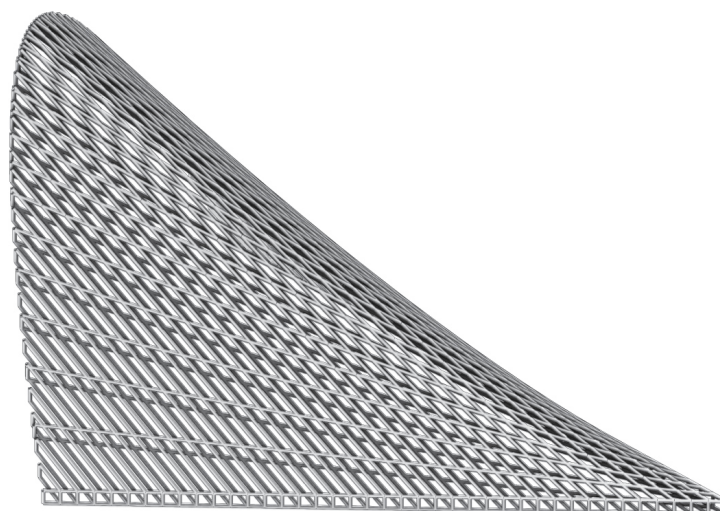


*Figura 4.36. Cuarto movimiento del robot.
Elaboración propia.*

Como en el caso anterior, la retícula resultante es demasiado amplia de cara a usarse como una malla de encofrado, por lo que se aumenta el número de generatrices inicial de 5 a 40 y el programa vuelve a hacer correr todos los movimientos del robot, dando lugar a una retícula mucho más densa. (figs 4.37, 4.38, 4.39, 4.40 y 4.41)



*Figura 4.37. Jaula final obtenida a partir de cinco generatrices en cada dirección.
Elaboración propia.*



*Figura 4.38. Jaula final obtenida a partir de cuarenta generatrices en cada dirección.
Elaboración propia.*

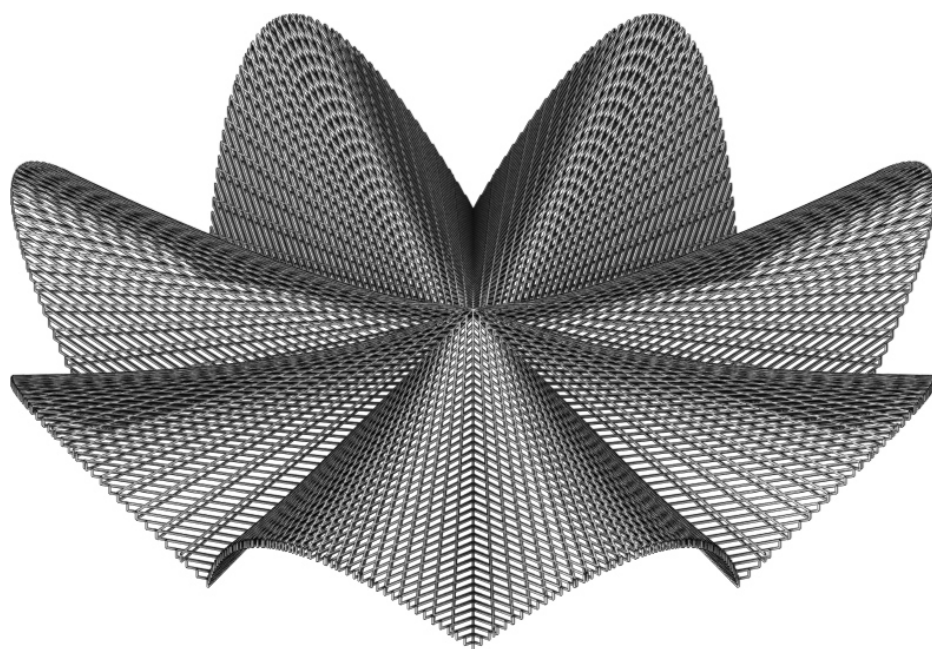


Figura 4.39. Encofrado del Restaurante de los Manantiales a partir de Mesh Mould. Elaboración propia.

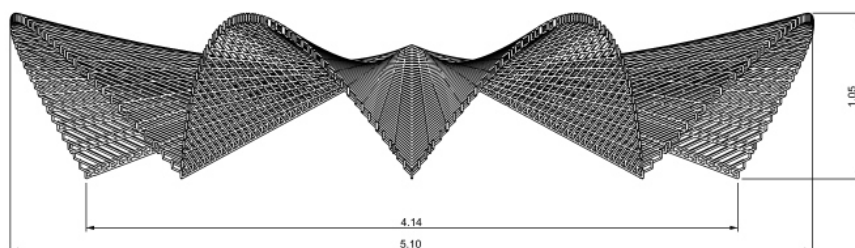
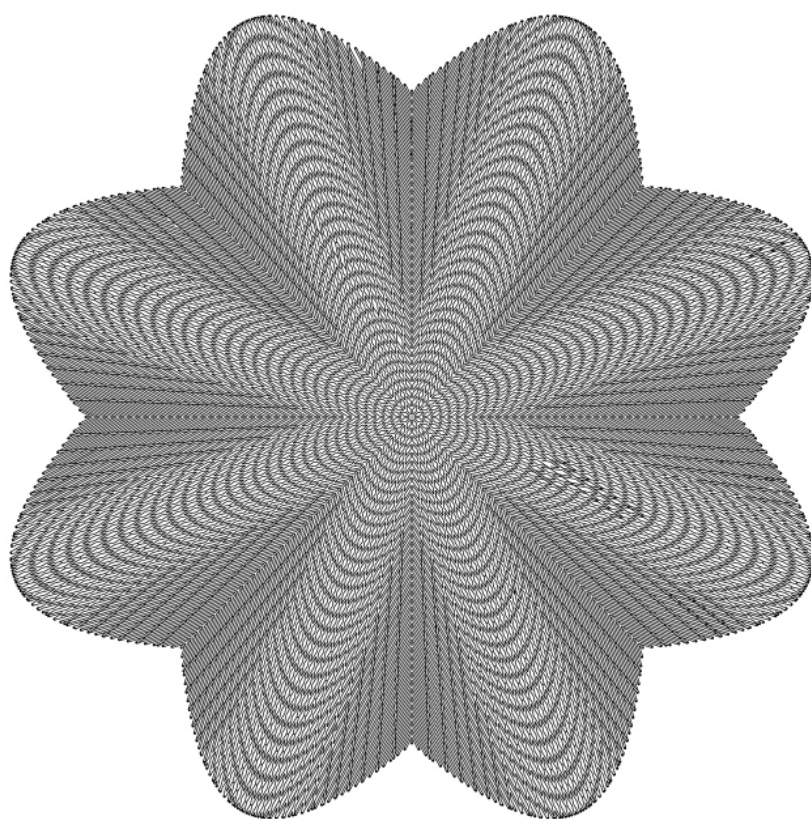


Figura 4.40. Planta y sección con dimensiones del encofrado obtenido para Restaurante de los Manantiales a partir de Mesh Mould. Escala 1:50. Elaboración propia.

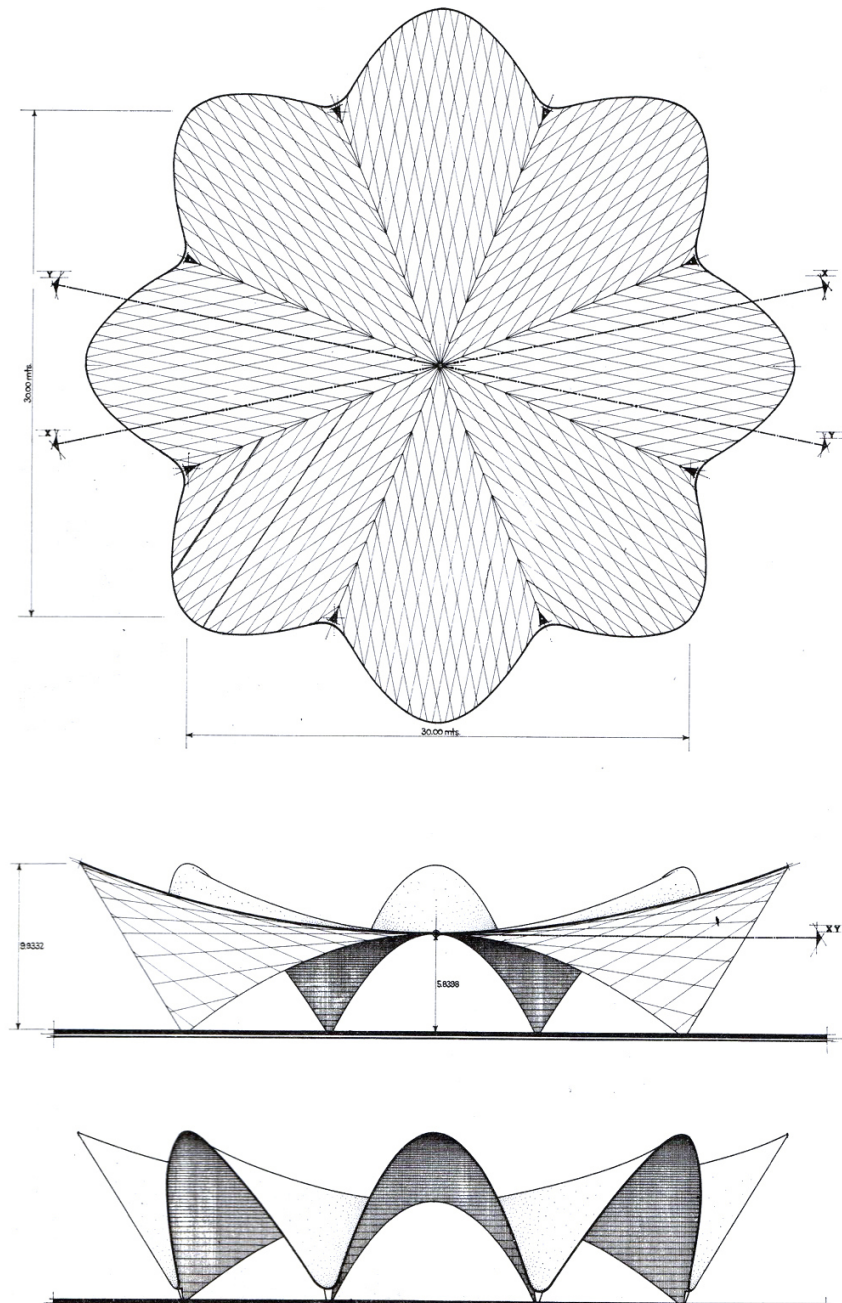


Figura 4.41. Planta, sección y alzado con dimensiones reales del Restaurante de los Manantiales. Escala 1:400.

El objetivo al empezar este Trabajo de Fin de Grado era poder recrear el proyecto del Restaurante de Félix Candela con este método de fabricación digital. Pero la problemática de la escala lo ha hecho inabarcable, el proyecto en la realidad tiene unas dimensiones de 42 metros de diámetro y una altura máxima de 8,25. Lo que deja a cada lóbulo de la matriz con un largo de unos 21 metros. De esta forma, las dimensiones máximas que se han conseguido con el método de Mesh Mould son 5 metros de diámetro y 1,5 metros de altura máxima. Una opción sería dividir cada lóbulo en sectores que fueran abarcables por el brazo robótico y ensamblarlos entre sí en obra, que era a lo que se pretendía llegar en este trabajo, pero por falta de tiempo no ha sido posible. Otra opción interesante sería cambiar de método de construcción digital o de herramienta e investigar nuevos desarrollos para construcciones a gran escala.

Conclusiones

La realización de este Trabajo de Fin de Grado ha supuesto un gran reto para mí, ya que a pesar de ser una temática que siempre ha llamado mi atención, mis conocimientos sobre ella y sobre el software de modelado 3D que se ha empleado eran nulos hasta hace unos meses. Sin embargo, he disfrutado mucho el proceso de principio a fin, considero que ha sido una buena forma de terminar mi paso por la carrera, ya que he descubierto una rama de la arquitectura que realmente he disfrutado y ha abierto un nuevo horizonte de posibilidades en cuanto a mi futuro académico y profesional.

La elaboración de este documento me ha permitido obtener una amplia visión de la trayectoria que ha seguido la evolución de encofrados de hormigón armado hasta la actualidad, y hacia donde se dirige, gracias al estudio de métodos pioneros de fabricación digital. Dichos métodos tienen ventajas e inconvenientes, que tienen que ser tenidos en cuenta y sopesados a la hora de desarrollar un proyecto de estas características.

La arquitectura robótica, en conjunto con los softwares de modelado 3D, suponen un antes y un después en la forma de construir arquitectura, ya que permiten obtener geometrías complejas de manera precisa, eficiente, económica y sostenible. La evolución que han sufrido los métodos de construcciones tradicionales gracias a la intervención de la arquitectura robótica, permite la obtención de resultados estructuralmente mucho más eficientes; y estéticamente, más similares a la idea inicial del proyecto, con una generación de residuos en el proceso significativamente menor en comparación con los métodos tradicionales en los que toda la estructura de andamios de madera construida para la cimbra del encofrado de hormigón eran desechados una vez se terminaba la construcción del edificio. Sin embargo, no hay que perder de vista las limitaciones que presentan, ya que su grado de autonomía y respuesta ante imprevistos hacen necesaria en todo momento la presencia humana como supervisora del proceso. También presenta una movilidad y un rango de alcance escasos, lo que limita mucho la escala del objeto a construir. A pesar de todo esto, creo que el potencial que presentan estas nuevas líneas de investigación es infinito y personalmente tengo ganas de ver hasta dónde es posible llegar a medida que se vayan resolviendo las problemáticas expuestas.

En cuanto a los objetivos fijados al inicio de este Trabajo de Fin de Grado, creo que se han cumplido con éxito a pesar de las dificultades que han ido apareciendo que han ralentizado el avance más de lo que me hubiera gus-

tado. Con esto me refiero a la imposibilidad de haber realizado la reconstrucción robotizada de la cubierta del Restaurante de los Manantiales, del arquitecto Félix Candela, a escala real. Las limitaciones de tiempo y escala me han impedido dar ese salto que habría permitido culminar la simulación del caso práctico de la forma deseada. Dicho esto, no me parece una mala finalización de este Trabajo de Fin de Grado, ya que me ha permitido obtener una visión real de las limitaciones que presentan los brazos robóticos, al mismo tiempo que abre diferentes líneas de investigación para futuros Trabajos de Fin de Grado, como por ejemplo:

1. Continuar el caso práctico llevado a cabo en este trabajo de investigación y comprobar la viabilidad constructiva y estructural de construir arquitecturas de grandes dimensiones por partes con un brazo robótico.
2. Generar una base de datos que recoja las nuevas metodologías de fabricación digital con las prestaciones que tiene cada una, de tal forma que, dadas las dimensiones y características del proyecto, te indique cual es el método y los materiales más adecuados para su fabricación.
3. Explorar de la construcción de superficies de forma libre a partir de otros materiales y métodos automatizados.

El uso de la robótica en nuestro mundo es una realidad. Está en constante desarrollo ganando terreno, también en arquitectura. Es por ello que grupos de investigación de reconocido prestigio están trabajando constantemente en ella, lo que la convierte en fuente constante de investigaciones, tanto teóricas como prácticas.

Fuentes

- ADRIAENSSENS, Sigrid, BLOCK, Philippe, VEENENDAAL, Diederik y WILLIAMS, Chris. *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Editorial ROUTLEDGE; N.º 1 edición (22 abril 2014). 338 páginas.
- BARREIRO, Álvaro. *Panelización de superficies de forma libre en arquitectura: de la idea a su construcción*. Trabajo Final de Grado. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. 2018.
- BEJARANO, Rocío. *La pagoda de Fisac. Mito y mártir de la arquitectura española del S.XX*. Trabajo Final de Grado. Madrid: Universidad de Alcalá. 2017.
- DEL BLANCO, Federico Luis. *La arquitectura no construida de Félix Candela. Evolución de la arquitectura de Félix Candela a partir de sus proyectos no construidos, 1939-1997*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. 2016
- GRAMAZIO, Fabio., KOHLER, Matthias. y WILLMANN Jan. *The robotic touch : how robots change architecture*. Editorial Park Books; Illustrated edición (15 Mayo 2014). Inglés. 490 páginas
- HACK, Norman. *Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of non-standard concrete structures: A real scale architectural demonstrator*. Automation in Construction. Marzo 2020. 16 páginas.
- ISSA, Rajaa. *Essential Mathematics for computational design*. Robert McNeel & Associates, 2013. 79 páginas.
- LÓPEZ, Juan José. *Equilateralización y panelización. Paneles en superficies NURBS*. Trabajo Final de Grado. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. 2021.
- MARTÍN, Bruno. *Hiladas robóticas. Fachadas de ladrillo de forma libre*. Trabajo Final de Grado. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. 2021.
- RUEDA, Sonia L. *Formas libres (I): Curvas NURBS*. Cuaderno 456.01 / 3-78-03 Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. 2015
- Formas libres (II): Superficies NURBS*. Cuaderno 457.01 / 3-78-04 Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. 2015
- SCIAVICCO, LORENZO. Y SICILIANO, Bruno. *Modelling and control of robot manipulators*. CreateSpace Independent Publishing Platform; segunda edición (17 Febrero 2001), 377 páginas.
- TAPP, Kristopher. *Differential Geometry of Curves and Surfaces*. Editorial Springer, (2016). 370 páginas.
- TORROJA MIRET, Eduardo. *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid, Intituto de la Construcción y del Cemento (1957). Publicado por: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 318 páginas. Prólogo.
- La cuba hiperbólica de Fedala*. CSIC, Consejo superior de investigaciones científicas. Informes de la Construcción Vol. 10, nº 98, Febrero de 1958, páginas 1-13

- POTTMANN, Helmut, SCHIFTNER, Alexander y WALLNER, Johannes. «Geometry of Architectural Freeform Structures». In Proceedings of the 2008 ACM symposium on Solid and physical modeling (SPM '08). 2008
- POTTMANN, Helmut, ASPERL, Andreas, HOFER, Michael y KILIAN, Axel. *Architectural Geometry*. Bentley Institute Press (junio 2015)
- W. SPONG, Mark, HUTCHINSON, Seth y VIDYASAGAR, Paul *Robot Modeling and Control*. Editorial Wiley, segunda edición (marzo de 2020). 608 páginas.
- WANG, Xiang, TAM, KAM-MING, Mark, BEAUDOUIN-MACKAY, Alexandre, HOYLE, Benjamin, MASON, Molly, GUO, Zhe, GAO, Weizhe, LI, Ce, ZHU, Weiran, KARSAN, Zain, TING-CHUN KAO, Gene, ZHANG, Liming, CHAI, Hua *mwork for Shell Structures*. Architectural Intelligence, 2020. Páginas 295 a 314.

Recursos digitales referenciados en el documento

BIOGRAFÍA DE EDUARDO TORROJA.

Enlace: <https://www.fundacioneduardotorroja.org/index.php/es/eduardo-torroja/biografia.html?showall=&start=1>; consultado el 09.01.2023

BIOGRAFÍA DE FÉLIX CANDELA.

Enlace: <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/c/candela.htm>; consultado el 09.01.2023

BIOGRAFÍA DE MIGUEL FISAC.

Enlace: <https://www.comunidad.madrid/cultura/patrimonio-cultural/arquitectos-madrid-miguel-fisac>; consultado el 09.01.2023

CURVAS DE BÉZIER.

Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=uZI4bY4uULo>
Enlace: <https://dcain.etsin.upm.es/~leonardo/tema2.pdf>; consultado el 09.01.2023

CURVATURA DE GAUSS.

Enlace: https://hmong.es/wiki/Gaussian_curvature; consultado el 09.01.2023

CURVATURA DE GAUSS. APUNTES DE LA PROFESORA SONIA L. RUEDA.

Enlace: http://dma.aq.upm.es/profesor/rueda_s/srueda_archivos/CurvSup/Apuntes/superficies3.pdf; consultado el 09.01.2023

DFAB HOUSE.

Enlace: <https://dfabhouse.ch/dfab-house/>; consultado el 09.01.2023

ENCICLOPEDIA BRITANNICA.

Enlace: <https://www.britannica.com/technology/shell-structure-building-construction>; consultado el 09.01.2023

ETH ZURICH.

Enlace: <https://ethz.ch/en/research/interdisciplinary-structures.html>; consultado el 09.01.2023
Enlace: <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/index.html>; consultado el 09.01.2023

FÉLIX CANDELA, EL MAGO DE LOS CASCARONES DE CONCRETO

Enlace: <https://dialnet.unirioja.es>; consultado el 09.01.2023

FÉLIX CANDELA Y LAS BÓVEDAS DE CÁSCARA.

Enlace: <https://tienai91.files.wordpress.com/2011/10/presentacion-felix-candela.pdf>; consultado el 09.01.2023

HARDWARE PARAMÉTRICA. HORMIGÓN ARMADO.

Enlace: https://issuu.com/mariaalexandrapelletiernavarro/docs/tesina_muta-maria_pelletier-publica; consultado el 09.01.2023

HIPÓDROMO DE LA ZARZUELA.

Enlace: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/hipodromo-de-la-zarzuela/>; consultado el 09.01.2023

KNITCANDELA.

Enlace: <https://revistaestilopropio.com/obra/hormigon-flexible-knitcandela/>; consultado el 09.01.2023

KNITCRETE.

Enlace: <https://hormigonaldia.ich.cl/smartconcrete/knitcrete-el-moldaje-flexible-que-da-nuevas-formas-al-hormigon/>; consultado el 09.01.2023

LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS Y EDUARDO TORRROJA.

Enlace: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/04/04/los-procesos-constructivos-y-eduardo-torroja/>; consultado el 09.01.2023

Procedencia de las ilustraciones

- o.1. Tomada de <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/275.html>; consultado el 06.01.2023
- o.2. Tomada de <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/334.html>; consultado el 06.01.2023
- o.3. Tomada de https://www.archdaily.com/942221/dfab-house-eth-zurich-plus-nccr-digital-fabrication/5ef1569fb357658c7f0004e3-dfab-house-eth-zurich-plus-nccr-digital-fabrication-photo?next_project=no; consultado el 06.01.2023
- o.4. Tomada de https://www.archdaily.com/942221/dfab-house-eth-zurich-plus-nccr-digital-fabrication/5ef161d2b357658c7f000514-dfab-house-eth-zurich-plus-nccr-digital-fabrication-exploded-axo?next_project=no; consultado el 06.01.2023
- o.5. Tomada de <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/316.html>; consultado el 08.01.2023
- o.6. Tomada de <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/324.html>; consultado el 08.01.2023
- o.7. Tomada de https://www.archdaily.com/942221/dfab-house-eth-zurich-plus-nccr-digital-fabrication/5ef15eabb357658c7f000502-dfab-house-eth-zurich-plus-nccr-digital-fabrication-photo?next_project=no; consultado el 06.01.2023
- o.8. Tomada de <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/334.html>; consultado el 08.01.2023
- o.9. Tomada de <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/334.html>; consultado el 08.01.2023
- o.10. Tomada de <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/334.html>; consultado el 08.01.2023
- o.11. Tomada de <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/311.html>; consultado el 08.01.2023
- o.12. Tomada de Journal of Computational Design and Engineering. *Robotic variable fabric formwork*. Figura 4. Página 4.
- o.13. Tomada de Journal of Computational Design and Engineering. *Robotic variable fabric formwork*. Figura 1. Página 2.
- 1.1. Tomada de <http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/es-es/commands/curvatureanalysis.htm>; consultado el 07.01.2023
- 1.2. Tomada de <http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/es-es/commands/curvatureanalysis.htm>; consultado el 07.01.2023
- 1.3. Tomada de <http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/es-es/commands/curvatureanalysis.htm>; consultado el 07.01.2023
- 1.4. Elaboración propia de la autora

- 1.5. Elaboración propia de la autora
- 1.6. Elaboración propia de la autora
- 1.7. Elaboración propia de la autora
- 1.8. Elaboración propia a partir de original tomado de Sonia L. Rueda en *Formas libres I: Curvas NURBS*. Figura 1.3. Página 7.
- 1.9. Elaboración propia de la autora
- 1.10. Elaboración propia de la autora
- 1.11. Tomada de Álvaro Barreiro Barba TFG: *Panelización de superficies de forma libre en arquitectura*. Figura 2.8. Página 18.
- 1.12. Elaboración propia de la autora
- 1.13. Elaboración propia de la autora
- 1.14. Elaboración propia de la autora

- 2.1. Tomada de <https://www.archdaily.com.br/br/877207/capela-bosjes-steyn-studio/58cb1ceee58ecee2f60001fd-bosjes-chapel-steyn-studio-photo>; consultado el 05.01.2023
- 2.2. Tomada de <https://architizer.com/blog/inspiration/stories/architectural-details-toyo-ito/#media-9>; consultado el 05.01.2023
- 2.3. Tomada de <https://www.archdaily.com.br/br/888424/as-conchas-de-concreto-de-felix-candela-atraves-de-fotografias-maquetes-e-desenhos>; consultado el 05.01.2023
- 2.4. Tomada de <https://www.archdaily.cl/cl/626588/feliz-cumpleanos-felix-candela>; consultado el 05.01.2023
- 2.5. Tomada de https://www.urbipedia.org/hoja/Restaurante_Los_Manantiales#/media/File:FelixCandela.LosManantiales.1.jpg; consultado el 05.01.2023
- 2.6. Tomada de https://oa.upm.es/45621/1/FEDERICO_LUIS_BLANCO_GARCIA_01.pdf; consultado el 05.01.2023
- 2.7. Tomada de <https://www.disenoyarquitectura.net/2011/01/planta-de-embotellado-bacardi-de-felix.html>; consultado el 05.01.2023
- 2.8. Tomada de https://hmn.wiki/es/Lambert-St._Louis_International_Airport#wiki-2; consultado el 05.01.2023
- 2.9. Tomada de <https://www.di-conexiones.com/paraboloide-hiperbolico-geometria-como-marca-en-productos-innovadores/>; consultado el 05.01.2023
- 2.10. Tomada de <https://docplayer.es/14884335-Cascarones-de-concreto-armado-revalorar-para-proteger-un-patrimonio-de-la-arquitectura-mexicana.html>; consultado el 05.01.2023
- 2.11. Tomada de <https://docplayer.es/14884335-Cascarones-de-concreto-armado-revalorar-para-proteger-un-patrimonio-de-la-arquitectura-mexicana.html>; consultado el 05.01.2023
- 2.12. Tomada de https://es.wikiarquitectura.com/embot_bacardi_colocando_concreto_sobre_el_cascaron/; consultado el 05.01.2023
- 2.13. Tomada de https://es.wikiarquitectura.com/embot_bacardi_colocando_concreto_sobre_el_cascaron/; consultado el 05.01.2023
- 2.14. Tomada de <http://historiaycuriosidadqn2.blogspot.com/2018/11/el-marquesado-de-torroja.html>; consultado el 05.01.2023

- 2.15. Tomada de <https://noroeste.ayeryhoyrevista.com/hipodromo-de-la-zarzuela-madrid/>; consultado el 05.01.2023
- 2.16. Elaboración propia de la autora
- 2.17. Tomada de Informes de la Construcción Vol. 10, nº 98, Febrero de 1958. E.Torroja. La cuba hiperbólica de Fedala
- 2.18. Elaboración propia de la autora
- 2.19. Tomada de <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/hipodromo-de-la-zarzuela/>; consultado el 05.01.2023
- 2.20. Tomada de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6559/10lcc1ode39.pdf?sequence=10&isAllowed=y>; consultado el 05.01.2023
- 2.21. Tomada de Informes de la Construcción Vol. 10, nº 98, Febrero de 1958. E.Torroja. La cuba hiperbólica de Fedala
- 2.22. Tomada de https://es.wikipedia.org/wiki/Miguel_Fisac; consultado el 05.01.2023
- 2.23. Tomada de <https://www.metalocus.es/es/noticias/centro-de-estudios-hidrograficos-por-miguel-fisac>; consultado el 05.01.2023
- 2.24. Tomada de https://twitter.com/agua_architects/status/822758183479504896; consultado el 05.01.2023
- 2.25. Tomada de <https://www.eleconomista.es/economia/noticias/7577861/05/16/Patrimonio-perdido-I-la-Pagoda-de-Fisac-el-extrano-edificio-que-cambio-la-NII.html>; consultado el 05.01.2023
- 2.26. Elaboración propia de la autora
- 2.27. Tomada de <http://vhaldemarmetal.tumblr.com/post/126040140615/miguel-fisac-la-pagoda-laboratorios-jorba>; consultado el 05.01.2023
- 2.28. Tomada de <https://www.archdaily.cl/cl/913758/clasicos-de-arquitectura-laboratorios-jorba-la-pagoda-miguel-fisac>; consultado el 05.01.2023
- 2.29. Tomada de <https://www.archdaily.cl/cl/913758/clasicos-de-arquitectura-laboratorios-jorba-la-pagoda-miguel-fisac>; consultado el 05.01.2023
- 3.1. Tomada de <https://www.infopl.net/noticias/item/106840-el-bioniccobot-podria-revolucionar-la-industria-textil>; consultado el 06.01.2023
- 3.2. Tomada de [https://www.bilopack.es/2019/06/28/robots-colaborativos-cobots-en-la-industria-alimentaria/#iLightbox\[gallery745\]/0](https://www.bilopack.es/2019/06/28/robots-colaborativos-cobots-en-la-industria-alimentaria/#iLightbox[gallery745]/0); consultado el 06.01.2023
- 3.3. Tomada de <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/383.html>; consultado el 06.01.2023
- 3.4. Tomada de <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/311.html>; consultado el 06.01.2023
- 3.5. Elaboración propia de la autora.
- 3.6. Tomada de <https://freedomforlife.wordpress.com/grados-de-libertad/>; consultado el 06.01.2023
- 3.7. Tomada de TFM: Desarrollo de sistema de control para un manipulador de seis grados de libertad. Pag 18. Autor: Fidel Perez Menendez.
- 3.8. Tomada de Mark W. Spong, Seth Hutchinson y M. Vidyasagar *Robot Modeling and Control*. (Editorial Wiley, 2020). Página 23

- 3.9. Tomada de Mark W. Spong, Seth Hutchinson y M. Vidyasagar *Robot Modeling and Control*. (Editorial Wiley, 2020). Página 23
- 3.10. Tomada de Mark W. Spong, Seth Hutchinson y M. Vidyasagar *Robot Modeling and Control*. (Editorial Wiley, 2020). Página 24
- 3.11. Tomada de Mark W. Spong, Seth Hutchinson y M. Vidyasagar *Robot Modeling and Control*. (Editorial Wiley, 2020). Página 25
- 3.12. Tomada de Mark W. Spong, Seth Hutchinson y M. Vidyasagar *Robot Modeling and Control*. (Editorial Wiley, 2020). Página 25
- 3.13. Tomada de Mark W. Spong, Seth Hutchinson y M. Vidyasagar *Robot Modeling and Control*. (Editorial Wiley, 2020). Página 26
- 3.14. Tomada de Mark W. Spong, Seth Hutchinson y M. Vidyasagar *Robot Modeling and Control*. (Editorial Wiley, 2020). Página 27
- 3.15. Tomada de Siciliano L. *Modelling and control of robots manipulators* (London, 2020), figura 1.2. Gantry manipulator
- 3.16. Tomada de <https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/images/press/news/2022/05/kuka--robot-range.png?rev=-1&w=1900&hash=5720E624DDE6BFBD4EFCDF290B744FB> ; consultado el 06.01.2023
- 3.17. Tomada de <https://www.designboom.com/technology/gramazio-kohler-mesh-mould-07-25-2016/>; consultado el 06.01.2023
- 3.18. Tomada de Automation in Construction *Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of nonstandard concrete structures: A real scale architectural demonstrator*. Figura 20. Página 11.
- 3.19. Tomada de <https://www.obrasurbanas.es/dfab-house-la-construccion-del-manana-hoy/>; consultado el 06.01.2023
- 3.20. Tomada de Automation in Construction *Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of nonstandard concrete structures: A real scale architectural demonstrator*. Figura 27. Página 14.
- 3.21. Tomada de https://www.researchgate.net/figure/Functional-zones-of-the-DFAB-HOUSE-with-two-design-options-zone-A-minimum-allowable_fig98_325362607; consultado el 06.01.2023
- 3.22. Tomada de Automation in Construction *Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of nonstandard concrete structures: A real scale architectural demonstrator*. Figura 12. Página 8.
- 3.23. Tomada de Automation in Construction *Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of nonstandard concrete structures: A real scale architectural demonstrator*. Figura 14. Página 9.
- 3.24. Tomada de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mesh_Mould_and_In_Situ_Fabricator_%28Gramazio_Kohler_Research,_ETH_Zurich%29.jpg; consultado el 06.01.2023
- 3.25. Tomada de Automation in Construction *Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of nonstandard concrete structures: A real scale architectural demonstrator*. Figura 24. Página 12.
- 3.26. Tomada de <https://www.obrasurbanas.es/dfab-house-la-construccion-del-manana-hoy/>; consultado el 06.01.2023
- 3.27. Tomada del artículo *3d-Printed Bending-Active Formwork for Shell Structures*. Figura 11. Página 12.
- 3.28. Tomada del artículo *3d-Printed Bending-Active Formwork for Shell Structures*. Figura 15. Página 15.

- 3.29. Tomada del artículo *3d-Printed Bending-Active Formwork for Shell Structures*. Figura 9. Página 10.
- 3.30. Tomada de <https://block.arch.ethz.ch/brg/project/knit-candela-muac-mexico-city>; consultado el 06.01.2023
- 3.31. Tomada de <https://block.arch.ethz.ch/brg/project/knit-candela-muac-mexico-city>; consultado el 06.01.2023
- 3.32. Tomada de <https://block.arch.ethz.ch/brg/project/knit-candela-muac-mexico-city>; consultado el 06.01.2023
- 3.33. Tomada de <https://block.arch.ethz.ch/brg/project/knit-candela-muac-mexico-city>; consultado el 06.01.2023
- 3.34. Tomada de <https://block.arch.ethz.ch/brg/project/knit-candela-muac-mexico-city>; consultado el 06.01.2023
- 3.35. Tomada de <https://block.arch.ethz.ch/brg/project/knit-candela-muac-mexico-city>; consultado el 06.01.2023
- 3.36. Tomada de <https://block.arch.ethz.ch/brg/project/knit-candela-muac-mexico-city>; consultado el 06.01.2023
- 4.1. Tomada de <https://seeklogo.com/vector-logo/282934/rhinoceros-3d>; consultado el 08.01.2023
- 4.2. Tomada de <https://www.arquiparados.com/t421-curso-tutorial-grasshopper-en-espanol-desde-cero>; consultado el 08.01.2023
- 4.3. Tomada de <https://robotsinarchitecture.org/>; consultado el 08.01.2023
- 4.4. Tomada de <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial/kr-quantec>; consultado el 08.01.2023
- 4.5. Tomada de <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial/kr-quantec>; consultado el 08.01.2023
- 4.6. Tomada de <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial/kr-quantec>; consultado el 08.01.2023
- 4.7. Tomada de <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial/kr-quantec>; consultado el 08.01.2023
- 4.8. Elaboración propia de la autora
- 4.9. Elaboración propia de la autora
- 4.10. Elaboración propia de la autora
- 4.11. Elaboración propia de la autora
- 4.12. Elaboración propia de la autora
- 4.13. Elaboración propia de la autora
- 4.14. Elaboración propia de la autora
- 4.15. Elaboración propia de la autora
- 4.16. Elaboración propia de la autora
- 4.17. Elaboración propia de la autora
- 4.18. Elaboración propia de la autora
- 4.19. Elaboración propia de la autora
- 4.20. Elaboración propia de la autora
- 4.21. Elaboración propia de la autora

- 4.22. Elaboración propia de la autora
- 4.23. Elaboración propia de la autora
- 4.24. Elaboración propia de la autora
- 4.25. Elaboración propia de la autora
- 4.26. Elaboración propia de la autora
- 4.27. Elaboración propia de la autora
- 4.28. Elaboración propia de la autora
- 4.29. Elaboración propia de la autora
- 4.30. Elaboración propia de la autora
- 4.31. Elaboración propia de la autora
- 4.32. Elaboración propia de la autora
- 4.33. Elaboración propia de la autora
- 4.34. Elaboración propia de la autora
- 4.35. Elaboración propia de la autora
- 4.36. Elaboración propia de la autora
- 4.37. Elaboración propia de la autora
- 4.38. Elaboración propia de la autora
- 4.39. Elaboración propia de la autora
- 4.40. Elaboración propia de la autora
- 4.41. Tomada de <http://somosreynitas.blogspot.com/2011/05/>; consultado el 08.01.2023