

HISTORIA Y VANGUARDIA DE LA CHAPA METÁLICA

CARLES GARCÍA SOMOLINOS



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

Tutores: Miguel Ángel Campos González y
Jose Javier Martí Cunquero
Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Trabajo de Fin de Grado. Curso 2017_2018

RESUMEN:

El desarrollo de técnicas del conformado de la chapa metálica está abriendo infinidad de posibilidades en el campo de la arquitectura. Pero no se puede olvidar su evolución en la historia de la humanidad, desde que Leonardo da Vinci hizo el primer borrador, y sus aplicaciones en la arquitectura, como la que realiza Hugo Junkers en sus hangares. Es importante analizar su recorrido hasta la actualidad para saber de donde proviene y de lo que es capaz. Posteriormente se realiza un estudio de los métodos de conformado más novedosos, y de sus aplicaciones en la arquitectura. Lo que caracteriza a estas técnicas innovadoras es el uso de herramientas no convencionales como fluidos, gases o herramientas flexibles para poder conformar multitud de formas.

Finalmente se hace una comparativa de tres proyectos, los dos primeros existentes y el tercero propio, para ver la evolución y las oportunidades que ofrece el material junto con las nuevas técnicas. Aunque la chapa carezca de estabilidad propia gracias al conformado, puede llegar a ser una alternativa barata, ligera y eficiente a algunos sistemas constructivos tradicionales, al igual que una hoja de papel puede ganar consistencia doblándose y deformándose.

PALABRAS CLAVE:

Chapa metálica; Conformado; Método; Estructura; Revestimiento

RESÚM:

El desenvolupament de tècniques del conformat de la xapa metàl·lica està obrint infinitat de possibilitats en el camp de l'arquitectura. Però no es pot oblidar la seva evolució en la història de la humanitat, desde que Leonardo da Vinci va fer el primer esborrany, i les seves aplicacions en l'arquitectura, com la que realitzà Hugo Junkers en els seus hangars. És important analitzar el seu recorregut fins a l'actualitat per saber d'on prové i del que és capaç. Posteriorment es realitza un estudi dels mètodes de conformat més nous, i de les seves aplicacions a l'arquitectura. El que diferencia aquestes tècniques innovadores és l'ús de ferramentes no convencionals com fluids, gasos o eines flexibles per poder conformar multitud de formes.

Finalment es fa una comparativa de tres projectes, els dos primers existents i el tercer propi, per veure l'evolució i les oportunitats que ofereix el material juntament amb les noves tècniques. Encara que la chapa no tingui estabilitat pròpia, gràcies al conformat pot arribar a ser una alternativa barata, lleugera i eficient a alguns sistemes constructius tradicionals de la mateixa manera que un full de paper pot guanyar consistència doblegant-se i deformant-se.

ABSTRACT:

Development of sheet metal forming techniques is opening up countless possibilities in the field of architecture. But we cannot forget its evolution in the history of humanity since Leonardo da Vinci drew his first sketch, and its applications in architecture, as Hugo Junkers, does in his hangars. It is important to analyze its journey to the present day to know where it comes from and what it is capable of. Subsequently, a study of the most innovative forming methods and their applications in architecture is carried out. What characterizes these innovative techniques is the use of non-conventional tools such as fluids, gases or flexible tools to shape a multitude of forms.

Finally, a comparison is made of three projects, the first two existing and the third being a personal proposal, to see the evolution and opportunities offered by the material together with the new techniques. Although the sheet does not have stability, with the newly forming methods can become a cheap, light and efficient alternative to some traditional construction systems as a sheet of paper can gain consistency by folding and deforming it.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. MARCO HISTÓRICO.....	13
2.1. INMERSIÓN.....	13
2.2. ARQUITECTOS Y EJEMPLOS ARQUITECTÓNICOS.....	19
3. CONFORMADO ESTANDARIZADO.....	23
2.1 TÉCNICAS DE CONFORMADO ESTANDARIZADO.....	25
2.2 ARQUITECTOS Y EJEMPLOS ARQUITECTÓNICOS.....	31
4. NUEVAS TÉCNICAS DE CONFORMADO.....	39
2.1 TÉCNICAS NOVEDOSAS DE CONFORMADO.....	41
2.2 ARQUITECTOS Y EJEMPLOS ARQUITECTÓNICOS.....	47
5. COMPARATIVA.....	51
2.1 PLANOS DEL MUSEO GUGGENHEIM DE BILBAO.....	53
2.2 PLANOS DEL DONGDAEMUN DESIGN PLAZA.....	57
2.3 PLANOS DEL ESPACIO PARA EXPOSICIONES.....	61
6. CONCLUSIONES GENERALES.....	71
7. BIBLIOGRAFÍA.....	73

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la necesidad de métodos de producción rentables y del ahorro en energía y materiales ha entrado en conflicto con el deseo de identidad y expresión arquitectónica. Y los edificios de forma libre son el mejor ejemplo de ello. El siguiente trabajo pretende exteriorizar las posibilidades que ofrece la chapa metálica gracias a los nuevos métodos de conformado. Los cuales mayoritariamente funcionan gracias a la evolución de los softwares avanzados.

El conformado de la chapa ha ido evolucionando a lo largo de los años, desde que Leonardo da Vinci hizo el primer boceto de la primera maquina para laminar, y que va a continuar su curso desarrollandose y eliminando fronteras e impedimentos. Es uno de los procesos de manufacturación más importantes, especialmente para el sector automovilístico. Pero gracias a las nuevas técnicas se puede observar que tiene una gran trayectoria en el campo de la arquitectura, y no solo en su revestimiento, sino también en su soporte.

El estudio se ha llevado a cabo con la ayuda de diferentes trabajos de investigación, con el objetivo de concentrar la información para poder tener un rango de conocimiento más amplio sobre el tema en cuestión. De toda la información recopilada, solo se han extraído los conceptos más significativos e importantes y se ha indagado más sobre ellos. Como en el caso de los nuevos sistemas de conformado, para así poder concluir con una idea propia.

OBJETIVOS:

El presente estudio tiene dos objetivos. El primero es profundizar en las nuevas técnicas del conformado metálico que se ofrecen actualmente y el segundo es culminar con una propuesta arquitectónica utilizando estos métodos. Por tanto, ha sido fundamental ejecutar una búsqueda y una ordenación detallada de los antecedentes en el campo de la conformación metálica, indagado en los métodos de conformado estandarizados, así como en los más novedosos. Observando y analizando sus aplicaciones en proyectos arquitectónicos.

Para finalizar, se ha realizado una comparación de tres proyectos actuales, realizando un previo análisis constructivo, y se han establecido una serie de conclusiones referidas al uso de la chapa, los métodos de conformado y en las posibilidades que ofrece este material.

METODOLOGÍA:

La investigación se organiza en tres apartados que permiten aproximarse de manera gradual a la chapa metálica y su conformado. Son los dos primeros apartados los que permiten comprender el contexto histórico y estandarizado, mientras que el último se centra más en las alternativas que ofrece el material y los nuevos métodos de conformado.

El trabajo se ha desarrollado en varias etapas:

1ª Etapa: Búsqueda escueta de documentación sobre los antecedentes y la actualidad, incluyendo los ejemplos presentados, para conocer así como la evolución, el estado de la cuestión.

2ª Etapa: Depuración y organización de toda la información antes de focalizarse y desarrollar los conceptos más importantes y significativos para la comprensión de la materia.

3ª Etapa: Habiendo asimilado los conceptos más relevantes, se da pie al estudio y comparación de tres proyectos, siendo el tercero una propuesta alternativa a lo convencional para observar las posibilidades que ofrece la materia analizada.

MARCO HISTÓRICO

Para obtener una visión global y profundizar en el conocimiento del conformado de la chapa metálica, se realiza una recopilación de información sobre los acontecimientos más destacados desde sus inicios.

No es fácil determinar la fecha exacta de la primera chapa metálica. En la prehistoria se fabricaban láminas finas de metales, trabajadas en frío. Eran materiales muy dúctiles como el oro y la plata, martilleándolos con piedras hasta conseguir laminas más delgadas para el uso en joyas y en el forjado de armas. El hierro blando sólo se podía trabajar en caliente, lo que provocaba problemas particulares para la obtención de laminas de poco espesor.

El comienzo en la producción de chapa se produjo con la introducción del **lamina-do con rodillo**, *the rolling mill*. El primer diseño conocido de un laminador se remonta a Leonardo Da Vinci, que en 1480, en uno de sus bocetos, describe, por primera vez, la posibilidad de hacer pasar el metal entre dos rodillos con ejes paralelos para modificar su espesor. En este caso también estaba previsto para el uso de materiales dúctiles en frío, especialmente plomo, estaño, etc., pero se desconoce si llegó a materializarse.

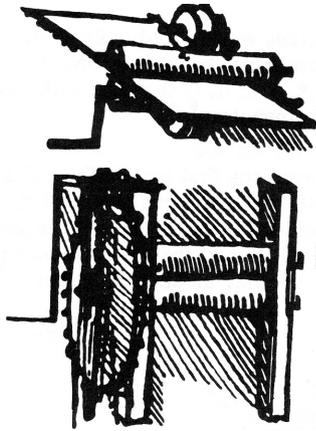


Imagen 1.
Sketch de Leonardo da Vinci.

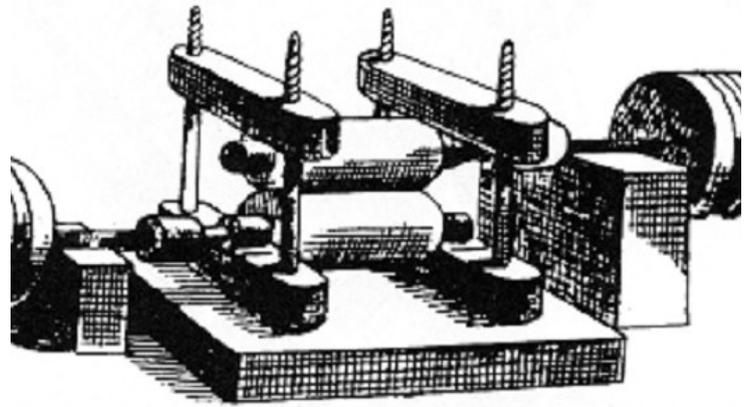


Imagen 2.
Rodillo de laminación en Newcastle.

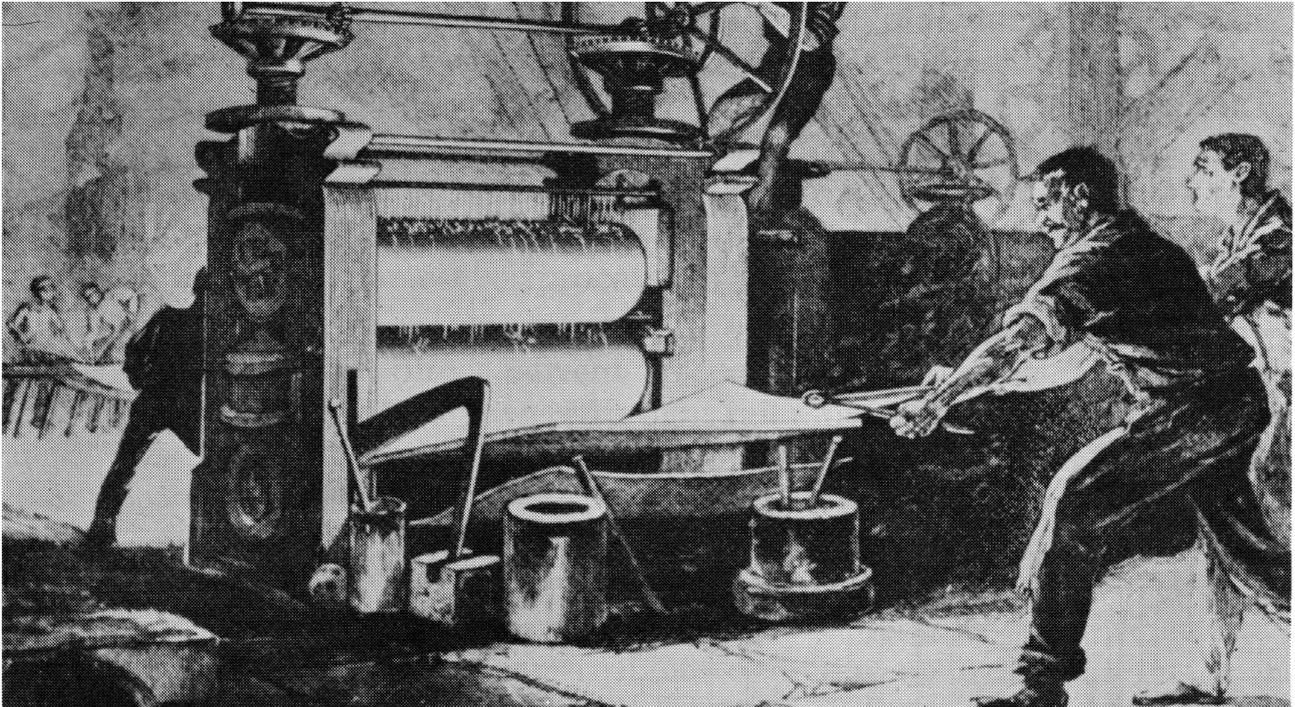


Imagen 3.
Rodillo de laminación finales del siglo XIX.

En 1682 el rodillo de laminación, en frío fue presentado en Newcastle, Inglaterra por John Hanbury. Los cilindros que presionaban el metal obtenían la fuerza motriz que generaba el paso del agua por un canal. Reproducía barras de 700 mm de largo y 100 mm de ancho, que podían obtener chapas con dimensiones de 1500×700 mm. Se trata de la primera prueba de laminación del acero para producir chapa metálica.

En Gales continuaron desarrollando formas más complejas; círculos, cuadrados, railes y vigas en forma de T. La técnica encajaba perfectamente con las exigencias de la época produciendo los materiales solicitados, por ejemplo; las planchas de plomo para las cubiertas de los tejados, los railes para las vías de tren y productos semi-elaborados de acero que podían obtenerse con rapidez.

A principios del siglo XIX la estructura del laminador con rodillo se componía de un robusto sistema de hierro con dos cilindros de acero con la posibilidad de ajustar la distancia entre los rodillos.

La laminación se había convertido en un proceso muy productivo capaz de satisfacer una gran variedad de productos, que se exigían en el momento, entre los que se encontraba la chapa metálica, aunque el proceso todavía requería un uso notable de mano de obra humana.

En la *Gran Exposición Británica* de 1851 se exhibió una lamina metálica de 6 metros de largo, 1 metro de ancho y 11 milímetros de espesor, con un peso superior a 500 kg. Del uso de la fuerza hidráulica ese pasó a la máquina de vapor y luego al motor eléctrico. Se fue incrementando el número de cilindros. De dos cilindros se pasó a tres, donde el intermedio, con un diámetro mucho menor, disminuía la potencia solicitada y permitía el balanceo en los dos sentidos sin invertir el movimiento del motor. Se pasó por la configuración de cuatro cilindros (ya propuesta por el genio Leonardo da Vinci) con dos cilindros más externos, actuando como soporte a los dos internos que realizaban el mecanizado, hasta implementar la configuración con hasta 20 cilindros.

Cabe destacar que el laminado, tal y como se conoce hoy en día, no puede atribuirse a un solo inventor, sino que es fruto de decenas y decenas, por no decir centenas, de pequeñas mejoras continuas que lo han llevado a ser el proceso más utilizado en la elaboración de metales. Considerando que el 90% de los metales utilizados en la industria, tarde o temprano, han sido sometidos a un proceso de laminación.

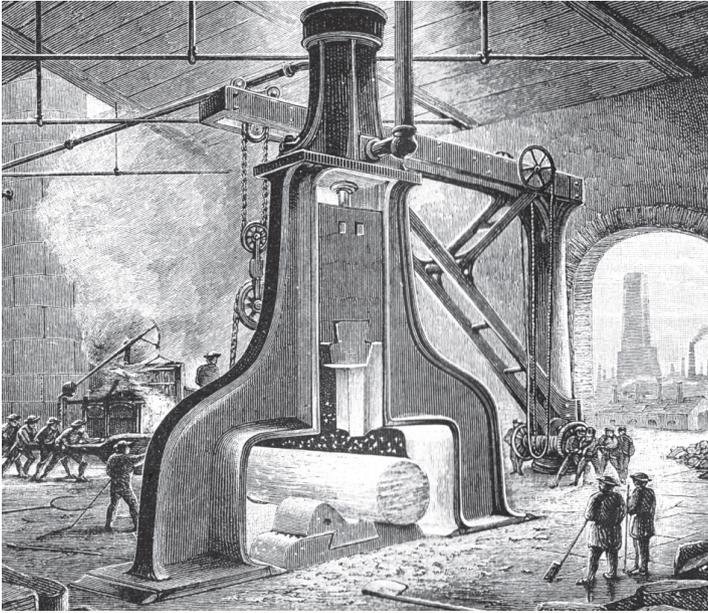


Imagen 4.
Martillo de vapor Nasmyth, 1841.



Imagen 5.
Laminación continua 1915.

Al mismo tiempo, el conformado metálico se lleva a cabo desde hace miles de años mediante **la técnica del martillo**, *hammering*. El metal se coloca sobre un yunque de metal o de madera, que reproduce la forma requerida, y luego, mediante sucesivos martilleos, se fuerza a adherirse al molde reproduciendo su forma. Se trata de un proceso lento y cuidadoso, cuyo éxito se debe a las habilidades del operario.

Los primeros martillos eran de caída libre, pero en 1841 apareció el martillo de vapor de Nasmyth, patentado por los Schneider. Este era un martillo de forja de grandes dimensiones, dos metros de alto y un peso de 2.500 kg. La ventaja de esta herramienta era que un operario podía controlar la fuerza de cada golpe. Las piezas pequeñas se forjaban por separado y finalmente se unían mediante soldadura a las grandes. Sus ventajas se hicieron tan obvias que en poco tiempo los martillos Nasmyth se encontraban en todos los talleres de Inglaterra. El uso de esta técnica permitía que los costes de producción se redujesen a la mitad, mejorando al mismo tiempo la calidad de las piezas forjadas.

Tras la *Revolución Industrial* se fueron perfeccionando e implementando los métodos existentes y ampliando la variedad de formas de conformado de chapa, como la laminación continua y en caliente, y el uso de la presión hidráulica para conformar. El conjunto de estos métodos ha servido de precedente para el desarrollo de los métodos actuales estandarizados.

Imagen 6.
Alzado de parte del Acueducto.

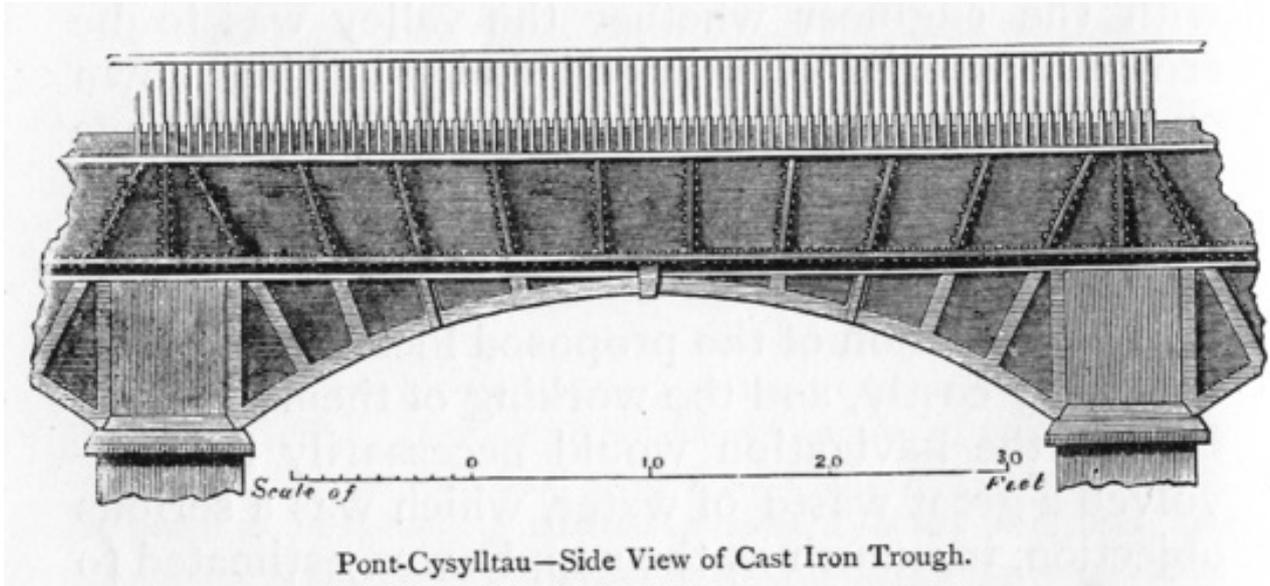


Imagen 7.
Perspectiva de la unión de las láminas de acero.

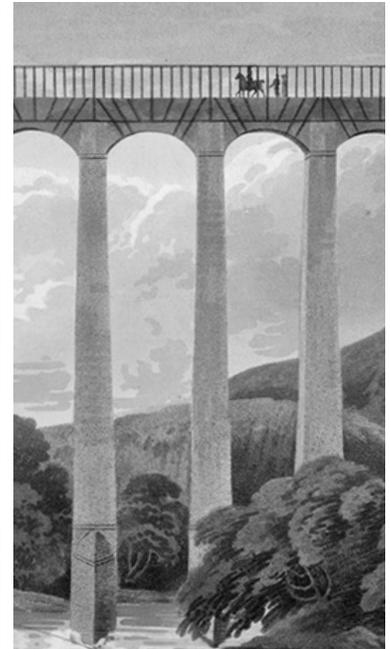


Imagen 8.
Alzado.

ARQUITECTOS Y EJEMPLOS ARQUITECTÓNICOS

Los métodos de conformado de la chapa metálica han sido esenciales para la invención y desarrollo de elementos que han facilitado el progreso de la humanidad y por ende de la arquitectura. Algunos de los aventureros que apostaron por este material fueron; Isambard Kingdom Brunel, Thomas Telford, etc. y estas son algunas de las obras más destacadas.

El Acueducto de Pontcysyllte (1805), diseñado por Thomas Telford a principios del siglo XIX, es el acueducto más largo y alto en Gran Bretaña. Se trata de una obra precursora tanto por la tecnología utilizada como por el uso del metal en la arquitectura. Tiene 307 m de longitud, 3,5 m de anchura y casi 2 m de profundidad. Se trata de un canal de hierro fundido sostenido por arcos metálicos apoyados en altos muros de mampostería.

Los arcos estructurales que salvan los vanos entre muros, son metálicos dándole más eficacia a la estructura. Este diseño reduce el peso propio del proyecto y por lo tanto costes materiales. Además, en la envolvente metálica del canal, Telford utiliza un sistema de remaches, que actúan como si fueran costillas, para que los muros que soportan la presión del agua sean más rígidos en su forma.

Existió gran escepticismo sobre el método de construcción empleado, pero Telford confió en sí mismo. Es un claro ejemplo de las innovaciones producidas por la Revolución Industrial en Gran Bretaña.

Imagen 9.
Foto de la obra.

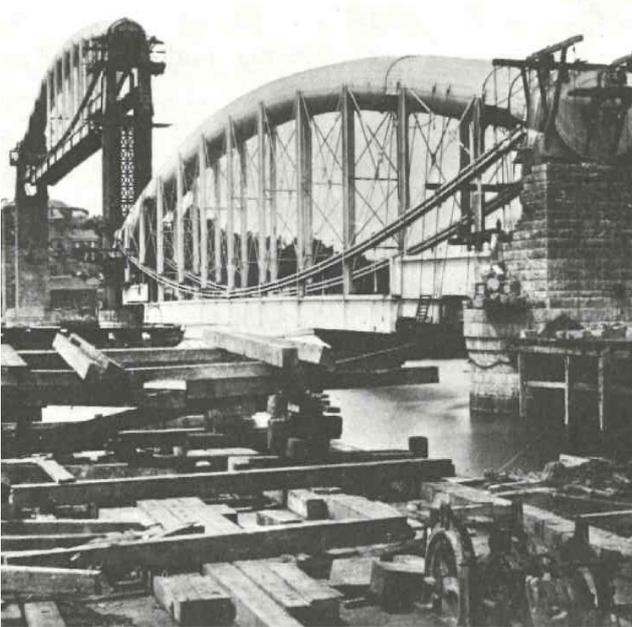


Imagen 10.
Detalle del cilindro.

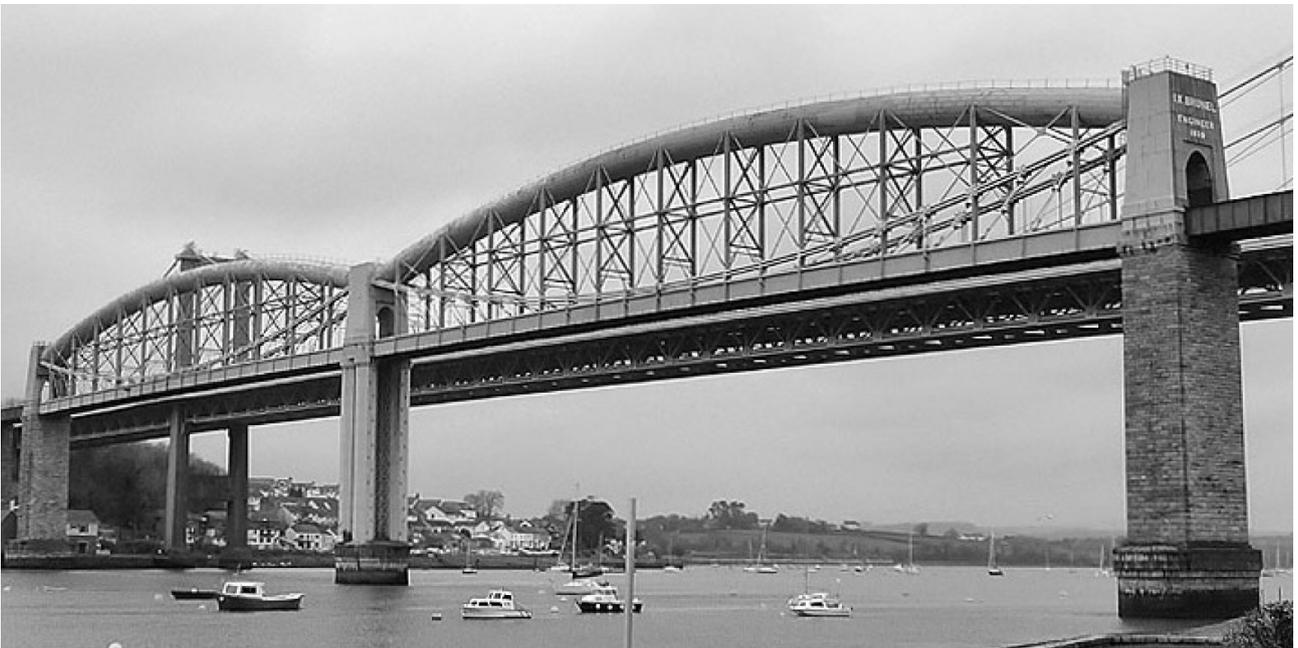


Imagen 11.
Perspectiva.

The Royal Albert Bridge (1859) es una de las grandes obras de Isambard Brunel. Se trata de uno de los puentes más grandes del mundo y es único en su diseño.

El diseño "Bowstring Suspension Bridge" se compone de un arco tubular de hierro forjado, con un perfil en forma de parábola, junto con perfiles metálicos que cuelgan a cada lado del tubo y lo unen a la cadena en catenaria. La calzada actúa como viga plana para soportar la vía ferroviaria, y está sujeta por once perfiles por lado en cada tramo. Éstos pasan a través de las cadenas en catenaria y están conectados a ellas. Para arriostrar bien los perfiles y superar con éxito las limitaciones del sistema de suspensión, las verticales se sujetan mediante un sistema de arriostramiento diagonal. Los dos vanos principales se basan en el principio del puente colgante.

Se puede apreciar como el tubo de acero está compuesto por planchas curvadas unidas al tresbolillo y superpuestas. El sistema que se utilizó y que permitió generar esa curva fue el de golpeo mediante martillo. Para ganar mayor rigidez y firmeza, los grandes tubos de acero contienen cintas de acero en el interior como se puede apreciar en la imagen detalle. El resultado final es una construcción de diseño simple pero elegante.

CONFORMADO ESTANDARIZADO

La producción de chapa metálica ocupa gran parte de la producción industrial actual, siendo protagonista en diversos sectores y no iba a ser menor en la arquitectura. El dominio de los procesos de conformado ha permitido que se puedan obtener mayores prestaciones en el producto al mismo tiempo que se aumenta la complejidad de la forma de este.

La *Normativa Europea* clasifica el conformado según las condiciones de fuerza a las que se somete la pieza a deformar. Dependiendo si se le aplican condiciones de; compresión, compresión y tensión, únicamente tensión, doblado u otros.

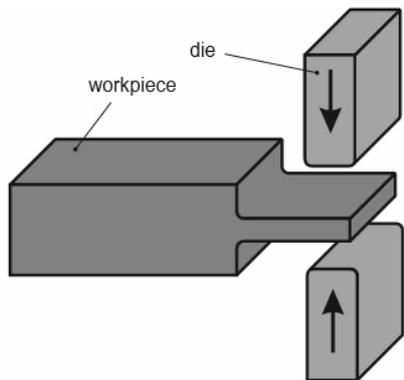


Imagen 12.
Rodado.

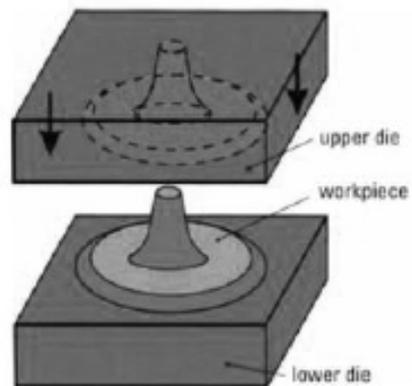


Imagen 13.
Troquelado
cerrado.

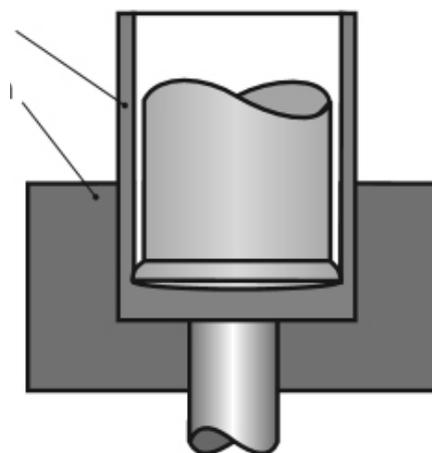
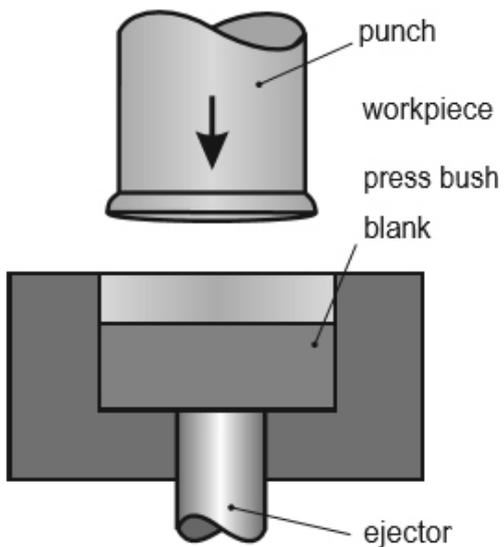


Imagen 14.
Extrusión.

TÉCNICAS DE CONFORMADO ESTANDARIZADO:

Conformado sometido a condiciones de compresión, *Under compressive conditions*:

El conformado se realiza al inicio en caliente con el fin de reducir al mínimo las fuerzas **por rodado**, *Rolling*, y acceder a un mayor grado de deformación. El conformado en caliente puede utilizarse para producir materiales planos como chapas o placas, pero también para la producción de tubos, alambres o perfiles. Si el espesor está por debajo de un valor mínimo y se imponen exigencias estrictas en cuanto a las dimensiones y la calidad de la superficie, el proceso se realiza mediante laminado en frío.

El **troquelado abierto**, *Open die forming*, utiliza herramientas que se desplazan unas hacia otras y que se ajustan parcialmente a la forma de la pieza de trabajo. La forma de la pieza se crea mediante la ejecución de un movimiento definido entre la pieza y la herramienta.

El conformado por **troquel cerrado**, *Closed die forming*, es un proceso de conformado por compresión, en el que las herramientas perfiladas se desplazan unas hacia otras, en el que el troquel contiene la pieza de trabajo, ya sea en su totalidad o en parte de ella, para crear la forma final.

El conformado **por embutido a través de un orificio**, *Forcing through an orifice*, con una determinada matriz. Esta técnica incluye las subcategorías de extrusión libre, extrusión de productos semiacabados y extrusión de componentes.

La **extrusión**, *Extrusion*, se utiliza para crear productos semiacabados, como perfiles con secciones transversales constantes. La extrusión en frío se utiliza para producir componentes individuales, por ejemplo, engranajes o ejes. En caliente y en frío el conformado se realiza utilizando los moldes rígidos. La diferencia se dibuja dependiendo de la dirección del flujo de material en relación con el movimiento del punzón.

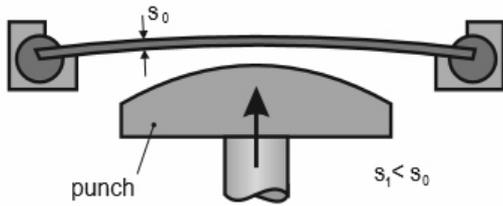


Imagen 15.
Estirado.

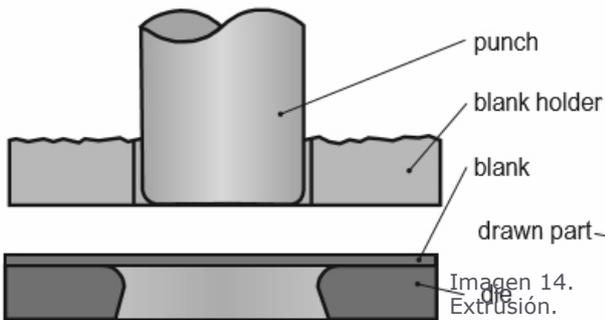
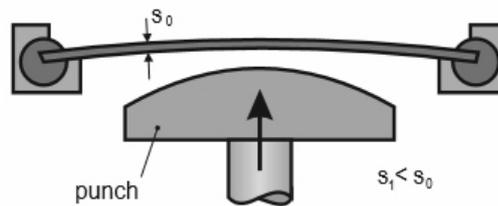


Imagen 14.
Extrusión.

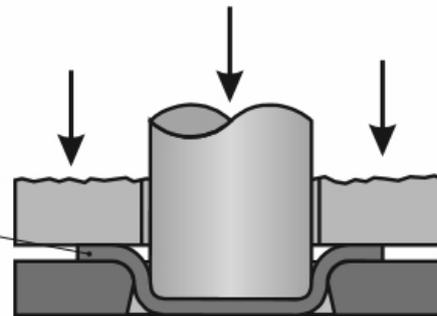


Imagen 16.
Embutido.

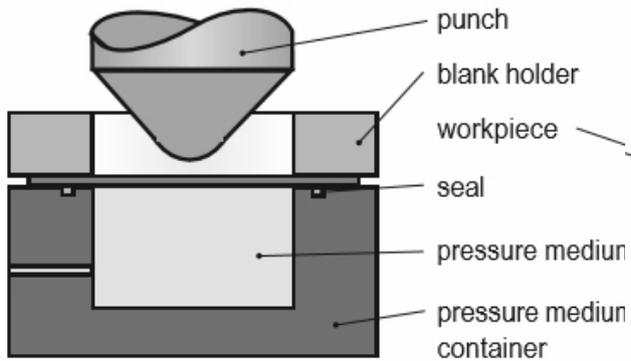
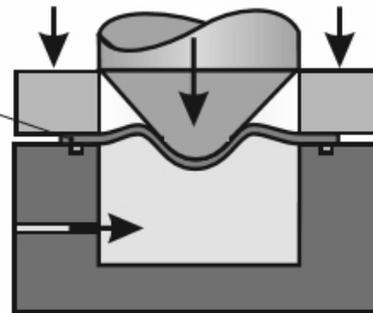


Imagen 17.
Hidroforming.



Conformado sometido a condiciones de tensión, *Forming under tensile conditions:*

La aplicación más importante en el conformado por **estirado**, *Stretch forming*, es el uso de un troquel rígido. El estirado es la alteración en la forma en una pieza utilizando un punzón rígido mientras la pieza de trabajo se sujeta firmemente por los extremos de la lámina.

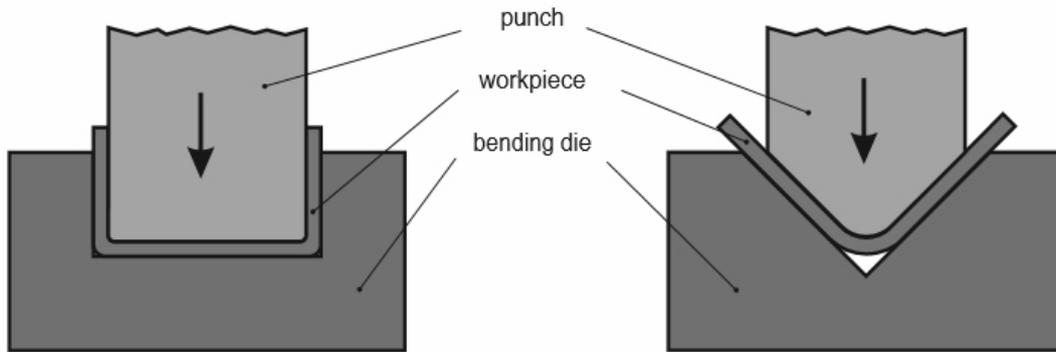
Conformado sometido a condiciones de compresión y tensión, *Forming under combination of tensile and compressive conditions:*

El embutido, *Deep drawing*, es la transformación de una chapa plana o lámina en una forma hueca sin cambio del espesor de la chapa. Se realiza con un punzón, un troquel inferior y un soporte de chapa. Con este método no es posible la formación de arrugas a medida que el metal se introduce en el troquel.

El rebordeado, *Flanging*, es un método que utiliza un punzón y una matriz para levantar bordes cerrados (rebordes o collares) en huecos perforados. Los huecos pueden estar en superficies planas o curvas.

El spinning se utiliza para transformar una pieza plana de chapa en un cuerpo hueco o para cambiar la periferia de un cuerpo hueco.

El conjunto de técnicas de **hidroconformado**, *Hidroforming*, proporciona flexibilidad y mayor precisión. Esta técnica se basa en el inflado del metal por la presión que ejerce el líquido contra la forma de la matriz o troquel. Pero el hidroconformado requiere habilidades particulares, además de mayor coste en la maquinaria.



U die

Imagen 18.
Doblado con
matriz.

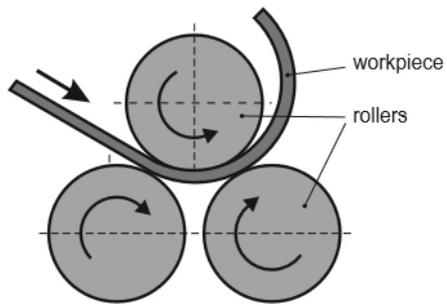


Imagen 19.
Doblado por
movimiento
rotatorio de
rodillos.

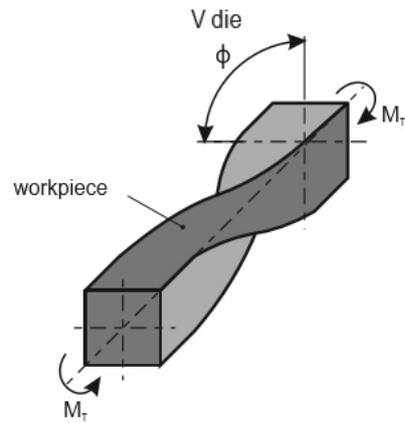


Imagen 20.
Flexión gira-
toria.

Conformado por doblado, *Forming by bending:*

En el **doblado con matriz, *Die bending,*** la forma de la pieza es impactada por la geometría de la matriz.

El **doblado por movimiento rotatorio de rodillos, *Bending with rotary die movement.*** Utilizando este proceso es posible fabricar piezas cilíndricas o cónicas. También incluye el enderezado del rodillo para eliminar deformaciones indeseables en láminas de metal, alambres, varillas o tuberías, así como el corrugado y el perfilado.

La **flexión giratoria, *Swivel bending,*** es un proceso continuo de flexión en el doblado de perfiles, varillas, alambres o tubos. Se utiliza para la producción de muelles y se denomina bobinado.

Imagen 21.
Perspectiva exterior.

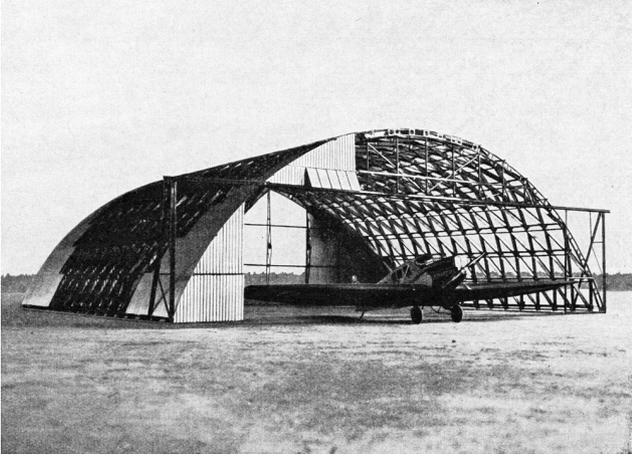


Imagen 22.
Detalle.

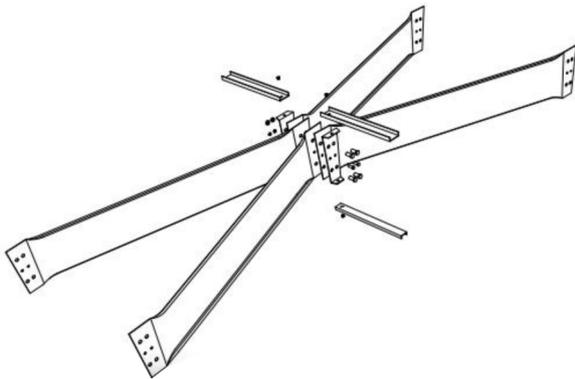


Imagen 23.
Axonometría del detalle constructivo.



Imagen 24.
Perspectiva interior.

ARQUITECTOS Y EJEMPLOS ARQUITECTÓNICOS

A continuación se muestran algunos proyectos que reflejan como se ha dado uso a la chapa metálica con los métodos de conformado estandar. Se puede observar que este material ofrece varias posibilidades, como es la de revestir, soportar fuerzas (estructural), o ambas.

Las cascaras cuadrículadas, Hugo Junkers (1859-1935):

"Hoy en día, veo que el problema de la construcción es su industrialización" y este proceso "se fundamenta en el material" Mies van der Rohe, 1924.

Con estas palabras, Mies, formuló un problema que Hugo Junkers había resuelto con la construcción de aviones diez años antes. A diferencia de lo estándar, en aquellos días, Junkers no diseñó los aviones con madera, optó por el uso del metal, algo inimaginable para los ingenieros de la época. Ya en 1925, Junkers comenzó, otra vez, a experimentar con estructuras, pero esta vez no para aviones, sino para construcciones industriales, donde poder almacenar los aviones.

Se trata de una **estructura** para bóvedas de hangares y naves usando un **entramado de láminas de acero**. Con este sistema se podían proyectar vanos de hasta 40 m. Debido a su considerable simplicidad y rigidez pronto fue plagiado en proyectos de todo el mundo y Junkers decidió patentarlo.

La cuadrícula está formada por chapas corrugadas trapezoidales. Todos los elementos portantes son perfiles de chapa prensada en frío. Diseñados con sección en C, de 2,75 m de largo, con un grosor de 6 mm y una altura de 400 mm. Los extremos de los perfiles son aplanados, y se doblan con un ángulo leve de 20° en direcciones opuestas en cada extremo. En estos dos puntos, el metal está ondulado para hacerlo mas rígido.

La eficiencia del sistema estructural viene dada por la ligereza, facilidad de producción y puesta en obra. Los perfiles C, al ser idénticos permiten una producción estandarizada y continua, con una forma sencilla. El conformado de las piezas se realiza por la técnica de embutido, *deep drawing*, al igual que las bandas protectoras de los límites de la carretera.

Imagen 25.
Perspectiva.

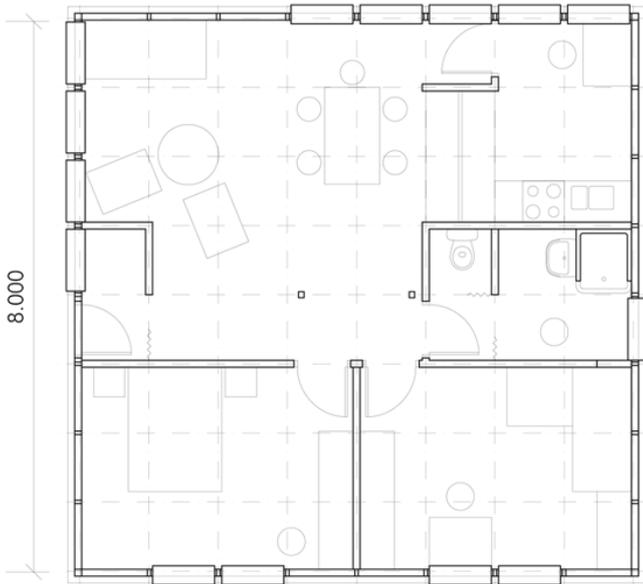
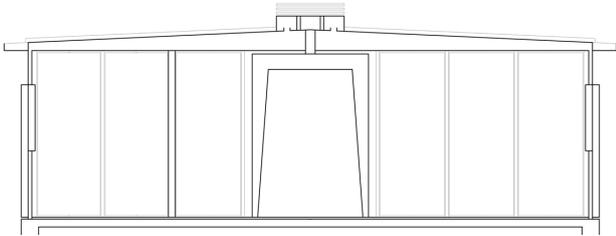


Imagen 26.
Sección y Planta.

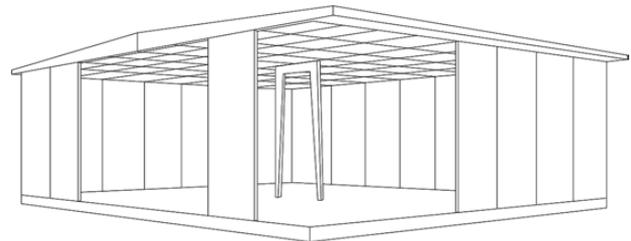
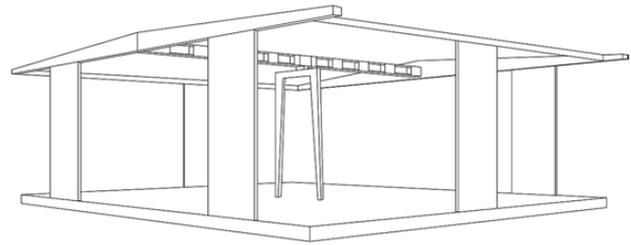
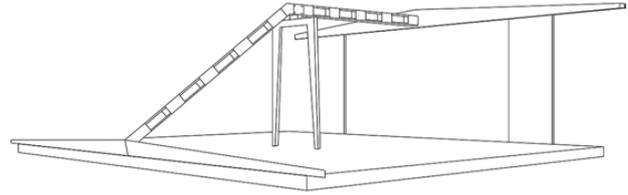
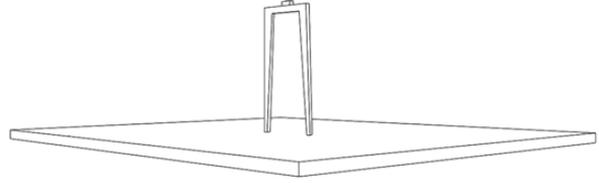


Imagen 27.
Axonometría del proceso constructivo.

La Maison Standar, Jean Prouvé. (1901-1984):

En 1949, en plena posguerra, el Ministerio de Reconstrucción y Urbanismo encargó a Jean Prouvé la planificación y desarrollo de 25 casas de construcción ligera y producción en serie, cuyo precio no debía ser superior al de una casa sencilla construida de forma tradicional.

Prouvé lleva a cabo avances importantes en la investigación de viviendas prefabricadas con la construcción de las *Maisons*. **El esquema estructural** de las *maisons à portiques* consistía en uno o dos **pórticos de chapa de acero** plegada con forma de U invertida sobre los que descansaba un caballete. Estos pórticos soportaban la carga central y asumían la función de estructura primaria durante el montaje. El diseño del sistema portical fue determinante para la facilidad de construcción y la concepción del espacio.

El proceso constructivo era el siguiente: en primer lugar se ejecutaba la trama del suelo, y cuando había desnivel, se apoyaba sobre muros portantes de piedra, y se situaba el pórtico de chapa plegada de acero en el centro. En segundo lugar, se ensamblaba la mitad de la viga central con la viga piñón y se elevaba el conjunto sobre dos paneles de fachada colocados estratégicamente para facilitar el montaje y dar soporte. Seguidamente se repetía el proceso con la otra mitad de la estructura y una vez montado el esqueleto portante se colocaban los paneles de la cubierta y, por último, los paneles de la fachada, las particiones interiores y el falso techo.

Los **cerramientos** exteriores eran **de chapa de aluminio**. Por otro lado, las particiones interiores tenían un espesor de 10 cm y se podían realizar con las dos caras de chapa, con una de chapa y otra de madera contrachapada o escayola, o con las dos caras de contrachapado o escayola.

El concepto de Prouvé fue la producción mecanizada de elementos que una vez ensamblados compusiesen la vivienda. Se puede apreciar el interés de Prouvé por el avance industrial de la época y su interés por introducir nuevas técnicas de fabricación y experimentar con nuevos materiales. Esta mentalidad estaba relacionada con la época, la era de la gran explosión del desarrollo industrial y del transporte, que influyó en todos los ámbitos de la sociedad y la cultura de la primera mitad del siglo XX.

Imagen 28.
Perspectiva.



Imagen 29.
El Museo en construcción.

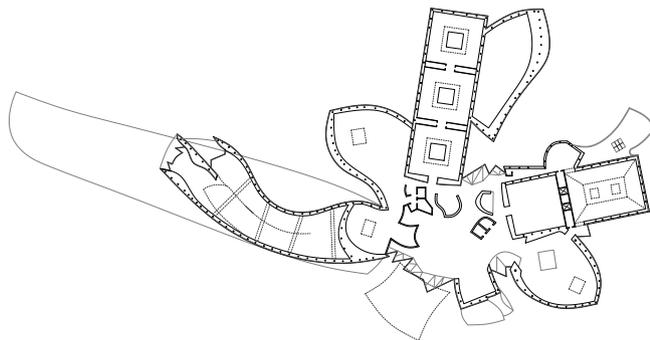
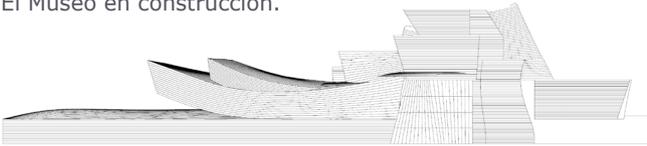


Imagen 30.
Sección y Planta.

Imagen 31.
Axonometría del detalle constructivo del revestimiento.

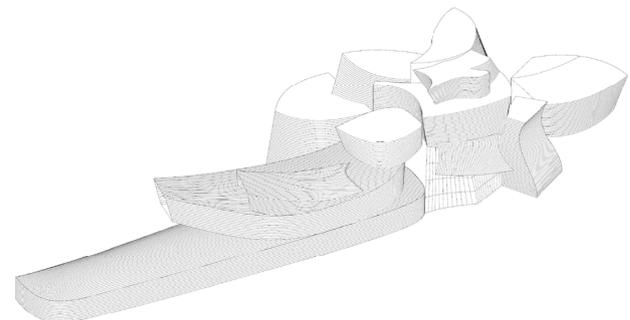
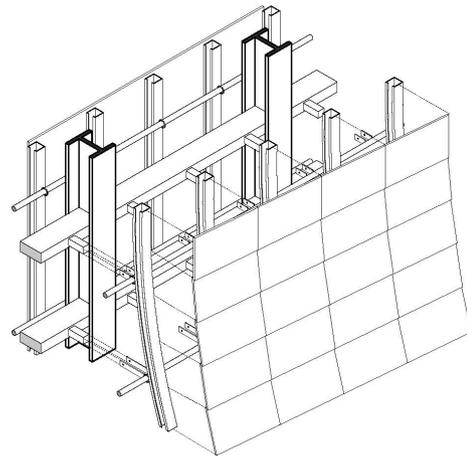
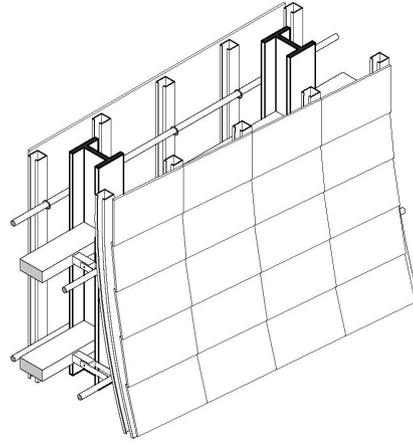


Imagen 32.
Axonometría.

El Guggenheim de Bilbao, Gehry Partners:

El Museo Guggenheim se sitúa en el borde de la ría del Nervión en Bilbao, se caracteriza por la fusión de formas curvilíneas y materialidad que recuerda el pasado industrial y metalúrgico de la ciudad.

Se trata de un conjunto de volúmenes con estructuras casi independientes entre sí relacionadas a diferentes niveles por pasarelas y vestíbulos comunes. Se pretendía crear un hito de la arquitectura de fin de siglo y se tuvo que emplear el avanzado software denominado *Catia*, un programa de diseño por ordenador utilizado en la industria aeronáutica, para trasladar fielmente el concepto de las maquetas estructurales que se crearon artesanalmente en el estudio y así facilitar su construcción.

El revestimiento de la mayor parte de volúmenes está compuesta por cerca de 33.000 **placas de titanio**, con espesor de un tercio de milímetro, consiguiendo un efecto rugoso y orgánico, al que se suman los cambios de tonalidad del material según la atmósfera que le rodee. Al ser tan finas, se adaptan perfectamente a la forma del edificio. Se realizaron muchas pruebas con diferentes materiales buscando uno que reuniera carácter y calidez, finalmente se seleccionó el titanio. Un material ligero, maleable y a la vez resistente a la polución y al rayado.

Su proceso de laminado es delicado y debe realizarse en lugares con grandes fuentes de energía. El laminado para las piezas del Museo se realizaron en Pittsburgh, consiguiendo láminas mucho más delgadas que si hubieran sido de acero. Un viento fuerte hace que su superficie vibre y se ondule.

La subestructura que soporta la piel metálica consta de **traviesas, ladders y montantes metálicos**. Las traviesas son perfiles en posición horizontal que conectan los *ladders* con la estructura primaria. Los *ladders* son perfiles que se apoyan en las traviesas y dan sujeción a los montantes tipo-C, que se posicionan en vertical y ofrecen el soporte para las planchas de titanio.

Imagen 33.
Perspectiva frontal.



Imagen 35.
Perspectiva del voladizo en construcción

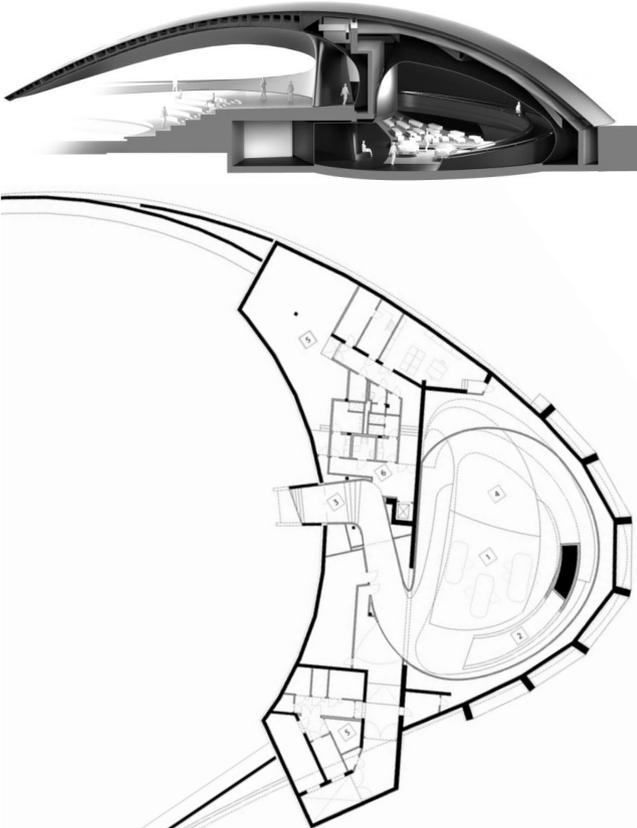


Imagen 34.
Sección y Planta.

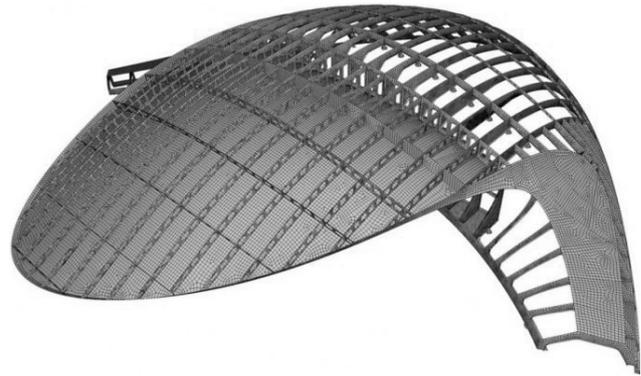


Imagen 36.
Axonometría estructural.

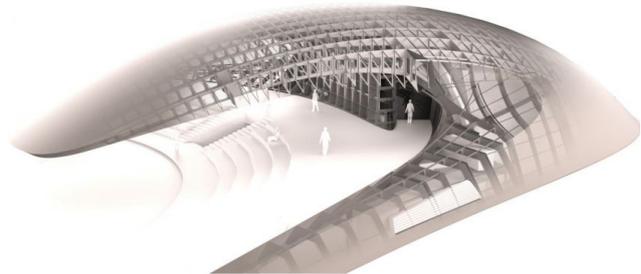


Imagen 37.
Axonometría.

Pabellón de Porsche, Henn Architekten:

El pabellón para Porsche, inaugurado en junio de 2012, en Wolfsburgo, se compone de una base de hormigón estructural que envuelve el sótano, una estructura metálica que cubre el área de exposición y otra estructura de acero inoxidable autoportante tipo cáscara para el voladizo.

Basándose en los principios de las **estructuras** ligeras y en la tradición de Porsche, se propusieron varias soluciones para el voladizo. Finalmente se optó por la de **tipo monocasco**. Un sistema utilizado en la ingeniería aeroespacial, de automoción y naval. Como los paneles que formaban la piel del pabellón únicamente añadían peso propio y no soportaban cargas, se decide que deben ir integrados en el sistema estructural **quedando fundida la estructura con el revestimiento**. Esta está compuesta por nervaduras y paneles metálicos. La rigidez se logra por medio de los paneles superiores e inferiores de la cáscara llevando la tensión y las fuerzas a compresión.

El dinamismo y el diseño de doble curvatura recuerda claramente al estilo de Porsche. Uno de los desafíos del proyecto fue el juntar mediante bridas la estructura de tipo cáscara del voladizo de 25 metros y la estructura metálica de la sala de exposiciones, debiendo quedar una unión homogénea y sin juntas.

Las planchas de acero inoxidable tenían un espesor de 10 mm. Las costillas están dispuestas en una rejilla ortogonal con una distancia de 1,60 m en sentido transversal y 4 m en sentido en voladizo.

Para obtener la doble curvatura de cada panel, las hojas de acero se conformaron en frío con prensas de construcción naval. Las planchas varían de tamaño dependiendo del radio de curvatura, requieren placas de acero muy pequeñas para curvaturas forzadas y permite placas grandes para curvaturas suaves, como en la parte volada. Se prefabricaron 56 segmentos y en la obra se soldaron entre ellos. Tenían unas dimensiones de 14 m x 4,8 m y se aseguraron mediante mediciones con puntos de control en cada partición.

El monocasco no es una novedad para la ingeniería civil, sino que es algo similar a los forjados colaborantes o a las vigas de los puentes con el hueco central. Lo más difícil aquí fue el cálculo y el montaje preciso de la estructura.

NUEVAS TÉCNICAS DE CONFORMADO

A medida que el desarrollo impone nuevas necesidades, la tecnología va ofreciendo nuevas posibilidades. Como ya se ha visto, los componentes de chapa metálica se pueden producir mediante las técnicas estandarizadas, que mayoritariamente utilizan prensas y matrices. Así se obtiene una gran productividad y un tiempo de producción corto. Pero estos procesos únicamente son rentables para la producción de cantidades elevadas de piezas y económicamente inviables para la fabricación de series cortas. Este problema viene dado por el elevado coste de la creación de moldes.

Gracias a los procesos de conformado modernos que están apareciendo y los progresos en el control de software avanzado, se podrá dar una solución a las producciones de series cortas y dar la oportunidad a los que actualmente se ven obligados a elaborar sus productos con materiales y diseños alternativos, evitando los problemas asociados a las tecnologías tradicionales de estampado.

Imagen 38.
ISF Negativo.

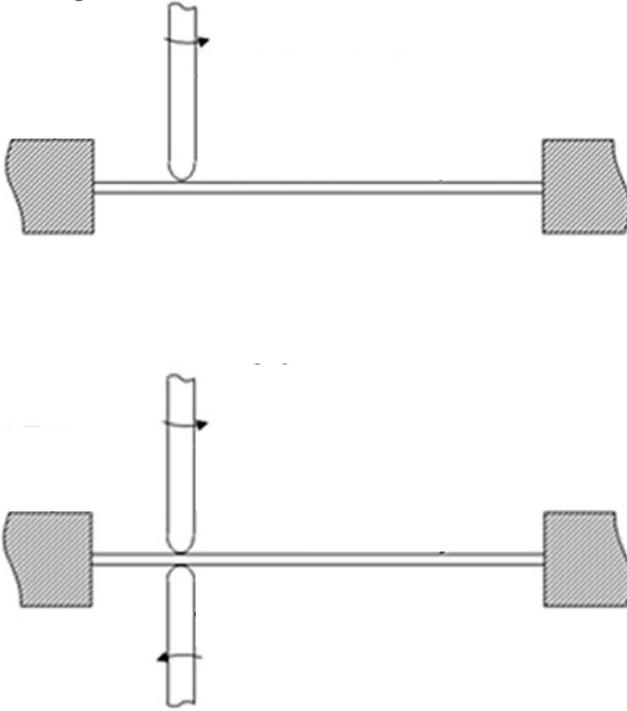


Imagen 39.
ISF Positivo.



Imagen 40.
ISF Positivo.

Imagen 41.
ISF Híbrido con líquido a presión.

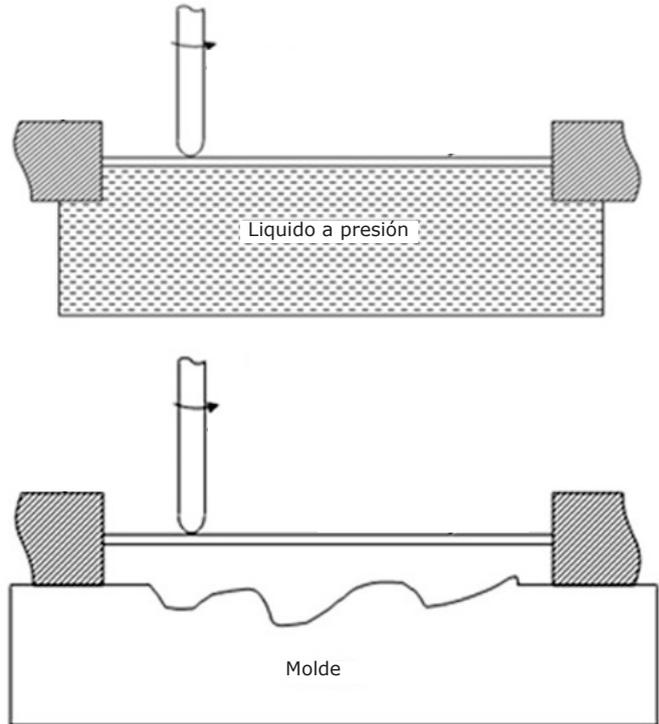


Imagen 42.
ISF Híbrido con molde.



Imagen 43.
ISF Positivo.

TÉCNICAS NOVEDOSAS DE CONFORMADO:

Conformado incremental, *Incremental sheet forming (ISF)*:

El conformado incremental se caracteriza por ser una tecnología capaz de modelar piezas de elevada complejidad. Esta técnica es el resultado de la mezcla parcial del proceso de conformado por estiramiento y spinning. Por lo tanto, el ISF tiene las ventajas de ambos procesos.

La fabricación de formas con chapa metálica se obtiene por la generación de sucesivas deformaciones sobre la chapa, hasta que la suma de estas configure la forma deseada. En comparación con los procesos de conformado estándar, esta técnica permite reducir el coste, por no tener que crear un molde o matriz, así como costes asociados a la fabricación de las piezas.

Hay cuatro elementos básicos en el proceso ISF, una chapa metálica, un soporte para la chapa, la herramienta a modo de puntero que realiza la deformación y una máquina CNC. La herramienta debe ser semiesférica y el controlador CNC con capacidad para controlar en 3 dimensiones (X, Y, Z) se utiliza para manejar el puntero.

El conformado incremental se clasifica en:

____ Conformado incremental convencional, que puede ser positivo o negativo. En el primero se utiliza un puntero a cada lado de la chapa, uno se utiliza de soporte a la vez que el otro ejerce la presión moldeando la lámina. Y en el segundo solo se utiliza un puntero que va creando la forma requerida.

____ Conformado incremental híbrido, que combina el uso del puntero en un lado de la chapa, y ofrece 2 posibilidades para ejercer presión en la otra parte: líquido a presión o un molde, que generalmente es de madera.

Imagen 44.
Multipoint Forming.

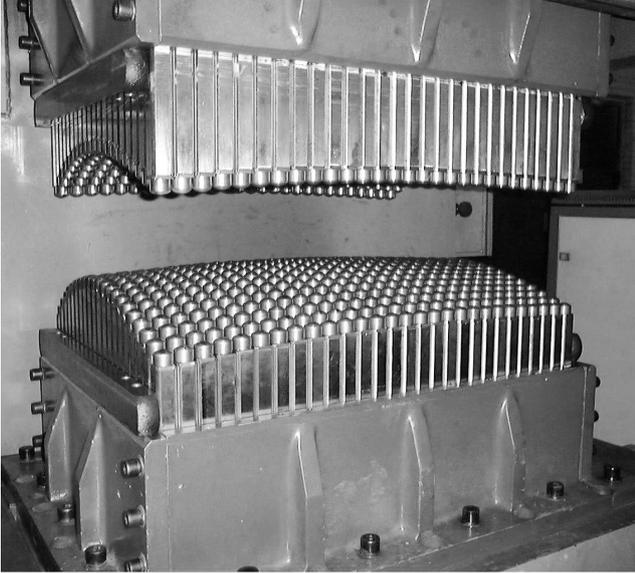


Imagen 46.
Multipoint Forming.

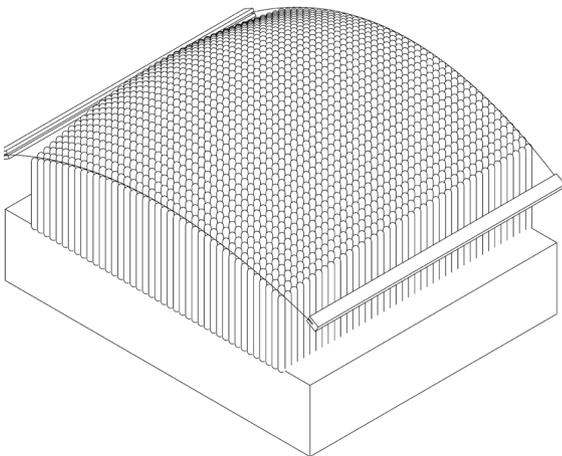


Imagen 45.
MF para paneles de curvatura gaussiana positiva.

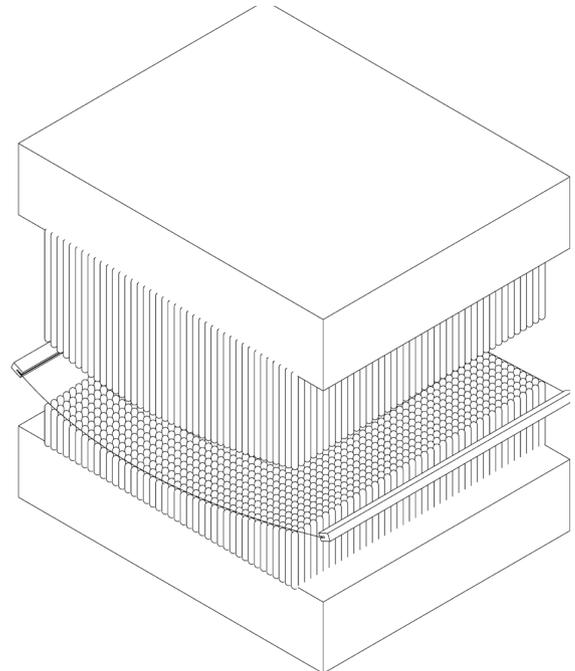


Imagen 47.
MF para paneles de curvatura gaussiana negativa.

Multipoint forming, (MF):

La tecnología de producción en masa se utiliza para la fabricación de automóviles, aviones y barcos de chapa, pero no es factible para edificios de forma irregular, debido a la gran variedad de paneles y sus grados de curvatura. El alto precio de la fabricación de moldes no se podría justificar económicamente. Por esta razón para los edificios de forma libre, habitualmente, se utilizan paneles planos o de 1 curvatura, y rara vez se emplean paneles metálicos de doble curvatura.

El sistema Multipoint Forming permite la producción en masa, que utiliza una máquina como molde, controlable digitalmente para conformar los paneles. Es un método de última generación para conformar paneles de chapa metálica con varias formas mediante el control de la altura de pequeñas prensas hidráulicas. Y puede crear cualquier forma presionando los postes móviles contra la chapa.

Se emprendió con el fin de desarrollar métodos alternativos para la fabricación de paneles 3D para aeronaves. El MF también fue utilizado para fabricar las deformadas columnas de acero del Estadio Olímpico de Beijing.

Existen dos alternativas que ofrece el *Multipoint Forming*. La primera es el *Multiple-post hydroforming*, que es un método híbrido de hidroconformado y *Multipoint Forming*. La idea es tener los postes que ejercen la fuerza en un lado de la chapa y líquido a presión en el otro. Y la segunda es *Multipoint Stretch Forming*, que es otro método híbrido por estiramiento y Multipoint Forming. Esta opción produce formas curvas estirando y presionando la chapa fija con múltiples postes controlados por ordenador con la forma deseada.

Imagen 48.
Método de plegado de Robofold.

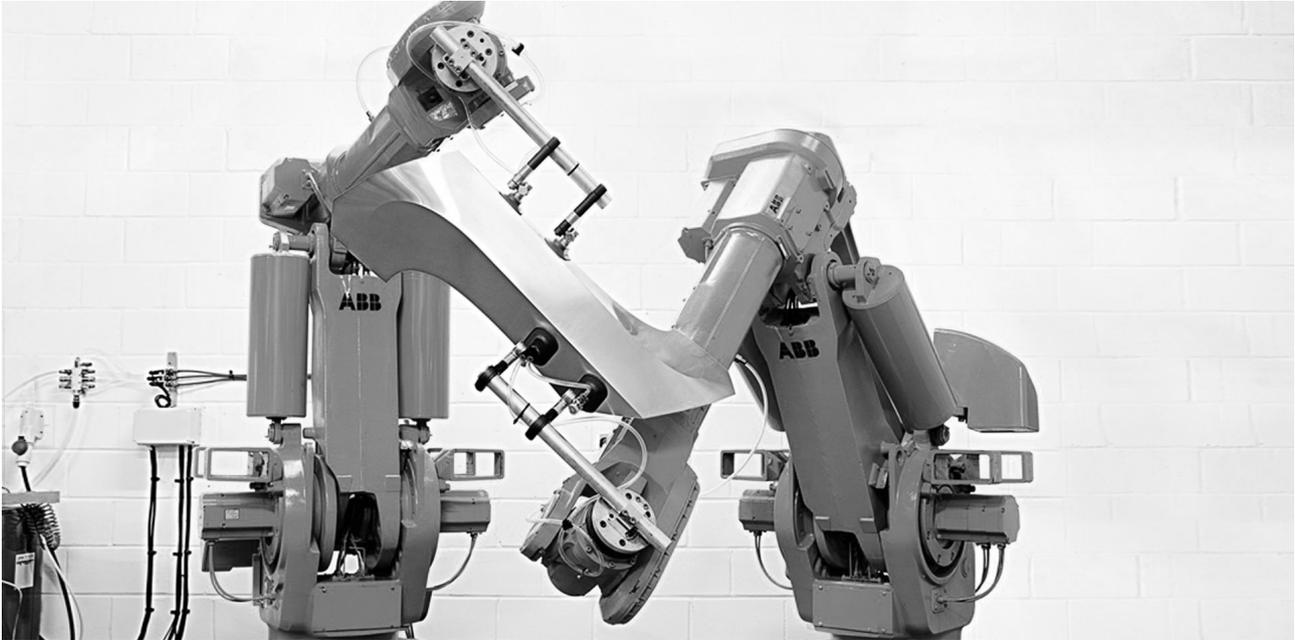


Imagen 49.
Método por inflación de FiDU .

RoboFold:

RoboFold es un sistema de conformado único, de bajo consumo, que utiliza robots para crear formas metálicas curvas. Toda la información para crear una forma se configura con robótica, para que realicen los movimientos necesarios. Están programados para manipular la chapa plegándola a lo largo de las líneas previamente marcadas.

Inspirándose en la impresión en 3D, todo el proceso RoboFold se simula con software de diseño asistido por ordenadores (CAD). Actualmente se imparte formación del sistema para la producción de revestimientos arquitectónicos, instalaciones artísticas y mobiliario a medida.

FiDU:

FiDU es un método innovador y simple. No sólo se pretende utilizar menos material, sino también menos datos. Zieta Prozessdesign utiliza robots precisos y herramientas organizadas para crear una producción eficaz y sostenible. El material "decide" su forma final. Con esta técnica una forma 2D pasa a ser 3D. Las dos chapas metálicas planas soldadas se inflan al introducir aire a presión en su interior.

El proceso es el siguiente; se obtiene la chapa metálica, se cortan mediante laser las dos laminas que después se soldarán por el perímetro. Por último, mediante software avanzado se introducen los datos para que el robot infle las dos laminas soldadas aplicando más o menos presión para que la forma final tenga un resultado u otro.

Imagen 50.
Perspectiva.

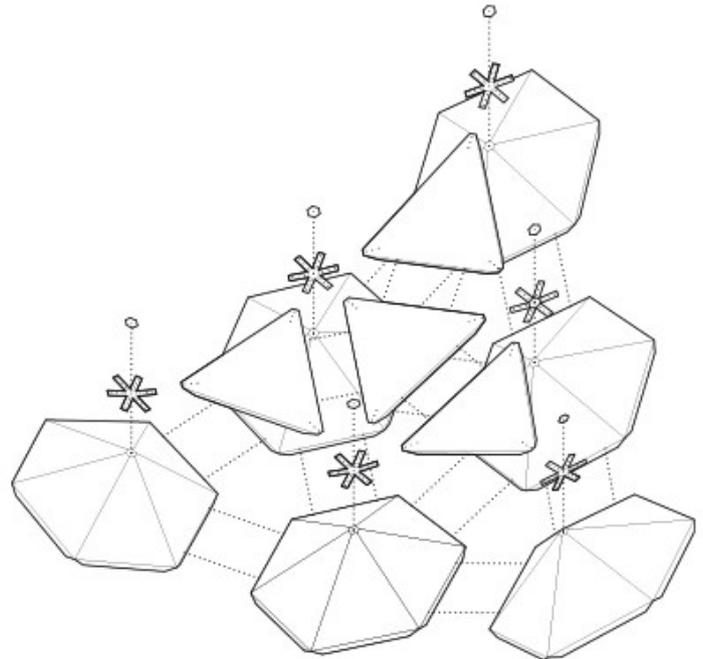
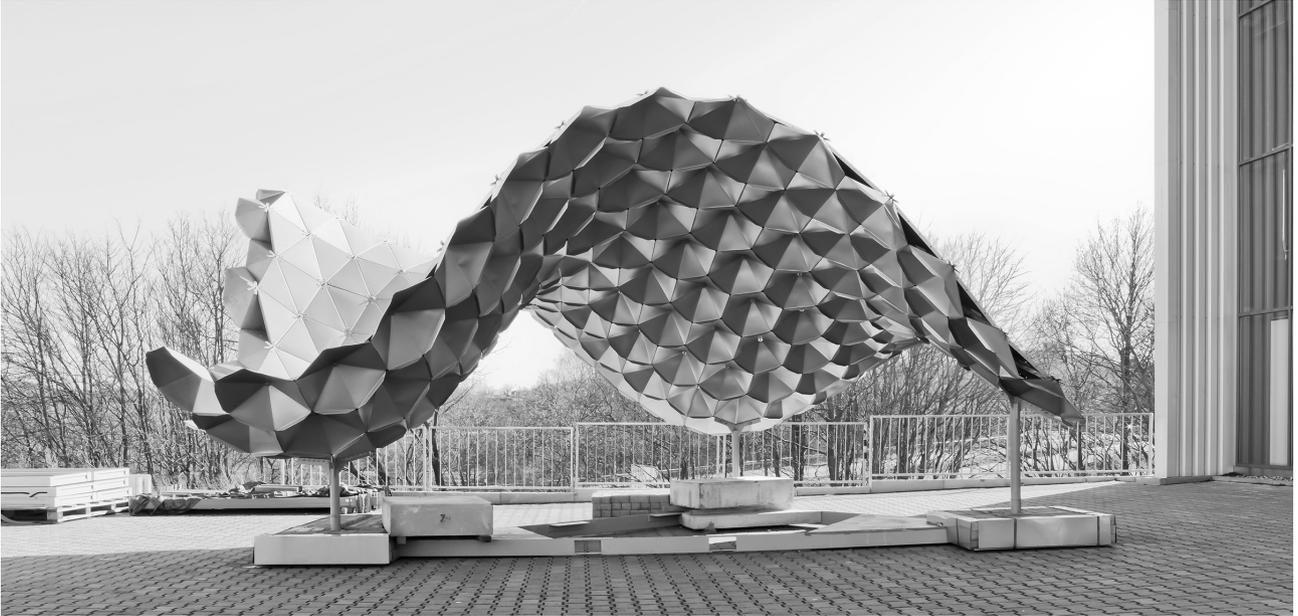


Imagen 51.
Axonometría del detalle constructivo.

ARQUITECTOS Y EJEMPLOS ARQUITECTÓNICOS:

Self-supporting free-form structures, RWTH Aachen:

El trabajo presentado desvela un nuevo concepto de estructuras ligeras con las bases del plegado. El desarrollo de procesos de producción adecuados, incluyendo métodos de producción de vanguardia como Incremental Sheet Forming, ha sido necesario para el desarrollo de los componentes. Se estableció un proceso comenzando con el diseño arquitectónico, la producción y el montaje, y se probó en una forma prototipo.

La producción de tantas piezas es una tarea difícil y es necesario un proceso de fabricación flexible y optimizado. Los elementos triangulares, así como los conectores en forma de estrella, se fabricaron utilizando un láser CNC. Los labios de unión de las pirámides se doblaron con una plegadora manual. Para las partes más complejas de la estructura, las pirámides, los métodos de producción comunes eran inaplicables porque un proceso de plegado de los elementos piramidales era difícil en términos de flexión tridimensional. Por lo tanto las pirámides se conformaron utilizando ISF, un proceso de conformado económico para la producción de series cortas, que es flexible debido al bajo esfuerzo de mecanizado.

Imagen 52.
Perspectiva.

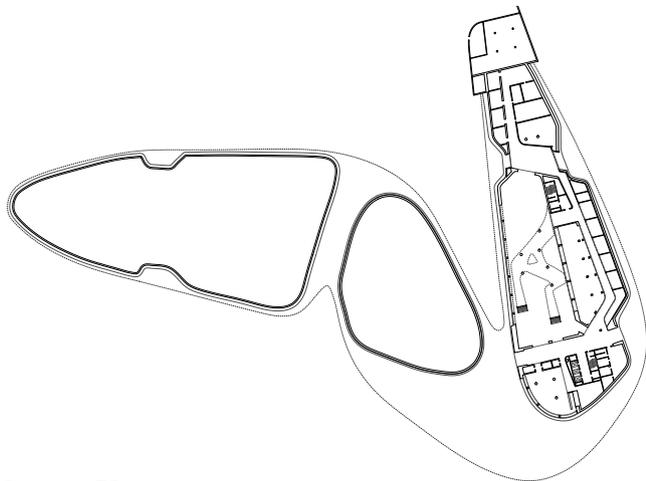


Imagen 53.
Alzado y Planta.

Imagen 54.
Perspectiva de la panelización y su variedad.

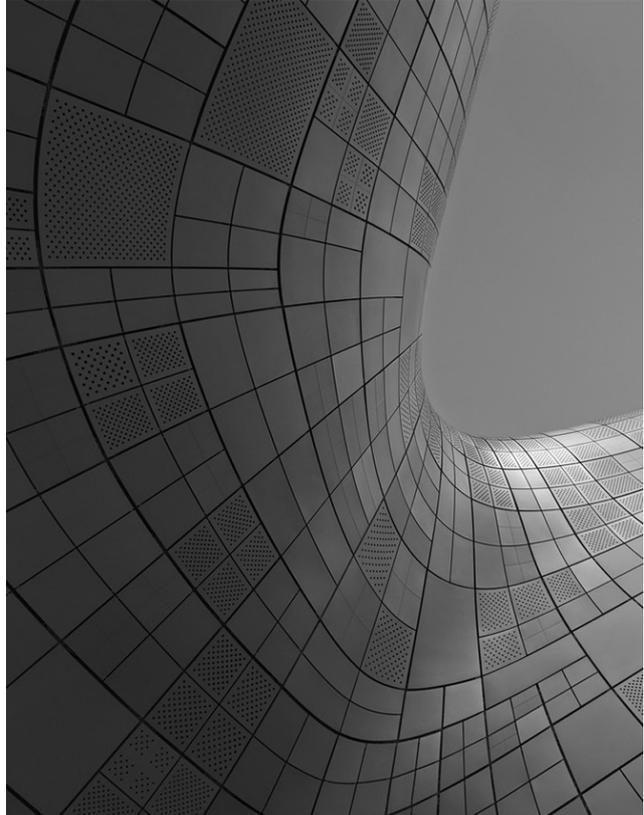


Imagen 55.
Detalle del revestimiento.

Dongdaemun Design Plaza, Zaha Hadid Architects:

La piel del Dongdaemun Design Park (DDP) fue cubierta por más de 45.000 paneles de aluminio de 4 milímetros de espesor con los bordes doblados de los cuales casi el 50% son de doble curvatura. Cada panel es diferente variando en color y forma. Las juntas entre paneles son de 25 milímetros, lo que deja muy poco espacio para errores de construcción y deformaciones. El tamaño de los paneles curvos es como máximo de 1,2 x 1,6 metros, que son las dimensiones que la maquina acepta.

Ningún edificio con estas características ha sido edificado anteriormente, y con tan poco tiempo para la ejecución. El método de fabricación de los paneles fue fundamental para lograr terminar la construcción en el tiempo acordado. Durante un año, se estudiaron diferentes métodos para moldear las láminas metálicas con doble curvatura de forma rápida y económica. El método seleccionado fue el *Multipoint Stretch Forming* que como ya se ha visto, permite fabricar en masa los paneles con la forma requerida rápida y económicamente (264\$/panel).

“El proceso es el siguiente: primero se estira la lámina de aluminio fijándola por sus extremos, después se moldea configurando los pistones hidráulicos de la máquina con la forma deseada, presionando superiormente si es necesario, y finalmente se cortan y perforan los paneles. Si la lámina fuera cortada antes de moldearse, no habría posibilidad de fijar la lámina a la máquina, y si fuera perforada antes, la lámina no aguantaría al ser estirada” Ghang Lee and Seonwoo Kim

El formado y cortado de un panel dura 6 minutos, pero incluyendo el tiempo de disposición se convierten en 15 y algo más para los paneles más complejos. Esta técnica hizo posible la fabricación de toda la envolvente sin grandes pérdidas de material y con exactitud, favoreciendo la rapidez en la obra, con su colocación y ensamblaje.

COMPARATIVA

A continuación se realiza una comparativa para observar la evolución que ha tenido la arquitectura actual según las técnicas de conformado del momento. Entre los proyectos están el Museo Guggenheim de Bilbao, el Dongdaemun Design Plaza, de Seoul, y un Espacio de exposición en Aachen, este último propio.

Se puede observar como la subestructura que sustenta la piel exterior de los dos primeros proyectos ha mejorado considerablemente. Mientras la primera trata de 3 elementos diferentes (traviesas, ladders y montantes) que se ensamblan en obra, el segundo sistema (MERO system) viene prefabricado y es mucho más inteligente, simplificando así el montaje en la obra.

La técnica del Multipoint Stretch Forming es la utilizada para conformar los paneles de la piel exterior en el proyecto Dongdaemun Design Plaza. Esta técnica ofrece más libertad para los revestimientos en edificios de forma libre, eliminando algunos de los condicionantes económicos que limitaban que cada panel tuviese una forma diferente.

El Espacio para Exposiciones es una propuesta mía, donde la estructura se funde con el revestimiento. El proyecto es un buen ejemplo que muestra que la chapa metálica es un material potente y con futuro, que ofrece infinidad de alternativas y opciones, y que con ayuda de las nuevas técnicas de conformado algunas fronteras que antes existían, ya han desaparecido.

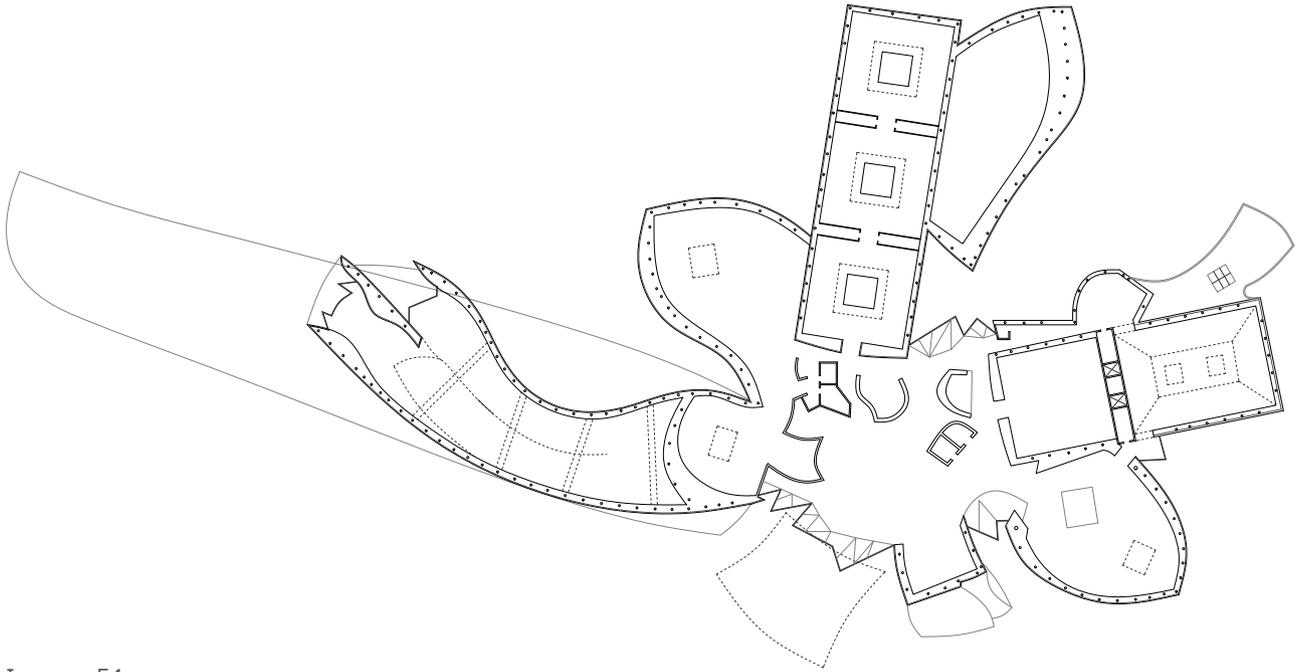


Imagen 54.
Planta.

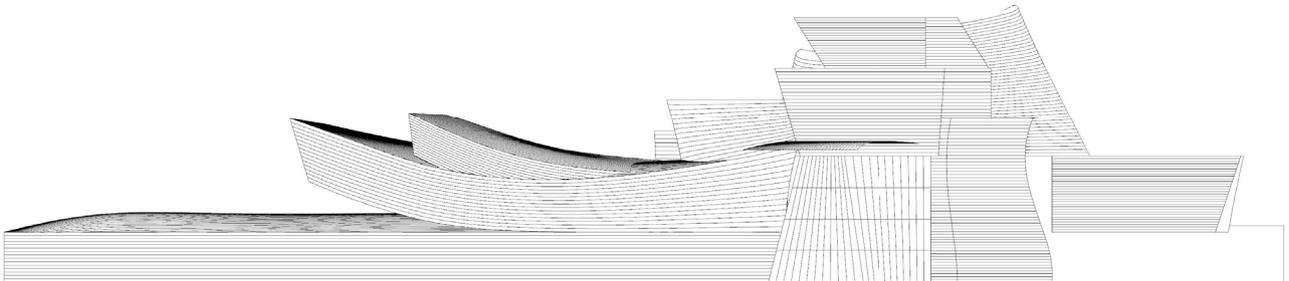


Imagen 55.
Alzado.

Museo Guggenheim de Bilbao

Gehry Partners, 1997

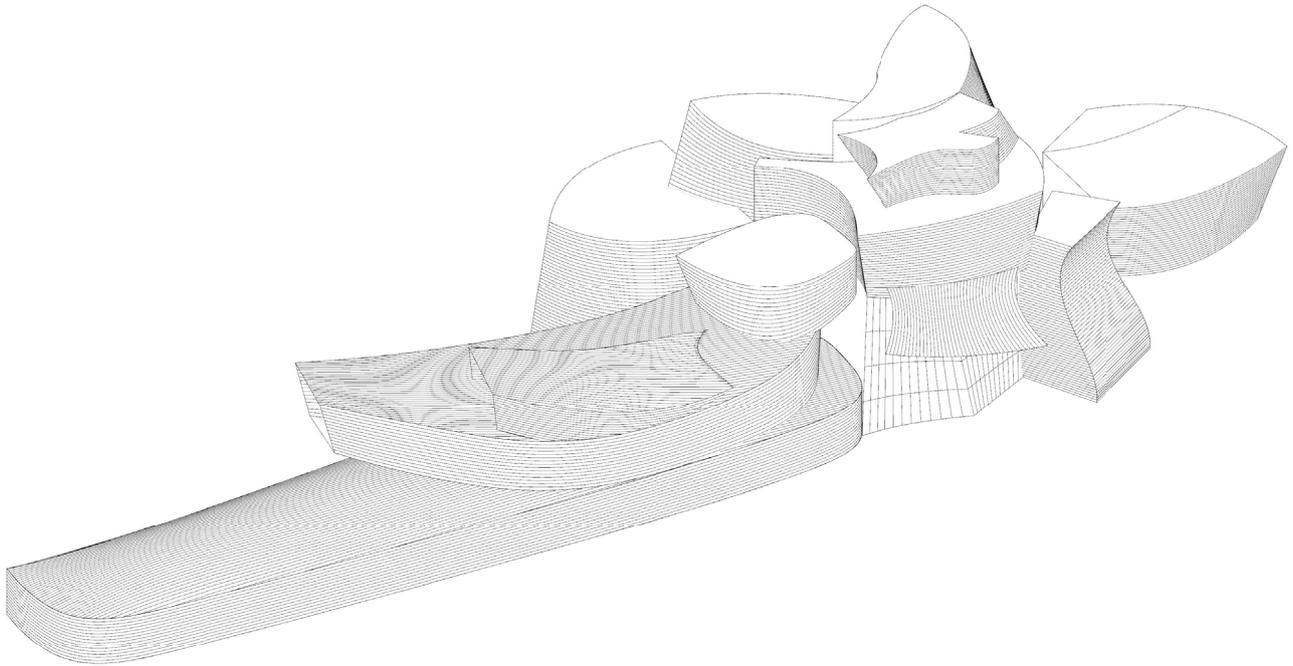


Imagen 56.
Axonometría.

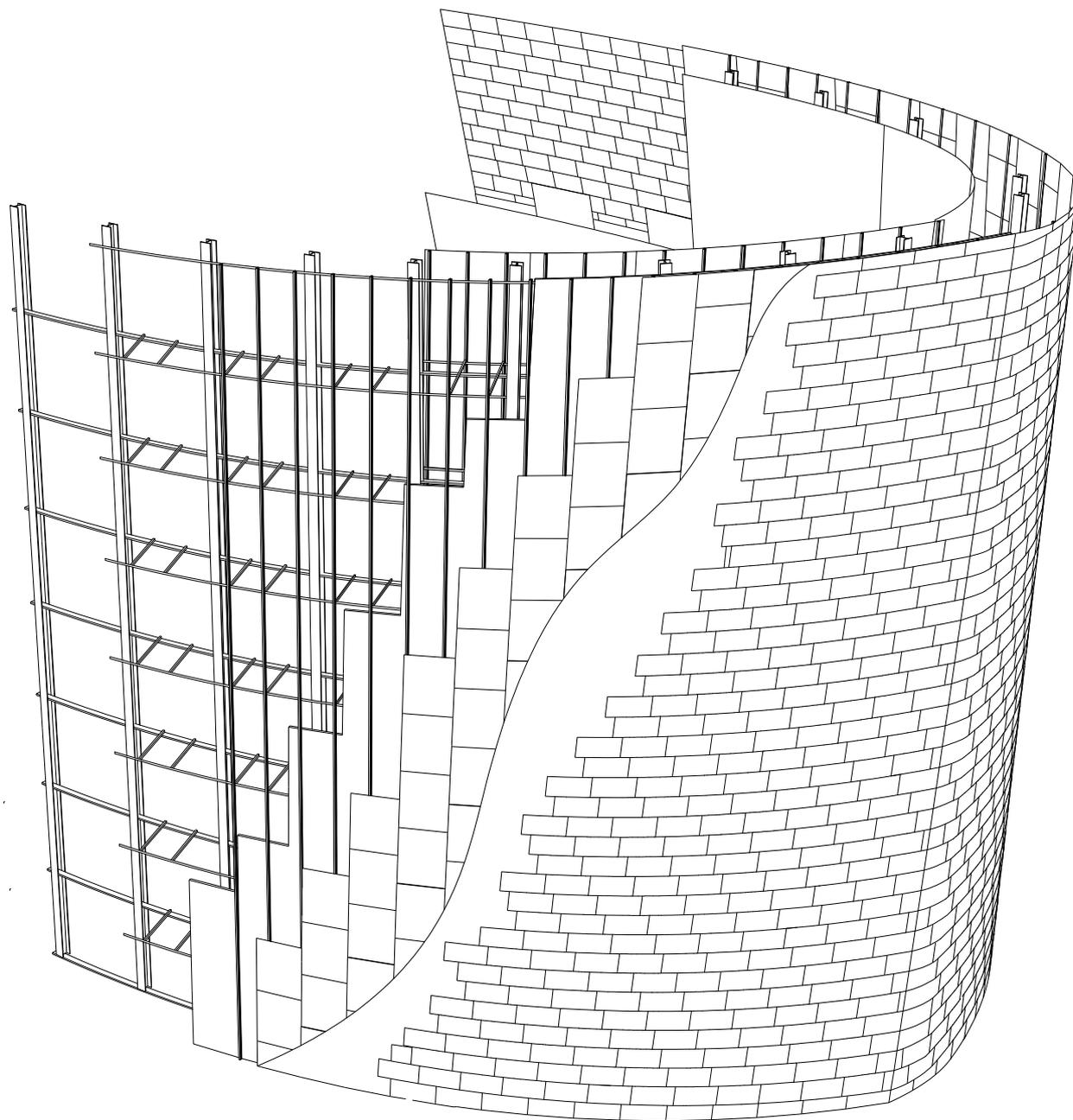


Imagen 57.
Axonometría detalle revestimiento.

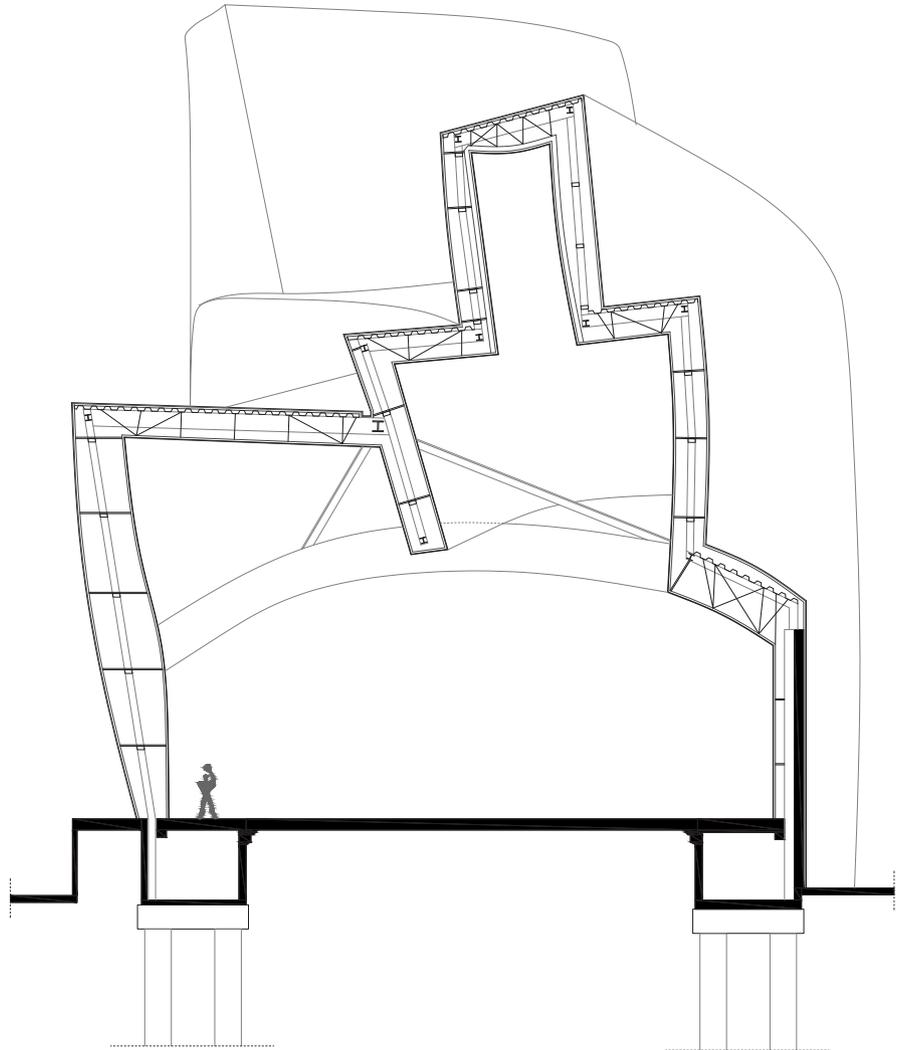
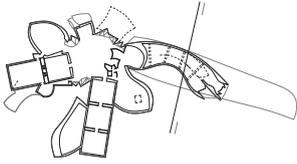


Imagen 58.
Sección.

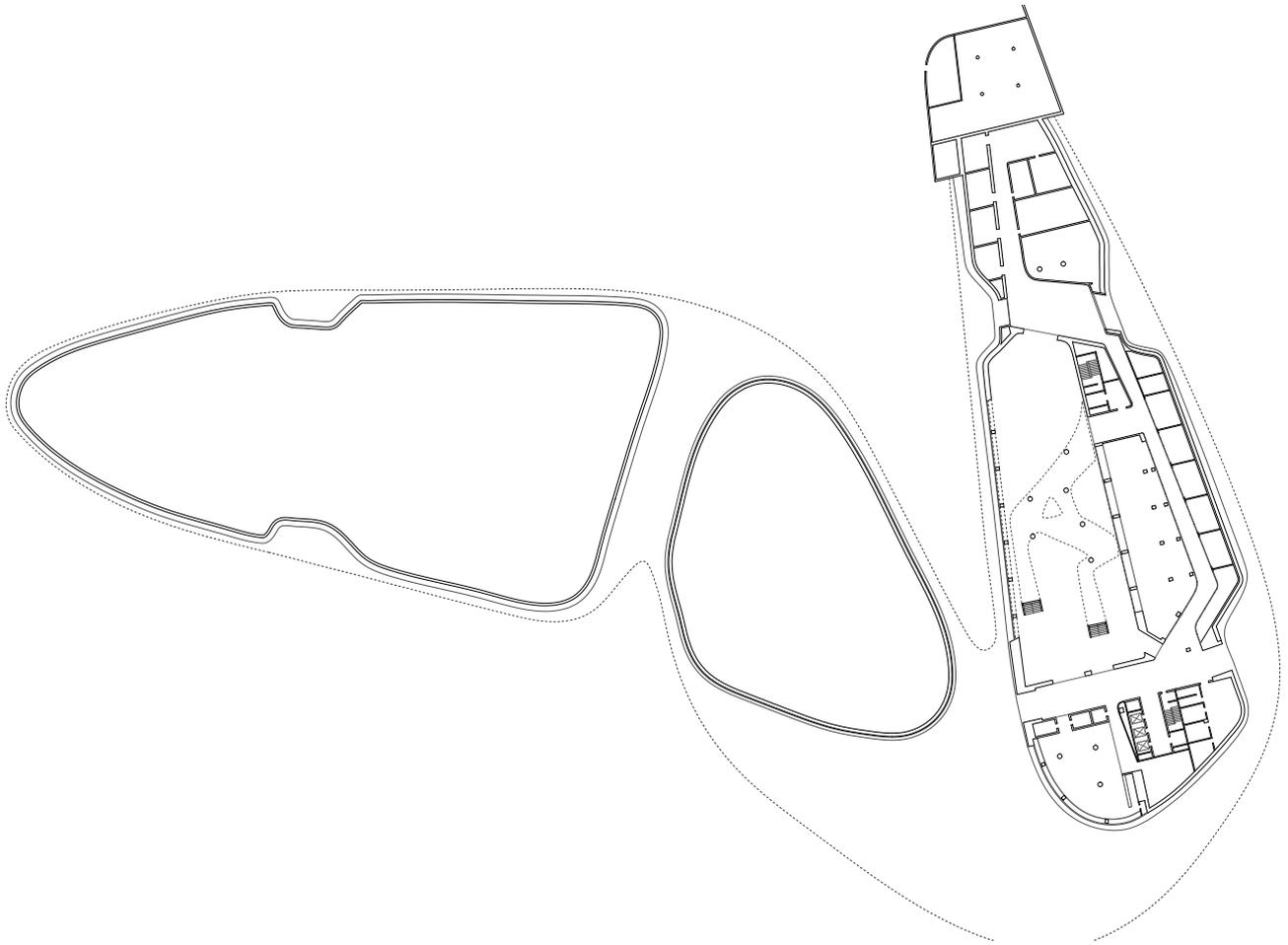


Imagen 59.
Planta.

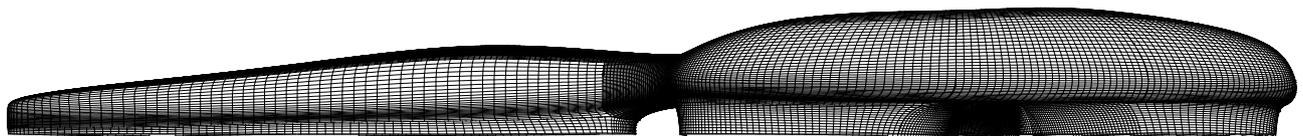


Imagen 60.
Alzado.

Dongdaemun Design Plaza
Zaha Hadid Architects, 2014

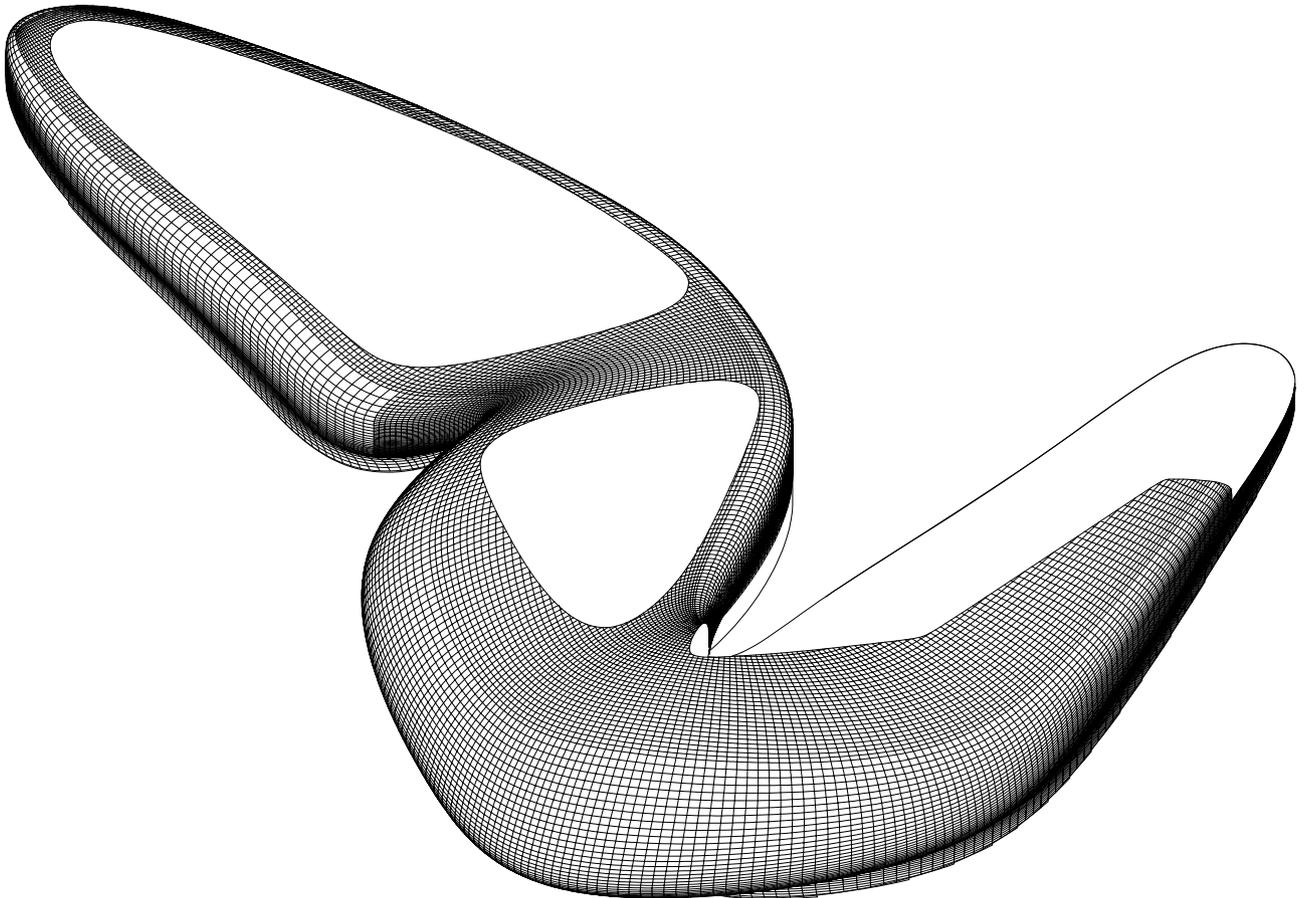


Imagen 61.
Axonometría.

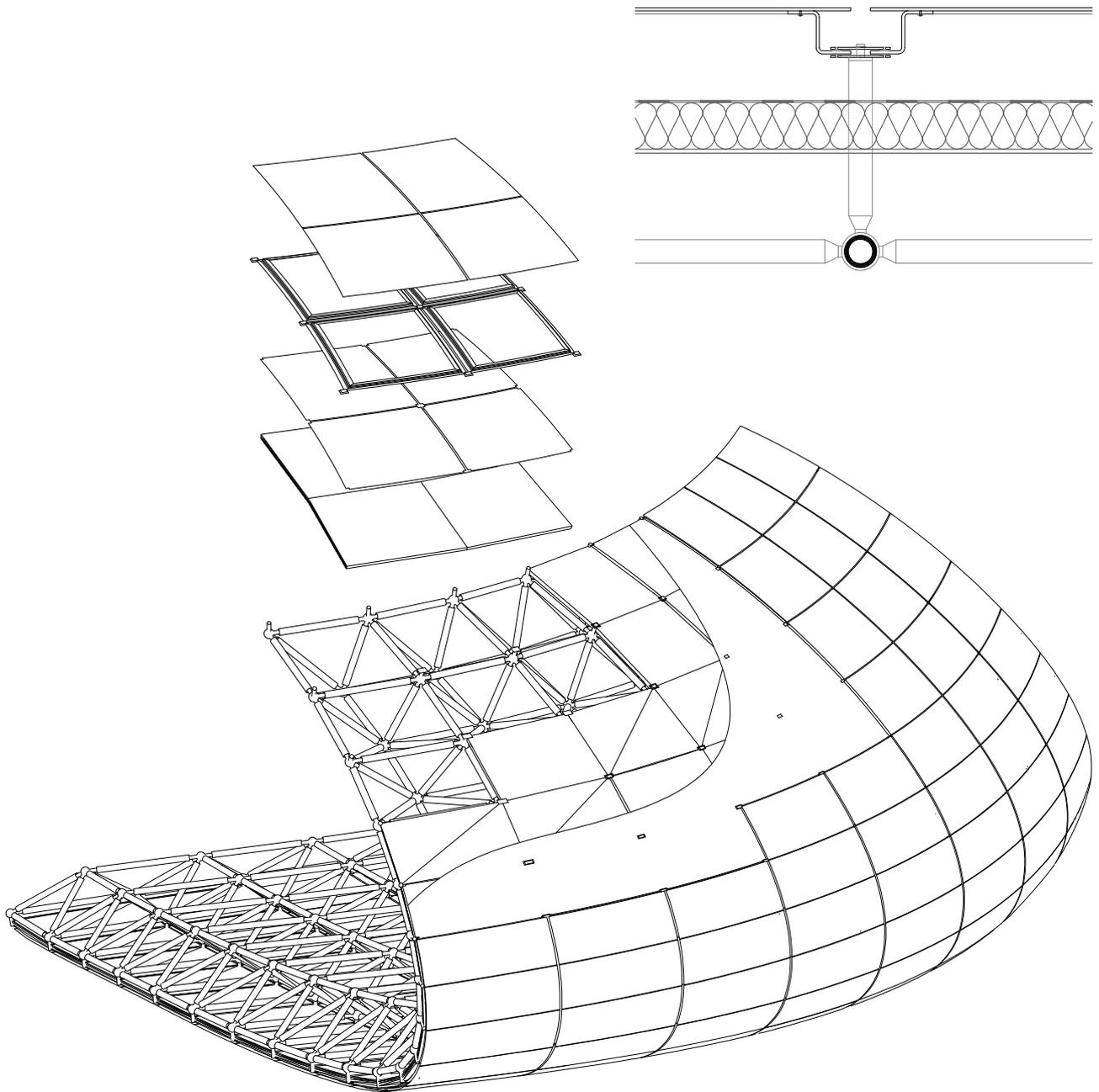


Imagen 62.
Axonometría del revestimiento.

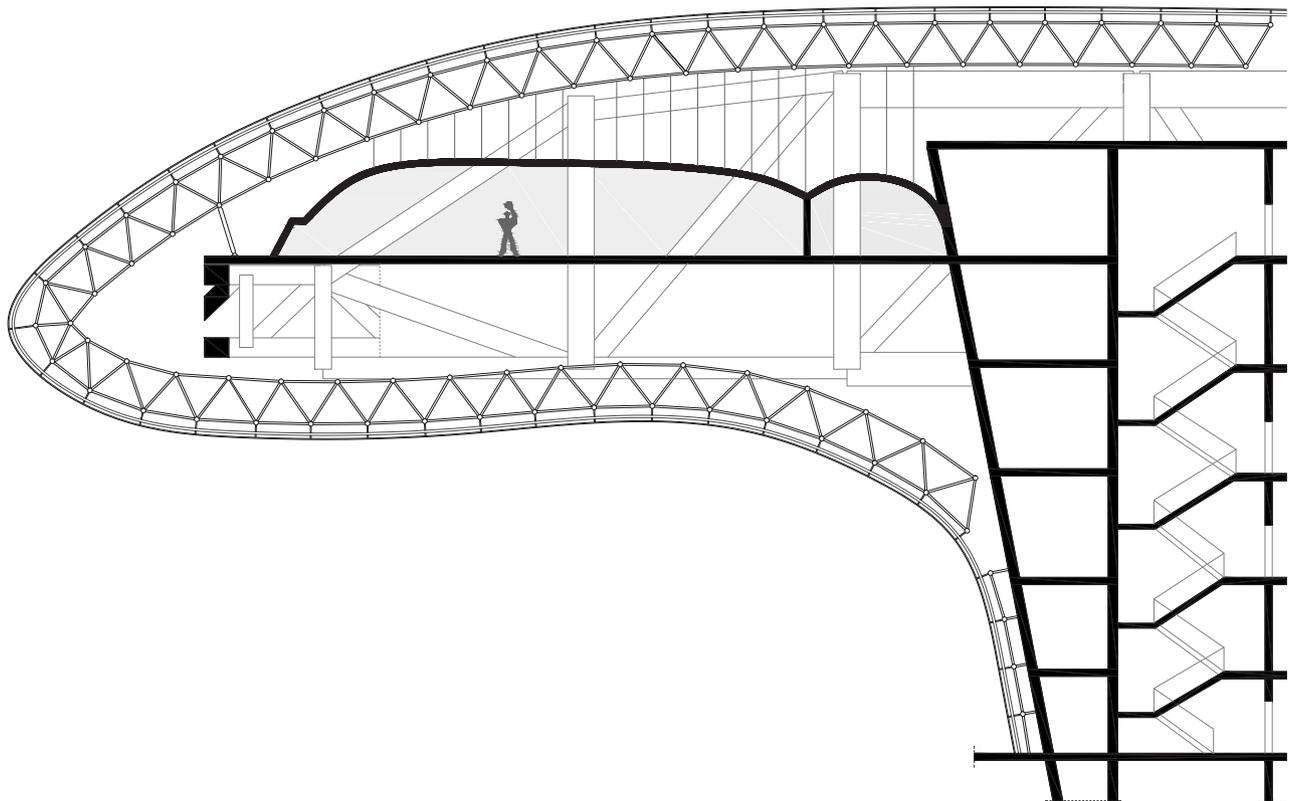
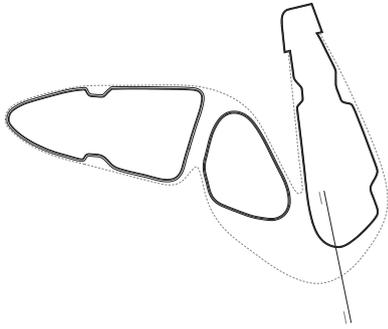


Imagen 63.
Sección.



Imagen 64.
Planta general.

Espacio para Exposiciones

Carles García, 2018

El pabellón proyectado en Aachen, una ciudad al oeste de Alemania, tiene como objetivo ser un espacio de exposiciones enfocado a la chapa metálica. Está situado frente al Instituto del Conformado Metálico de la Universidad de Aachen, una universidad puntera y pionera en las tecnologías del metal.

La propuesta tiene forma triangular en planta y cubierta ligera e inclinada, dándole un mayor protagonismo a las aristas del edificio. El pabellón está completamente acristalado para absorber la mayor parte de luz natural, que normalmente es escasa y para poder observar desde fuera la estructura.

Se trata de una estructura de techo suspendido, como si se tratase de una catenaria. Los soportes actúan a compresión mientras que el techo a tensión. Y lo más interesante es que la cubierta es revestidora y autoportante a la vez.

Los soportes de acero están inclinados y con la ayuda de un elemento tensor de sección cuadrada de chapa soportan las fuerzas. La cubierta de chapa metálica abraza a la viga circular de acero.

La cubierta ligera, básicamente está compuesta de láminas transversales superpuestas que recorren toda la luz del pabellón. Vienen en rollos desde la fábrica y simplemente se tienen que desenrollar y colocar. Las pirámides que hacen que el elemento no vibre con el viento están hechas con el método de conformado incremental (ISF) y unidas entre sí por las pestañas de la parte inferior, dobladas con el método de doblado estándar para que junto con las planchas creen una estructura triangulada y autoportante.

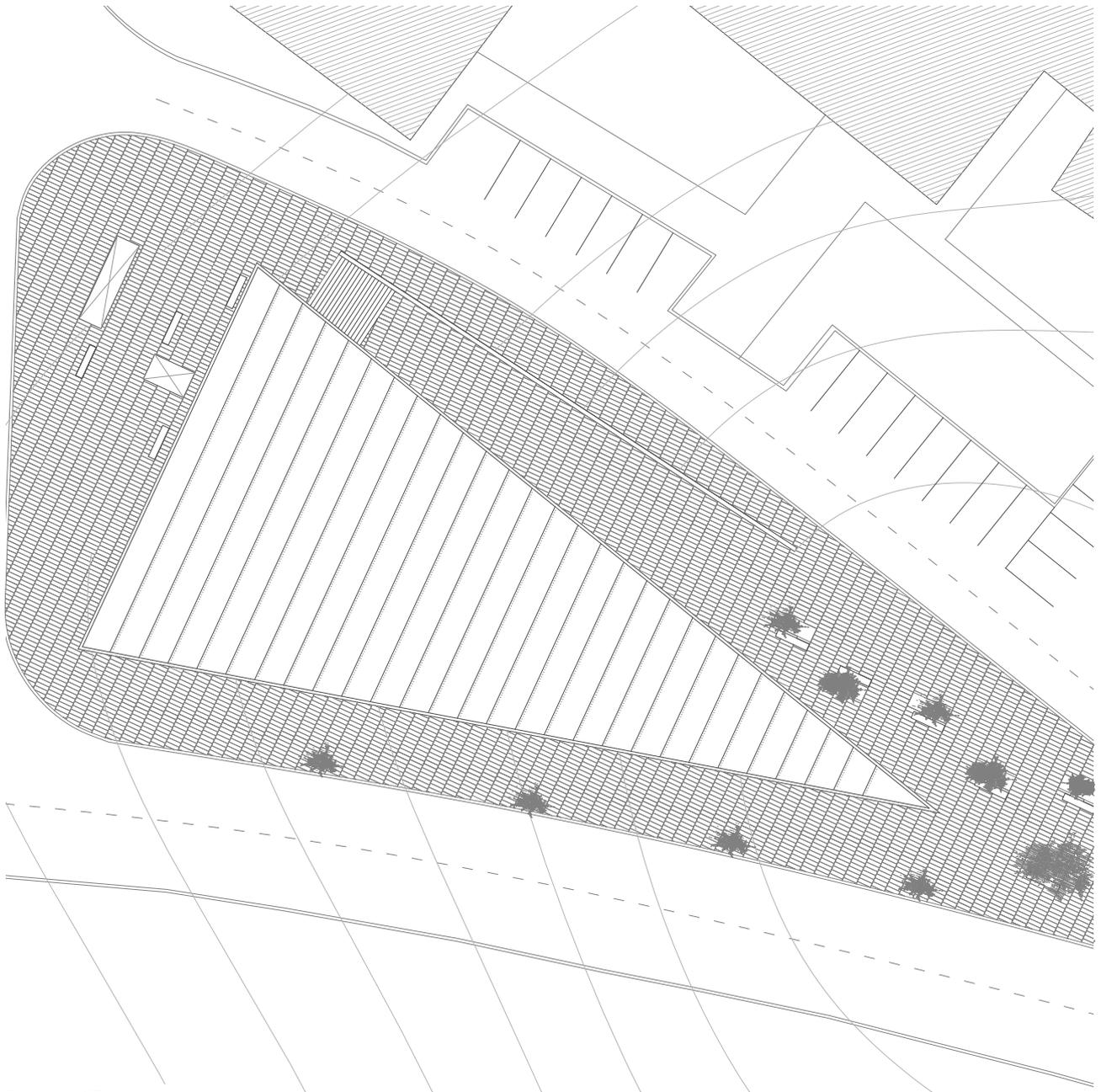


Imagen 65.
Planta de cubierta.

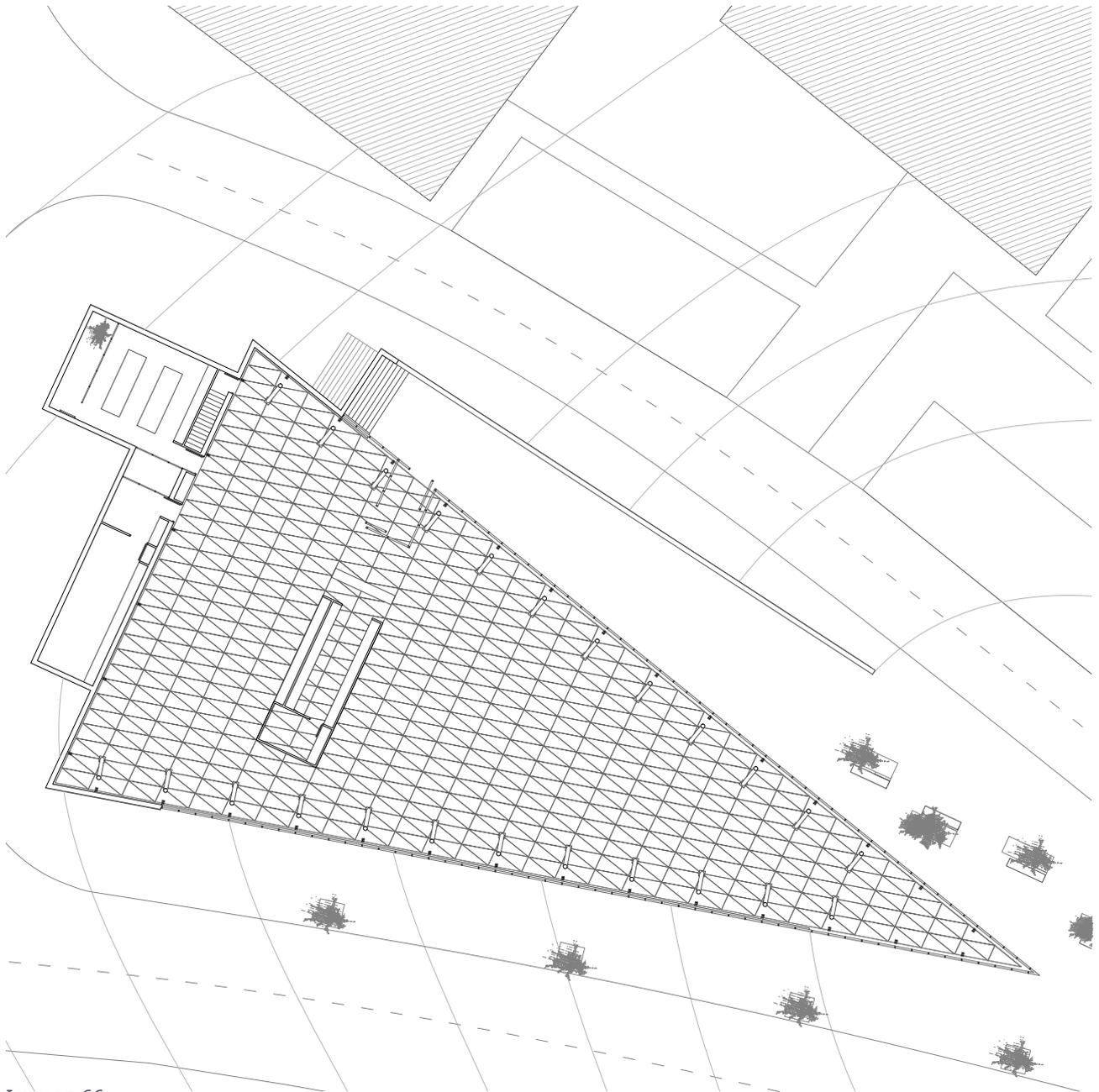


Imagen 66.
Planta cota 0.

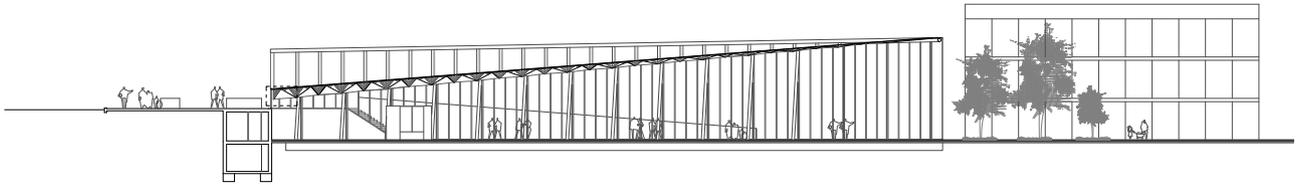


Imagen 67.
Sección Sur.

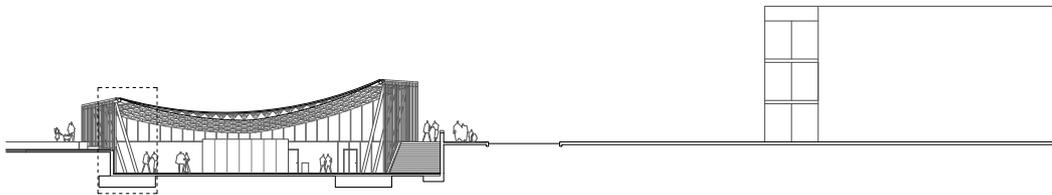


Imagen 68.
Sección Este.

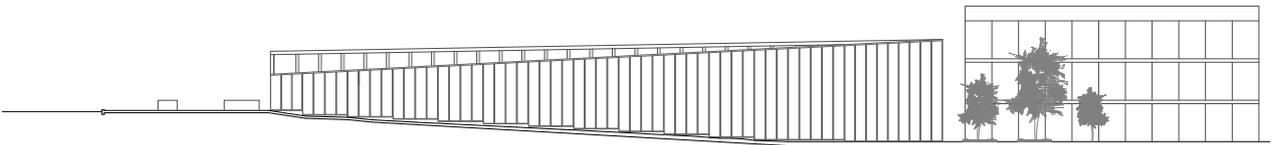


Imagen 69.
Alzado Sur.



Imagen 70.
Alzado Oeste.

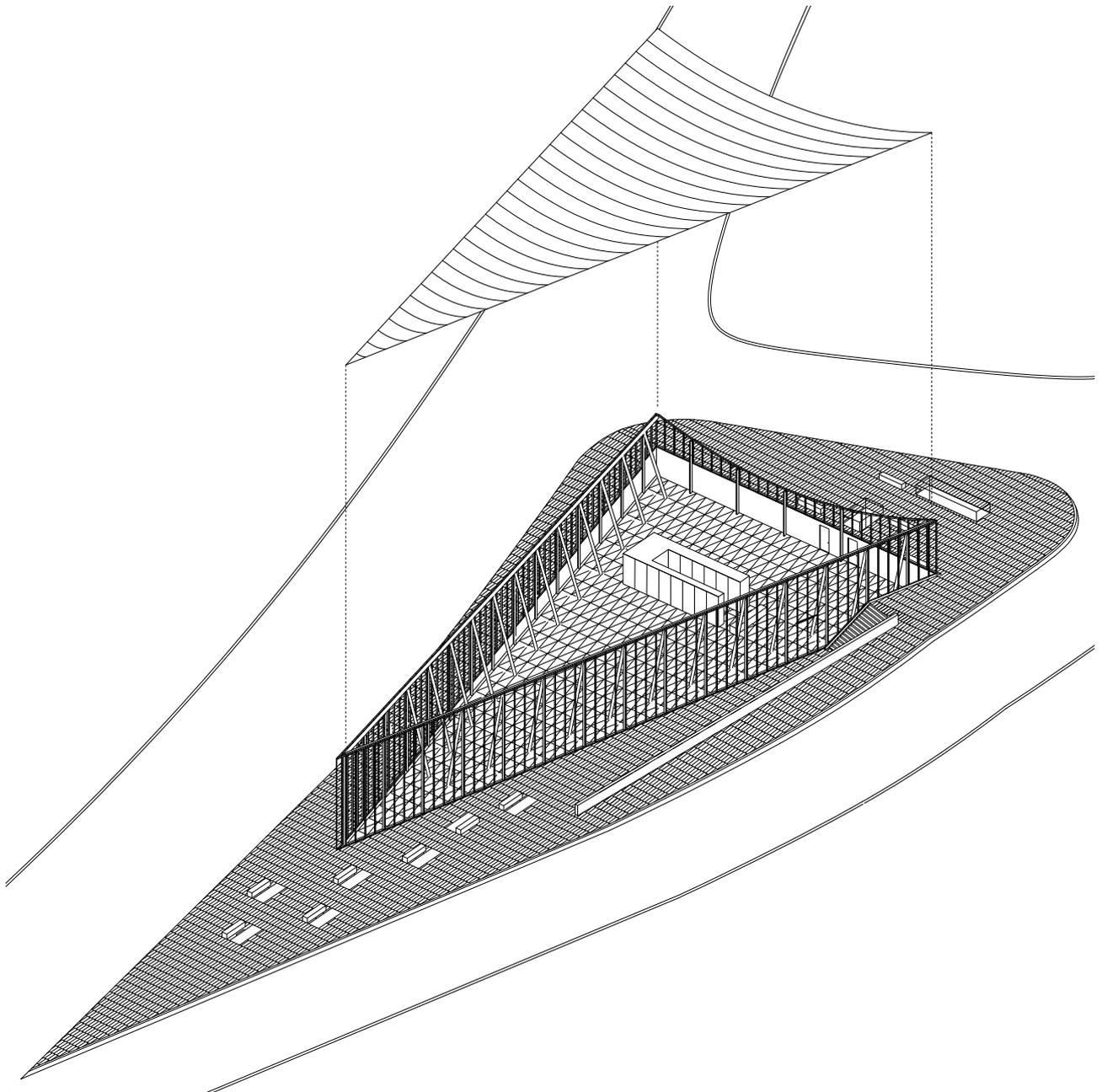


Imagen 71.
Axonometría.

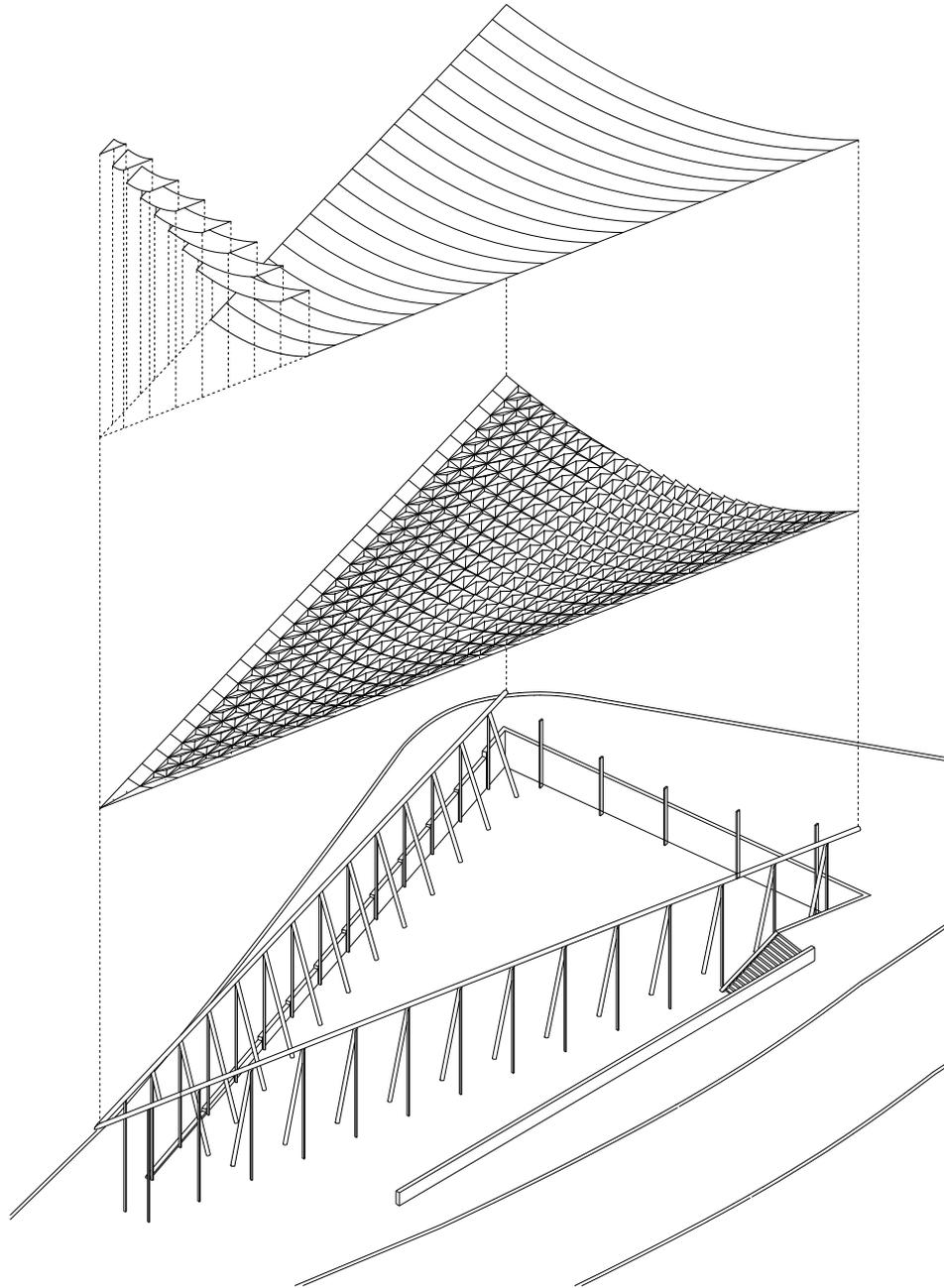


Imagen 72.
Axonometría estructural.

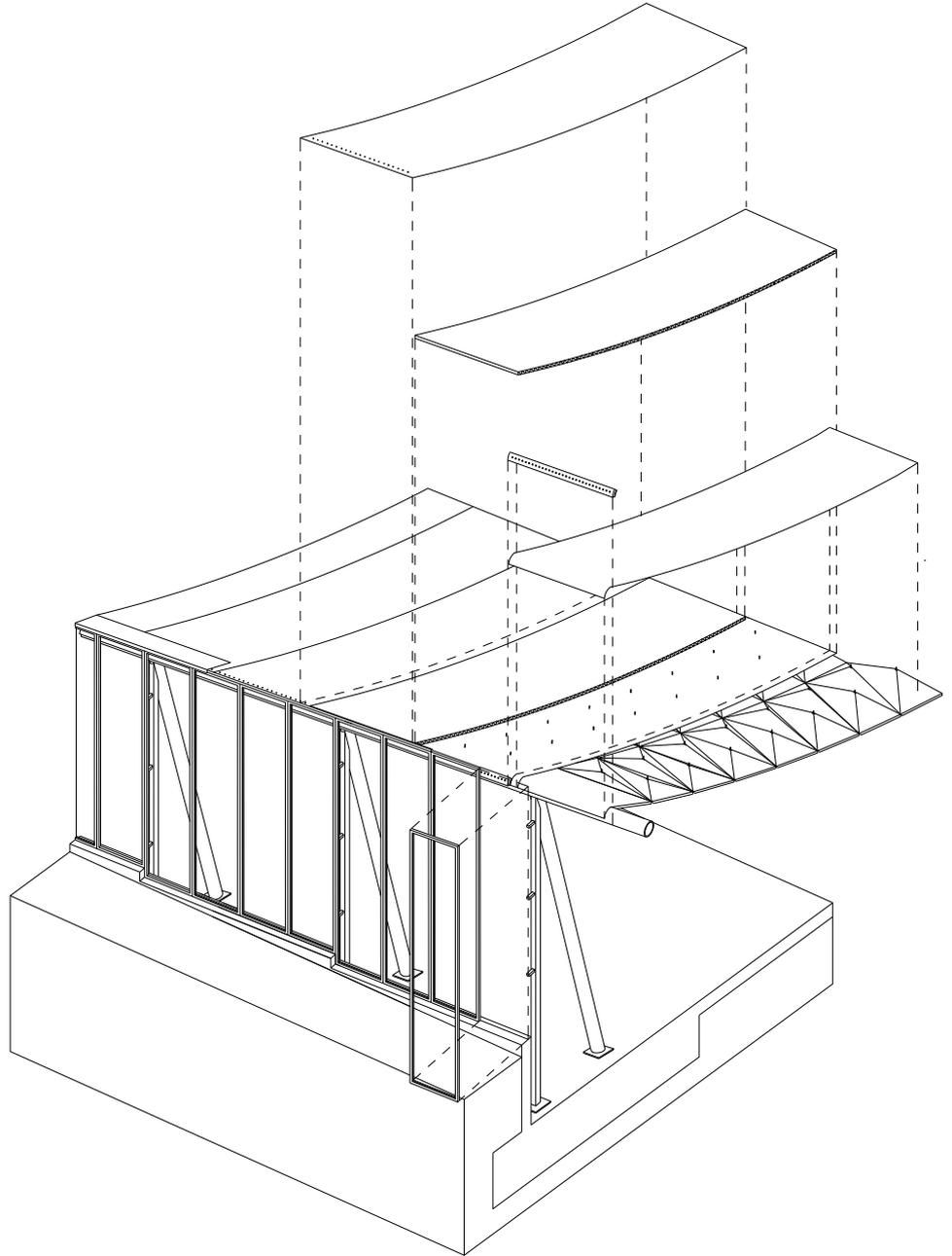


Imagen 73.
Axonometría detalle fachada.

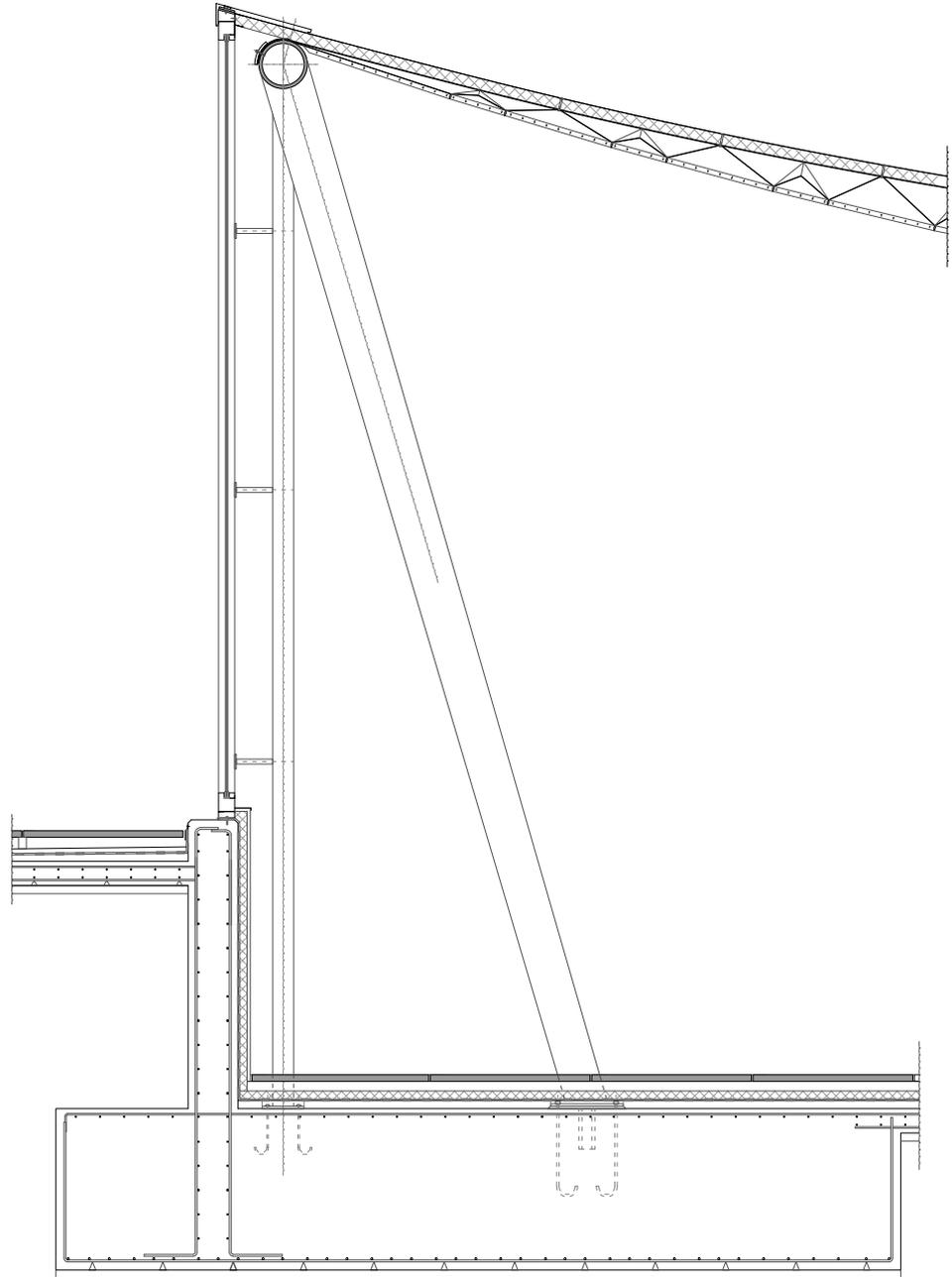


Imagen 74.
Sección detallada.

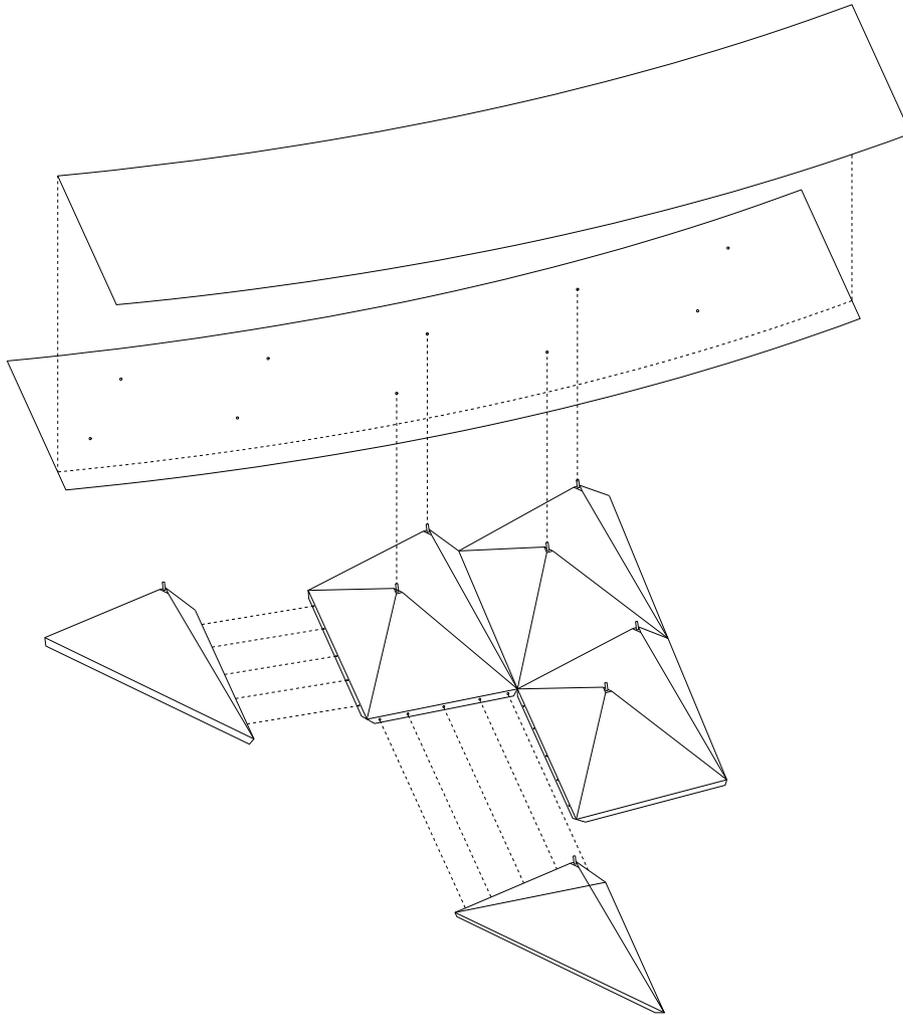


Imagen 75.
Axonometría detalle.

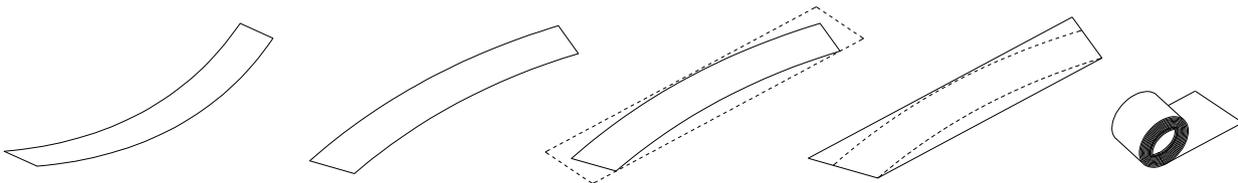


Imagen 76.
Proceso para poder trasladar las chapas metálicas.

CONCLUSIONES GENERALES

Una vez comprendidos y analizados los antecedentes y la actualidad referida a la chapa metálica, se ha llegado a la conclusión del gran potencial que posee como elemento constructivo. Permite soportar y revestir gracias a su flexibilidad y ligereza.

A lo largo de la historia se pueden observar ejemplos de su uso en los sistemas estructurales, como los hangares de Hugo Junkers, únicamente doblando la chapa para darle mayor consistencia. O como para revestir, como en el propio Museo Guggenheim de Bilbao, con las chapas de titanio. Estos ejemplos han servido de base para estudiar y ver el potencial de este material.

Gracias al desarrollo de los métodos de conformado y del software avanzado se pueden lograr sistemas de chapa con los que crear alternativas más eficientes a los elementos constructivos que se utilizan actualmente.

En la comparativa de los proyectos se ve como los nuevos métodos de conformado ofrecen una mayor libertad y flexibilidad para la piel de los edificios de forma libre, facilitando el montaje y suprimiendo barreras económicas.

Con el Espacio para Exposiciones se demuestra como la chapa puede ofrecer nuevas alternativas, como la cubierta de la propuesta, que evita una subestructura que aumente el peso, haciendo así posible su construcción. Y esto es solo uno de los diseños que surge del conocimiento de las nuevas técnicas de conformado y sus aplicaciones.

El potencial del material es evidente, barato, maleable, y eficiente. Y simplemente doblándolo, inflándolo, o deformándolo se puede convertir en un material estable, consistente y ligero para futuras aplicaciones en la construcción. Por supuesto, todo es cada vez más fácil gracias al desarrollo tecnológico, que está brindando infinidad de oportunidades a este material.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA GENERAL:

History of sheet metal forming: <http://www.metalworkingworldmagazine.com/a-short-sheet-metal-history/>

History of sheet metal forming: <http://www.kaempfandharris.com/blog/the-history-of-sheet-metal-fabrication>

I.K. Brunel: <http://www.royalalbertbridge.co.uk/the-bridge-design.html>

Thomas Telford: <https://whc.unesco.org/en/list/1303>

SCHULER GmbH, Metal Forming Handbook, 1998

H. Junkers https://issuu.com/magazin.ar.tum/docs/jahrbuch2015_web/146

H. Junkers <https://cargocollective.com/industriekultur>

H. Junkers <https://inspiration.detail.de/discussion-pure-invention-the-lamella-halls-of-the-aviation-pioneer-hugo-junkers-113111.html>

J. Prouvé, La Maison Standar de Jean Prouvé en Meudon. Edificio, fachadas y paneles verticales, Laura Armesto Pineda

El Museo Guggenheim, DESARROLLO DEL PROYECTO Y EJECUCIÓN DE LAS FACHADAS DEL MUSEO GUGGENHEIM BILBAO. BILBAO/ESPAÑA, José Emilio Galindez Maurenza, Ingeniero Industrial

cccccccc

El Museo Guggenheim: <https://www.guggenheim-bilbao.eus/>

Porsche Pavilion, Henn Architecture: Double Curvature for Volkswagen Achim Bleicher, Ron M. Behnke, Mike Schlaicha.

Porsche Pavilion, Henn Architecture: <http://www.henn.com/en/projects/culture/porsche-pavilion>

Multipoint stretch forming: Case Study of Mass Customization of Double-Curved Metal Façade Panels Using a New Hybrid Sheet Metal Processing Technique.

Método FiDU: <https://zieta.pl/>

Método Robofold: <http://www.robofold.com/>

Self-supporting free-form structures using folding principles: Ralf Herkrath, Thorsten Pofahl, Martin Trautz.

INFOGRAFÍA:

Imagen 1, Recogida de: http://www.metalworkingworldmagazine.com/files/2014/06/Fig_2-sheet-metal-history.jpg

Imagen 2, Recogida de: http://www.metalworkingworldmagazine.com/files/2014/06/Fig_4-sheet-metal-history-600x300.jpg

Imagen 3, Recogida de: http://www.metalworkingworldmagazine.com/files/2014/06/Fig_6-sheet-metal-history-600x300.jpg

Imagen 4, Recogida de: <http://www.cradleylinks.com/images/steamhammer.jpg>

Imagen 5, Recogida de: <http://www.middle-america.com/wp/wp-content/uploads/2012/09/Ashland-Mill-wide.jpg>

Imagen 6, Recogida de: <http://gerald-massey.org.uk/smiles/images/tel/196.jpg>

Imagen 7, Recogida de: <http://gerald-massey.org.uk/smiles/images/tel/pontagua2.jpg>

Imagen 8, Recogida de: <https://c8.alamy.com/compes/d92mm9/vista-del-acueducto-pontcysyllte-north-wales-reino-unido-circa-1900-d92mm9.jpg>

Imagen 9, Recogida de: The Works of Isambard Kingdom Brunel : an engineering appreciation, Pág. 177

Imagen 10, Recogida de: https://www.gracesguide.co.uk/Chepstow_Railway_Bridge

Imagen 11, Recogida de: <http://www.britaininfocus.org.uk/gallery/panoramas/water/00453-royal-albert-bridge-river-tamar/>

Imagen 12-20, Recogida de: SCHULER GmbH, Metal Forming Handbook, pág 8-22

Imagen 21, Recogida de: https://www.junkers.de/sites/default/files/styles/artikel_inline/public/hangar.jpg?itok=bbjQqvOZ

Imagen 22, Recogida de: https://payload305.cargocollective.com/1/12/414957/8409622/002_440.jpg

Imagen 23, Recogida de: https://issuu.com/magazin.ar.tum/docs/jahrbuch2015_web/146

Imagen 24, Recogida de: https://payload305.cargocollective.com/1/12/414957/8409686/004_440.jpg

Imagen 25, Recogida de: <https://www.flickr.com/photos/lascases/6287955857/>

Imagen 26, Planos recogidos de: J. Prouvé, La Maison Standar de Jean Prouvé en Meudon. Edificio, fachadas y paneles verticales, Laura Armesto Pineda

Imagen 27, Planos recogidos de: J. Prouvé, La Maison Standar de Jean Prouvé en Meudon. Edificio, fachadas y paneles verticales, Laura Armesto Pineda

Imagen 28, Recogida de: <https://www.guggenheim-bilbao.eus/>

Imagen 29, Recogida de: <https://www.guggenheim-bilbao.eus/>

Imagen 30: Plano y Sección propios

Imagen 31, Recogida de la revista EL CROQUIS, Frank Gehry 1987-2003

Imagen 32: Axonometría propia

Imagen 33, Recogida de: http://www.henn.com/sites/default/files/styles/detail_landscape/public/externals/c41d453e35634de11a505da249796b6b.jpg?itok=Tb27uROq

Imagen 34, Recogida de: http://www.henn.com/sites/default/files/styles/detail_landscape/public/externals/258c50a3b64337dc2a254c492a4c0520.jpg?itok=q_j9apqY

Imagen 35, Recogida de: http://www.henn.com/sites/default/files/styles/detail_landscape/public/research/monocoque-shells/images/cc.henn.studyimagesmonocoques-hells11.jpg?itok=xG-nIV0e

Imagen 36, Recogida de: http://www.henn.com/sites/default/files/styles/detail_landscape/public/research/monocoque-shells/images/cc.henn.studyimagesmonocoques-hells2.jpg?itok=xH1R-QuD

Imagen 37, Recogida de: http://www.henn.com/sites/default/files/styles/detail_landscape/public/externals/2d73024067fe851610e985bc777f8334.jpg?itok=t3UbsXmx

Imagen 38, Recogida de: Incremental Sheet Forming (ISF), Yogesh Kumar and Santosh Kumar pág, 3

Imagen 39, Recogida de: Incremental Sheet Forming (ISF), Yogesh Kumar and Santosh Kumar pág, 4

Imagen 40, Recogida de: https://payload331.cargocollective.com/1/13/418423/8932360/Forming-Image-7_670.jpg

Imagen 41, Recogida de: Incremental Sheet Forming (ISF), Yogesh Kumar and Santosh Kumar pág, 4

Imagen 42, Recogida de: Incremental Sheet Forming (ISF), Yogesh Kumar and Santosh Kumar pág, 5

Imagen 43, Recogida de: https://payload331.cargocollective.com/1/13/418423/8932360/Forming-Image-7_670.jpg

Imagen 44, Recogida de: https://www.sae.org/dlymagazineimages/web/516/3795_3364.jpg

Imagen 45, Axonometría propia

Imagen 46, Recogida de: https://www.researchgate.net/figure/Multipoint-stretch-forming-machine-photographs-courtesy-of-SteelLife_fig9_311485839

Imagen 47, Axonometría propia

Imagen 48, Recogida de: <http://www.robofold.com/assets/img/gallery/img-sftwr-02-01-s-w683-h392-q75-m1395932729.jpg>

Imagen 49, Recogida de: <https://zieta.pl/>

Imagen 50, Recogida de: <https://trako.arch.rwth-aachen.de/cms/TRAKO/Forschung/Leichtbau/~isbf/Faltstrukturen-aus-Feinblech/lidx/1/>

Imagen 51, Recogida de: <https://trako.arch.rwth-aachen.de/cms/TRAKO/Forschung/Leichtbau/~isbf/Faltstrukturen-aus-Feinblech/lidx/1/>

Imagen 52, Recogida de: https://images.adsttc.com/media/images/5331/11d3/c07a/80d6/4200/007e/large_jpg/ZHA_DPPSeoul_VSB_01.jpg?1395724747

Imagen 53, Plano y Sección propios

Imagen 54, Recogida de: https://images.adsttc.com/media/images/5331/12a2/c07a/80f4/c600/008b/large_jpg/ZHA_DPPSeoul_VSB_17.jpg?1395724953

Imagen 55, Recogida de: <http://www.constructionweekonline.com/pics-17259-pictures-zaha-hadid-at-dongdaemun-south-korea/13>

Imágenes 55-76, Planos, Secciones, Axonometrías y Pictogramas propios.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

Carles García Somolinos
Tutores: Miguel Ángel Campos González y
Jose Javier Martí Cunquero
Grado en Fundamentos de la Arquitectura