

**S**UPERFICIES **A**RQUITECTONICAS **S**INGULARES EN LA **C**IUDAD DE LAS **A**RTES Y LAS **C**IENCIAS  
**C**UBIERTA DE EL **U**MBRACLE



DIRECTORES DE PROYECTO CIENTIFICO TECNICO:

RAFAEL J. LIGORIT TOMAS  
FRANCISCO J. SANCHIS SAMPREDRO



# INDICE

## 1. INTRODUCCIÓN

TITULO	PAG.
1.1 HISTORIA Y SITUACIÓN	1.1
1.2 LA INUNDACIÓN DE VALENCIA	1.4
1.3 CONCEPTO	1.5
1.4 ESPACIOS	1.7
1.5 L'UMBRACLE (EL UMBRACULO)	1.10
1.6 SUPERFICIE SELECCIONADA	1.12
1.7 SANTIAGO CALATRAVA (EL AUTOR)	1.12

TITULO	PAG.
1.8 PLANOS GENERALES	
• PLANO GENERAL DE PLANTA	1.15
• PLANO GENERAL DE ALZADO NORTE	1.16
• PLANO GENERAL DE ALZO SUR	1.17
• PLANO GENERAL DE SECCIÓN A-A'	1.18
• PLANO GENERAL DE SECCIÓN B-B'	1.19
• PLANO GENERAL DE SECCIÓN C-C'	1.20

## 2. INSPIRACIÓN

TITULO	PAG.
2.1 FUNCIONALIDAD Y USO	2.1
2.2 EL UMBRACULO Y LA LUZ	2.2
2.3 HISTORIA DE LOS UMBRACULOS	2.5
2.4 INSPIRACIÓN DEL AUTOR	2.6
2.5 INFLUENCIA Y SEMEJANZAS CON LA OBRA DE GAUDÍ	2.9



# INDICE

## 3. ANALISIS GEOMETRICO

3.1 ESTUDIO GEOMETRICO CUBIERTA	3.1
3.2 PROYECCIÓN ORTOGONAL DE LAS VISTAS DE LA CUBIERTA	3.2
3.3 COMPROBACIÓN GEOMETRICA DE LAS PARABOLAS	3.3
3.4 DEMOSTRACIÓN GRÁFICA DE LA GENERACIÓN DE LA PARABOLA DE LOS ARCOS FIJOS	3.4
3.5 DEMOSTRACIÓN GRÁFICA DE LA GENERACIÓN DE LA PARABOLA DE LOS ARCOS FLOTANTES	3.5

3.6 FORMACIÓN DE LA SUPERFICIE REGLADA DE PLANO DIRECTOR	3.6
3.7 ESTUDIO GEOMETRICO MARQUESINA	3.8
3.8 FORMACIÓN DE LA CURVA DE LA MARQUESINA	3.9
3.9 SUPERFICIE REGLADA ALABEADA	3.10
3.10 PROYECCIÓN ORTOGONAL DE LAS VISTAS DE LA MARQUESINA	3.11

## 4. ANALISIS ESTRUCTURAL

4.1 HISTORIA DEL ARCO	4.1
4.2 LA FORMA CURVA	4.2
4.3 MÓDULO DE CUBIERTA ACOTADO	4.4
4.4 SISTEMA ESTRUCTURAL DE LOS ARCOS	4.5
4.5 HIPÓTESIS DE CALCULO ESTRUCTURA	4.6
4.6 APOYO FIJO DE LOS ARCOS	4.8



# INDICE

## 5. ANALISIS CONSTRUCTIVO

4.7 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	4.9	5.1 ANALISIS CONSTRUCTIVO DEL CONJUNTO	5.1	5.10 ESPECIFICACIÓN TÉCNICAS SEGÚN NBE EA-95	5.15
4.8 MARQUESINA ACOTADA	4.10	5.2 EL PASEO DE ARBOTANTES	5.2	5.11 UNIONES SOLDADAS	5.16
4.9 SISTEMA ESTRUCTURAL MARQUESINA	4.11	5.3 MIRADOR Y JADÍN	5.3	5.12 PIEZAS QUE COMPONEN LA CUBIERTA	5.17
4.10 SOPORTE ESTRUCTURAL MARQUESINA	4.12	5.4 ESQUEMA CUBIERTA AJARDINADA	5.4	5.13 TIPOS DE SOLDADURA EN LA CUBIERTA	5.19
4.11 UNIÓN ENTRE EL SOPORTE DE LA MARQUESINA Y EL APOYO	4.13	4.5 PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CUBIERTA	5.5	5.14 APOYOS DE HORMIGÓN BLANCO Y TRECADÍS	5.20
4.12 SISTEMA DE ANCLAJE DE LA ESTRUCTURA AL APOYO	4.14	5.6 SECUENCIA GRÁFICA DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CUBIERTA	5.10	5.15 PASEO DE LOS ÓCULOS. ESCALERAS DE ACCESO	5.21
4.13 APOYO BIARTICULADO DEL SOPORTE	4.15	5.7 PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA MARQUESINA	5.12		
4.14 HIPOTESIS DE CALCULO DE LA MARQUESINA	4.16	5.8 SISTEMA Y TÉCNICAS DE UNIÓN	5.13		
4.15 SIMPLIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA PARA EL CALCULO	4.17	5.9 UNION ATORNILLADA ENTRE ARCOS FIJOS Y BASE DE APOYO DE HORMIGÓN	5.14		



# INDICE

## 6. CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES A NIVEL PROFESIONAL	6.1
6.2 CONCLUSIONES A NIVEL PERSONAL	6.2

## 7. BIBLIOGRAFIA

7.1 LIBROS CONSULTADOS	7.1
7.2 OTROS DOCUMENTOS CONSULTADOS	7.2
7.3 WEB CONSULTADAS	7.3
7.4 REFERENCIAS DE FOTOGRAFÍAS Y MATERIAL GRÁFICO	7.4





## CIUDAD DE LAS ARTES Y LAS CIENCIAS

### HISTORIA Y SITUACIÓN

En los finales de la década de los 80, Joan Lerma, el por entonces presidente de la Generalitat Valenciana, adoptó la idea de construir un polo científico y cultural que sirviese a toda la comunidad. La idea era nada menos que de un catedrático de historia de la ciencia de la Universidad de Valencia, José María López Piñero.

Esta idea pretendía brindarle a la ciudad un centro en el que se pudiese reunir el conocimiento con el entretenimiento. Un lugar para aprender, recorrer, y disfrutar. Un espacio que se brindara a los habitantes de Valencia, pero también pudiese ser visitado por gente de todo el mundo.

Está ubicada en una superficie de más de 300.000 m<sup>2</sup> en el tramo final del antiguo cauce del río Turia, junto a la salida de la autopista del Saler.



Ubicación de la Ciudad de las Artes y las Ciencias previa construcción. (1.1)

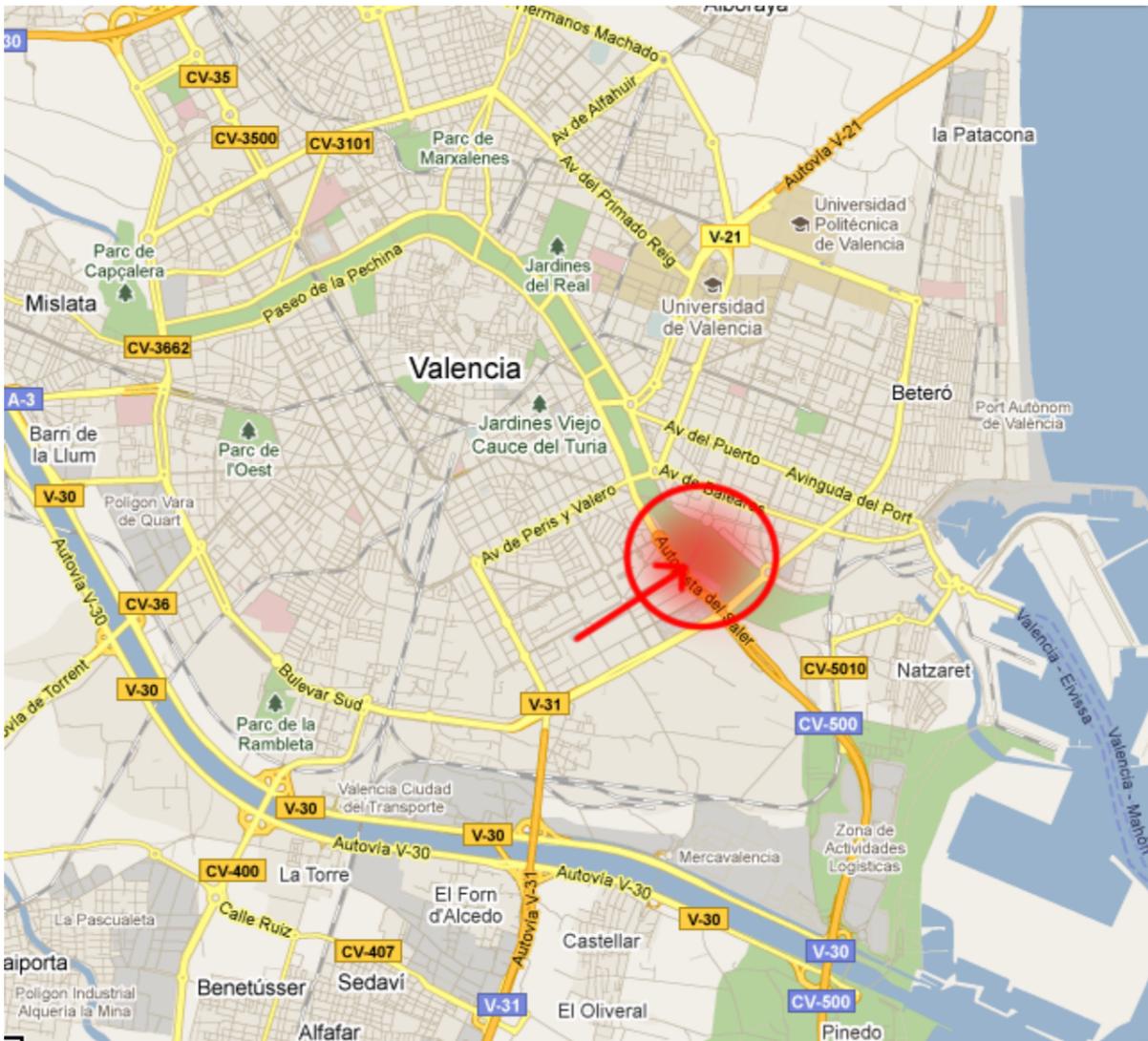


Vista aérea de la Ciudad de la Artes y las Ciencias (1.2)

## SUPERFICIES ARQUITECTONICAS SINGULARES

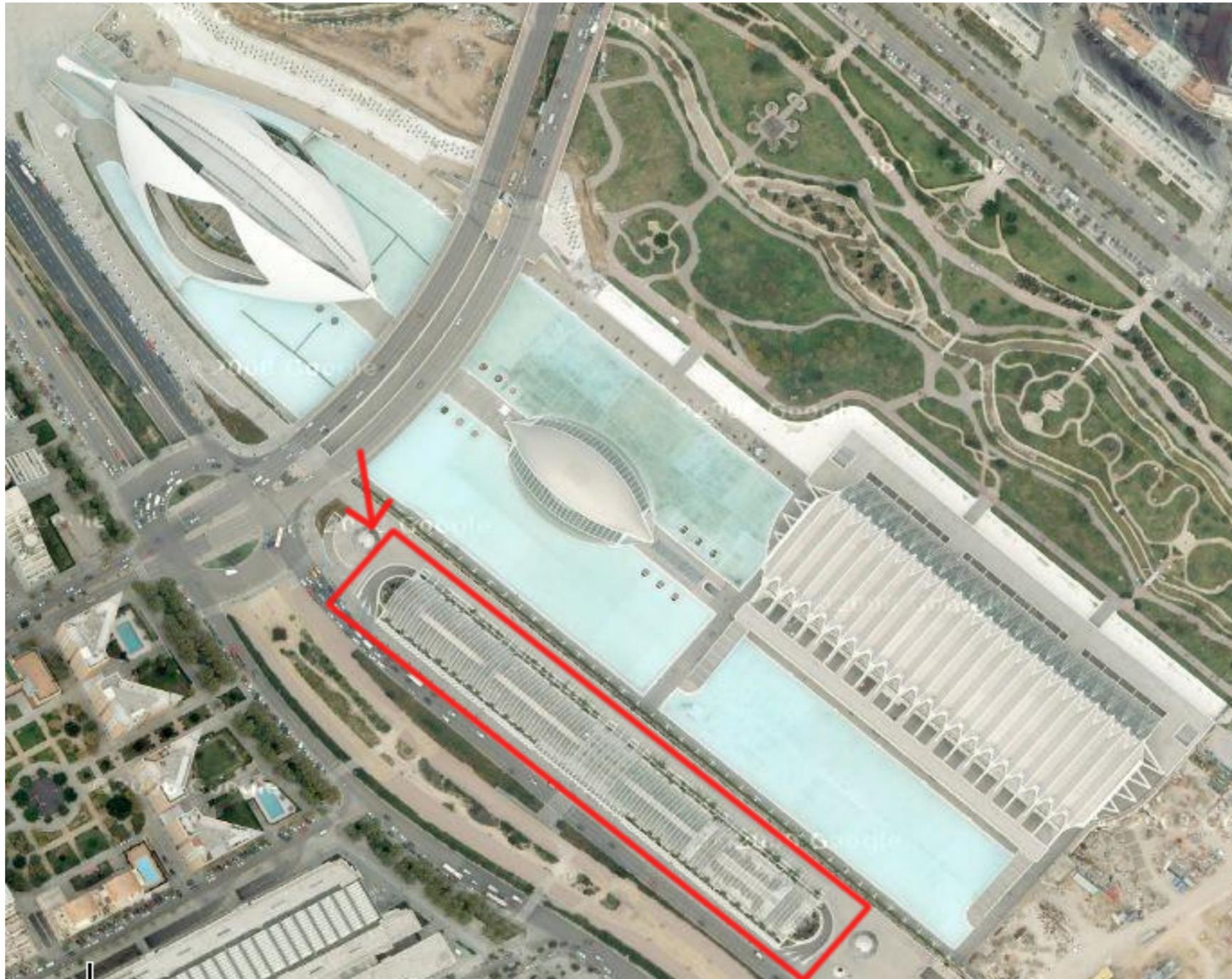
El proyecto se enmarca dentro de una ciudad con mucha historia en España. Llamada a ser no sólo un aporte científico y cultural, sino también un nuevo eje urbano que articule la ciudad, el proyecto se extiende en una gran franja degradada de Valencia.

Debido a la importancia de este eje que termina sobre la costa valenciana, y potenciado por el nuevo proyecto de Calatrava, se proyectó también un remate del mismo. Este nuevo aporte ya ha sido aprobado y asignado a dos importantes estudios de arquitectura que trabajarán conjuntamente: Ateliérs Jean Nouvel (con la colaboración del valenciano José María Tomás), y GMP. El planteo es generar el nexo entre la ciudad y el mar, desde el último tramo de la Ciudad de las Artes y Ciencias, hasta el mismo puerto, recuperando las playas y generando espacios verdes con algunas torres.



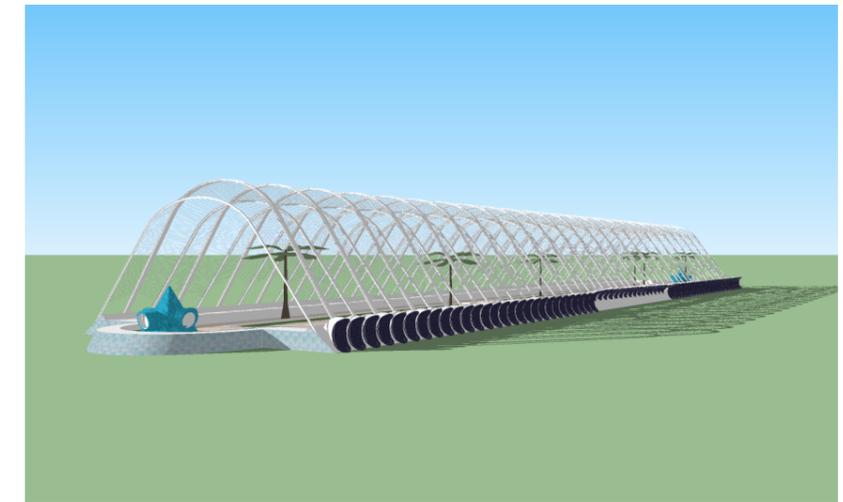
Captura de la ubicación de las Ciudad en google maps. (1.3)

Captura de la ubicación de las Ciudad en google maps. (1.4)



Captura de la ubicación de l'Umbracle en google maps. (1.5)

Recreación 3D del Umbracle mediante SkechUp



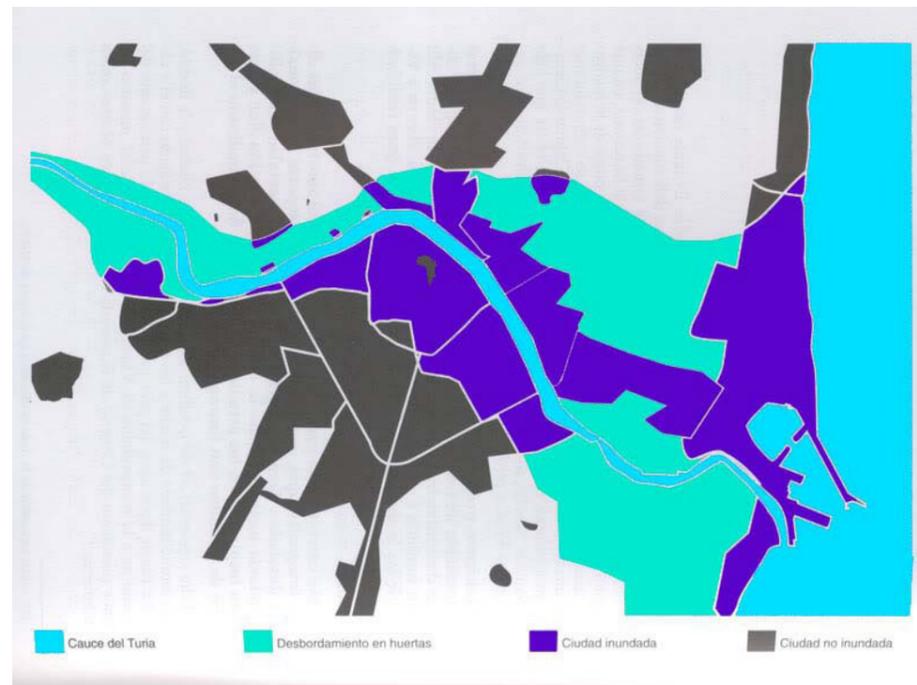


## LA INUNDACIÓN DE VALENCIA

La ciudad de Valencia sufre la más terrible inundación de su historia el 14 de octubre de 1957. A las dos de la madrugada el río Turia se desbordó, inundando la capital con una de las mayores riadas, que afectó a dos tercios de la población. En algunos puntos del casco histórico las aguas desbordadas del río alcanzaron 3 metros de altura y cubrieron de barro gran parte del área urbana.



Fotografía de archivo de la inundación de Valencia (1.6)



Mapa de la valoración de daños a causa de la inundación (1.7)

Como medida de prevención se planificó el denominado Plan Sur, consistente esencialmente en la desviación del Turia 5 kilómetros al oeste del centro de la ciudad, mediante la apertura de un cauce artificial con capacidad de 5.000 metros cúbicos por segundo, también se aprovechó para construir una ronda para tráfico rodado de gran capacidad, ya que se diseñaron dos autopistas paralelas en los márgenes del nuevo cauce.

Durante los años 80 se crearon las bases para la ocupación y transformación del viejo cauce del río Turia en un espacio verde constituido por más de 2.000.000 m<sup>2</sup> a lo largo de 10 kilómetros por pleno centro de la ciudad. En un principio se trataba sólo de una Ciudad de las Ciencias, e incorporaba una torre de Telecomunicaciones, , frente al proyecto actual con un Museo y un Cine Planetario.



Maqueta de la Torre de Telecomunicaciones de Calatrava (1.8)

El conjunto se completaba con un aparcamiento y zona ajardinada que servía de nexo entre las distintas instalaciones. El proyecto inicial fue encargado al arquitecto valenciano Santiago Calatrava Valls en 1991. Según los diseñadores del proyecto se trataba de ejecutar un parque temático basado en las nuevas tecnologías. Como referente de Francia y más en concreto era el Parque de Futuroscop en Poitiers. También se había diseñado una Torre de comunicaciones de tal magnitud y grandeza que pudiera convertirse en un nuevo icono arquitectónico, que representase la ciudad a nivel mundial.



El 1995 se paralizaron las obras. La torre de comunicaciones, símbolo ya asociado a la gestión de los gestores anteriores, debiendo el arquitecto retirarla del proyecto, añadiendo en su lugar el palacio de las artes que reconvertía a la Ciudad de la Ciencia en “de las Artes y la Ciencia” Completando los edificios con un parque oceanográfico universal diseñado por el arquitecto Félix Candela.

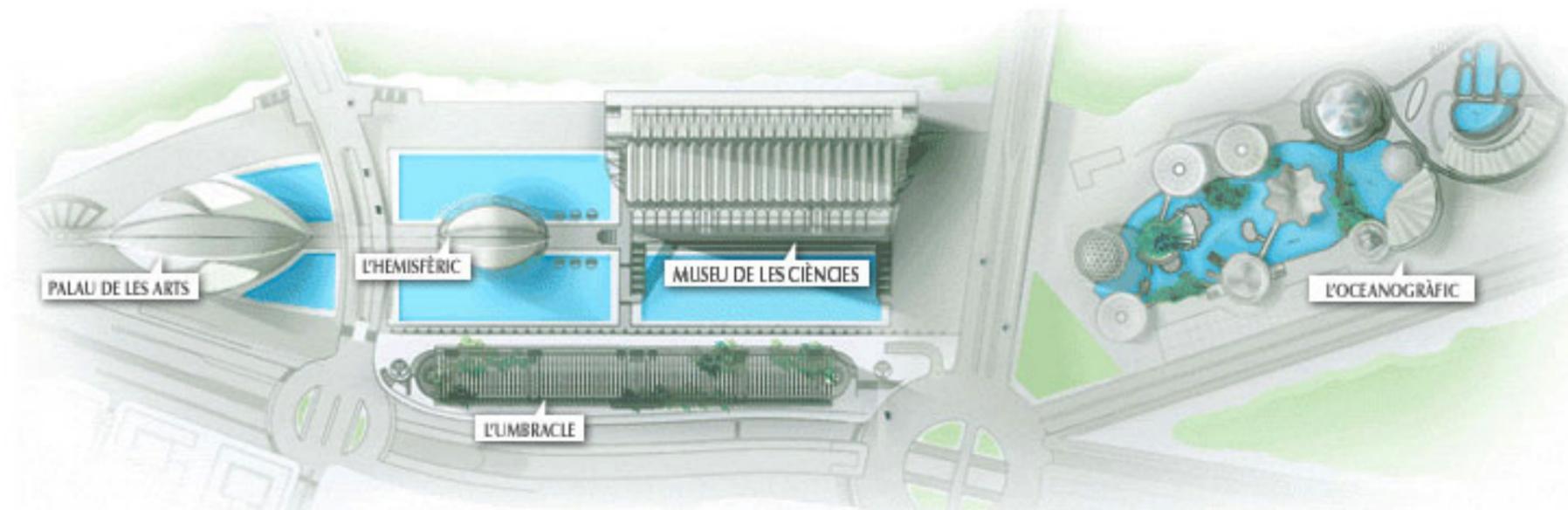
La topografía en la que se implanta el proyecto es llana y está sobre el margen derecho del tramo final del antiguo río Turia. La idea es poder recuperar el area urbana entre este antiguo río y la autopista del Saler.

## CONCEPTO

La idea preponderante del proyecto era recuperar una zona postergada de Valencia, así como brindarle carácter al parque lineal que se extiende a través de la ciudad. El proyecto sería un eslabón dentro de una cadena que tenía como objetivo dar un salto hacia el tercer milenio.

La serie de seis edificios proyectados para ésta ciudad cultural se adhieren a la linealidad del eje. Acompañan el sentido del mismo y brindan grandes espacios abiertos y públicos. Además, suman elementos característicos valencianos.

A lo largo de casi dos kilómetros, y con una superficie de 350.000 metros cuadrados, el proyecto lleva el sello inigualable de Calatrava. Muchas veces nombrada como “una ciudad dentro de una ciudad”, la creación del arquitecto valenciano causa asombro y sorpresa.



Mapa del conjunto de la Ciudad de las Artes y las Ciencias previo a la construcción del Agora (1.9)



Respetando la tradición mediterránea del mar y la luz, el color azul y el blanco se funden junto con la arquitectura pseudo-futurista del autor. La antigüedad y tradición de la ciudad dan lugar a éstas monumentales esculturas modernistas.

Cada uno de los edificios proyectados tiene su propio concepto y responde a diferentes funciones. Sin embargo, todos están trabajados con los mismos materiales o los mismos colores, por lo cual se puede entender el proyecto como un "todo". Además, grandes espejos de agua unifican todas las partes y le dan un sentido común a la obra.

El complejo de La Ciudad de las Artes y las Ciencias se ha convertido en lugar de referencia internacional y símbolo de la apuesta por el turismo cultural y el dinamismo con el que la Comunidad Valenciana se presenta ante el mundo.



Recreación 3D del conjunto de la Ciudad (1.10)



## ESPACIOS

### Palau de Les Arts Reina Sofia

Es el edificio principal del conjunto. Se ubica sobre el margen occidental del eje y constituye un hito urbano majestuoso. Este componente representa la apuesta por el arte, difundiendo la música, danza, y teatro. Sus formas sugerentes remiten a la actividad náutica y son casi como una metáfora de un barco que hubiese encallado en el cauce del antiguo río Turia.

El edificio cuenta con 37.000 metros cuadrados de superficie, y más de 70 metros de altura. En su interior se ubican cuatro grandes salas: la Sala Principal, el Aula Magistral, un Anfiteatro, y Teatro de Cámara. Y a ello se le suma una Sala de Exposiciones.



Vista del Palacio de las Artes Reina Sofia (1.11)

### L'umbracle

Se trata de de una estructura alargada que conforma un espacio al aire libre. Mediante arcos fijos y flotantes se genera una zona desde donde puede apreciarse toda la Ciudad de las Artes. Su interior alberga toda clase de vegetación propia de la zona valenciana (jara, lentisca, romero, lavanda, madreSelva, buganvilla, palmeras) así como también un paseo de esculturas contemporáneas.



Vista de L'Umbracle (1.12)



### L'Hemisféric

Esta creación de Calatrava se ha convertido quizás en una de las más representativas de la Ciudad de las Artes y Ciencias. Su aspecto peculiar y claramente semejante a un globo ocular la han puesto en el centro de la escena. Situado frente al L'Umbracle, se encuentra flanqueado por dos estanques rectangulares al norte y sur.

L'Hemisféric alberga un espacio tecnológico y educativo, con salas IMAX, medios audiovisuales, la última tecnología, y un planetario. En él pueden dictarse clases, hacer presentaciones, o inclusive espectáculos de entretenimiento.



Vista del Hemisferio (1.13)

### Museu de les Ciéncies Príncipe Felipe

Cuenta con 40.000 metros cuadrados distribuidos en tres pisos. Su imagen exterior aparenta ser el esqueleto de algún animal prehistórico o quizás una enorme ballena. La particularidad de ser un museo interactivo de ciencia hace que sea un lugar especial para los jóvenes y menores. Al contrario de cualquier otro museo convencional, en él desaparecen las señalizaciones de "prohibido tocar" y cada muestra invita a acercarse y participar de ellas; aprender en cada una de las intervenciones. Su aspecto lúdico y descontracturado llama la atención tanto como esos enormes "huesos" que lo acúan.



Vista del Museo de la Ciencias Príncipe Felipe (1.14)



### L'Oceanográfico

Con un volumen de 110.000m<sup>2</sup> se convirtió en el mayor oceanográfico europeo y el tercero a nivel mundial. Sus 45.000 especies de todas partes del mundo hacen de la visita un conocimiento exhaustivo de las profundidades marinas. Su cubierta en forma de nenúfar es obra del arquitecto Félix Candela.



Vista del Oceanográfico (1.15)

### El Agora

Es el edificio con el que se dará por concluido el complejo de la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia.

De planta diáfana de aproximadamente 5000 m<sup>2</sup>, tendrá una altura máxima de 85m, una longitud de unos 104m y una anchura de 60m. La estructura fija forma una cubierta metálica abovedada formada por 49 pórticos arriostrados longitudinalmente mediante parejas de arcos laterales y centrales.

En su parte superior, se sitúa una gran estructura móvil que permitirá el control de la luz natural en el recinto gracias a su cubierta de vidrio.



Recreación del Agora finalizado (1.16)



### L'UMBRACLE (EL UMBRACULO)

En cuanto a la tipología y sistemas constructivos, los umbráculos pueden componerse de estructuras modulares curvas o planas y de materiales diversos como el acero, madera, ladrillo, hormigón. La cubierta puede ser de malla, redes, láminas de madera, paja...cualquier material capaz de dejar pasar el aire y no los rayos del sol.

En este caso se trata de un paseo ajardinado de 17500 metros cuadrados que transcurre paralelo y a distinta altura de los anteriores edificios. La calle mide 320 metros de largo por 32 de ancho y alberga plantas autóctonas mediterráneas y tropicales, que, como es evidente, cambian su aspecto con cada época del año. También sirve de museo escultura al aire libre. Su estructura inferior y sótano alberga el aparcamiento del complejo.

El paseo se cubre con una estructura metálica de arcos con una forma elíptica muy típica de Calatrava. Desde su mirador norte se puede ver todo el complejo de las Ciudad de las Artes y las Ciencias.

Recibe el apodo de "jardín construido", ya que a la hora de elegir cada una de las especies de plantas, además de la adaptación climatológica, se tuvieron en cuenta las formas y colores para su distribución, creando un espacio armónico en su conjunto.

El umbráculo esta situado en la zona sur del complejo de la Ciudad de las Artes y las Ciencias, junto a la Avenida Autopista del Saler, y se describe como el pórtico de entrada a la Ciudad.

Podemos decir que se trata de una construcción multifuncional, ya que desempeña el papel de cubierta para el aparcamiento, el de mirador, paseo, zona de esparcimiento y alberga un jardín. Y desde hace seis veranos la terraza se transforma aprovechando el buen clima de la ciudad en terraza discoteca.



Interior de la terraza del Umbracle (1.17)

Se han plantado 50 especies florales autóctonas de la Comunidad Valenciana y, además de la adaptación climatológica de cada una, se ha tenido en cuenta la armonía del color y las formas, especialmente en su distribución.

Bajo su cubierta ajardinada se encuentra el aparcamiento de coches y autobuses. Este espacio se localiza en la zona sur del complejo y puede llegar albergar en su interior 736 turismos, entre sus dos plantas, 22 autobuses y de 6 a 8 microbuses.

Además de las escaleras para acceder al jardín elevado desde la acera de la autovía también se ha previsto unas rampas peatonales en los extremos del paseo, que permiten salvar la diferencia de rasante con la vía pública.

El acceso de vehículos se produce por sendas rampas de entrada y salida a la autovía, dispuestas en la fachada sur. Los autobuses disponen de acceso independiente mediante rampas ubicadas en los extremos del edificio.



Si analizamos la funcionalidad del mismo, y la ubicación, podemos llegar a la conclusión de que es la adaptación de una cubierta, en este caso de un aparcamiento, a su entorno, es decir, a la estética del complejo donde esta ubicado.

Esta situado en un punto clave del paso hacia el núcleo del conjunto de la Ciudad de las Artes y las Ciencias, por lo que el gran espacio abierto que forman sus arcos, junto con la decoración ajardinada y la zona de esparcimiento, crean un ámbito armónico y de tranquilidad que invitan al paseo y a disfrutar visualmente del conjunto arquitectónico.

Al mismo tiempo sirve de galería de arte al aire libre, ya que en sus jardines alberga figuras de arte contemporáneo.

Calatrava lo concibió desde un principio en hormigón blanco, como el resto del conjunto, con una fuerte carga de piezas metálicas. Su estructura se asemeja a una celosía, con sucesión de 55 arcos fijos y 54 flotantes, metálicos. Es una actualización de la tipología novecentista de "Winter Garden".



Winter Garden Sheffield (Yorkshire, Inglaterra) (1.18)

También podemos destacar la clara influencia de Gaudí presente en muchas de las obras de Santiago Calatrava, como por ejemplo el empleo de el "trencadis", la predilección por las formas curvas y dinámicas y el empleo de una arquitectura orgánica, promueve que haya armonía entre el habitad humano y el natural mediante el diseño que se exprese a través de el manejo del entorno, de la arquitectura y el mobiliario con la meta de crear un todo que sea uno con la naturaleza.

No obstante estos temas serán tratados con mayor profundidad en el apartado dos de la inspiración.



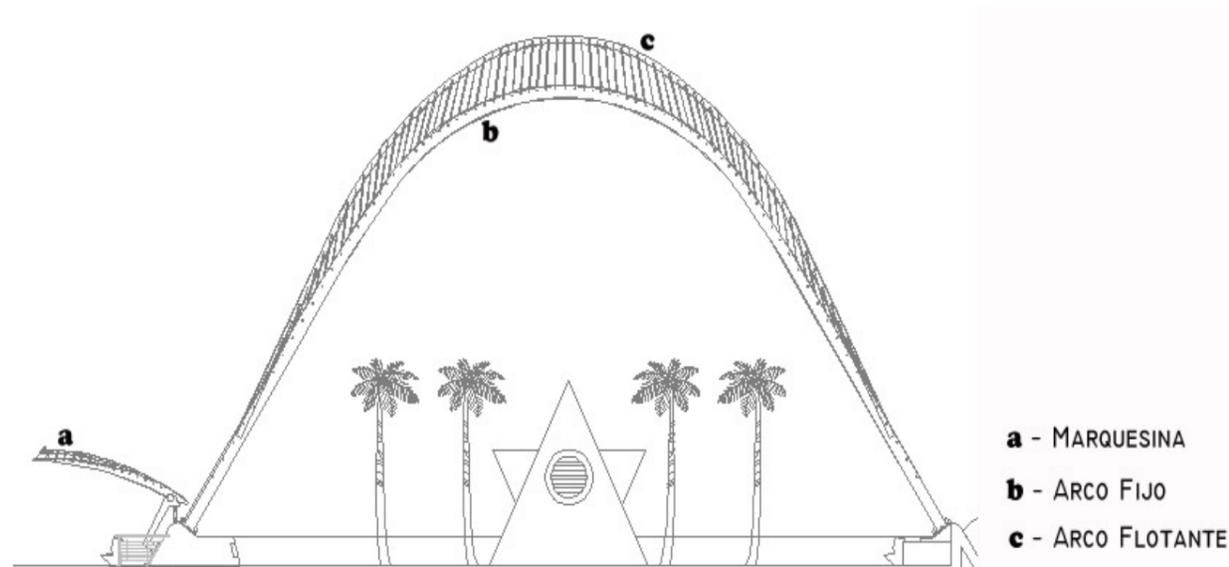
Paseo de los óculos del Umbracle (1.19)



### SUPERFICIE SELECCIONADA DENTRO DEL EDIFICIO

La altura máxima, desde el pie de los arcos fijos, hasta la clave de los flotantes, es de 18 metros.

Completa el conjunto una marquesina situada sobre el mirador.



La cubierta consiste en una sucesión de arcos fijos y arcos flotantes metálicos formados a base de chapas soldadas de acero laminado, creando una serie de perfiles en I unidos entre sí dando esa forma curvada.

Los arcos flotantes se unen a los fijos mediante perfiles redondos huecos soldados en ángulo, elevando la altura de los flotantes sobre los fijos.

### SANTIAGO CALATRAVA (EL AUTOR)

Santiago Calatrava Valls está considerado como uno de los arquitectos de mayor renombre de las últimas décadas. Arquitecto, ingeniero y escultor nació en la localidad valenciana de Benimamet, a unos cinco kilómetros de la ciudad, el 28 de julio de 1951. Comienza sus estudios de enseñanza primaria en 1956 finalizándolos en 1961, compaginándolos con la asistencia a clases nocturnas en las Escuela de Bellas Artes y Oficios de Burjasot, que finalizara en 1968.

Un año después, inicia los estudios universitarios, en la Escuela de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Valencia, terminándolos en 1973, presentando un trabajo de fin de carrera sobre estudios urbanísticos. Poco tiempo después, se traslada a Zúrich, donde complementa sus estudios, estudiando Ingeniería Civil en la ETH, y doctorándose entre 1979-1981, en Ciencias Técnicas por el Departamento de Arquitectura de la ETH con la Tesis "Acerca de la Plegabilidad de las Estructuras", y realizando su actividad como docente en el Instituto de Estática de la Construcción de la ETH, en el Departamento 1, y como profesor auxiliar en el Instituto de Estética Plana y Construcciones Ligeras de la ETH, Departamento 3.

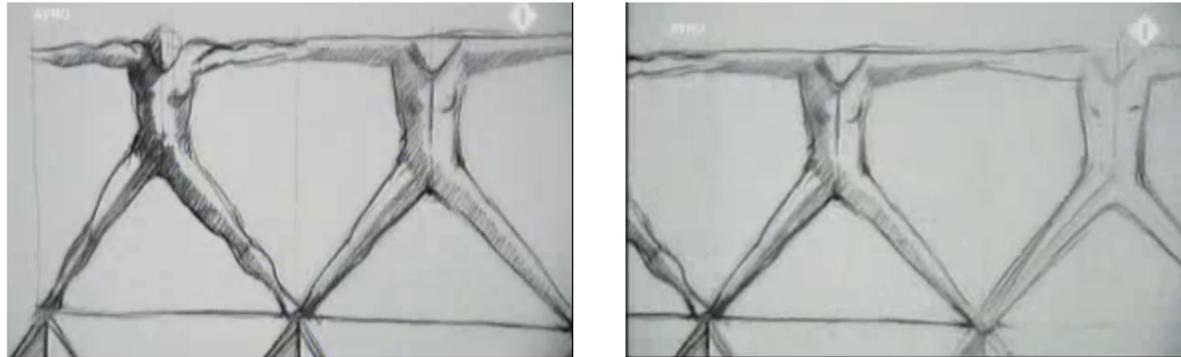
Santiago Calatrava concibe cada proyecto como una obra viva donde todas las partes que la componen están relacionadas. Da gran importancia a al efecto dinámico, al hormigón y al acero como materiales de construcción. Se inspira en la naturaleza y en los esqueletos humanos.



Foto de Santiago Calatrava (1.20)



Foto de Santiago Calatrava con Félix Candela (1.21)



Fotogramas capturados de un video de bocetos de Calatrava (1.22)

Arquitectura e ingeniería se funden en sus obras hasta tal punto que resulta imposible dividirlos.

*Pero el valenciano Santiago Calatrava no es "sólo" ingeniero y arquitecto. Es un creador polifacético. Un artista integral que trabaja la cerámica, la escultura y el dibujo con la misma calidad y originalidad que sus obras internacionales a gran escala.*

Además el mismo Calatrava afirma que *"puede darse una suma de lenguajes artísticos: sin ir más lejos, la arquitectura y la ingeniería, por el tamaño, por la escala, son tan generales y tan amplias que se nutren de todas las artes, son la suma de todas ellas. Así mismo, el hecho de trabajar como escultor me sirve enormemente a la hora de decidir la forma de un edificio"*.

La obra de este arquitecto valenciano, es fundamental porque sintetiza el pensamiento del escultor, del arquitecto y del ingeniero, lo cual viene de una completa formación.

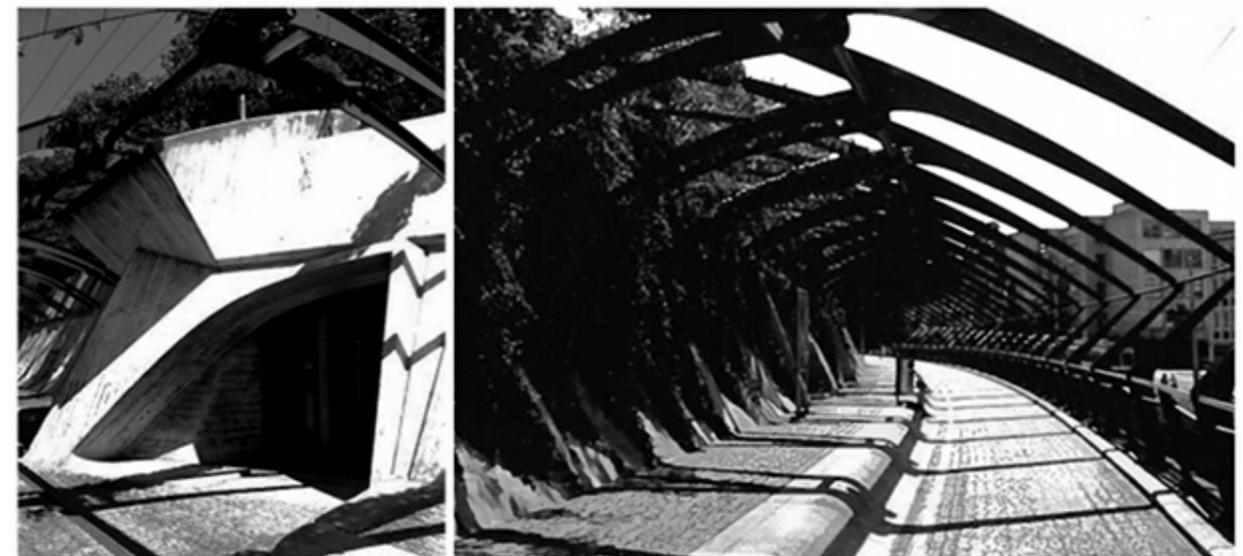
Su arquitectura se fundamenta en la ingeniería del siglo XIX y en la experimentación con formas y estructuras del siglo XX, abriendo un camino nuevo en la arquitectura contemporánea.

Su cualidad, de ser a la vez artista, arquitecto e ingeniero le lleva a defender que sea posible construir una obra de arte global. Por ello, en su arquitectura se encuentran diversas connotaciones. Combina la idea de obra de arte total con un cientifismo naturalista que se convierte en forma, remitiendo así a aspectos del positivismo del siglo XVIII, que se inspiraba en la anatomía, la cristalografía y la botánica. Muchas de las analogías anatómicas que se encuentran en la obra de Calatrava, estaban ya en los apuntes de Viollet Le Duc. Calatrava muestra una gran admiración por las formas de la naturaleza y por los esqueletos de los animales, a lo que se suma la expresión del rigor matemático en cada obra. Ha desarrollado, por tanto, a la vez la arquitectura de alta tecnología y la organicista,

continuando la tradición estructuralista. Ha tomado de Gaudí el ansia por la belleza de la naturaleza y la energía de las fuerzas espontáneas, y también los momentos más expresionistas de arquitectos como Alvar Aalto o Schaarum. Así, aunque nunca hace copias literales, su obra remite siempre a sus antecedentes y a la tradición.

En sus obras se dan dos cuestiones básicas: buscar la belleza en estructuras en equilibrio, como los puentes, y sugerir los aspectos misteriosos, fantásticos, e imaginativos que no se encuentran en el cálculo. Sus primeras obras, de principios de los años ochenta, eran generalmente de dimensiones reducidas, no llegaban a la monumentalidad que se da en sus obras de madurez. Se dedicó a toda clase de tipologías.

Destacan en esta etapa los almacenes Ernsting de Westfalia (1983-85), donde encontramos cierto clasicismo debido a la colaboración de discípulos de Aldo Rossi, lo cual le confiere universalidad, pero simultáneamente se da su característico organicismo. Sólo tenía que diseñar las fachadas del edificio, que resolvió con todos los avances técnicos: un zócalo de hormigón, un cuerpo de chapa ondulada de aluminio, que alude a las estrías, claroscuro de las columnas o pilastras de una fachada clásica, y finalmente una cornisa también de aluminio. Pero lo que más destaca es el sistema de las puertas abatibles, que parecen parpados que se abren, aplicando así lo cinético a la arquitectura. La estación de ferrocarril Stadelhofen en Zurich (1983-90), sigue un trazado curvado, y es donde más se muestra la influencia de Gaudí, pues las columnas se inclinan para acercarse a las líneas de carga para recordar las arquitecturas subterráneas.



Estación de Stadelhofen (Zürich.) (1.23)



Este proyecto muestra además que uno de sus recursos básicos será el diseño en sección, y por ello la estación posee la forma de una columna vertebral infinita. La ligereza de estructuras y el uso de formas aerodinámicas que surgen de la imaginaria tecnológica y de la aerodinámica de los años 50, ya se ve en una obra de 1884 como el puente de las calles Felipe II y Bacde Roda de Barcelona, donde de nuevo combina acero y hormigón armado., pasando de una estructura de un material a otra de otro. Además la asimetría de los arcos le da un gran dinamismo. En sus obras de madurez, sigue experimentando y predominan varias topologías: los puentes, los pórticos y las naves y galerías. Destaca la Galería comercial BCE de Toronto (1987-92), que se cierra mediante una cubierta de acero y cristal que distingue dos zonal, la galería y una plaza, ambas con una estructura arbolada que recuerda las sombras de palmeras en un invernadero en su afán organicista.

Lo que mas llama la atención en que completa una catedral, la de St John. The Divine en Nueva York en 1991. La interpreta a la manera de Gaudí, con una sección gótica, y demuestra que siempre se ha inclinado mas por el anticlasicismo. En ella se ven de nuevo analogías biológicas, la cripta a manera de raíces, la nave como tierra y el refugio como hojas. Igual que Le Duc, piensa que mucho del pensamiento constructivo radica en el gótico.

Su proyecto para el aeropuerto de Bilbao (1991) es una metáfora del movimiento de un pájaro con las alas desplegadas.



Dibujo de Santiago Calatrava (1.24)

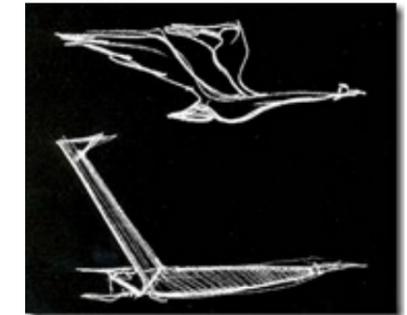
También ha desarrollado una topología curiosa, los pabellones con cubierta móvil, como el pabellón de Kuwait que realizo en 1992 para la Expo de Sevilla. Proyectó la Torre Collserola en 1988 (realizada finalmente por Norman Foster) y la torre de telecomunicaciones de Monjuic (1989-92), esta última con un fuste inclinado tiene similitudes antropomórficas y recuerda un reloj de sol gigante.

En cuanto a los puentes, antes de realizar los primeros, ensayo las estructuras con esculturas, siendo puentes como esculturas, o esculturas que a mayor escala se convierten en puentes. Ha proyectado muchísimos pero destacan tres: el puente sobre el río Tamesis en Londres (1990), con un arco parabólico que llegaría hasta la base y una sola viga con forma de tubo en acero.

El Lusitania (1988-91) en el que la repetición de los elementos sustentantes contrasta con el gigantesco arco y el puente del Alamillo para la Expo de Sevilla, con un mástil asimétrico gigante e inclinado y un haz de cables. Debía haber uno igual al otro extremo del río, pero solo se realizo uno y la vía que los uniría. Tiene una calzada central para los viandantes y dos laterales para los coches.



Fotografía del puente del Alamillo (Sevilla) (1.25)

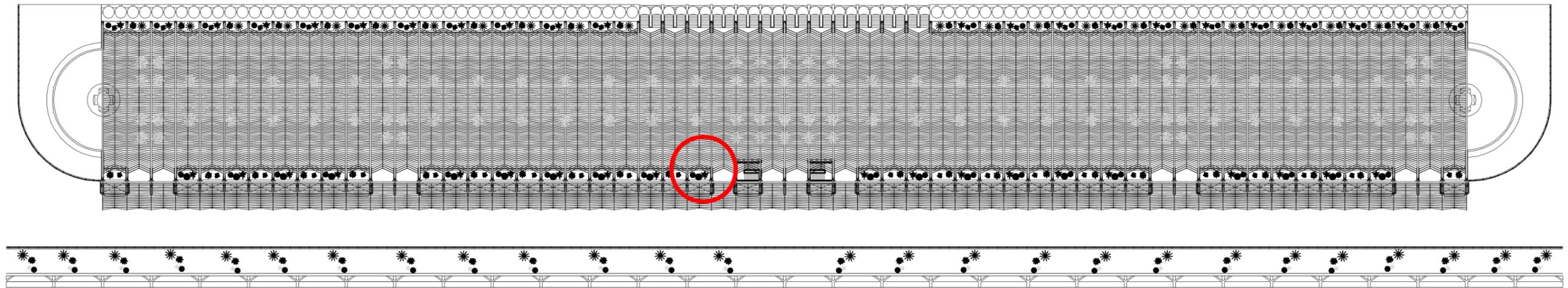


Boceto inspiración de Santiago Calatrava (1.26)

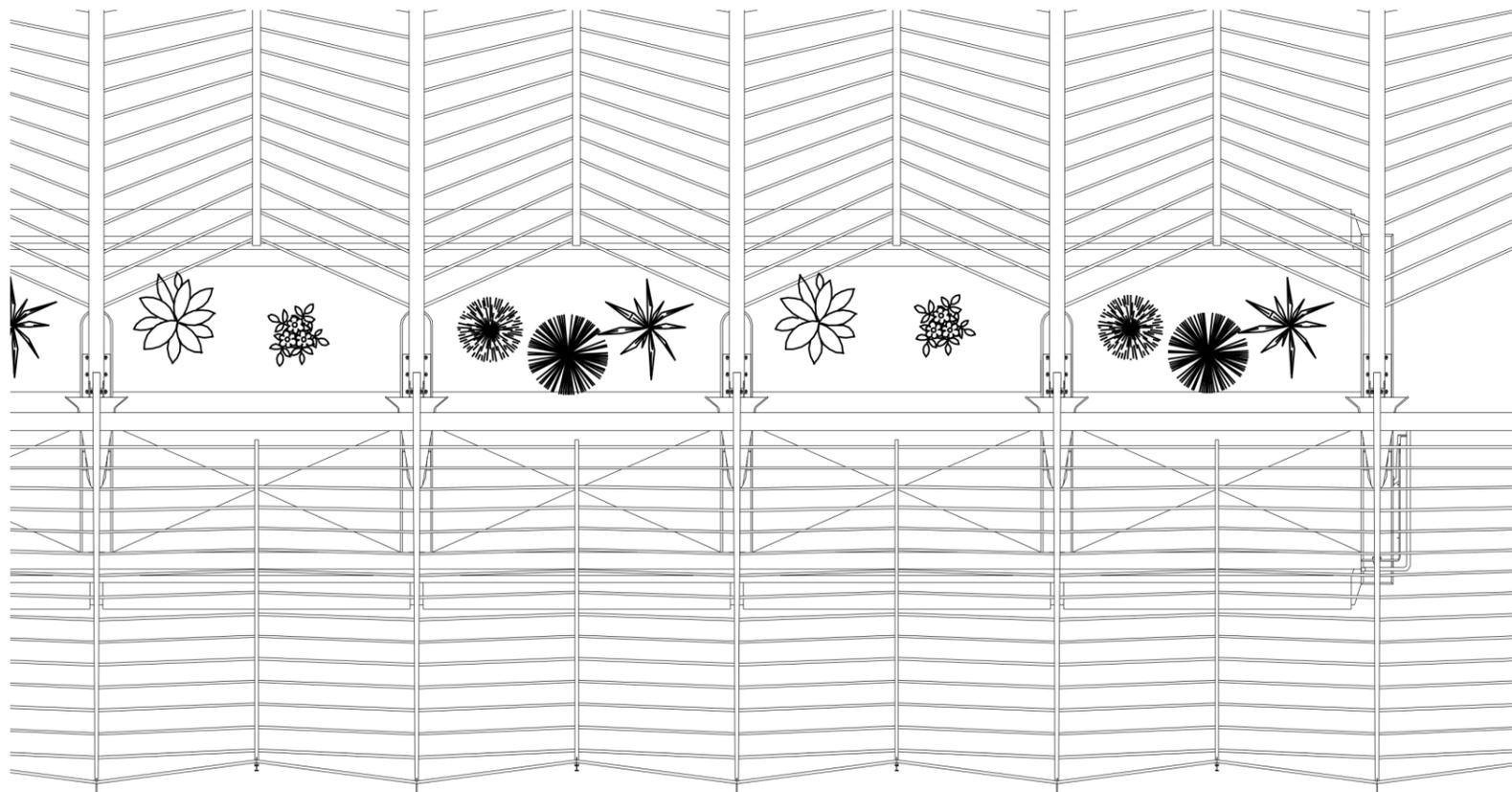


# **P**LANOS **G**ENERALES

SUPERFICIES ARQUITECTONICAS SINGULARES

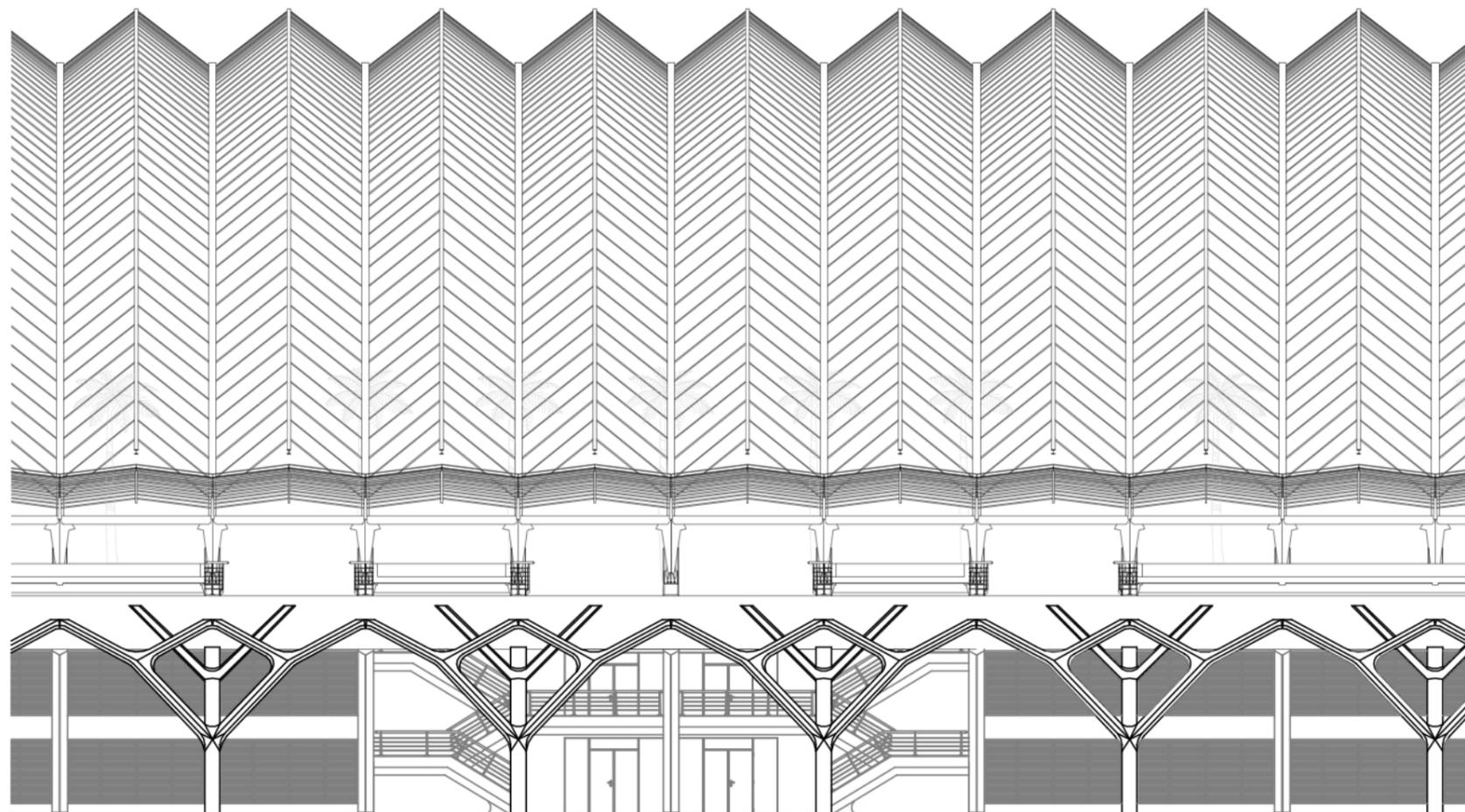
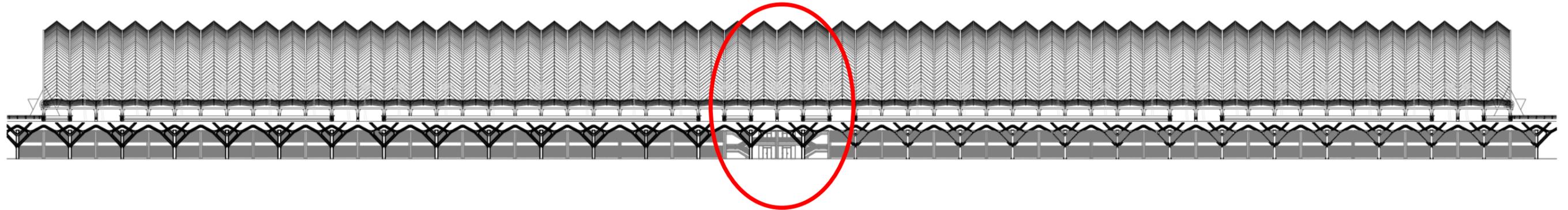


PLANTA A614



**PLANO GENERAL DE PLANTA  
ESCALA 1/200**

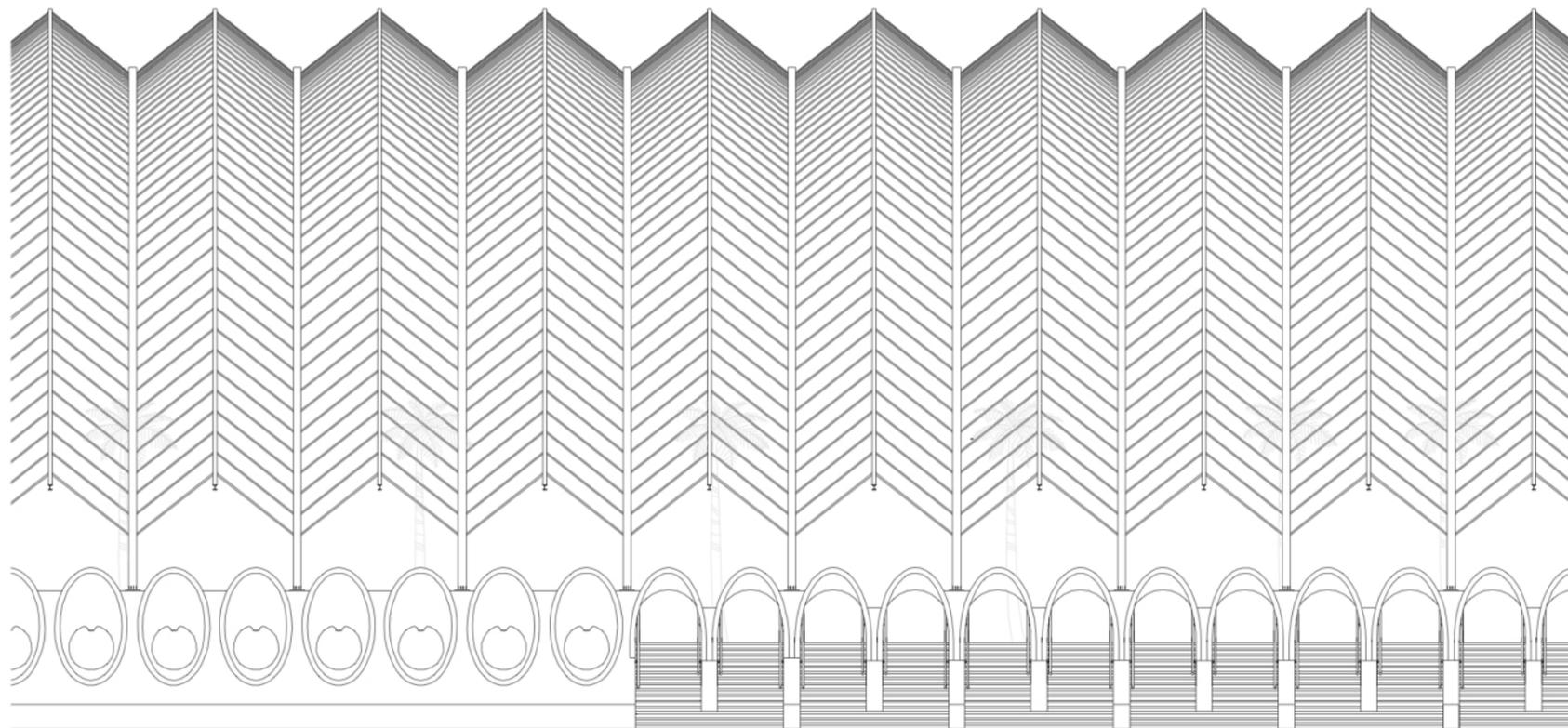
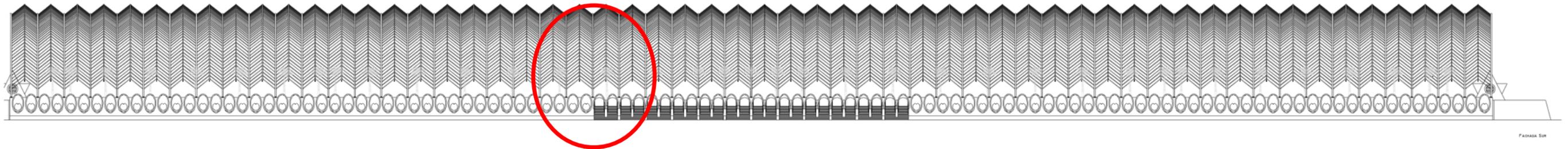
APROXIMACIÓN DE VISTA EN LA ZONA  
INDICADA SIN ESCALA DEFINIDA.



PLANO GENERAL DE ALZADO  
NORTE  
ESCALA 1/200

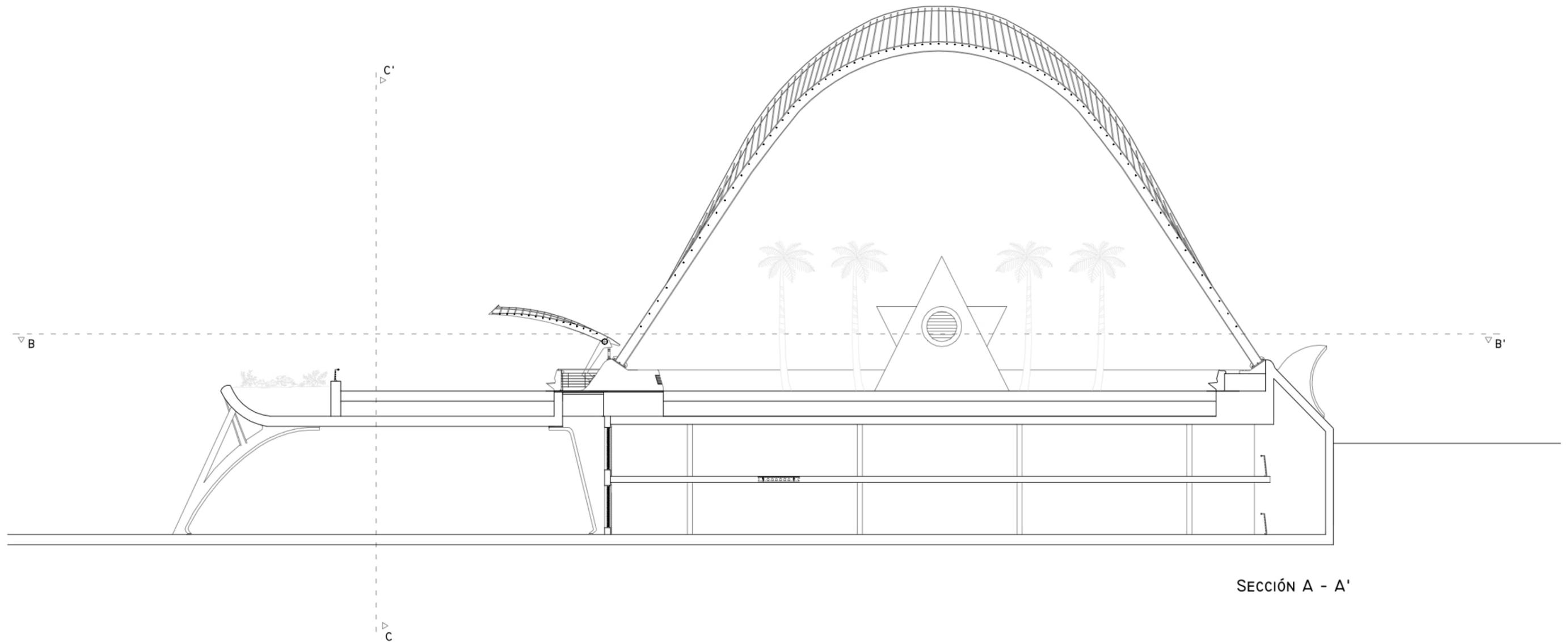
APROXIMACIÓN DE VISTA EN LA ZONA  
INDICADA SIN ESCALA DEFINIDA.

SUPERFICIES ARQUITECTONICAS SINGULARES



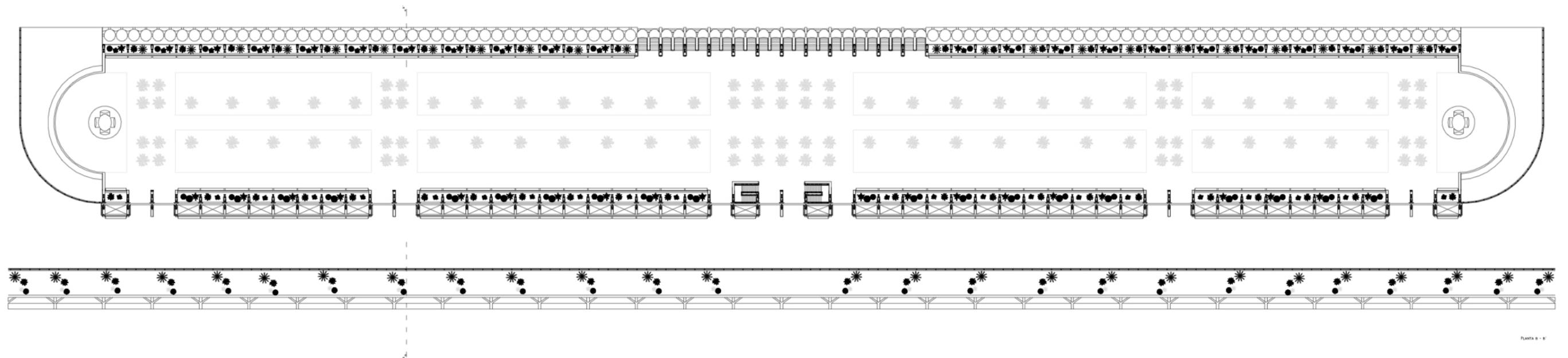
**PLANO GENERAL DE ALZADO  
SUR  
ESCALA 1/200**

APROXIMACIÓN DE VISTA EN LA ZONA  
INDICADA SIN ESCALA DEFINIDA.

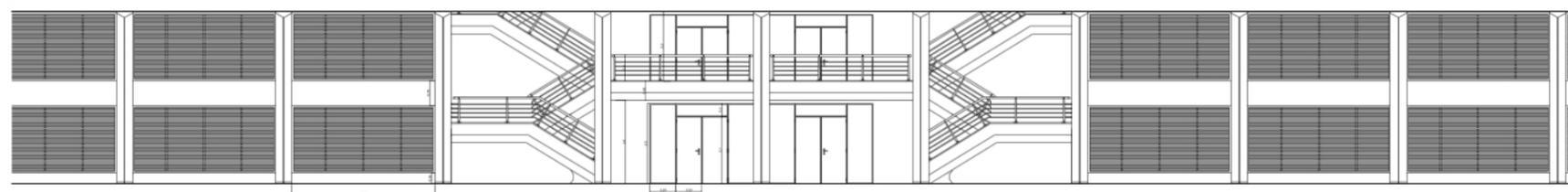
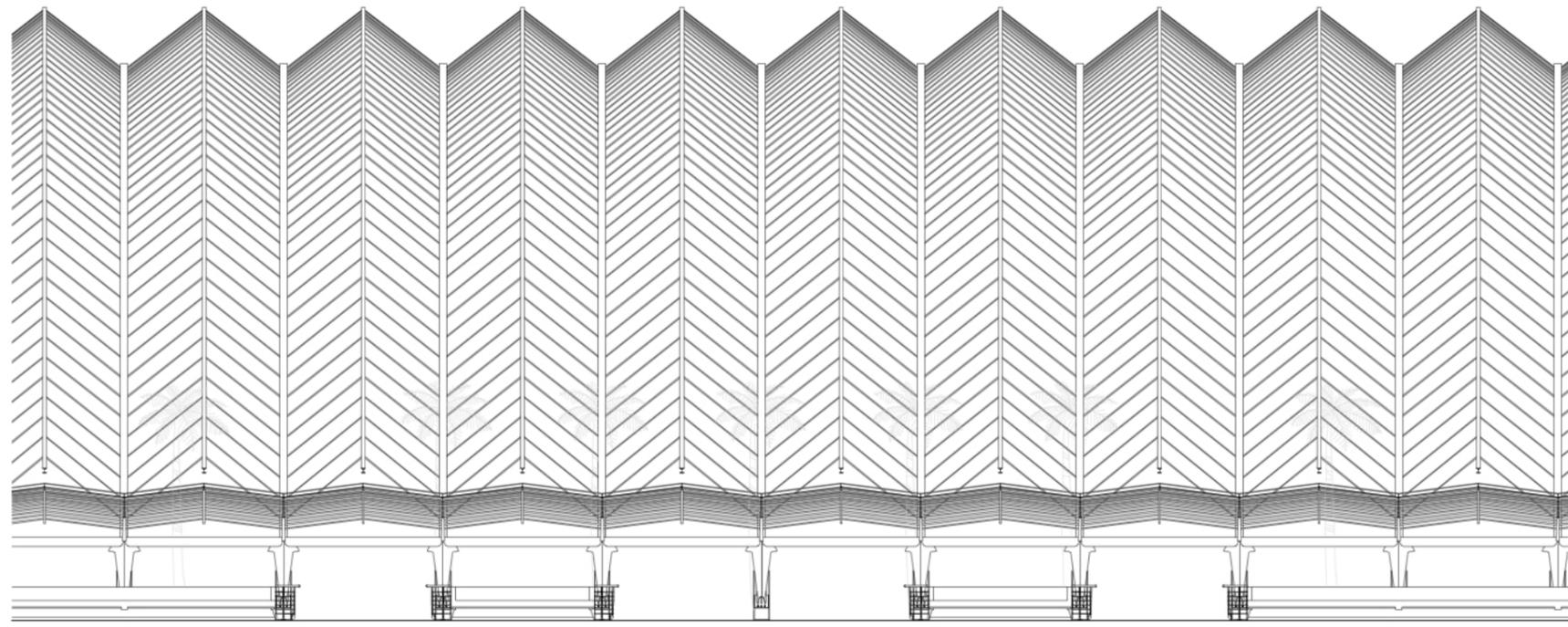
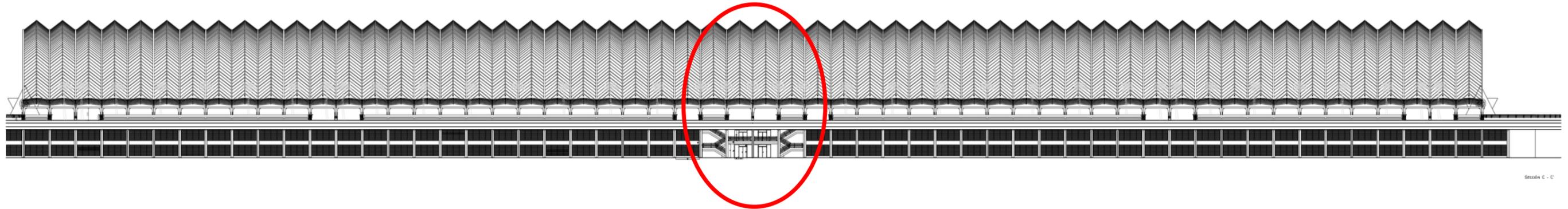


SECCIÓN A - A'

PLANO GENERAL DE SECCIÓN A-A'  
ESCALA 1/100



PLANO GENERAL DE SECCIÓN B-B'  
ESCALA 1/200



**PLANO GENERAL DE SECCIÓN C-C'  
ESCALA 1/200**

APROXIMACIÓN DE VISTA EN LA ZONA  
INDICADA SIN ESCALA DEFINIDA.







## FUNCIONALIDAD Y USO

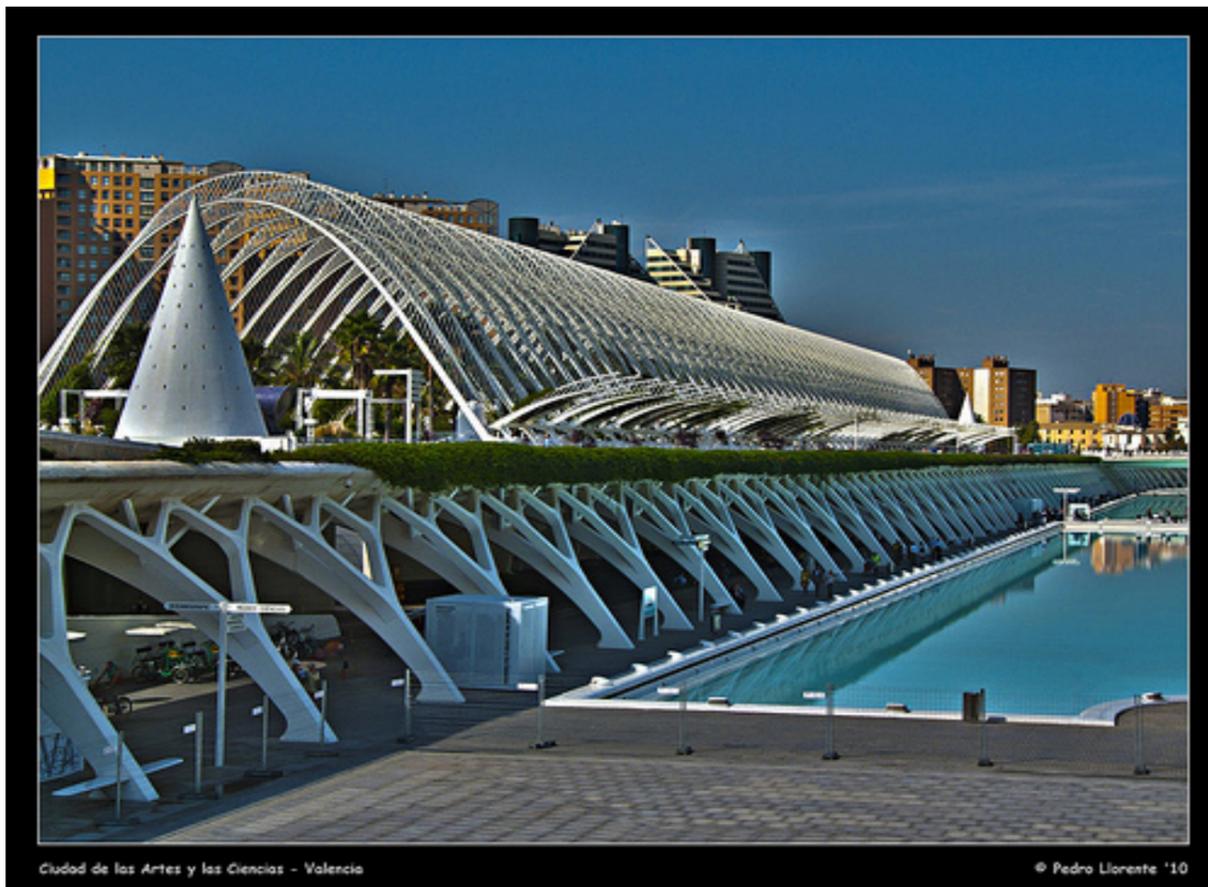
Para enfocar la inspiración que pudo llevar a Santiago Calatrava a la realización del Umbracle debemos enforcar esta solución desde un punto de vista puramente funcional.

La necesidad de un aparcamiento para un centro artístico cultural como La Ciudad de las Artes y las Ciencias es algo evidente, debido a la afluencia de visitantes, el problema era como integrarlo en el entorno sin que afectase a la belleza y la armonía de éste.

A partir de esta hipótesis podemos entender la solución aportada por el autor.

Por esta razón se crea una cubierta ajardinada para cubrir el aparcamiento aprovechando ese espacio como paseo y mirador al resto del conjunto.

Con esta solución además crea la puerta principal a la Ciudad desde la cara sur del complejo.



Alzado norte de L'Umbracle (2.1)



Puerta de entrada sur de L'Umbracle (2.2)



## EL UMBRACULO Y LA LUZ

Normalmente usamos el término invernadero o umbráculo indistintamente para referirnos a la misma construcción, sin percatarnos de sus diferencias. Es por ello que hay que saber distinguir entre los dos conceptos para comprender completamente su posterior uso y utilización.

Umbráculo (de umbría = sombra)

- Lugar destinado a proveer de sombra a los vegetales.
- Sombraje, especialmente el almacén cubierto de ramaje, follaje u otra cosa que permita el paso del aire para resguardar a las plantas de la fuerza del sol.
- Cobertizo para resguardar las plantas de la luz del sol.
- Área de sombra de un vivero.
- Por extensión, sitio cubierto para resguardarse del sol.

De acuerdo con esto podemos diferenciar ambas tipologías constructivas, llegando a la conclusión de que la única función del umbráculo es la de resguardar del sol todo aquello que coloquemos debajo de él, esencialmente plantas, y al mismo tiempo dejando pasar el aire. Por el contrario, la función del invernadero es más amplia y compleja, llegando a crear ambientes artificiales para el cultivo.



L'Umbracle (2.3)



Foto de invernadero (2.4)

Aclarado estos conceptos es necesario hablar sobre la importancia, como ya se ha mencionado, de la capacidad de resguardar al espacio que cubre del sol.

Para ello trataremos un concepto básico del diseño imprescindible para lograr la función deseada, la ligereza.



Arcos 1 (2.5)

Siguiendo el criterio de que el espacio arquitectónico sólo existe cuando es percibido por los sentidos, especialmente el de la vista, debemos entender a la estructura como "fuente de luz". Aunque el sol es claramente la fuente de la luz natural, la expresión "fuente de luz" debe entenderse como la descripción del método utilizado para dejar entrar la luz natural en un construcción.



Arcos 2 (2.6)

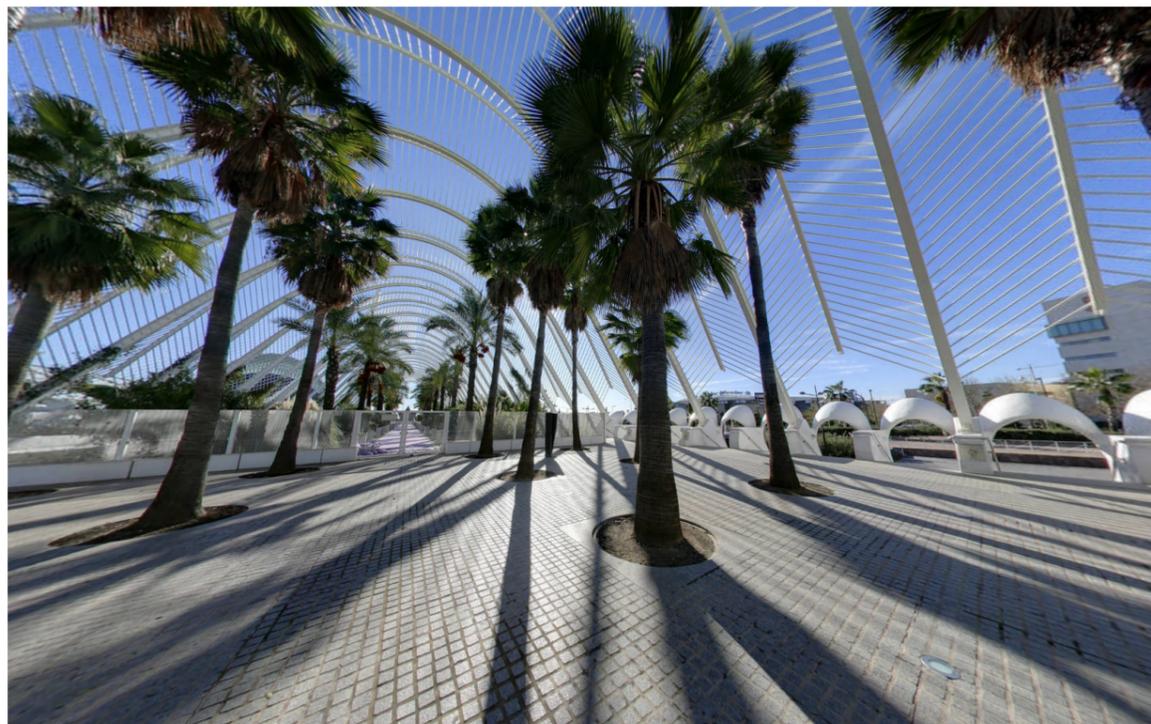


De esta manera trataremos a la estructura como fuente de luz, cuando la luz lo ilumina o pasa a través de ella o como elemento que controla cómo y por dónde entra la luz en un espacio.

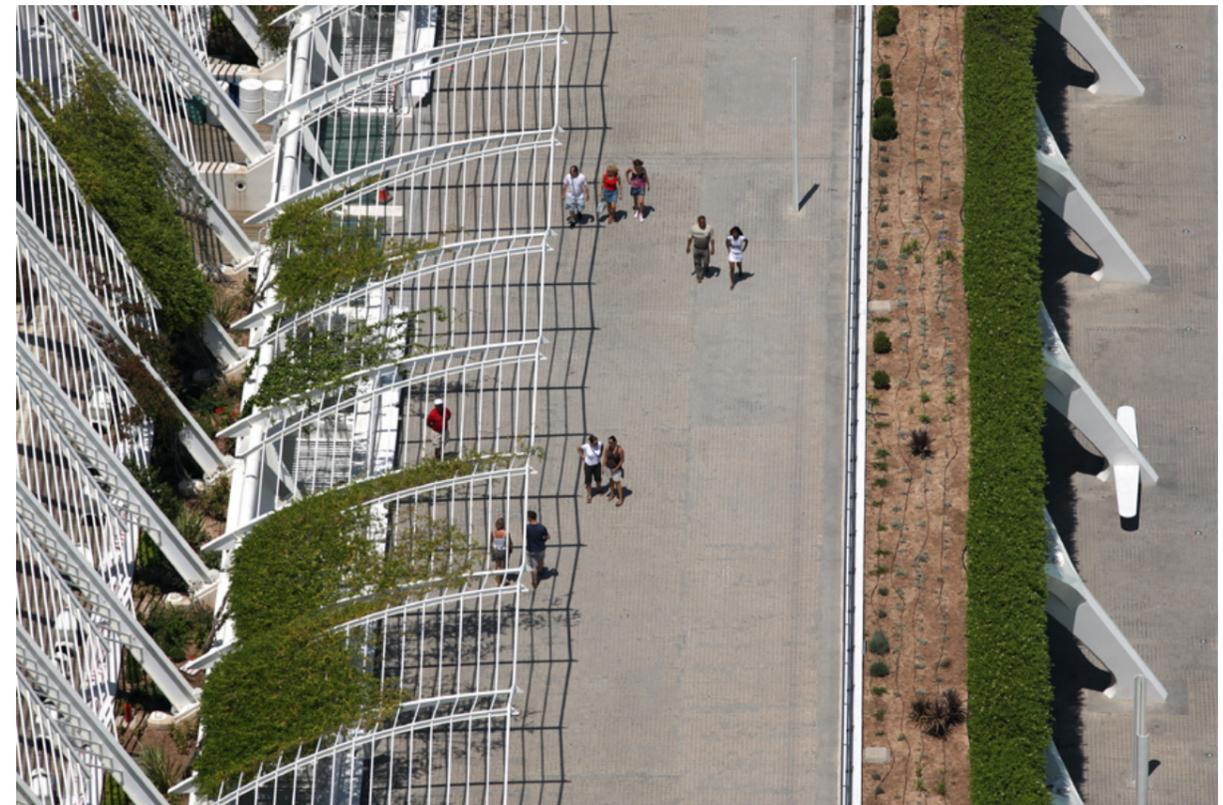
Cuando se requiere un elevado nivel de iluminación natural o de transparencia, las posturas de los arquitectos respecto al diseño de los detalles estructurales son diversas. Un máximo de luz natural implica reducir la silueta o la sombra de los elementos de la estructura.

Para conseguir esa doble cualidad arquitectónica de complejidad y ligereza cuando se reduce la dimensión estructural, un simple cálculo demuestra que si se sustituye una barra en tracción por otras dos de menor diámetro que tengan una resistencia conjunta equivalente, la superficie de la silueta estructural se reduce aproximadamente en un 30 por ciento. Con cuatro barras, la reducción de la silueta llega al 50 por ciento: cuantas más barras, más luz, pero también mayor complejidad visual.

No obstante para evitar un exceso de luz en las estaciones cálidas del año se pensó en un comienzo que la estructura sería como un emparrado, cubierta por plantas trepadoras, que poco a poco ascenderían por la sinuosa estructura. Sin embargo hasta la actualidad no se consiguió ese efecto de emparrado que en un comienzo se pensó para dotar al paseo de mayor frescura, y hacer más cómodo el paseo en las épocas calurosas.



Perspectiva Umbracle (2.7)



Vista aérea marquesina (2.8)



Con este estudio conseguimos entender claramente la geometría y funcionalidad por la que el autor se ha guiado para conseguir un fin, tamizar la luz.



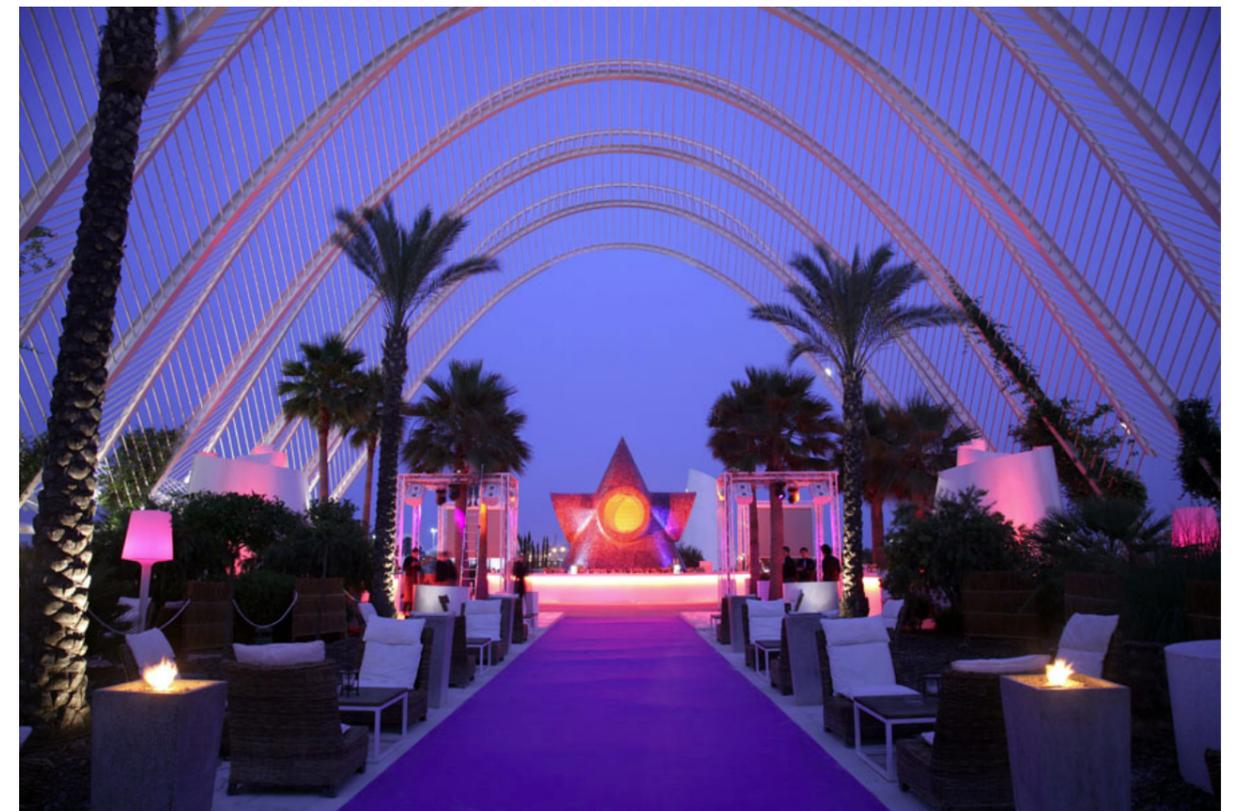
Vista oeste Umbracle (2.9)

Como opinión propia a mi juicio L'Umbracle es la obra del complejo de la Ciudad de las Artes y la Ciencias que mayor funcionalidad posee. Es una clara solución de optimización del espacio sin perder en ningún momento el componente estético que obligadamente debía guardar con el resto de la Ciudad.

Además a creado un lugar privilegiado para la contemplación del resto de su obra, invitando a los visitantes a el paseo gracias a la linealidad y profundidad que consigue con la consecución de las arcadas.

Desde hace unos años una parte del jardín se ha dedicado también a el uso de discoteca de verano, aprovechando el magnífico clima mediterraneo del que goza la ciudad, añadiendo si cabe un uso extra a una obra que no pierde ni un ápice de funcionalidad a pesar de su escultural diseño.

En definitiva, un lugar en el que el visitante se siente espectador paseando, como si de una galería de arte se tratase.



Vista nocturna de la terraza discoteca de Umbracle (2.10)

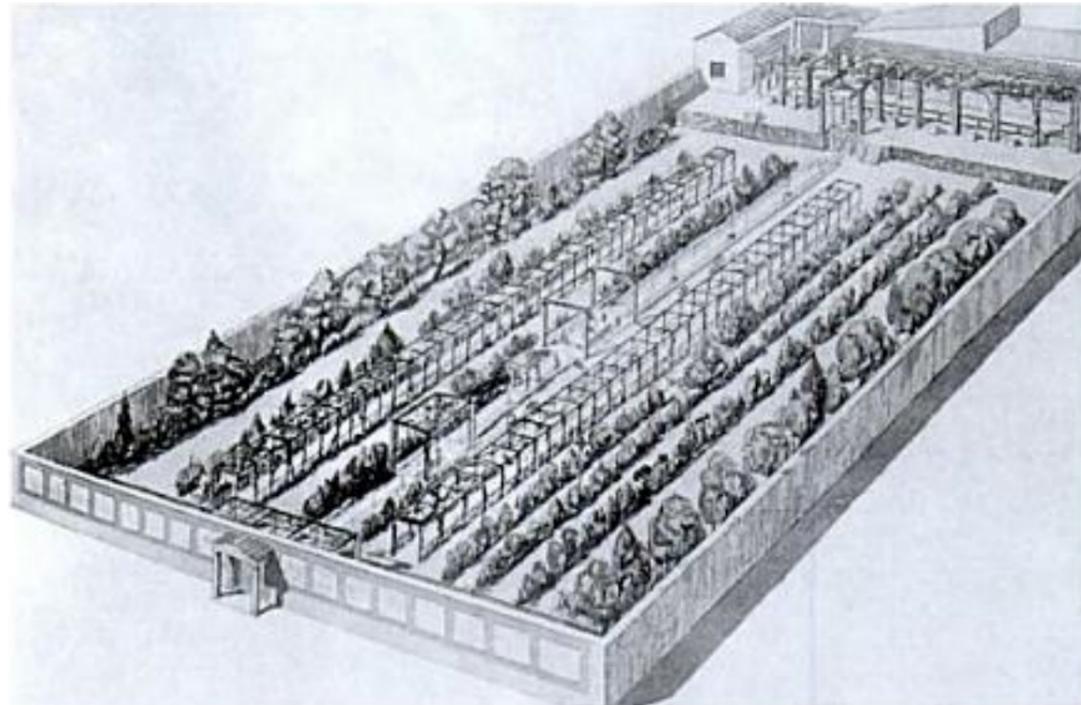


## HISTORIA DE LOS UMBRACULOS

Es curioso pensar como una solución tan antigua se combina con la tecnología de medios y recursos de los cuales disponemos en la actualidad.

El uso de este tipo de estructuras cubiertas por vegetación es tan antiguo que debemos remontarnos a la antigua Roma, en donde se encontraron claros ejemplo del uso de estos elementos, sin a penas variaciones ni grandes evoluciones, con la actualidad.

Un claro ejemplo lo podemos encontrar en El jardín de la Casa de Loreio Tiburtino en la antigua Pompeya.



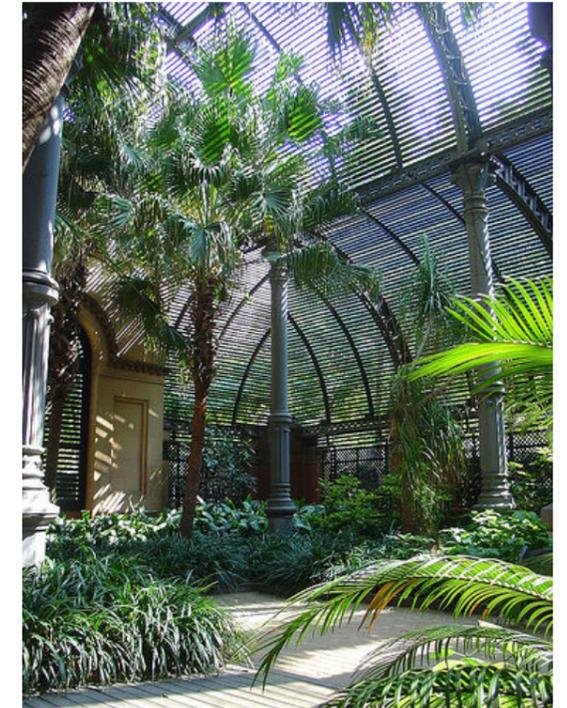
El jardín de la Casa de Loreio Tiburtino (2.11)

Los emparrados son un clásico en las zonas de clima mediterráneo, por lo que la combinación utilizada en La Ciudad de las Artes y las Ciencias en el jardín de Umbracle, es una clara adaptación de tradición y modernidad. Una visión al futuro integrada en la raíces y el espíritu mediterráneo de la zona.

Otros ejemplos:



Jardín botánico de Valencia (2.12)



Umbraculo de la Expo (2.13)



El Jardín Americano (Sevilla) (2.14)



## INSPIRACIÓN DEL AUTOR

Santiago Calatrava es un arquitecto que se le considera mitad arquitecto e ingeniero, mitad artista escultor. Esta afirmación es un reflejo de sus ideas más básicas a la hora de crear cualquiera de sus obras. La filosofía constructiva de Calatrava siempre ha sido lo mismo: unir la belleza de una estructura con las prestaciones de una función.

Precisamente por el diseño de sus estructuras y los recursos de formas que absorbe de la naturaleza y los esqueletos animales a Calatrava se le ha catalogado como uno de los mayores exponentes mundiales de lo que se conoce como arquitectura orgánica.

Ésta se podría definir como la filosofía de promover la armonía entre el habitad humano y el entorno, ya sea natural o no. Uno de los arquitectos más importantes a la hora de desarrollar esta filosofía fue Frank Lloyd Wright.



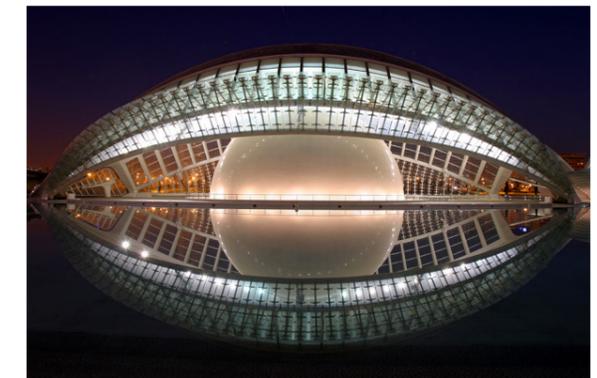
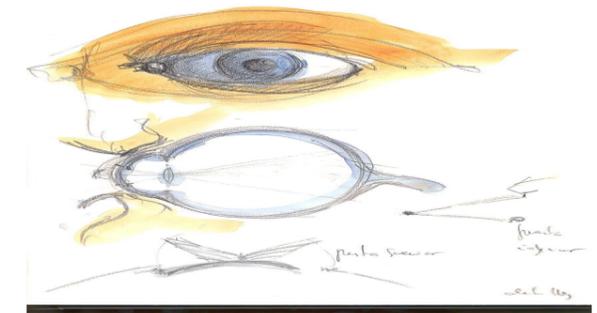
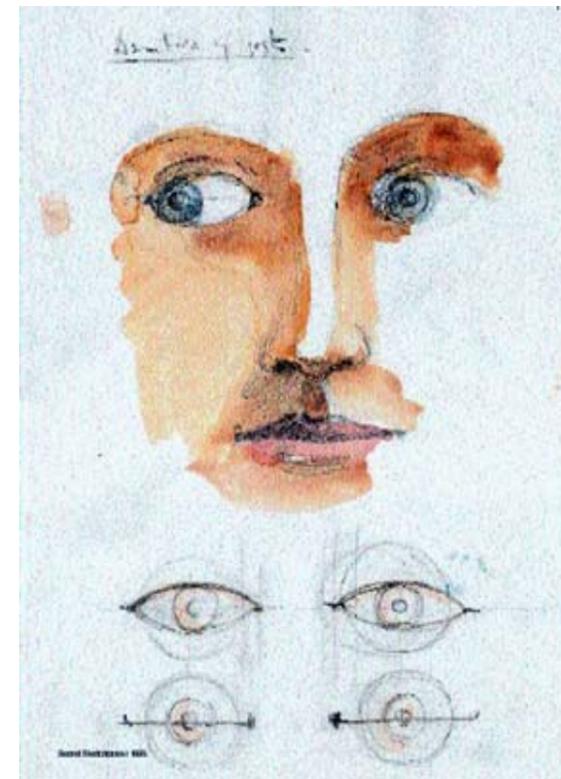
Fallingwater de Frank Lloyd Wright (Pennsylvania) (2.15)

Los emparrados son un clásico en las zonas de clima mediterráneo, por lo que la combinación utilizada en La Ciudad de las Artes y las Ciencias en el jardín de Umbracle, es una clara adaptación de tradición y modernidad. Una visión al futuro integrada en la raíces y el espíritu mediterráneo de la zona.

Calatrava tomó a Félix Candela, un arquitecto español, que vivió muchos años en México, como ejemplo, y admiración de pintores y escultores españoles como Goya, Miró y Gaudí y se inspira en la naturaleza y en los esqueletos humanos.

Un tema repetido es el ojo del hombre porque él es de la opinión de que el ojo es la verdadera herramienta de los arquitectos. Sus preferidos materiales de construcción son hormigón, hormigón armado, acero y cristal, su color favorito es el blanco y él da gran importancia al efecto dinámico.

La arquitectura e ingeniería se funden en sus obras hasta tal punto que resulta imposible dividirlos. Sus obras, a menudo, tienen un aspecto de animales en movimiento. La fisonomía y la naturaleza le importan en la misma dimensión como la geometría. De este modo crea monumentos característicos. Con frecuencia hace diseños para los proyectos en una forma estilizada, por ejemplo de animales, la plasticidad del cuerpo humano y del ojo humano, y simplifica los diseños a partir de esas ideas.



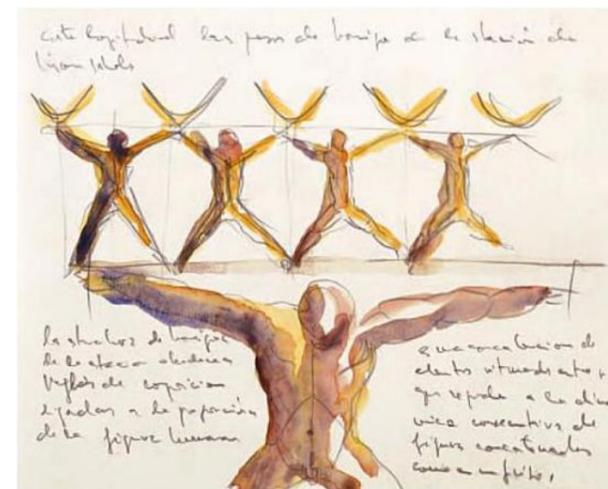
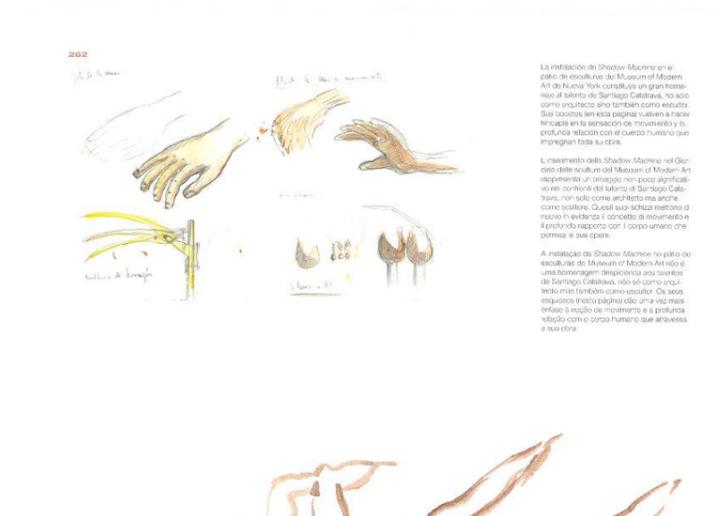
Boceto del ojo y L'Hemisfèric (Valencia) (2.16, 2.17 y 2.18)

## SUPERFICIES ARQUITECTONICAS SINGULARES

Un pilar básico en la obra de Santiago Calatrava a la hora de buscar la inspiración es el movimiento y la plasticidad del cuerpo humano. Estos son algunos de sus bocetos en los que juega con el dinamismo del cuerpo.

Con estas técnicas lo que pretende es conseguir asemejar las estructuras con las tensiones y los esfuerzos que se producen en cada punto del cuerpo para conseguir estabilizar las fuerzas.

El propio Calatrava en múltiples ocasiones ha declarado: "Para mí, hay dos principios fundamentales que se encuentran en la naturaleza que son los más apropiados para la construcción, uno es el uso óptimo del material, el otro la capacidad de los organismos de cambiar de forma, crecer, y moverse."



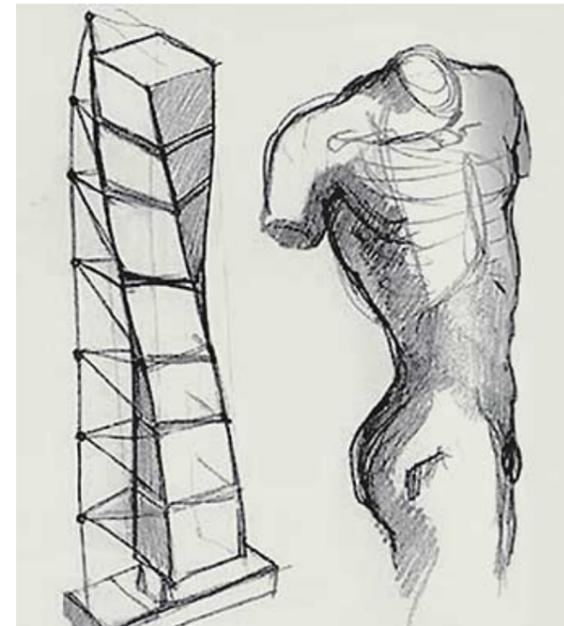
Bocetos de Santiago Calatrava sobre el cuerpo humano (2.19, 2.20 y 2.21)



Ejemplos de la búsqueda de inspiración en la forma y el movimiento del cuerpo humano.



Boceto y Torre de comunicaciones de Montjuic  
(Barcelona) (2.22 y 2.23)



Boceto y rascacielos Turning Torso  
(Suecia) (2.24 y 2.25)





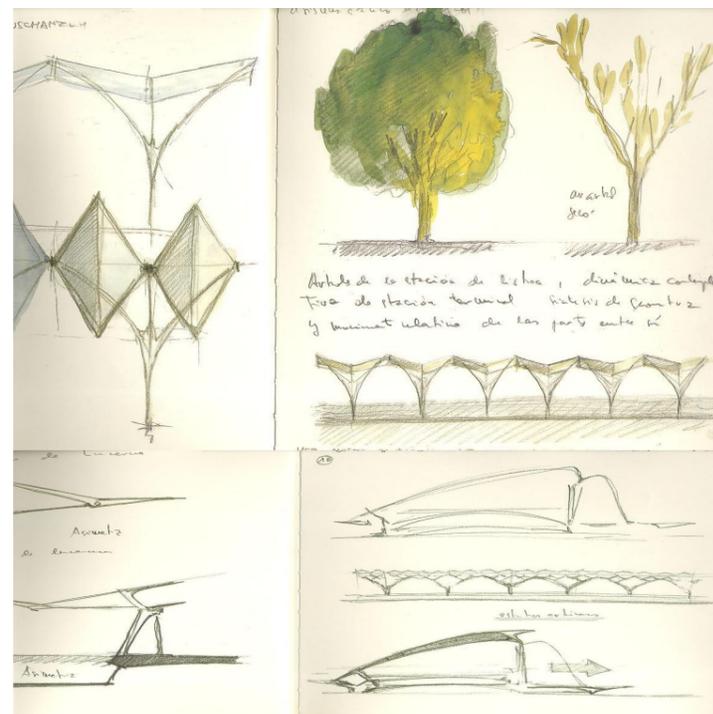
## INFLUENCIA Y SEMEJANZAS CON LA OBRA DE GAUDÍ

Otro de los elementos de la naturaleza más usados por Calatrava son los árboles. Recurso que usa en múltiples obras como solución estructural vista llegando así a un punto escultural. En la ciudad de la Artes y la Ciencias encontramos varios ejemplos.

Para solucionar los soportes del paseo mirador de Umbracle se ha recurrido a este tipo de estructuras con morfología de árbol. En este caso se ha recurrido a darles una inclinación para recibir mejor las presiones perpendiculares a su sección

Esta fotografía de columnas arboescentes se encuentra en el Parque Güell de Barcelona, obra de Gaudí que guarda una clara semejanza con la solución de Calatrava expuesta en la anterior fotografía del Umbracle.

A pesar de la total diferencia de materiales elegidos para la construcción, se respira claramente la misma filosofía estructural.



Boceto de Santiago Calatrava sobre los arboles (2.26)



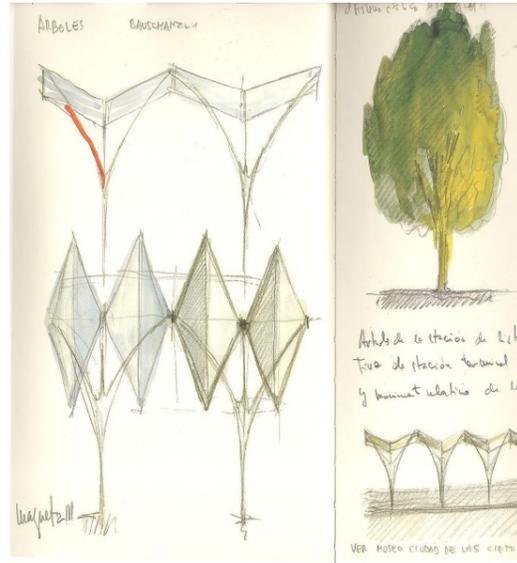
Paseo de arbotantes de L'Umbracle  
(Valencia) (2.27)



Paseo del Parque Güell de Gaudí  
(Barcelona) (2.28)



Otros ejemplos de la utilización de estructuras arboescentes inspirados en la obra de Gaudí.



Boceto de los arboles de la estación de Oriente (2.29)



Andén de la estación de Oriente  
(Lisboa) (2.31)



Columnas de la Sagrada Familia de Gaudí  
(Barcelona) (2.33)



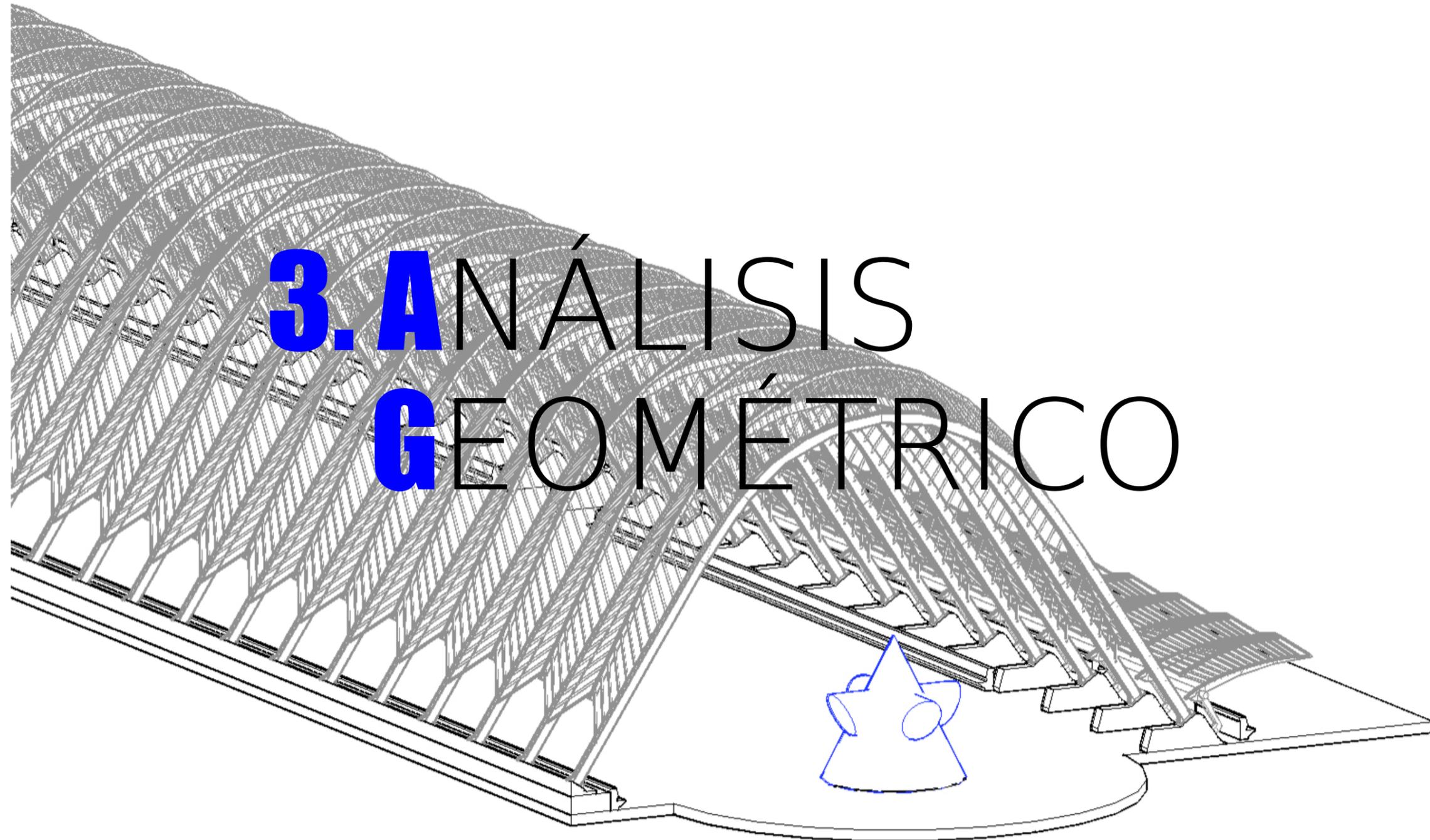
Boceto del Museo de las Ciencias Principe Felipe (2.30)



Columnas arboescentes de la fachada este del Museo Principe Felipe  
(Valencia) (2.32)



Columnas arboescentes de la entrada de la Sagrada Familia  
(Barcelona) (2.34)





## ESTUDIO GEOMÉTRICO CUBIERTA

La geometría de la cubierta del jardín de Umbracle consta de una sucesión de 55 arcos fijos y 54 arcos flotantes intercalados. Ambos siguen la directriz de una parábola, de diferente sección en los arcos fijos y los flotantes. (figura 1)

Para simplificar el estudio del conjunto vamos a dividir la estructura en módulos. Cada módulo está compuesto por dos arcos fijos y uno flotante intermedio. El arco flotante está unido por 109 barras de sección circular por cada uno de los lados a los arcos fijos. (figura 2).

La unión de los arcos fijos con el flotante intermedio genera lo que se conoce como superficie reglada. De esta forma se generan dos superficies regladas, simétricas respecto del eje del arco intermedio.

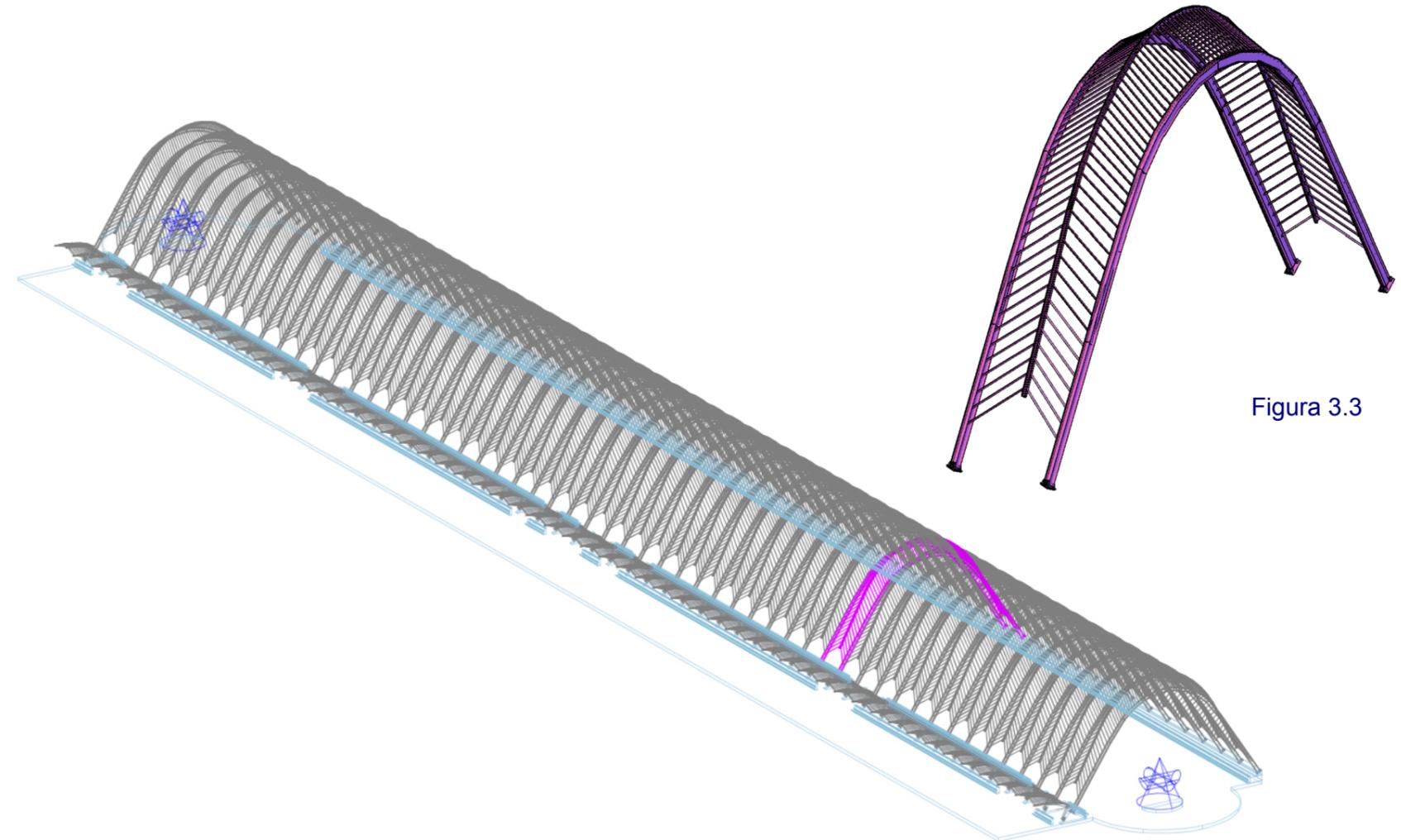


Figura 3.3



Boceto del Museo de las Ciencias Príncipe Felipe (3.1)

Figura 3.2



**PROYECCIÓN ORTOGONAL DE LAS VISTAS DE UN MÓDULO DE CUBIERTA**

Podemos observar de forma clara la geometría de un módulo de la cubierta, formado por dos arcos fijos y uno intermedio flotante sustentado a base de 218 barras de sección circular, a través de su alzado, planta y perfil.

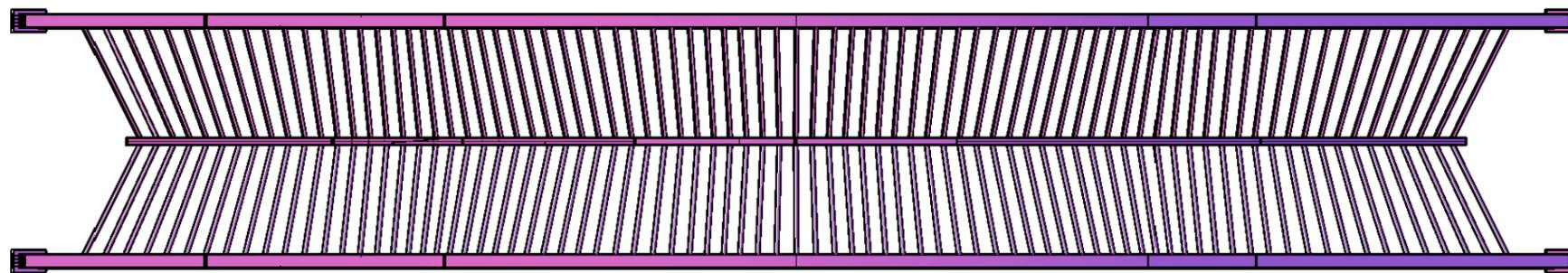
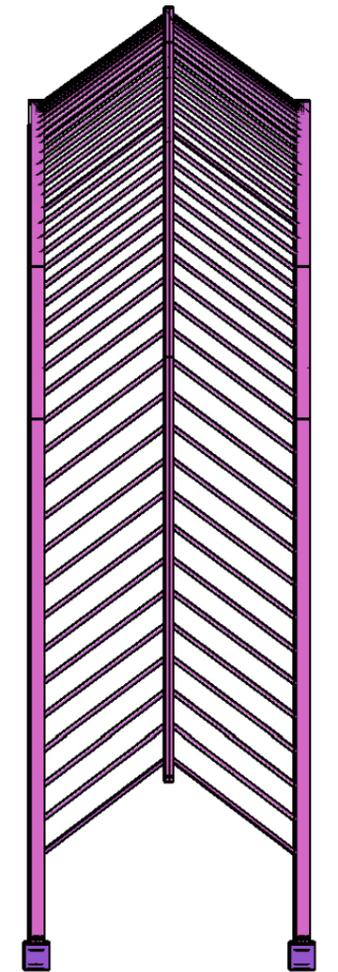
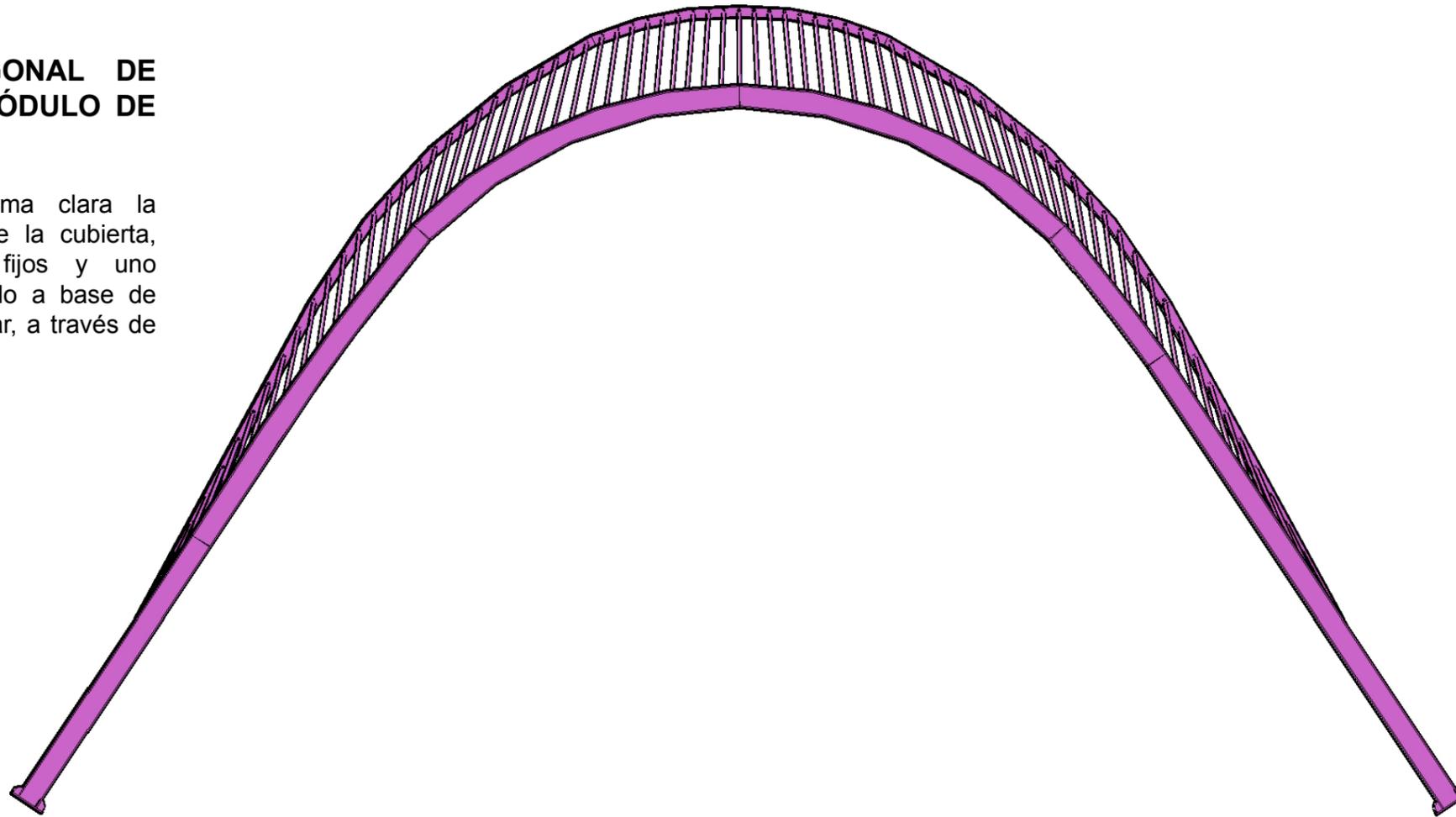


Figura 3.4



## COMPROBACIÓN GEOMÉTRICA DE LA PARABOLAS

Para la formación de los arcos fijos se a tomado una parábola como eje de trazado de su geometría. Tomando dicha parábola vamos a realizar una comprobación de su geometría para concluir que efectivamente se trata de este tipo curva.

Tomando un punto cualquiera de la parábola P trazaremos la recta tangente y única a esta curva (S). A continuación trazaremos una recta paralela al eje focal (eje de simetría de la parábola) desde el punto elegido P. A continuación, tomando como eje de simetría la recta tangente (S) trazaremos una recta simétrica a la recta paralela al eje focal. Esta última recta corta al eje focal en un punto, que recibe el nombre de foco.

Sabiendo que el vértice de la parábola es el punto medio entre el foco y lo que se conoce como directriz de la parábola, continuaremos trazando la recta directriz de la parábola Ésta es una recta perpendicular al eje focal.

Una vez hemos conseguido la directriz y el foco ya tenemos todo lo necesario para trazar la parábola tomando puntos. Como en este caso lo que buscamos es comprobar que la curva dada realmente se trata de una parábola haremos el proceso inverso.

Seleccionamos un punto cualquiera de la curva y comprobamos que cumple la condición de toda parábola de tener la misma distancia desde cualquier punto de ésta a el foco y a la directriz. Así concluimos, que esa distancia (N) desde un punto cualquiera, es la misma, por lo que efectivamente nos encontramos ante una parábola.

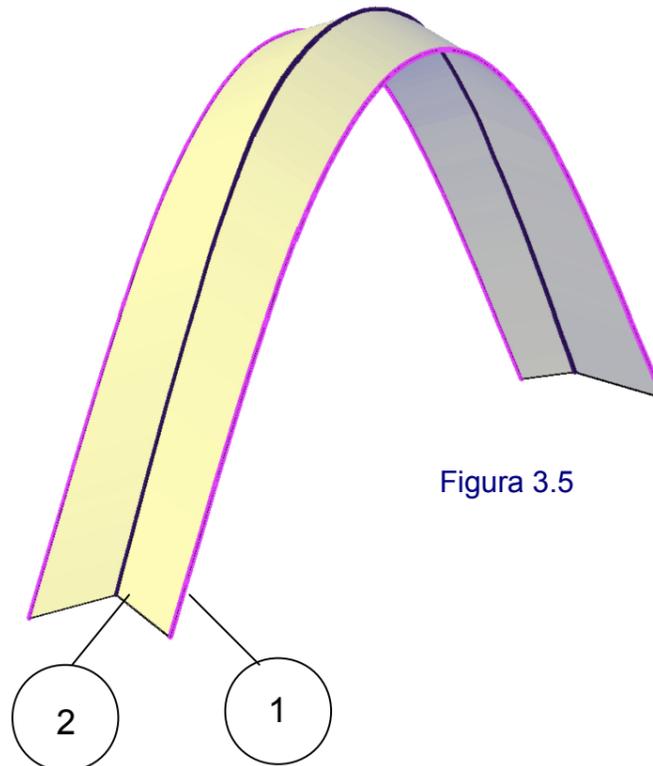


Figura 3.5

1. PARÁBOLA DEL ARCO FIJO

2. PARÁBOLA DEL ARCO FLOTANTE

1. PARÁBOLA DEL ARCO FIJO

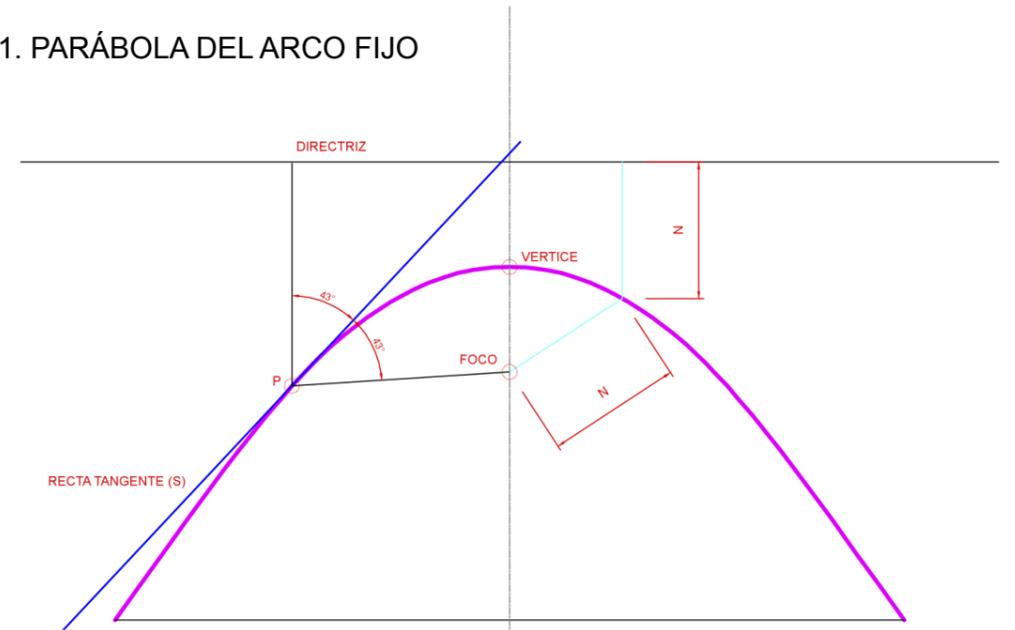


Figura 3.6

2. PARÁBOLA DEL ARCO FLOTANTE

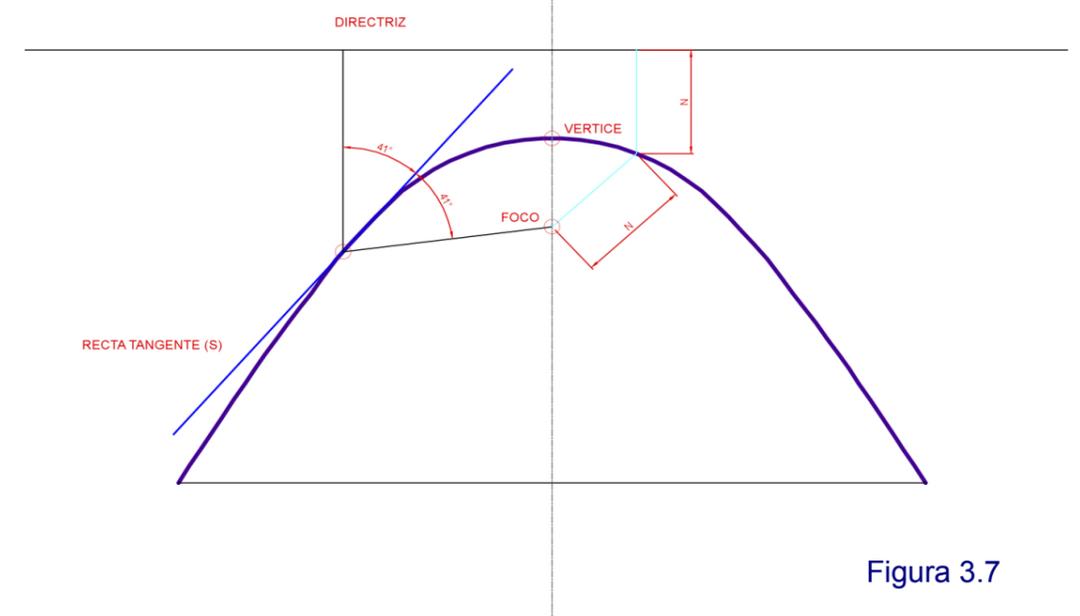
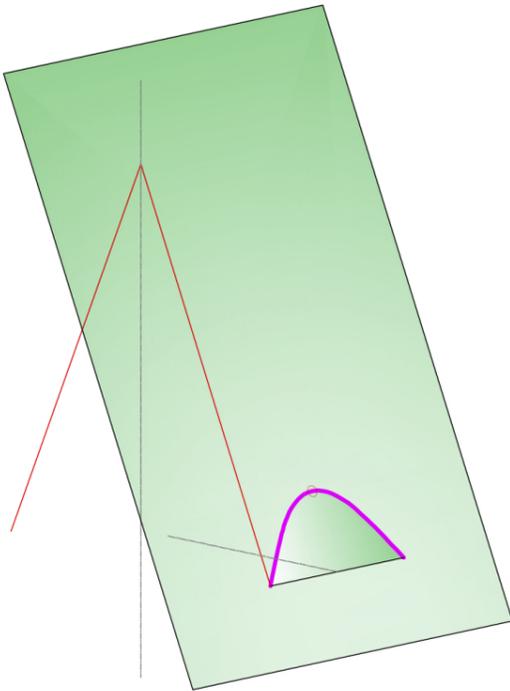


Figura 3.7

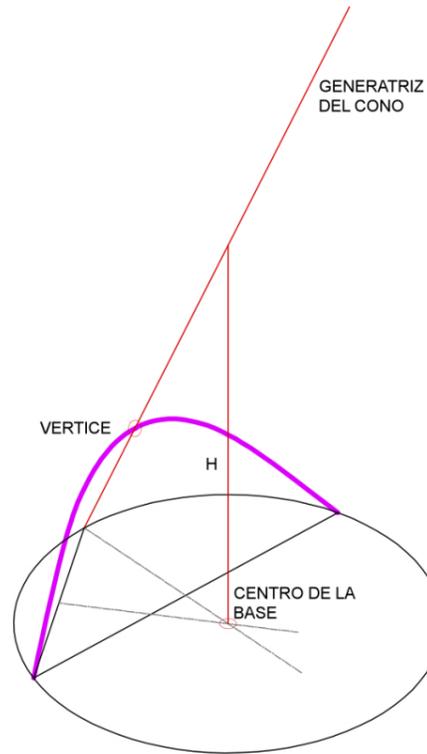


DEMOSTRACIÓN GRÁFICA DE LA GENERACIÓN DE LA PARABOLA DE LOS ARCOS FIJOS.

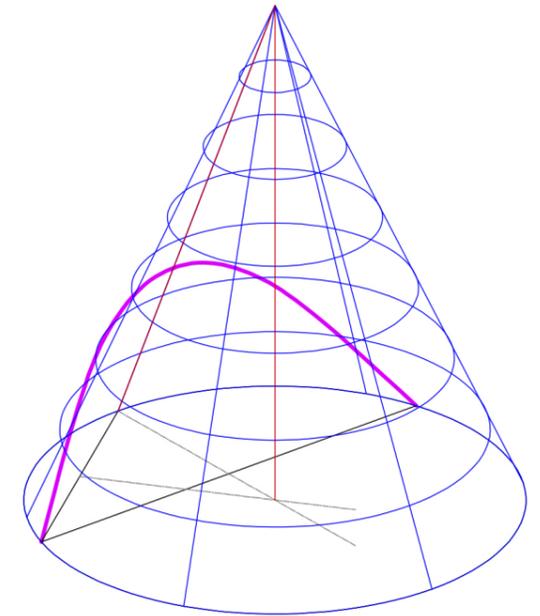
1



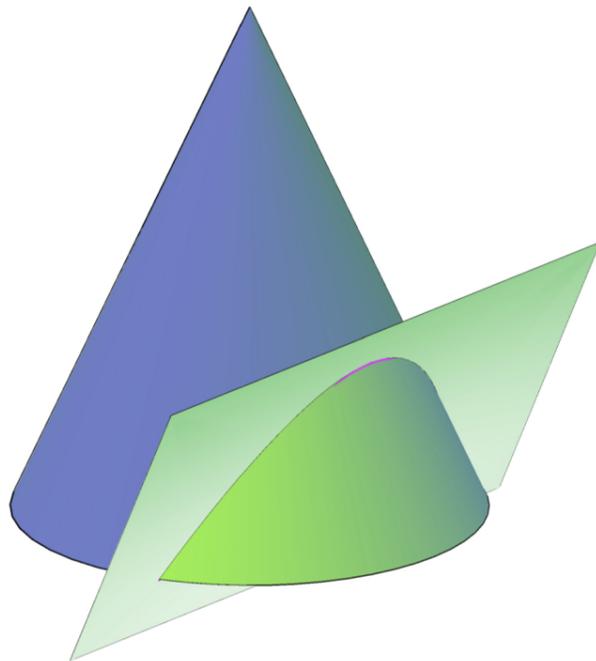
2



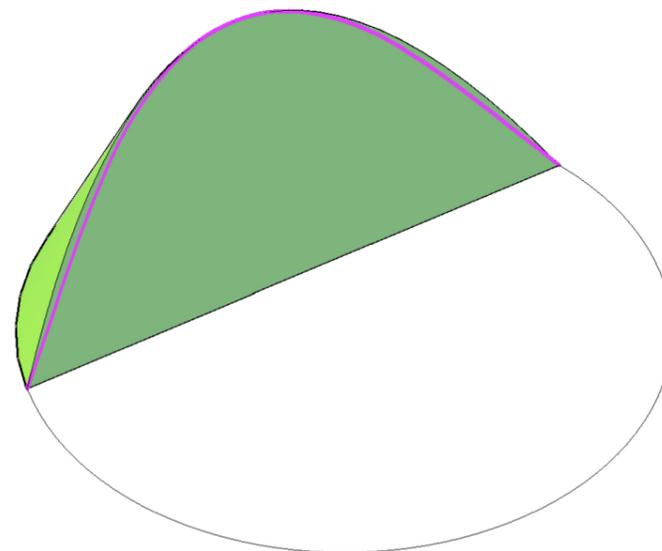
3



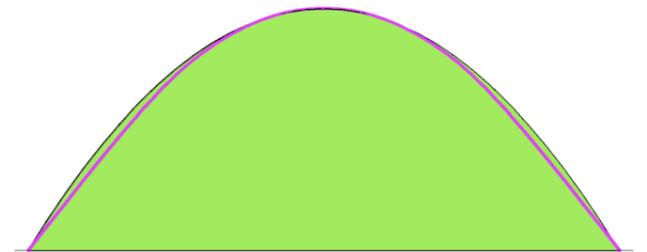
4



5



6

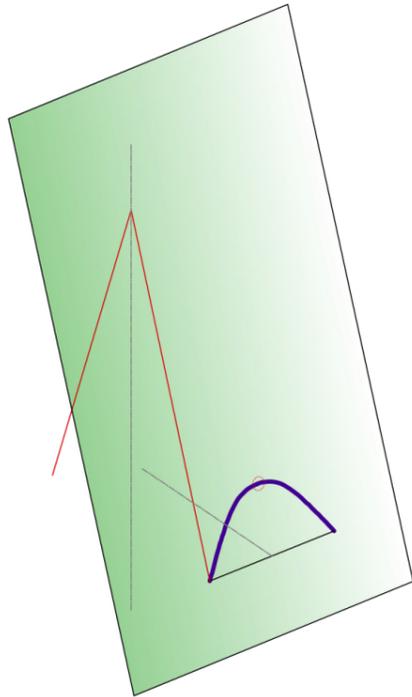


Figuras de 3.8 a 3.13

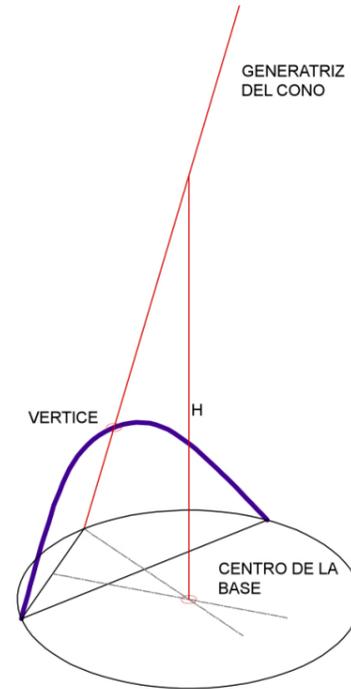


DEMOSTRACIÓN GRÁFICA DE LA GENERACIÓN DE LA PARABOLA DE LOS ARCOS FLOTANTES.

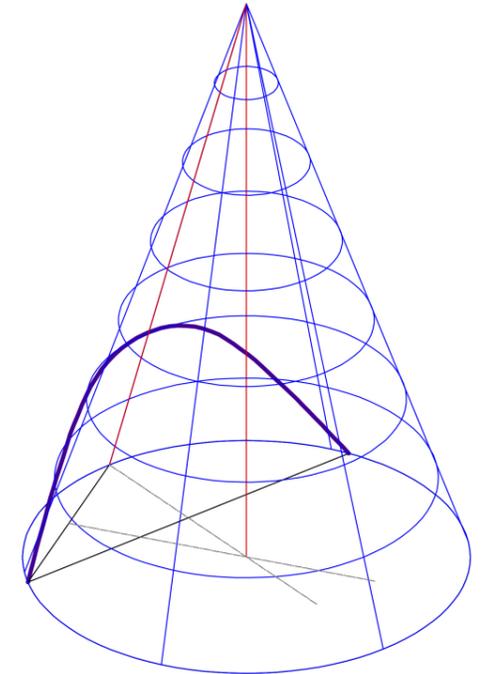
1



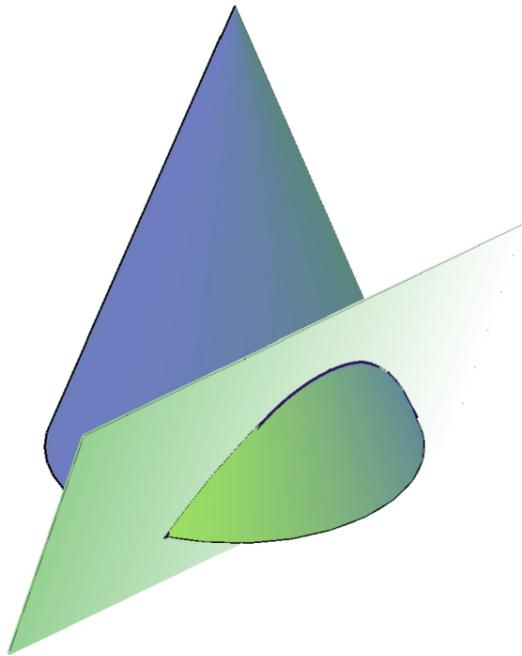
2



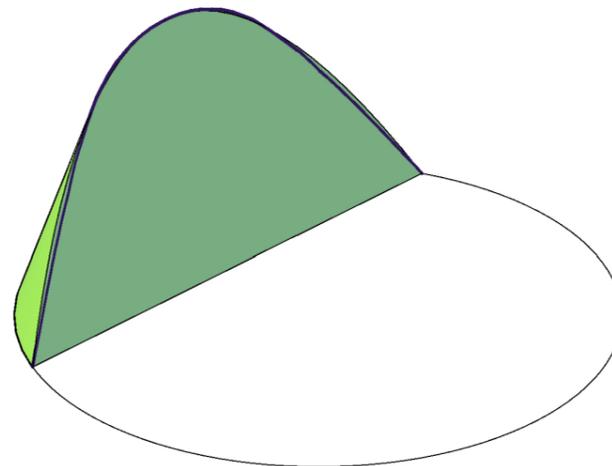
3



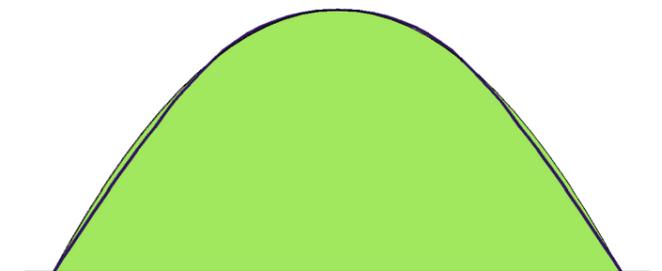
4



5



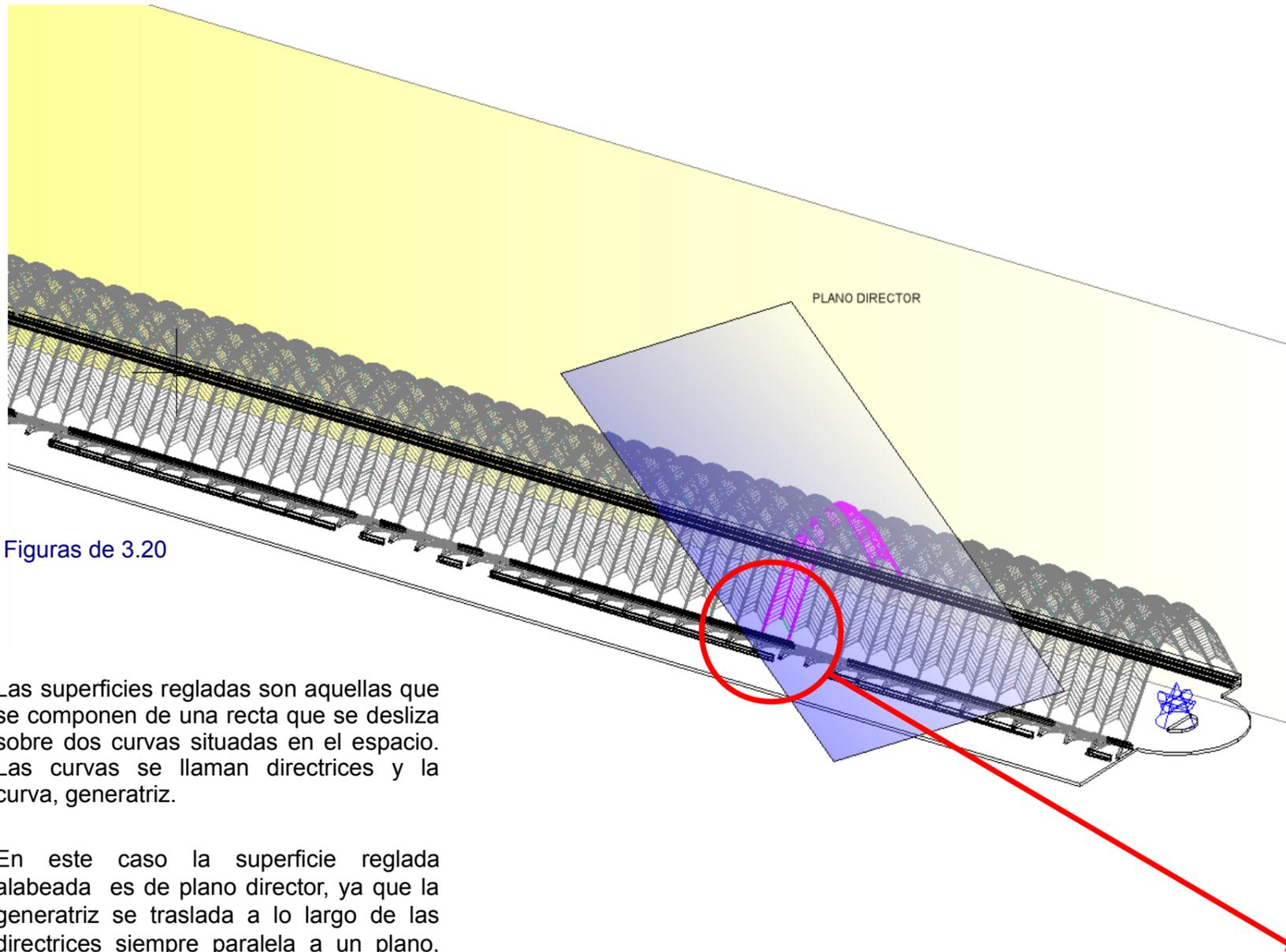
6



Figuras de 3.14 a 3.19



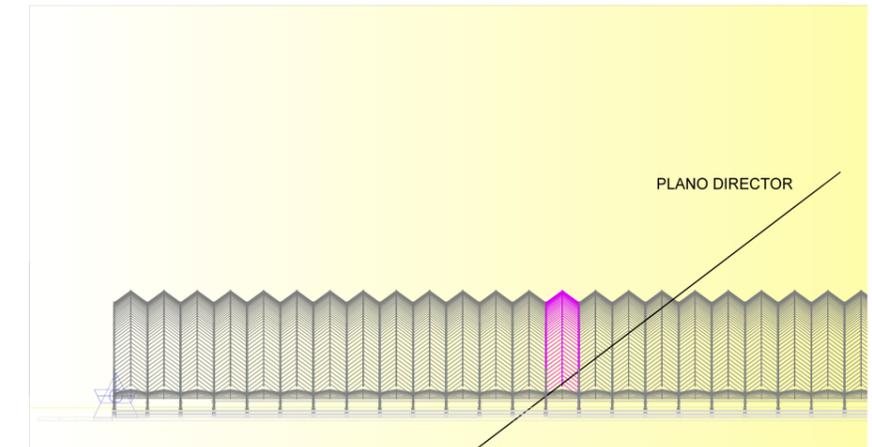
**FORMACIÓN DE SUPERFICIE REGLADA DE PLANO DIRECTOR.**



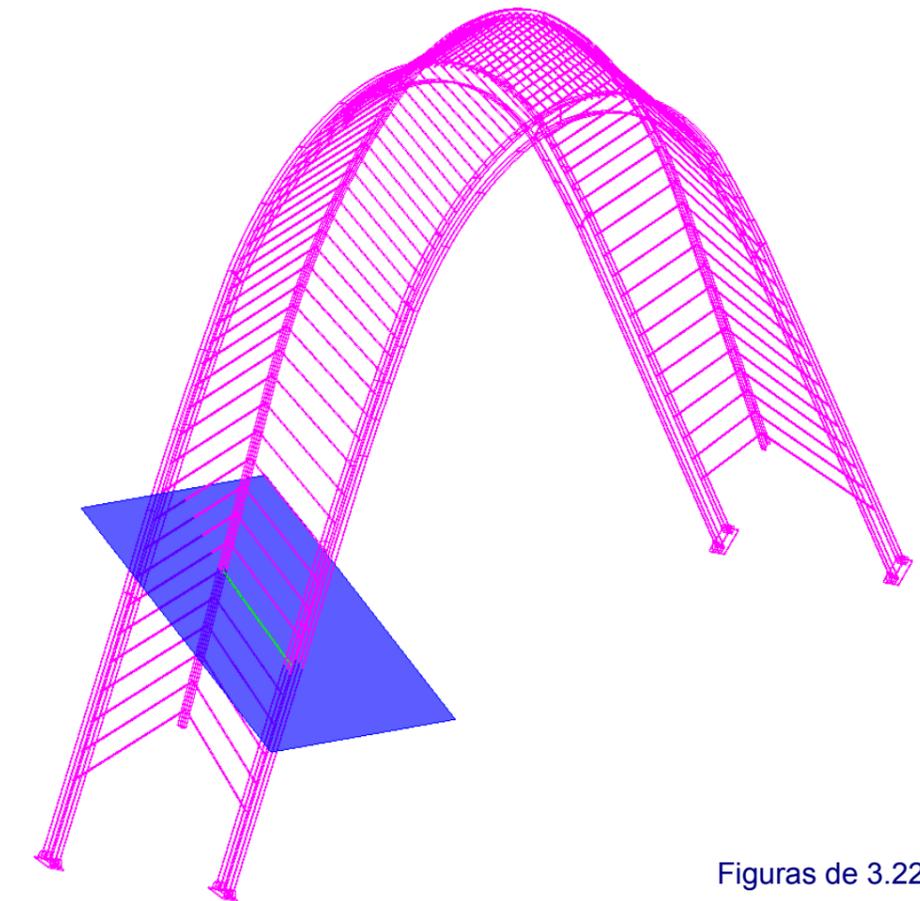
Figuras de 3.20

Las superficies regladas son aquellas que se componen de una recta que se desliza sobre dos curvas situadas en el espacio. Las curvas se llaman directrices y la curva, generatriz.

En este caso la superficie reglada alabeada es de plano director, ya que la generatriz se traslada a lo largo de las directrices siempre paralela a un plano, denominado plano director. Y éste es el que marca la dirección de los perfiles de sección circular que unen los arcos fijos a los flotantes.



Figuras de 3.21



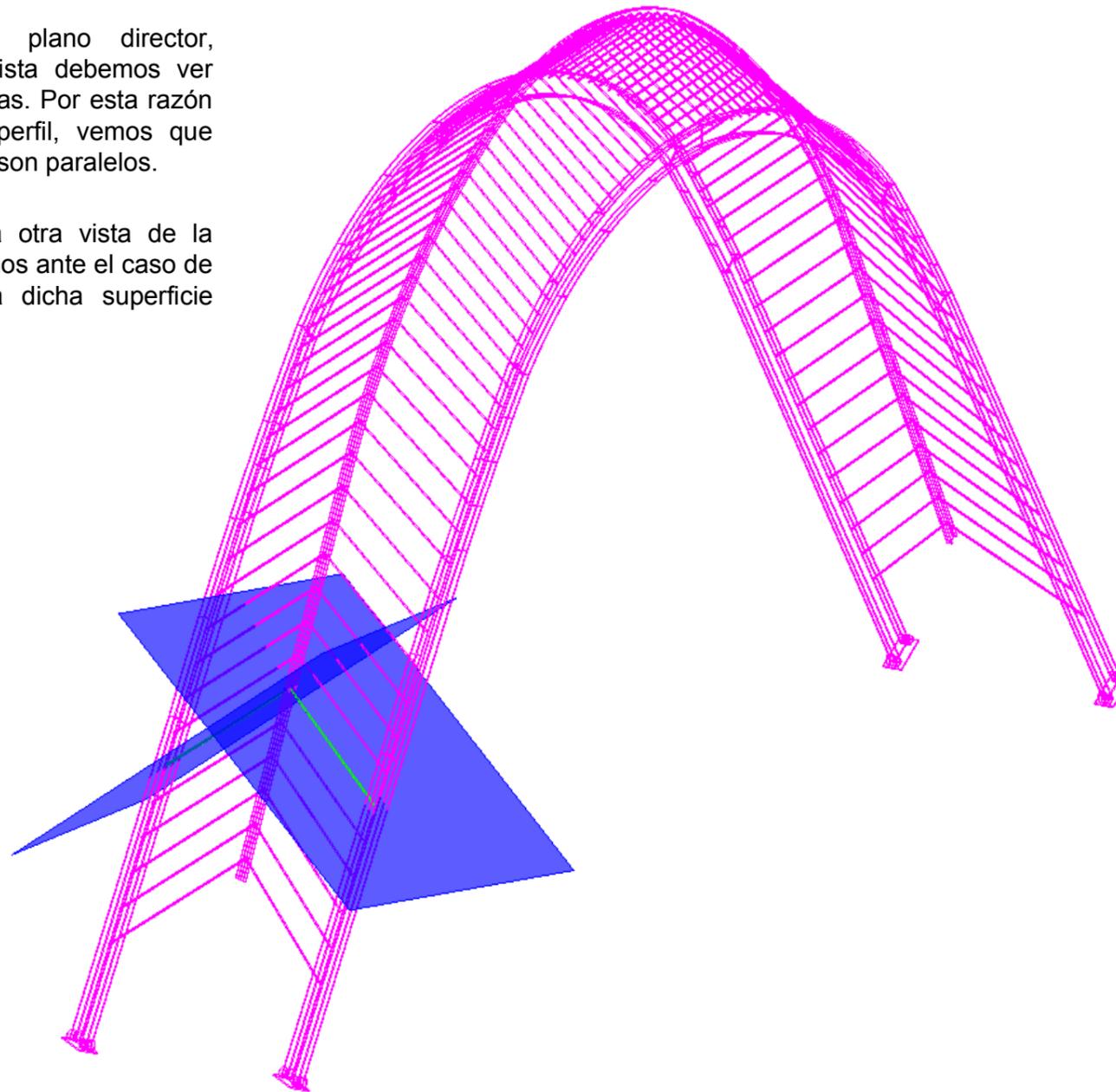
Figuras de 3.22



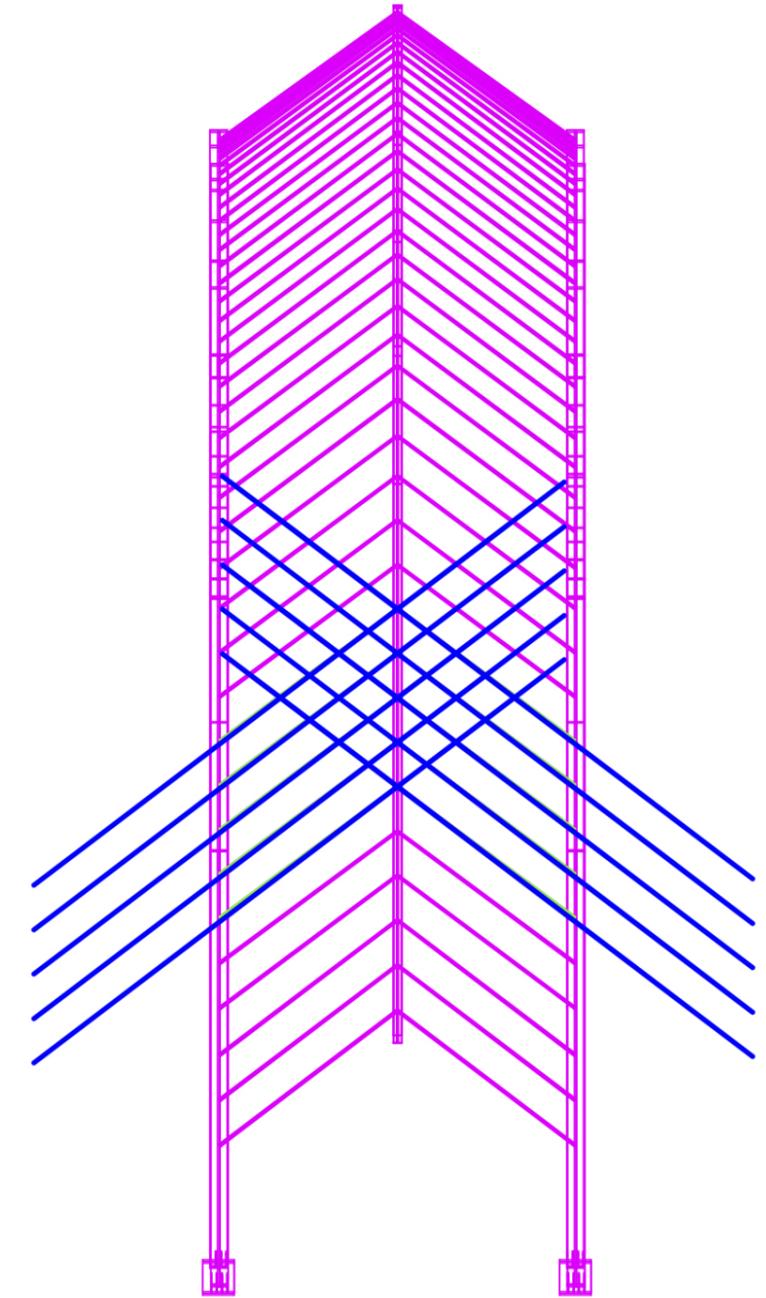
### FORMACIÓN DE SUPERFICIE REGLADA DE PLANO DIRECTOR.

Según la definición de plano director, concluimos que en una vista debemos ver todas las directrices paralelas. Por esta razón si vemos la cubierta de perfil, vemos que todos los perfiles circulares son paralelos.

Si esto sucede en alguna otra vista de la estructura nos encontraríamos ante el caso de que la figura que genera dicha superficie reglada sería un cilindro.



Figuras de 3.23



Figuras de 3.24



### ESTUDIO GEOMÉTRICO MARQUESINA

Al igual que la cubierta del jardín, sobre el paseo se extiende una pérgola marquesina compuesta por 55 ramas fijas y 54 flotantes intercaladas (Figura 1).

Todos las ramas fijas están unidas mediante una pieza especial al mismo soporte de hormigón donde descansan los arcos de la cubierta.

Además, todos los brazos fijos quedan arriostrados mediante un cilindro de 28 cm. de diámetro que cose la totalidad de la marquesina, aportando estabilidad y unificación al conjunto.

De igual forma, que en el estudio de la cubierta, para la marquesina también extraeremos un módulo para su entendimiento (Figura 2).



Maquesina del Umbracle (3.25)

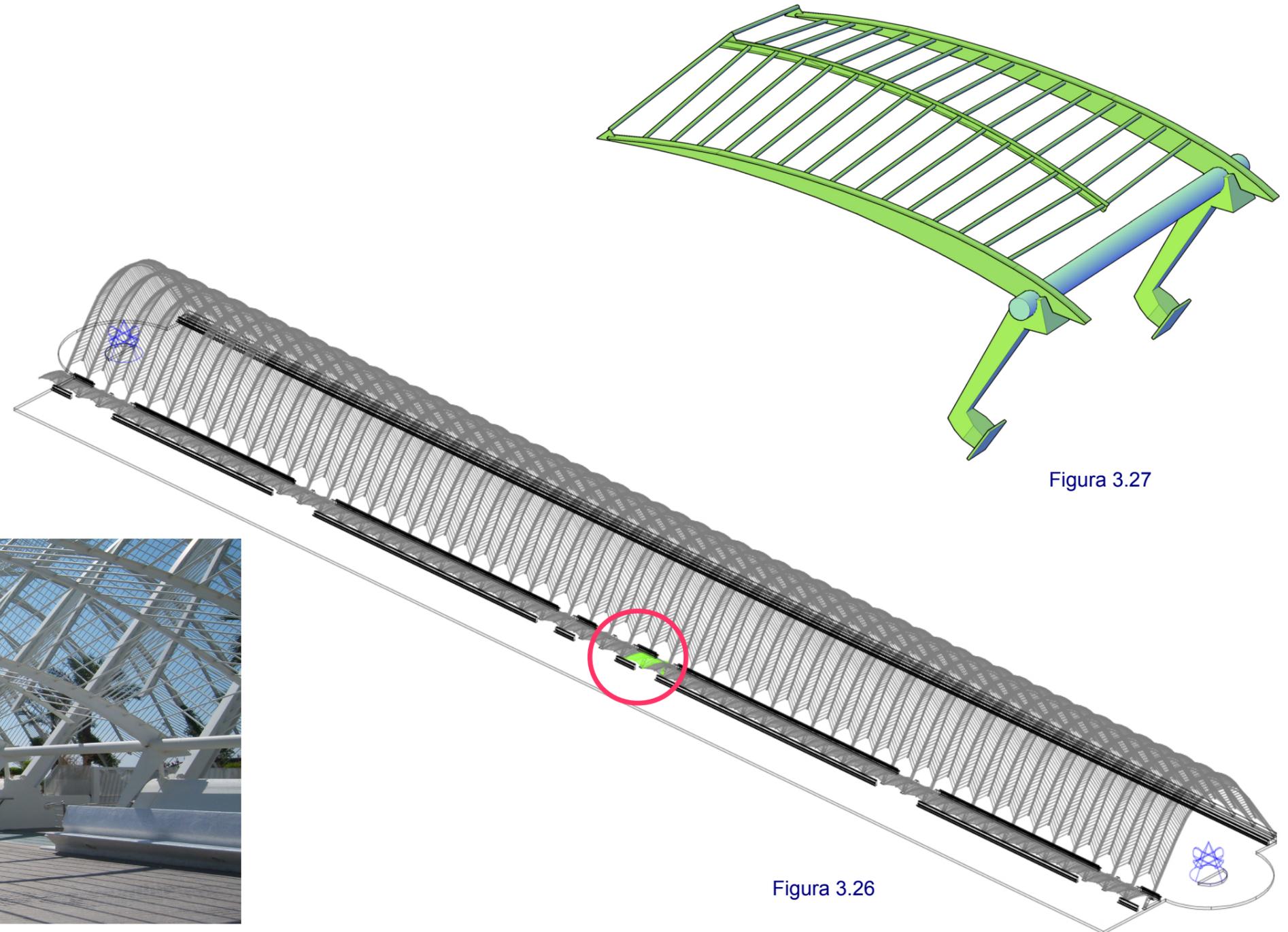


Figura 3.27

Figura 3.26



### FORMACIÓN DE LA CURVA DE LA MARQUESINA

A diferencia de las parábolas que forman los arcos, la curva de la marquesina no vamos a realizar su estudio debido a la imposibilidad de encontrar la verdadera geometría de los arcos. El mayor problema radica en que el tramo de curva que genera los arcos es demasiado pequeño para poder afirmar con certeza el origen de ésta.

La imposibilidad de conseguir algún tipo de información o planos de carácter oficial que resolviese este problema ha impedido el estudio geométrico de ésta, ya que podríamos hacer coincidir el tramo de la curva con múltiples posibilidades de distinta geometría.

Quiero dejar constancia de que con toda seguridad la generatriz de los arcos de la marquesina responden a un geometría y calculo concreto y razonado, a pesar de como he explicado anteriormente, no haber conseguido información necesaria para justificar con seguridad la solución.

No obstante en el siguiente gráfico se puede observar las directrices de los arcos que constituyen la marquesina.

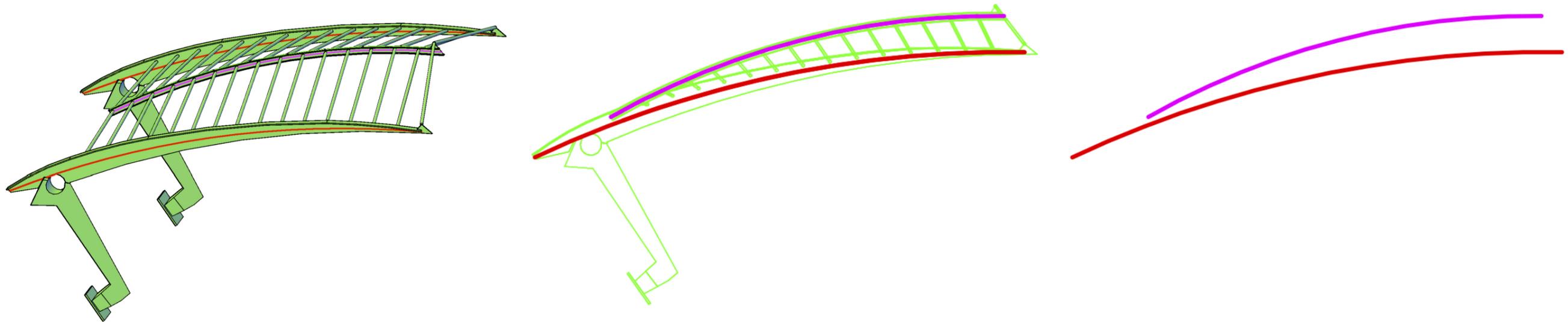


Figura 3.28 a 3.30



### SUPERFICIE REGLADA ALABEADA

Igual que en la cubierta la unión entre los arcos fijos y flotantes se lleva a cabo mediante quince perfiles rectos de sección circular por cada lado que generan las superficies regladas. Sin embargo, en la marquesina no se trata de una superficie de plano director como en la cubierta. Esto es apreciable de manera sencilla en las proyecciones, si los perfiles circulares no se proyectan paralelos entre sí en alguna vista, quiere decir que las generatrices no siguen un plano director.

En este caso las generatrices (perfiles circulares) recorren las directrices (arcos de la marquesina) guardando una equidistancia entre ellas.

En la recreación se puede ver en rojo las directrices de los arcos representada sobre los perfiles y la superficie reglada que generan los perfiles circulares.

Para finalizar se ha coronado los brazos en la punta de la ménsula con unas pletinas triangulares que se unen mediante los mismo perfiles circulares, aunque en este caso estos no siguen la línea de la superficie reglada.

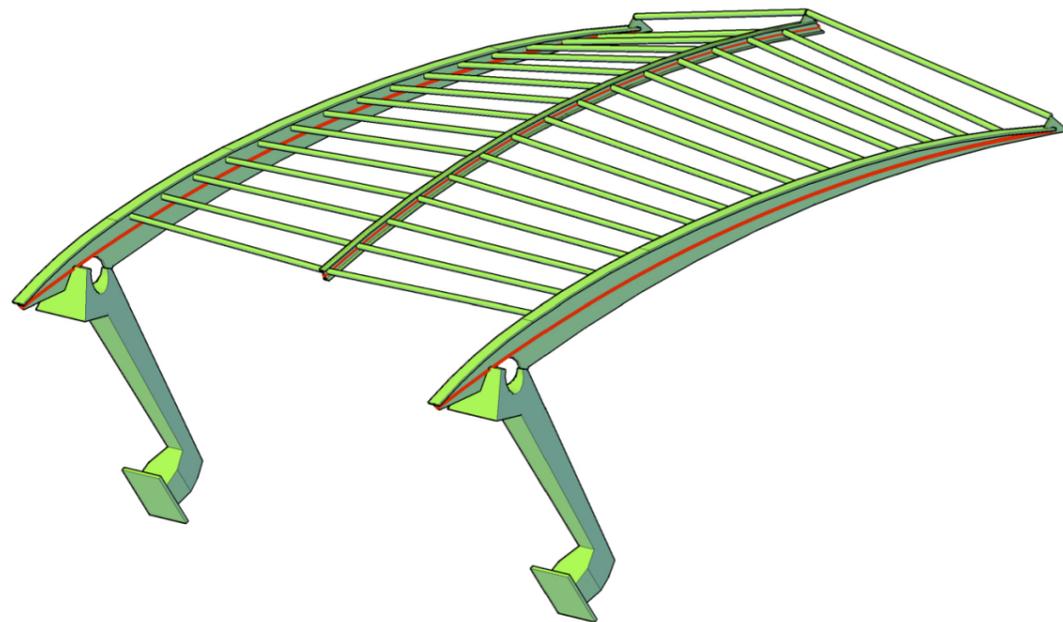


Figura 3.31

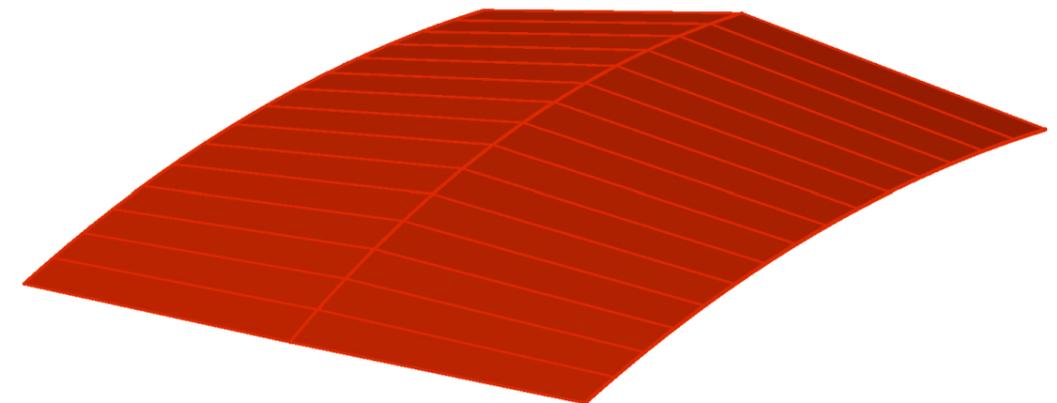


Figura 3.32



**PROYECCIÓN ORTOGONAL DE LAS VISTAS DE LA MARQUESINA.**

Aquí podemos observar de forma clara la geometría de un módulo de la marquesina a través de su alzado, planta y perfil.

Como se puede observar en el perfil, los brazos fijos tienen una sección variable que sigue la forma lógica que el diagrama de momentos marca en una ménsula. Incrementándose desde la punta de la ménsula (momento cero) hasta el empotramiento (momento máximo).

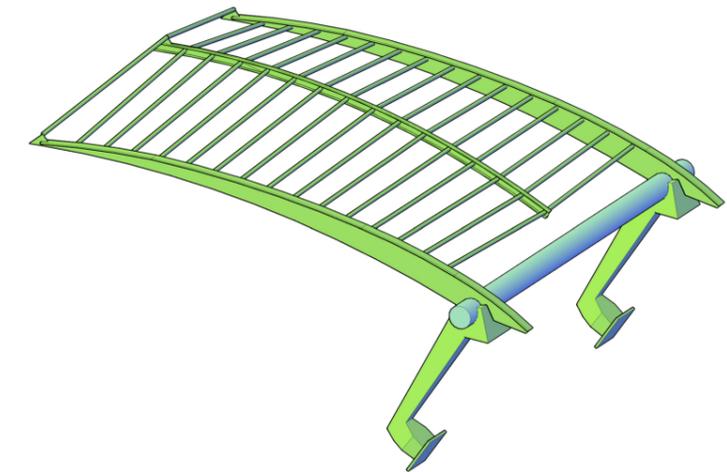
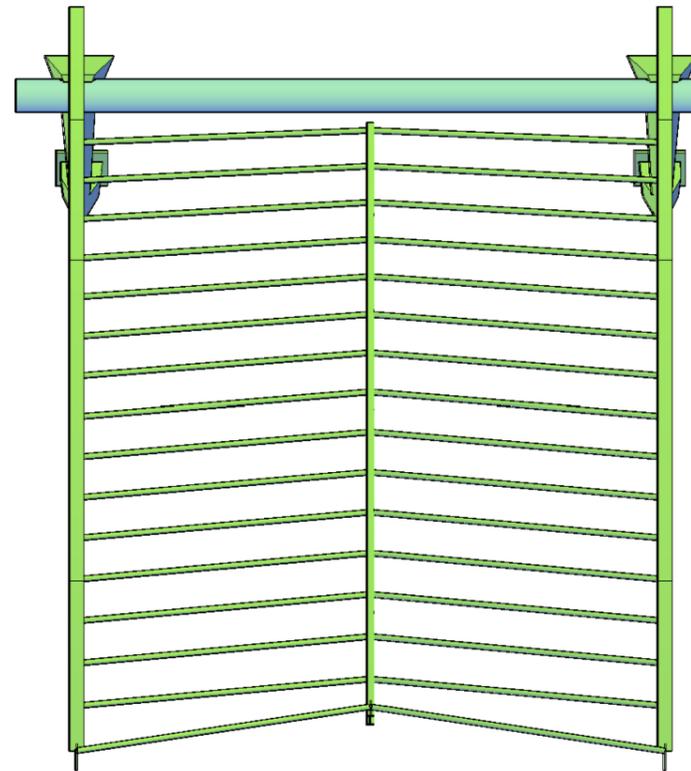
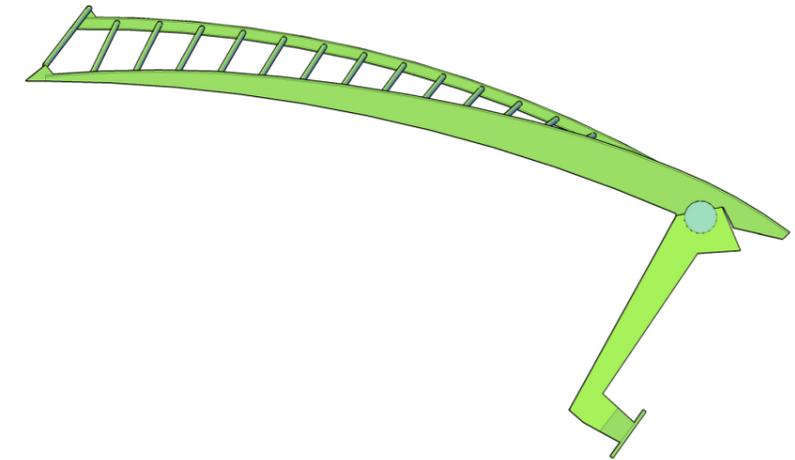
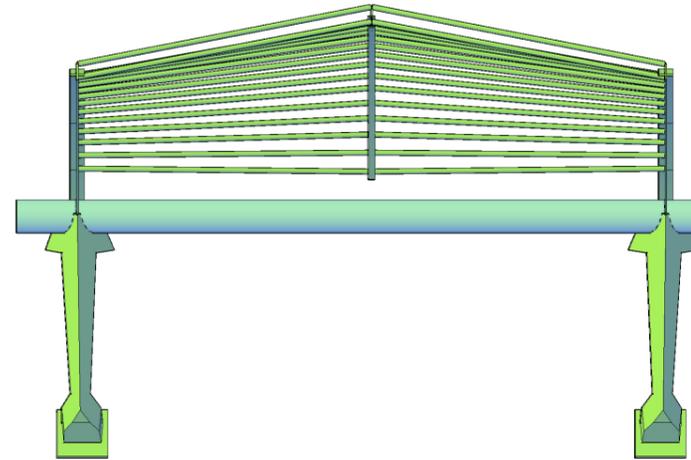
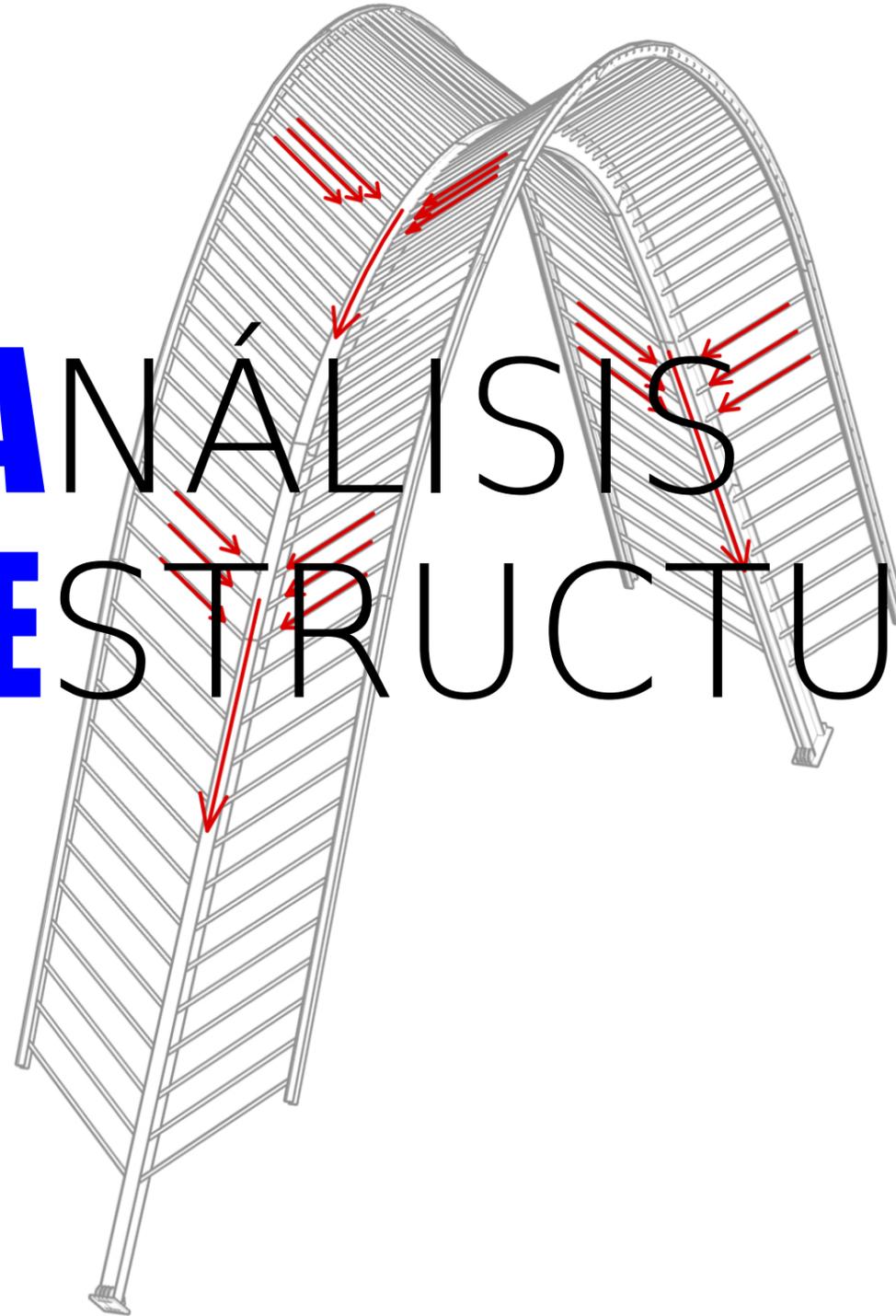


Figura 3.33



# 4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL





## HISTORIA DEL ARCO

En el mundo de la ingeniería, desde siempre ha habido una gran atracción por la forma curva del arco y su fenómeno resistente. Su aparente sencillez y la pureza de la línea que configura su forma encierra una estructura que se adapta perfectamente para resistir cargas y vencer grandes luces.

Sin embargo, no es la forma curva la cualidad fundamental del arco, pues lo esencial de esta estructura se encuentra en los esfuerzos longitudinales de contrarresto, que se visualizan en los empujes horizontales sobre los apoyos, pese a que las cargas externas sean verticales.

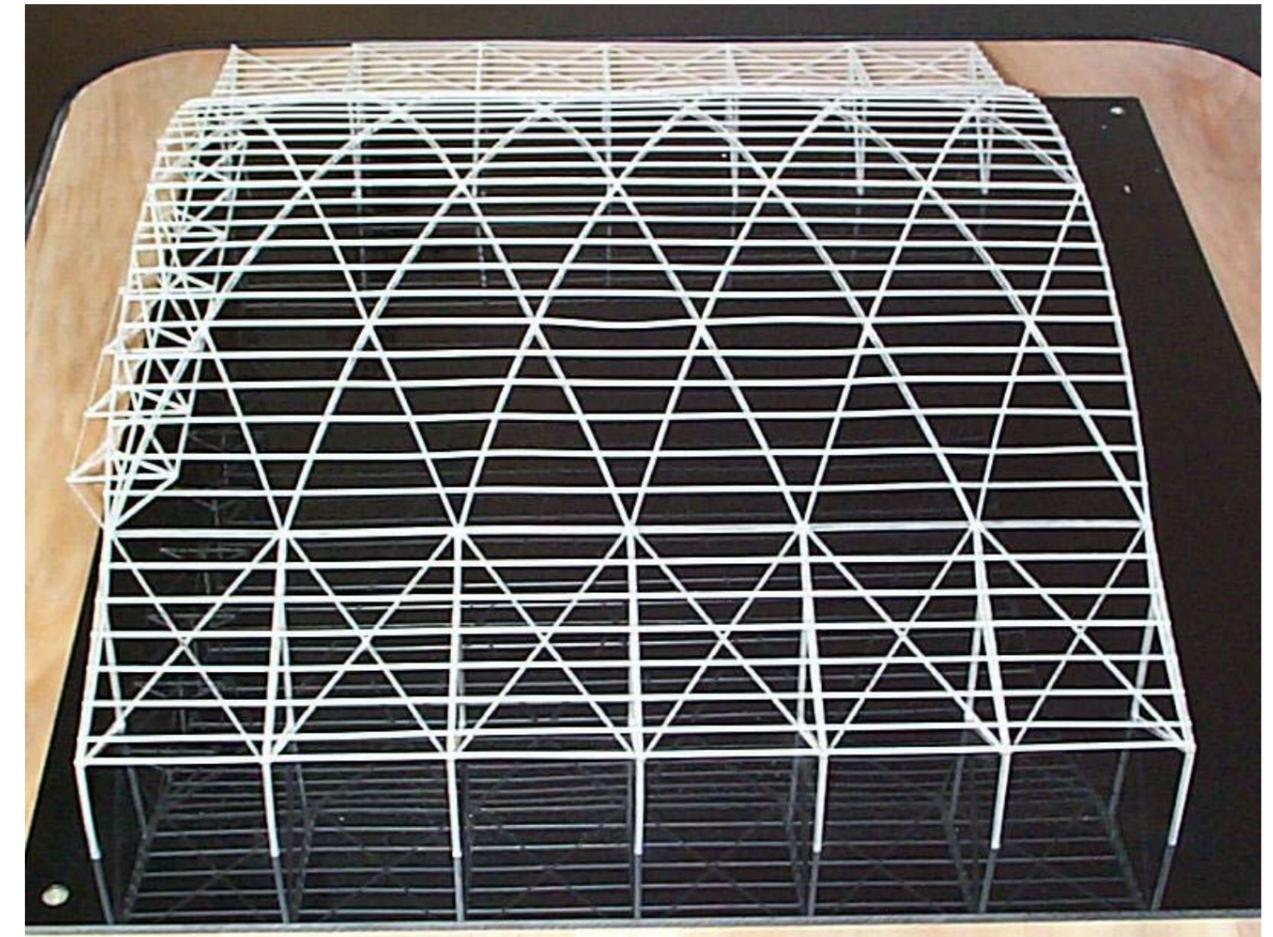
Existe una definición de arco, debida a Cayo Julio Lácer, el ingeniero romano que proyectó el puente de Alcántara en el año 106, grabada en la piedra del templete funerario, que recoge de una manera escueta el mecanismo resistente de estas estructuras: *Ars ubi materia vincitur ipsa sua* (En el arco la materia se vence a sí misma).



Inscripción en el templete funerario del puente de Alcántara (4.1)

Recuperando esta clásica definición de arco se procura hacer ver que el tema de los arcos no es ninguna novedad en el mundo de la ingeniería, pues desde siempre ha habido una gran atracción por el arco y su fenómeno resistente. Sin embargo, hasta bien entrado el siglo XIX no se aplicaron técnicamente los conceptos elementales de la estática gráfica, equilibrio y antifunicularidad.

Según el ingeniero Eduardo Torroja, “si la columna es arquitectura pura, el arco es ingeniería; o mejor dicho, para alejar toda interpretación profesional, si la columna es arte, el arco es técnica; sin que esto quiera decir, ni que a la columna le falte técnica, ni que el arco sea incapaz de vivísima expresión estética”



Maqueta del Hangar de Cuatro Vientos. Proyecto de E.Torroja (4.2)



### LA FORMA CURVA

A primera vista aparece como cualidad fundamental del arco su forma curva. Sin embargo, esto resulta insuficiente, pues si se apoya isostáticamente una barra arqueada sólo se dispondrá de una viga curva, no de un arco. Hay que considerar las condiciones de sustentación y entonces se encontrará lo esencial de la estructura arco, la existencia de esfuerzos longitudinales de contrarresto, que son los que determinan su forma.

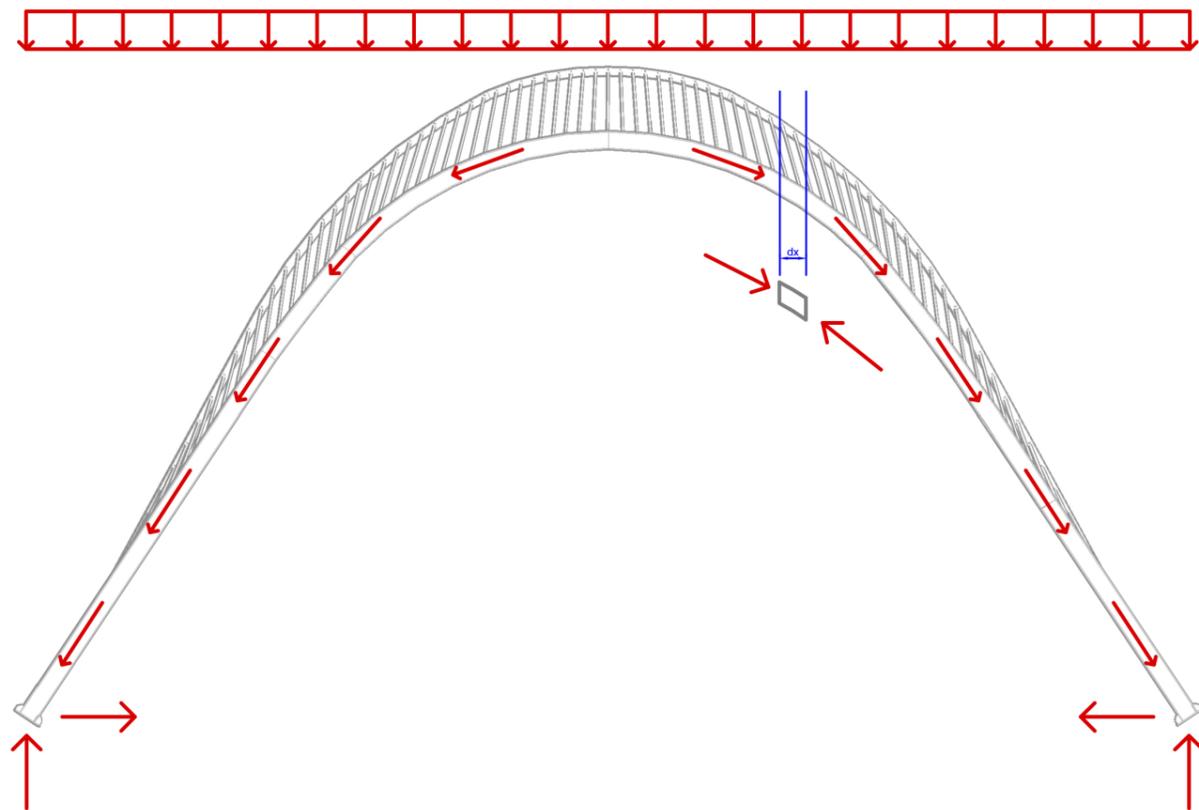


Figura 4.3

En edificación agroindustrial el uso del arco ya denota la búsqueda de una estética que se aleje de la mediocridad general en el diseño que rige este tipo de estructuras.



Bodegas Protos. (Valladolid) (4.4)



Winter Garden Sheffield (Yorkshire, Inglaterra) (4.5)

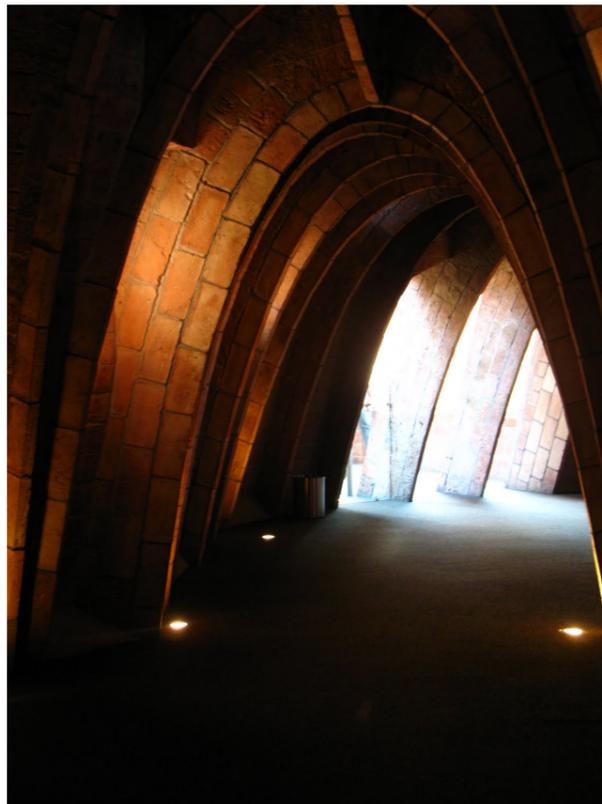


Al contrario que en las estructuras reticulares, cuya morfología queda determinada por las condiciones funcionales, en el arco imperan las condiciones estructurales, hasta tal punto que muchas veces la estructura ha de complementarse por exigencias de la función a que está destinada. Por consiguiente, como toda estructura lineal con libertad mecánica, el arco tiene la pretensión de ser configuración de esfuerzos, es decir, funicular de las fuerzas aplicadas.

Este tema de buscar la directriz correcta tiene especial relevancia cuando se trata de salvar grandes luces y fuertes cargas muertas.

Por este motivo la búsqueda de una directriz que se ajuste al funicular de una determinada combinación de cargas no ha tenido el mismo desarrollo en el campo de la edificación que en el campo de la construcción de puentes.

Para pesos propios del arco solamente y con espesor constante, el funicular es la catenaria, curva con la que Gaudí trabajó en gran parte de sus obras.



Vista de los arcos catenarios de la casa Mila (4.6)

En los arcos de cubierta, la sollicitación más desfavorable para las condiciones de funcionalidad de la directriz es la actuación de viento pues da lugar a una distribución continua de cargas con presiones y succiones que se aproxima mucho a la distribución asimétrica. Como además éstas se invierten al invertir el sentido de actuación del viento, se tienen siempre momentos flectores de importancia.

En el caso del Umbracle la importancia de las cargas variables del viento no son muy relevantes debido a la ligereza del diseño estructural de éste.

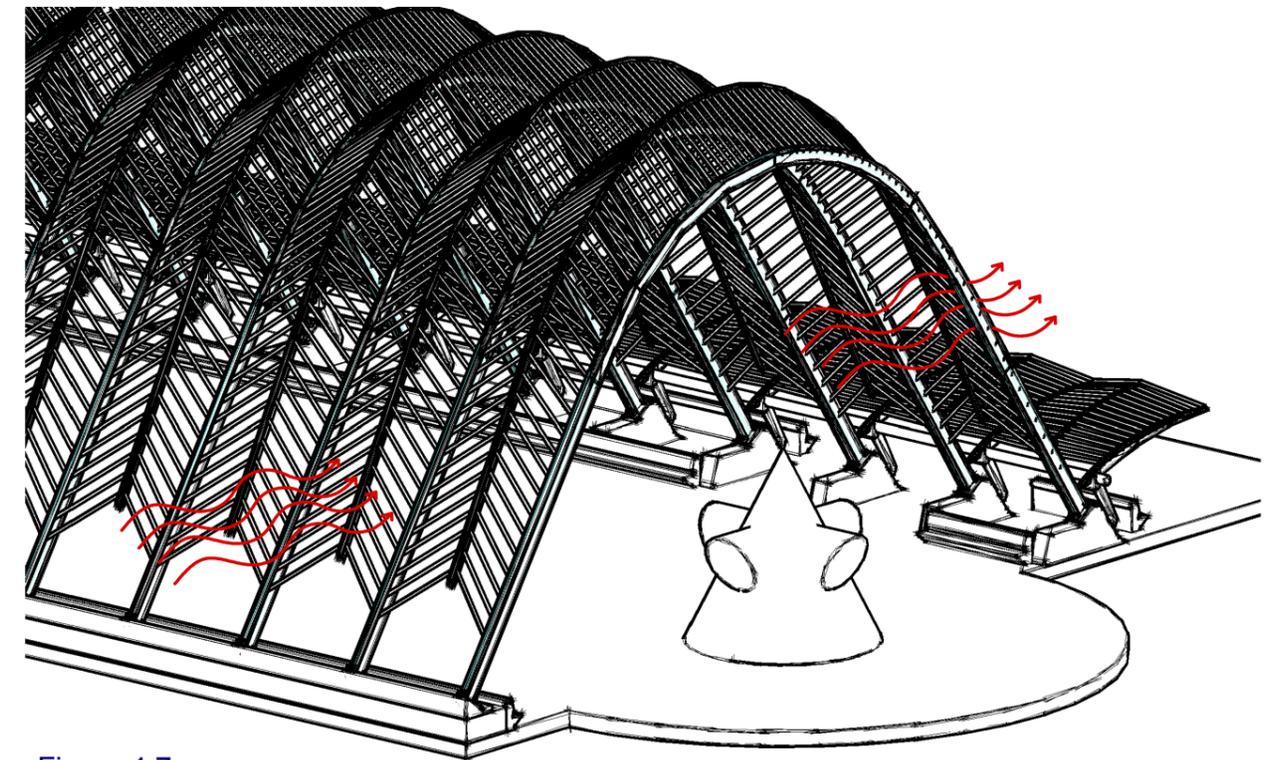


Figura 4.7



MODULO DE CUBIERTA ACOTADO

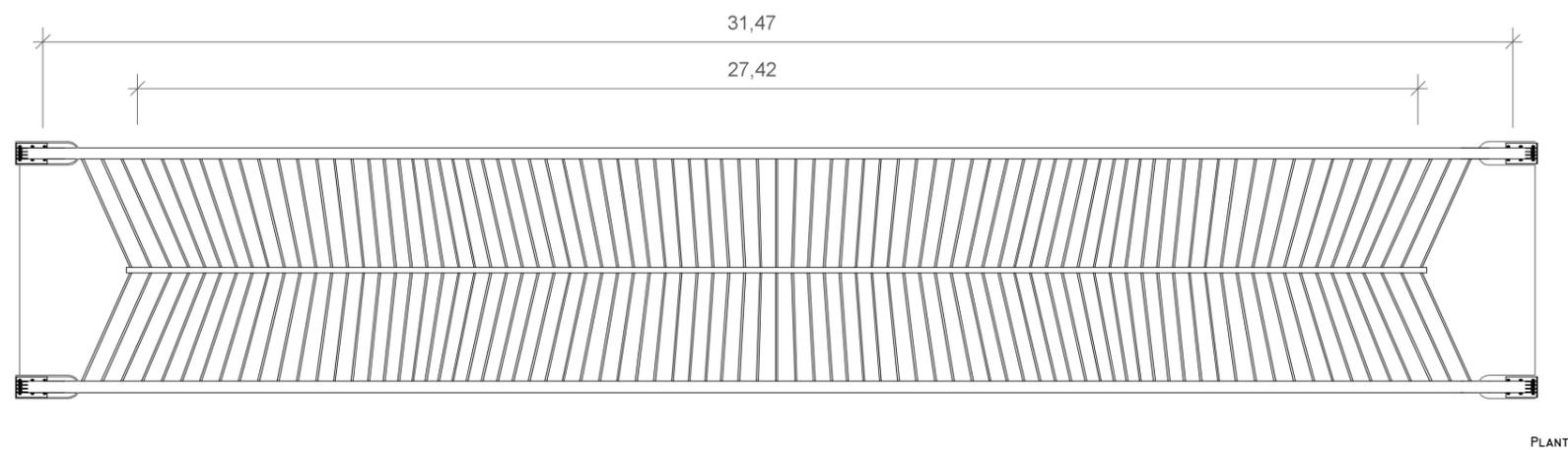
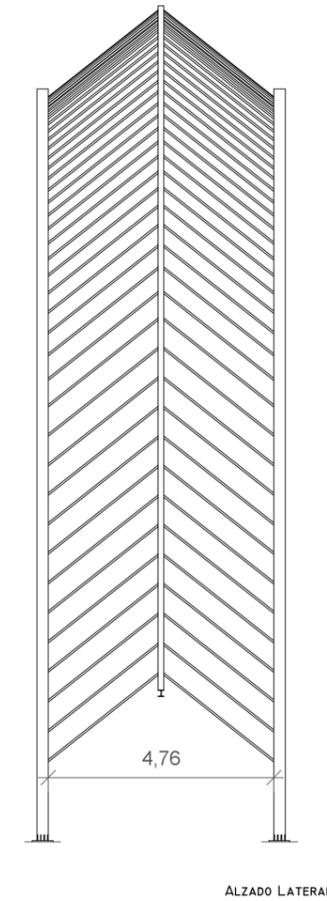
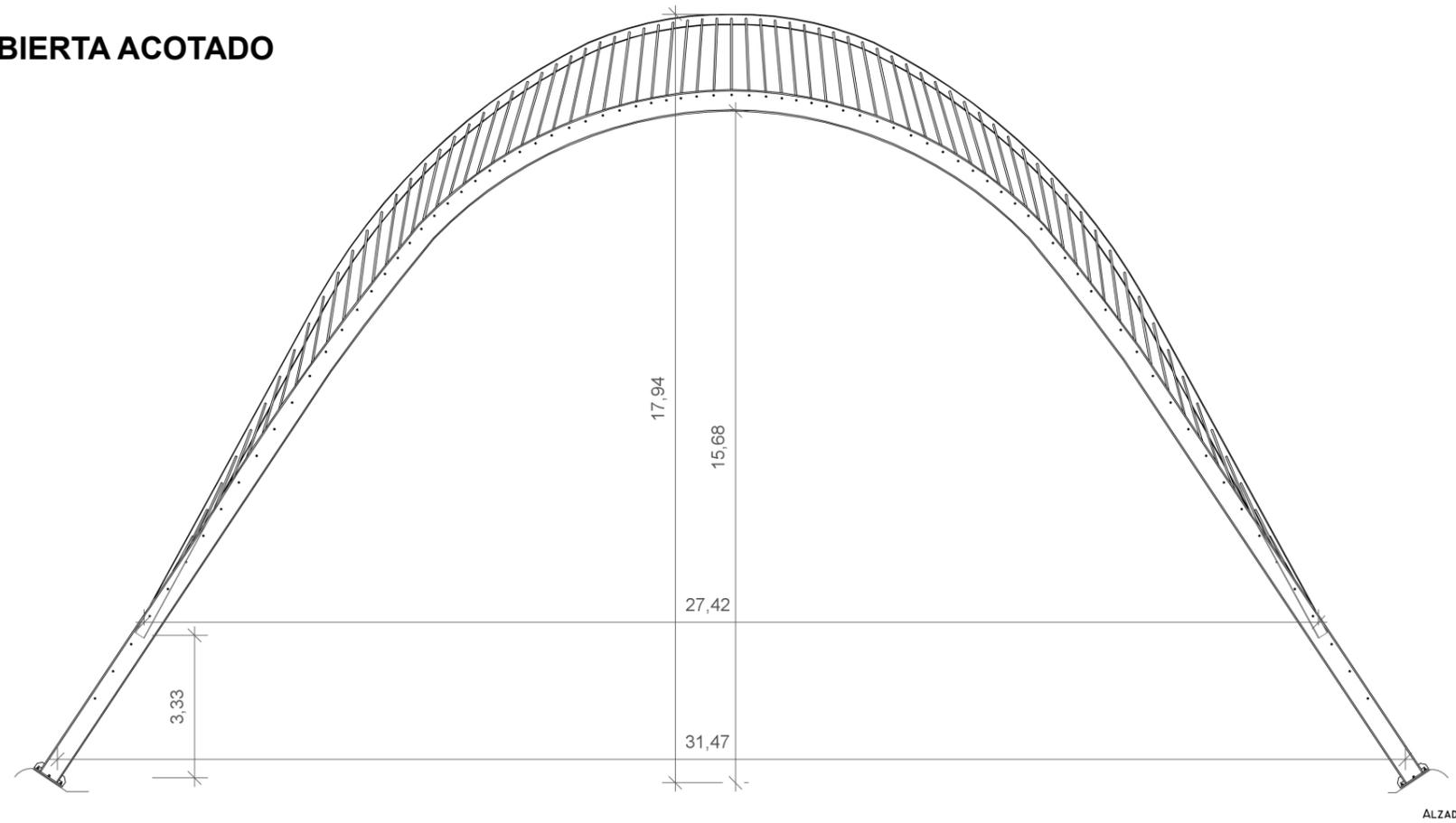


Figura 4.8



### SISTEMA ESTRUCTURAL ARCOS

El arco doblemente empotrado es un sistema hiperestático de tercer grado, con tres reacciones superabundantes. Como las reacciones vienen definidas por seis valores diferentes, se precisan tres ecuaciones para complementar las tres que proporciona la Estática. Estas expresiones han de recoger las condiciones de deformabilidad debidas al sistema de sustentación, es decir, las ecuaciones de deformación ligadas a los extremos empotrados.

Las condiciones derivadas de los extremos empotrados son tres:  
Invariabilidad de la luz, ausencia de desnivelación entre apoyos y que el giro relativo de las dos secciones extremas es nulo.

Para el estudio de la estructura haremos una simplificación de los arcos parabólicos siguiendo su directriz, y aplicando la simbología clásica para apoyos empotrados.

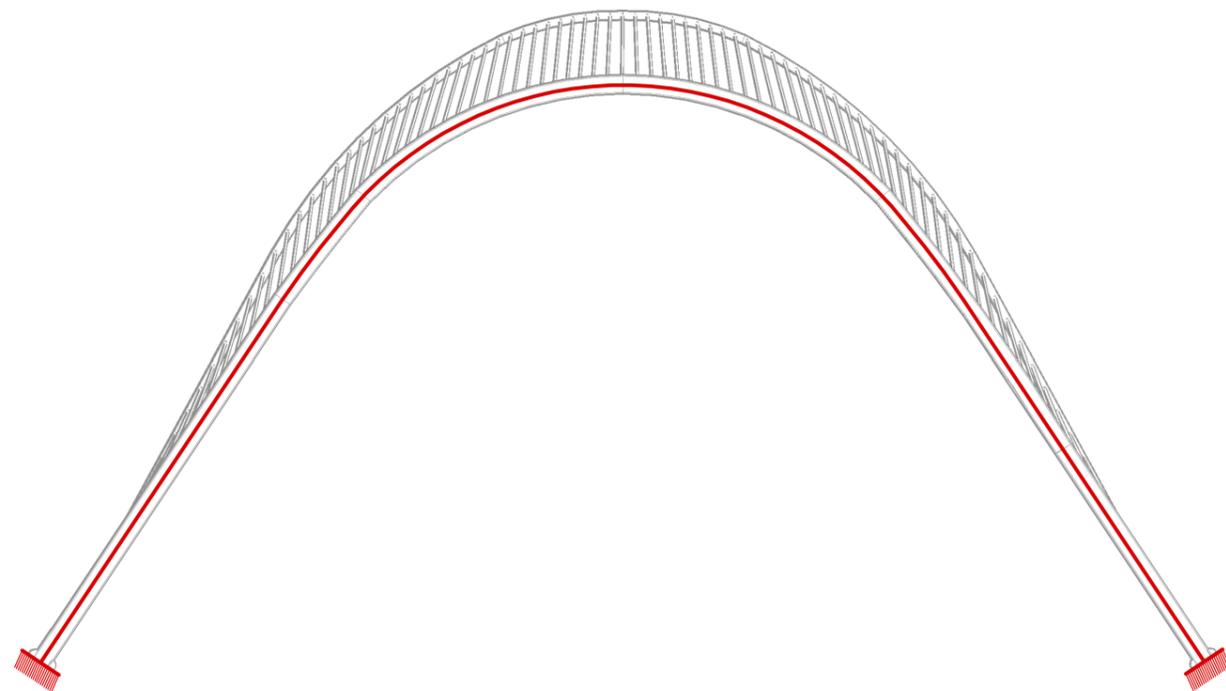


Figura 4.9

La estructura esta calculada como hiperestática, es decir, que necesita más elementos de los necesarios para mantenerse estable; la supresión de uno de ellos no conduce al colapso, pero modifica sus condiciones de funcionamiento estático.

Estos elementos que cuartan los posibles movimientos de la estructura son los apoyos. Los apoyos se han realizado en hormigón y la unión entres estos y los arcos se ha realizado mediante platabanda de acero unida por medio de doce tornillos, con lo que se asegura la transmisión de cargas de la manera proyectada, es decir como apoyo empotrado y no rótula o apoyo móvil.



Imágenes apoyos de los arcos (4.10)

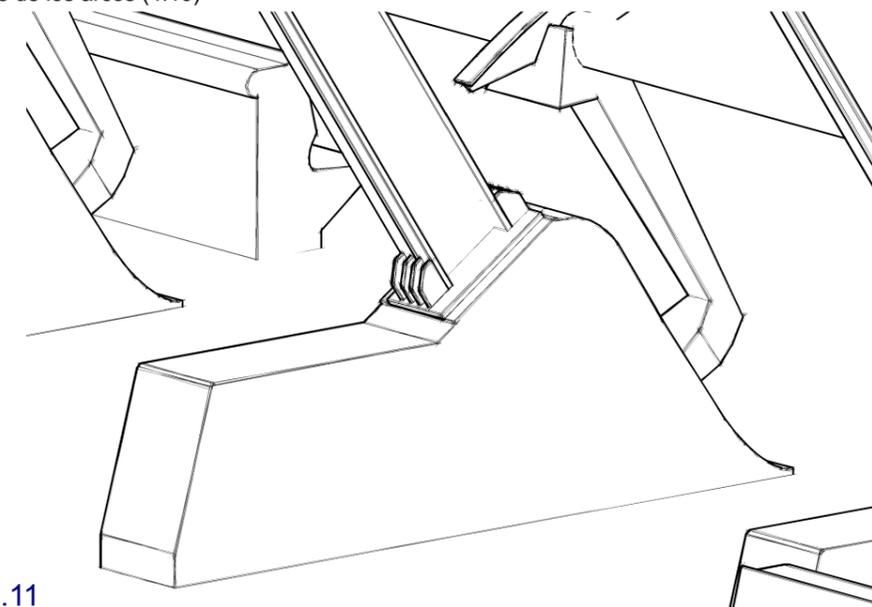


Figura 4.11



### HIPÓTESIS DE CÁLCULO ESTRUCTURAL

-Los arcos flotantes descargan sus cargas variables y su peso propio sobre los arcos fijos.  
La mitad de las cargas de dos arcos flotantes sobre un arco fijo, es decir las cargas variables y el peso propio de un arco flotante por cada arco fijo.

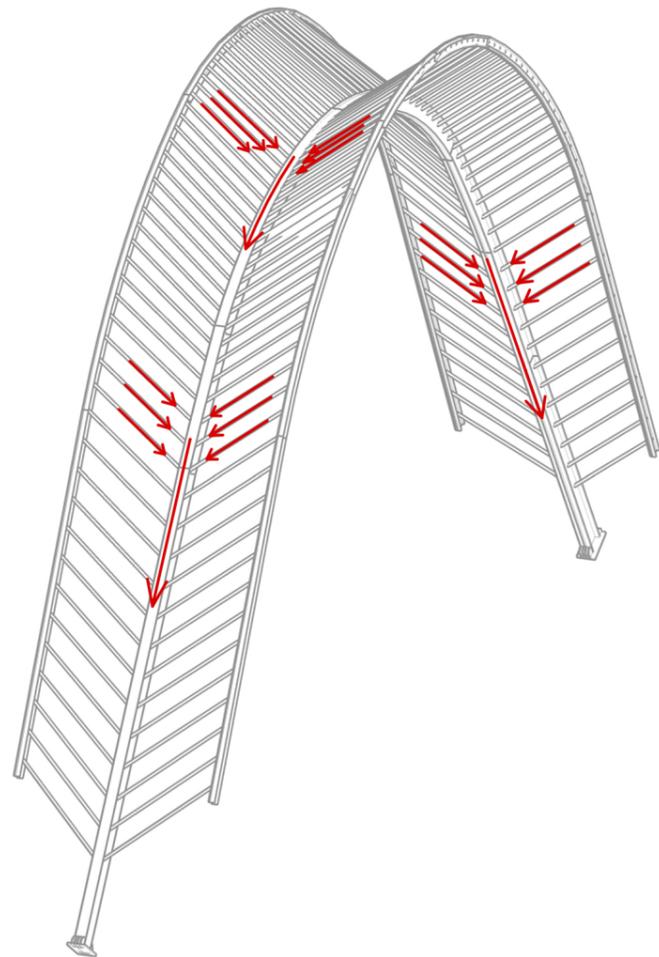


Figura 4.12

-Los arcos flotantes a través de los perfiles circulares descargan su carga en los arcos fijos de forma oblicua. Ésto genera componentes verticales y horizontales de carga.  
Las componentes horizontales se anulan ya que acometen en los arcos fijos en el mismo punto con la misma magnitud pero dirección enfrentada dos a dos.

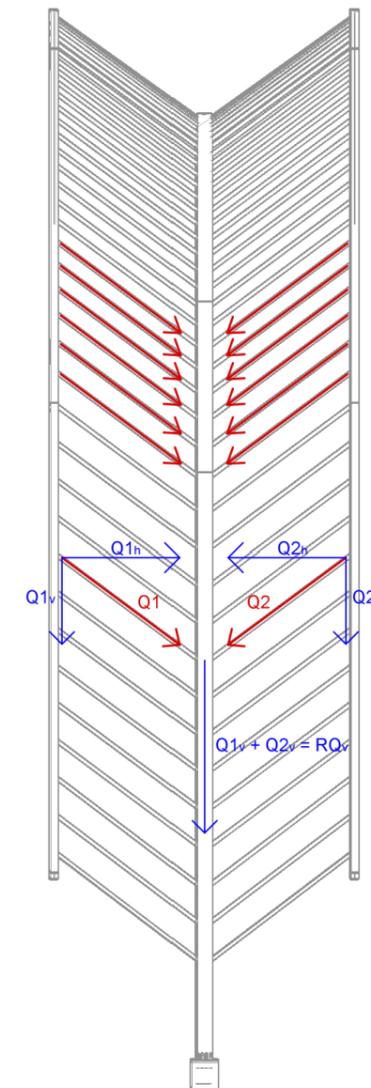


Figura 4.13



-El empuje sobre los empotramientos es proporcional a la carga y al cuadrado de la luz, e inversamente proporcional a la altura del arco. Para obtener el empuje mínimo con una determinada luz a cubrir, el arco debe ser lo más liviano posible y su altura, la mayor económicamente factible.

-La existencia de empujes reduce los momentos flectores del arco con respecto a los que existirían en la viga de igual luz, creando en aquél un régimen predominante de compresiones, mucho más favorable que el de flexión simple típico de las vigas.

-Estos empujes requieren una buena cimentación o unos buenos contrarrestos, que en el caso de arcos de cubierta implica el dimensionar y reforzar adecuadamente los soportes sobre los que arrancan los arcos, por los importantes esfuerzos que transmiten. Podría lograrse el mismo efecto atirantando el arco, pero el hecho de colocar un tirante a un arco conlleva una pérdida importante de la estética que acompaña a esta estructura.

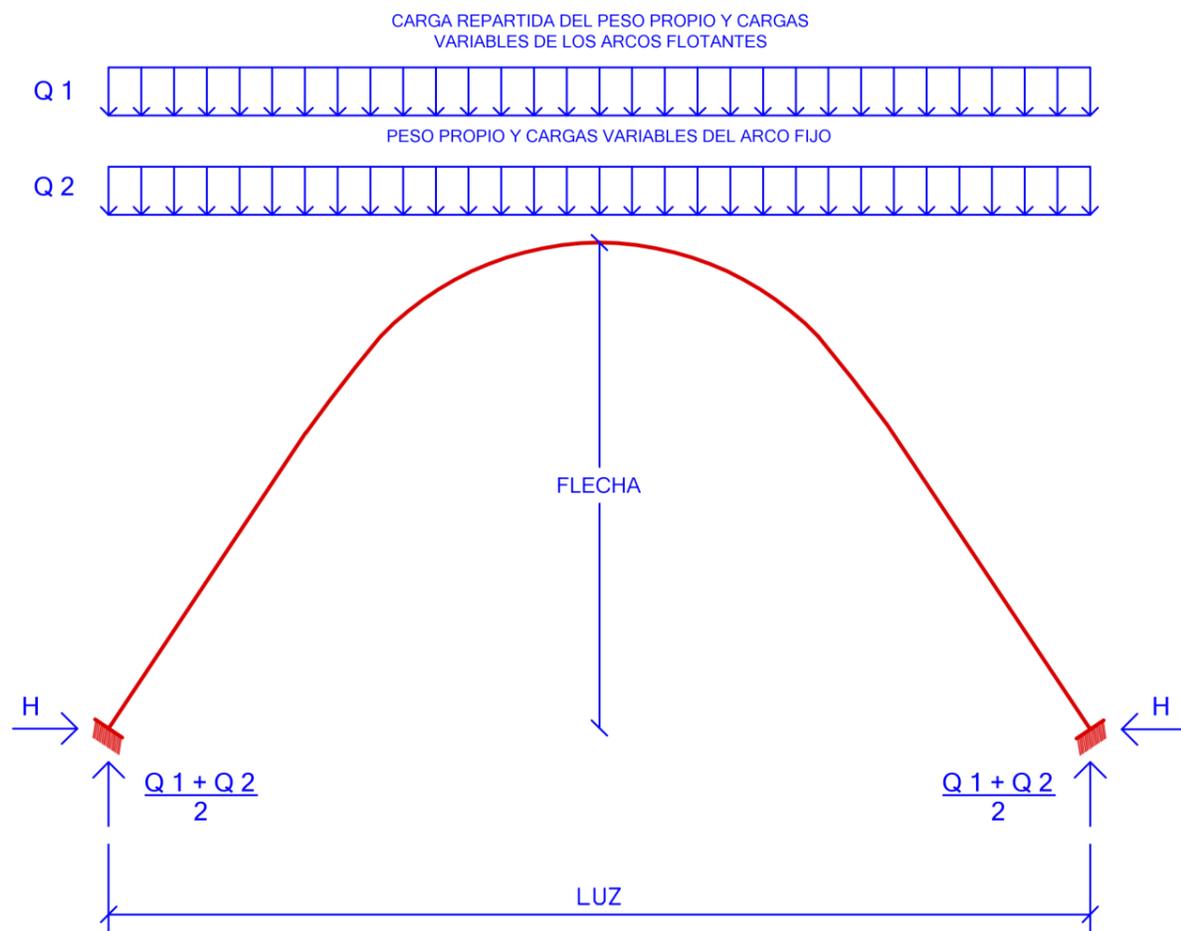


Figura 4.14

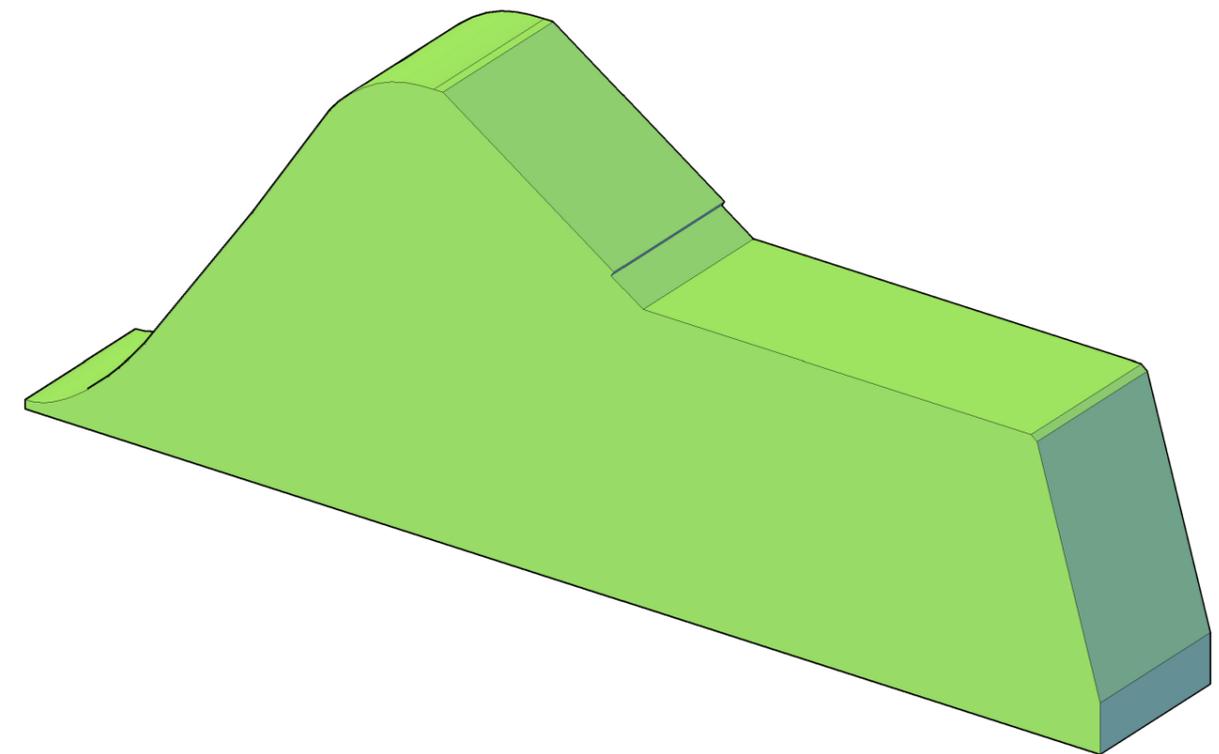


Figura 4.15



APOYO FIJO DEL ARCO

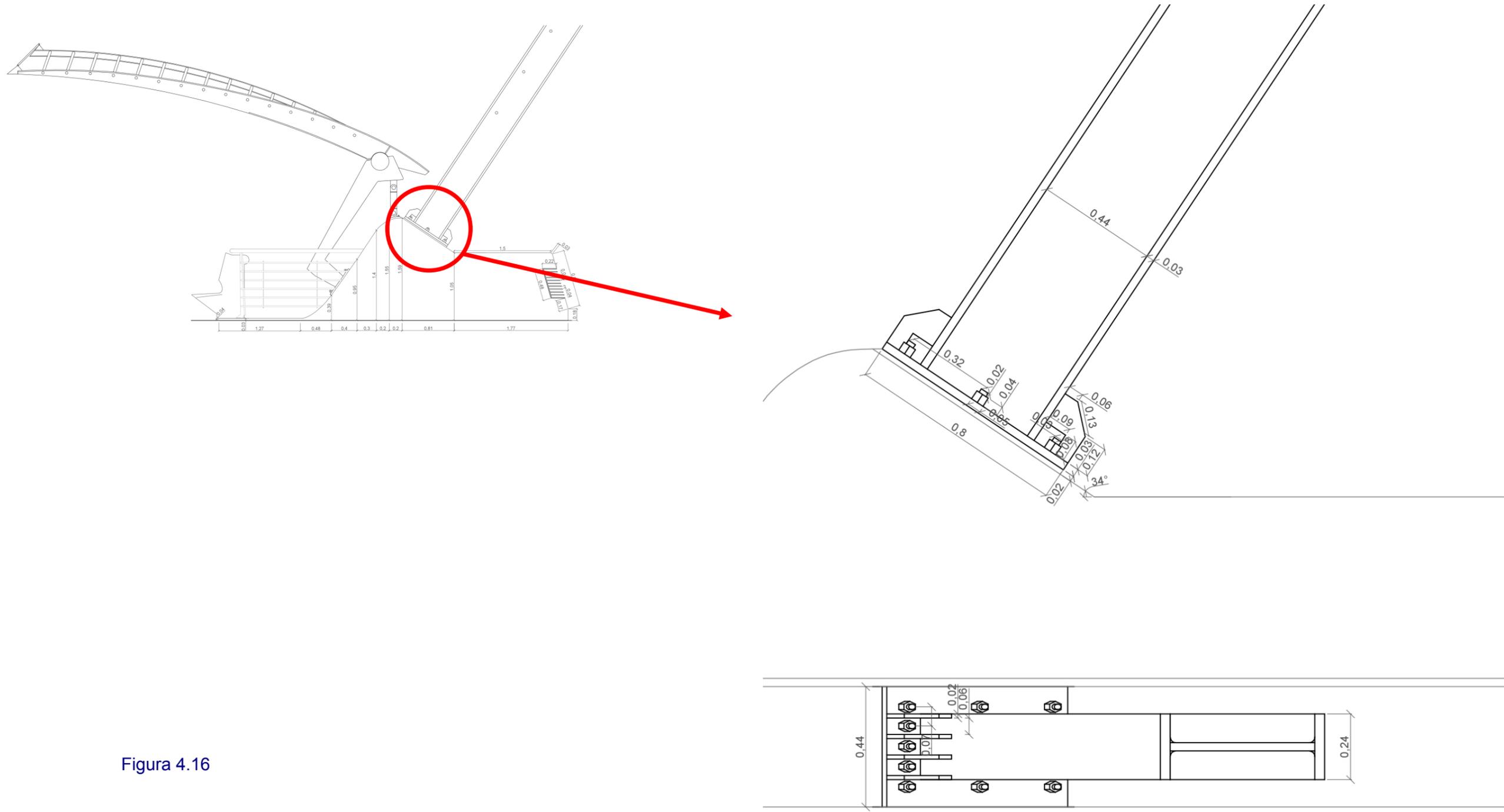


Figura 4.16



-La hipótesis fundamental para el estudio de los arcos es que su curvatura es pequeña en comparación con las dimensiones transversales de su sección, o lo que es lo mismo, que el radio de curvatura es mucho mayor que el canto de la sección.

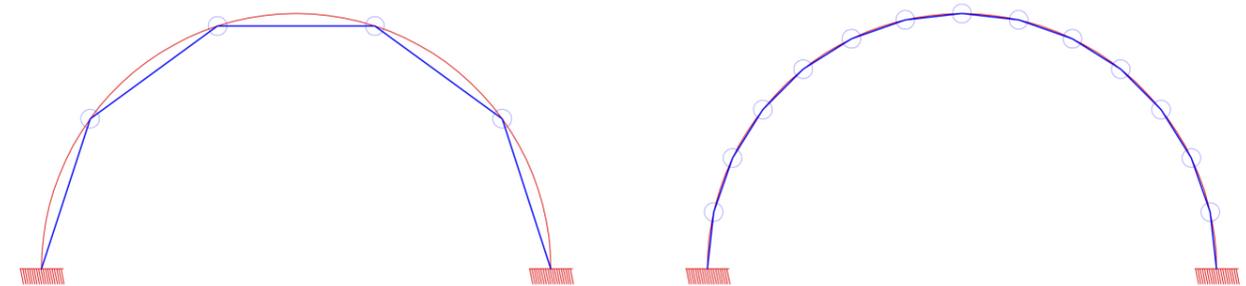
-Existen numerosos métodos para el cálculo de arcos.  
En la actualidad y más para un obra de carácter emblemático como el Umbracle el método utilizado es el método de los elementos finitos.

### METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

De forma muy resumida el método de los elementos finitos consiste en el desarrollo de un modelo, denominado elemento de pórtico plano, en el que previamente se realiza una discretización del arco en elementos rectos. El elemento de pórtico plano se ha determinado siguiendo los modelos de Timoshenko y de Euler-Bernoulli, obteniéndose todas las expresiones que se resumen en la matriz de rigidez completa del elemento.

Por último se analiza el pandeo de estas estructuras, comenzando por estudios empíricos para arcos concretos y continuando con la generalización y estudio del pandeo global mediante autovalores, obteniéndose la matriz de rigidez geométrica del arco.

Todo este análisis teórico se plasma en la realización de aplicaciones informáticas para el estudio de las estructuras.



Aproximación a la geometría real de un arco cualquiera con diferente número de elementos rectos. (4.17)



MARQUESINA ACOTADA

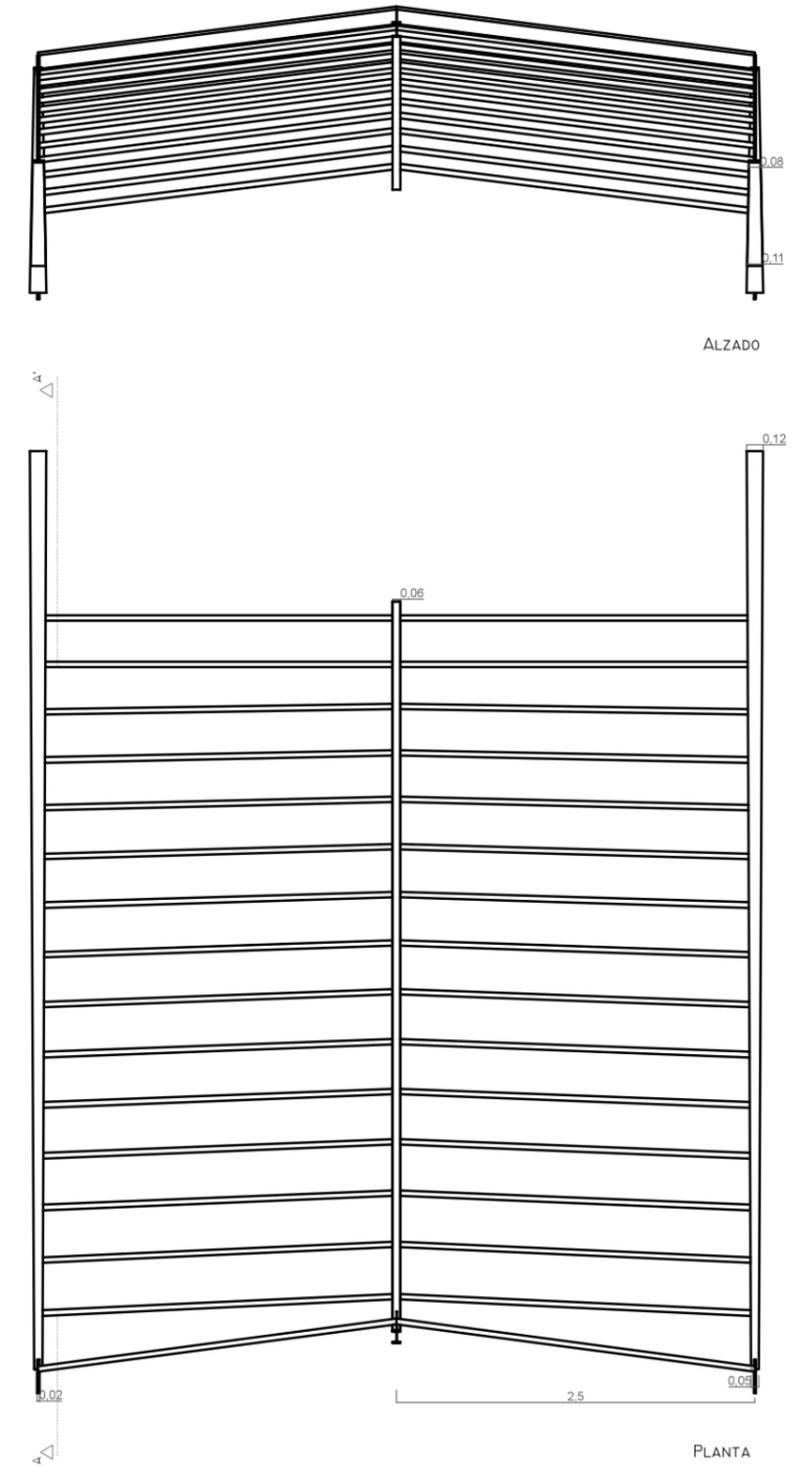
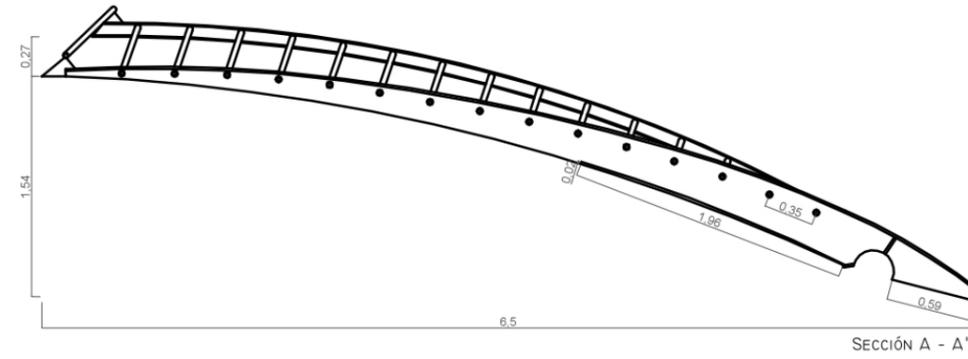


Figura 4.18



### SISTEMA ESTRUCTURAL MARQUESINA

La marquesina que recorre el paseo por la cara norte del paseo de Umbracle al igual que la estructura de cubierta esta compuesta por una consecución de arcos fijos y flotantes que descargan su peso sobre los anteriores.

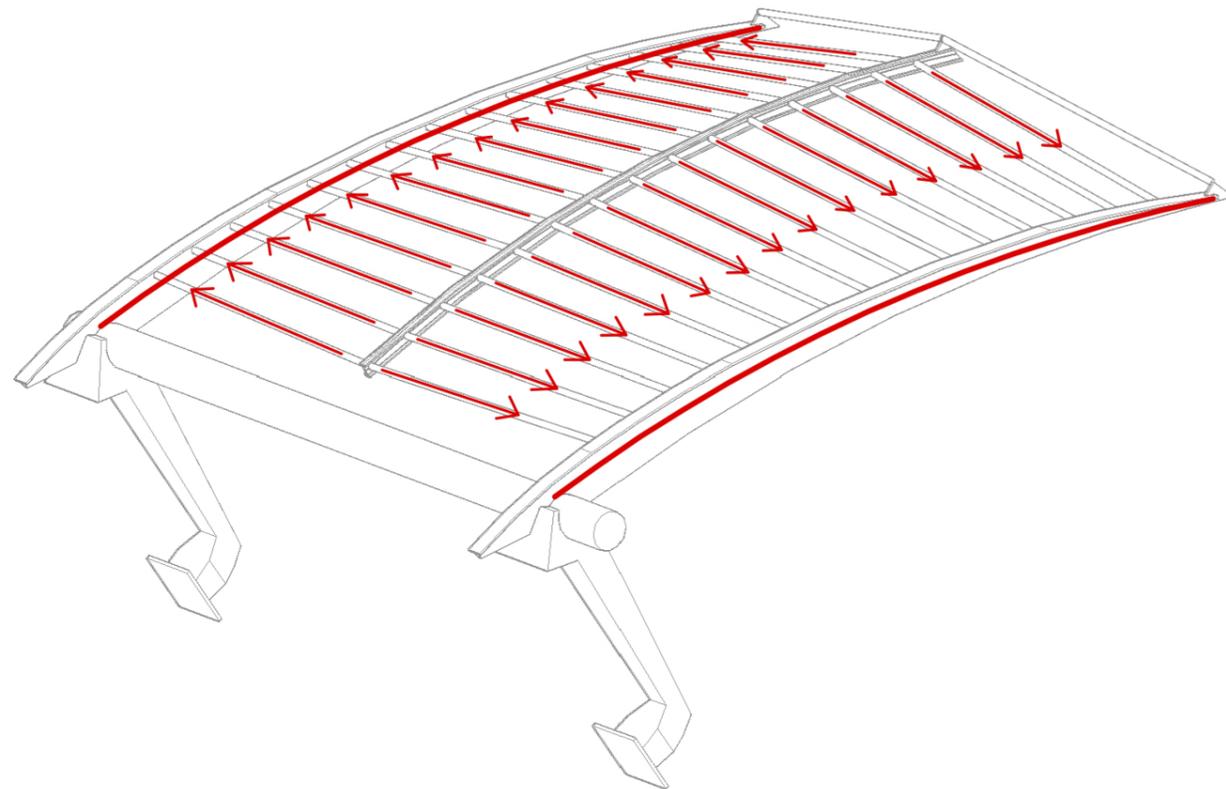


Figura 4.19

Análogamente a la estructura de arcos de la cubierta los arcos de la marquesina transmiten las cargas a través de unos soportes especiales a los mismos apoyos de donde arrancan los arcos fijos de la cubierta en su extremo norte. Como se ha mencionado antes estos apoyos se consideran como empotrados ya que cuartan todos los movimientos posibles.

Para saber si trabaja como una ménsula debemos fijarnos en si existe algún tipo de articulación en la unión entre los arcos y las piezas especiales o entre las piezas especiales y el apoyo.

### UNION ENTRE LA MARQUESINA Y LAS SOPORTES ESPECIALES

Se realiza mediante soldadura, lo que garantiza la rigidez y la transmisión de cargas. Para lograr una mayor rigidez y que el conjunto de arcos trabaje de manera más uniforme se ha optado por coser todos los arcos a lo largo del paseo con un cilindro de acero de sección hueca que también se une a la marquesina y a las piezas especiales mediante soldadura.



Detalles de la unión entre la marquesina y la pieza especial de soporte. (4.20)



SOPORTE ESPECIAL DE LA MARQUESINA

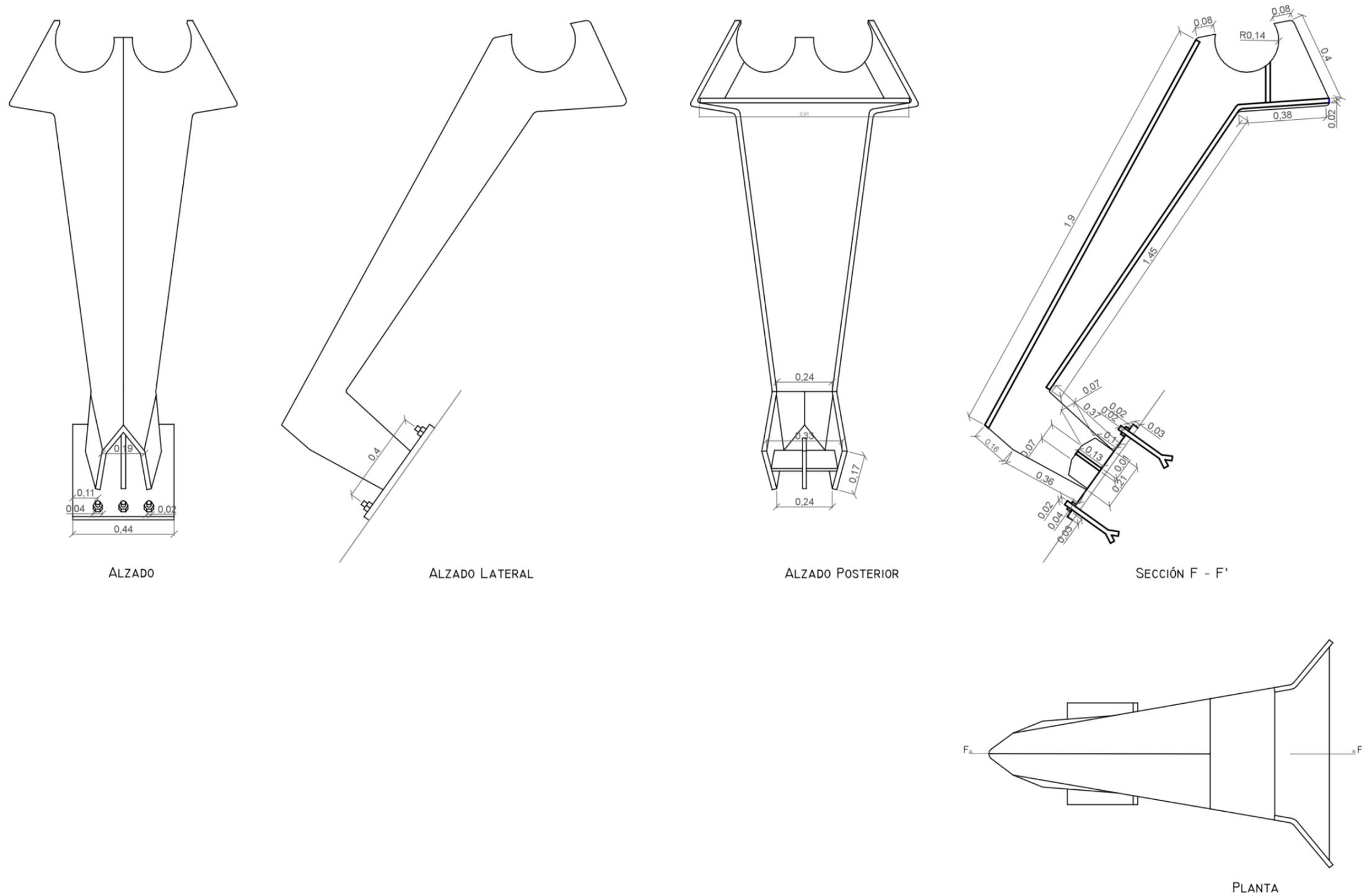


Figura 4.21



### UNION ENTRE EL SOPORTE DE LA MARQUESINA Y EL APOYO.

Esta unión se ha solucionado de igual forma que la unión entre los arranques de los arcos de la cubierta y los apoyos.

Se ha usado una platabanda de acero soldada al soporte especial y fijada mediante seis tornillos al apoyo de hormigón blanco.



Detalles de la unión entre el soporte de la marquesina y el apoyo. (4.22)

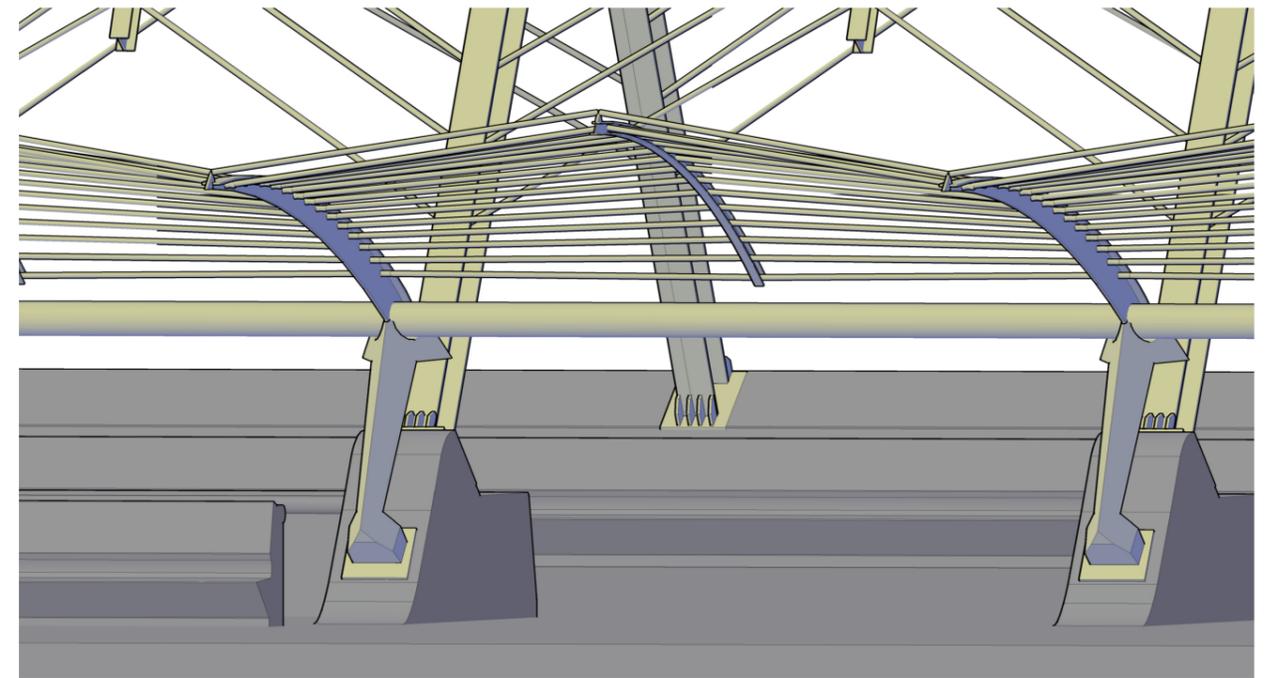
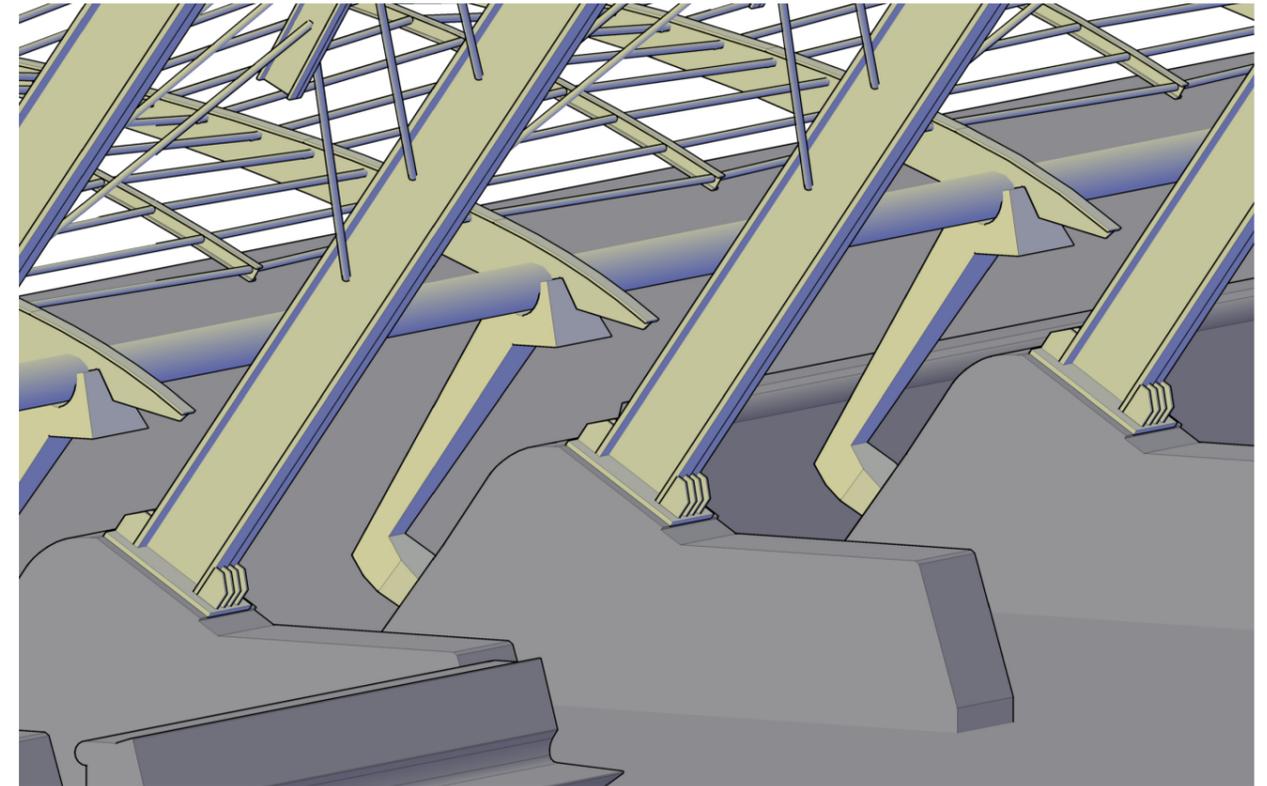


Figura 4.23



SISTEMA DE ANCLAJE DE LA ESTRUCTURA AL APOYO ACOTADO

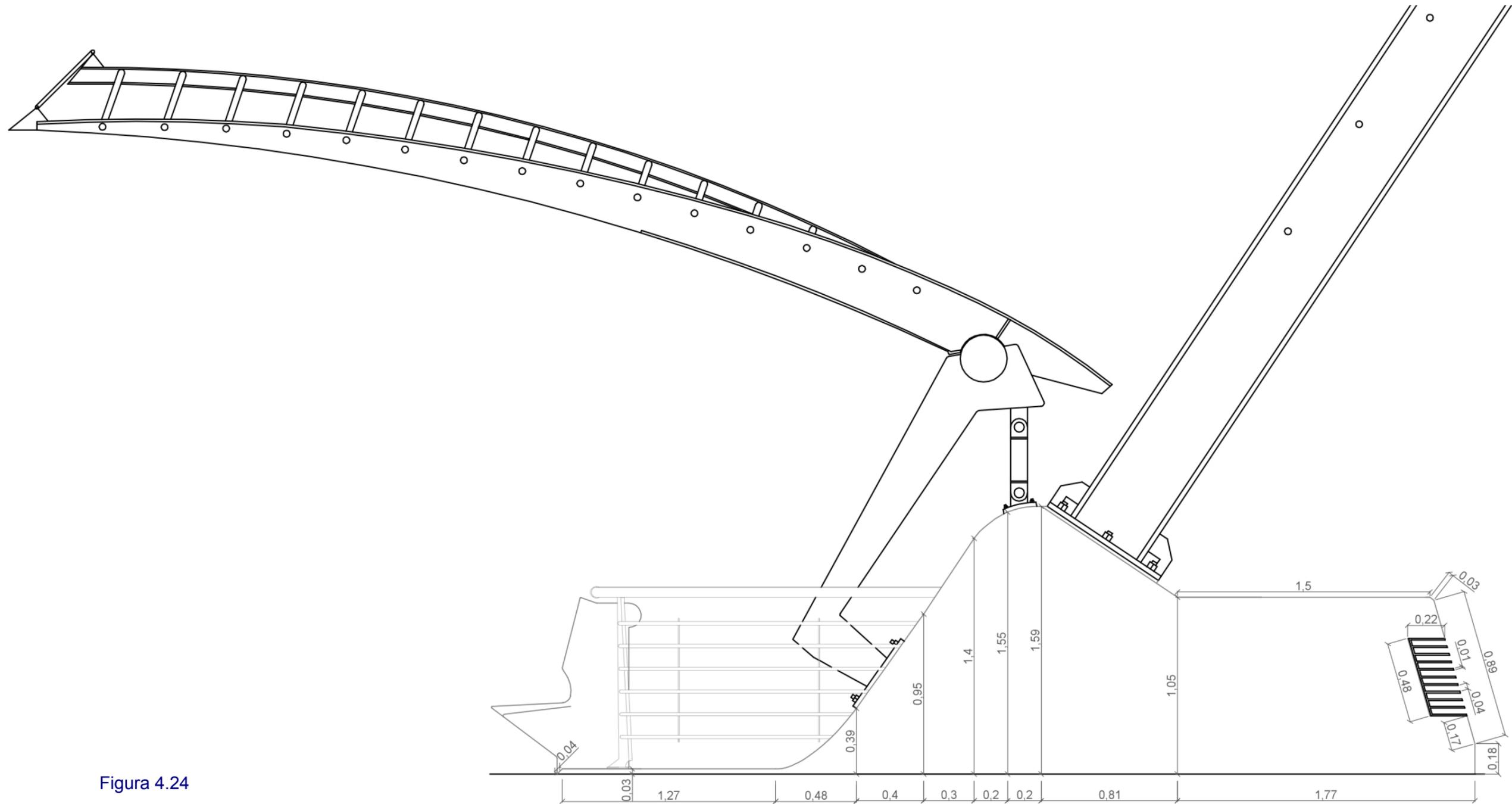


Figura 4.24



APOYO BIARTICULADO DEL SOPORTE ESPECIAL

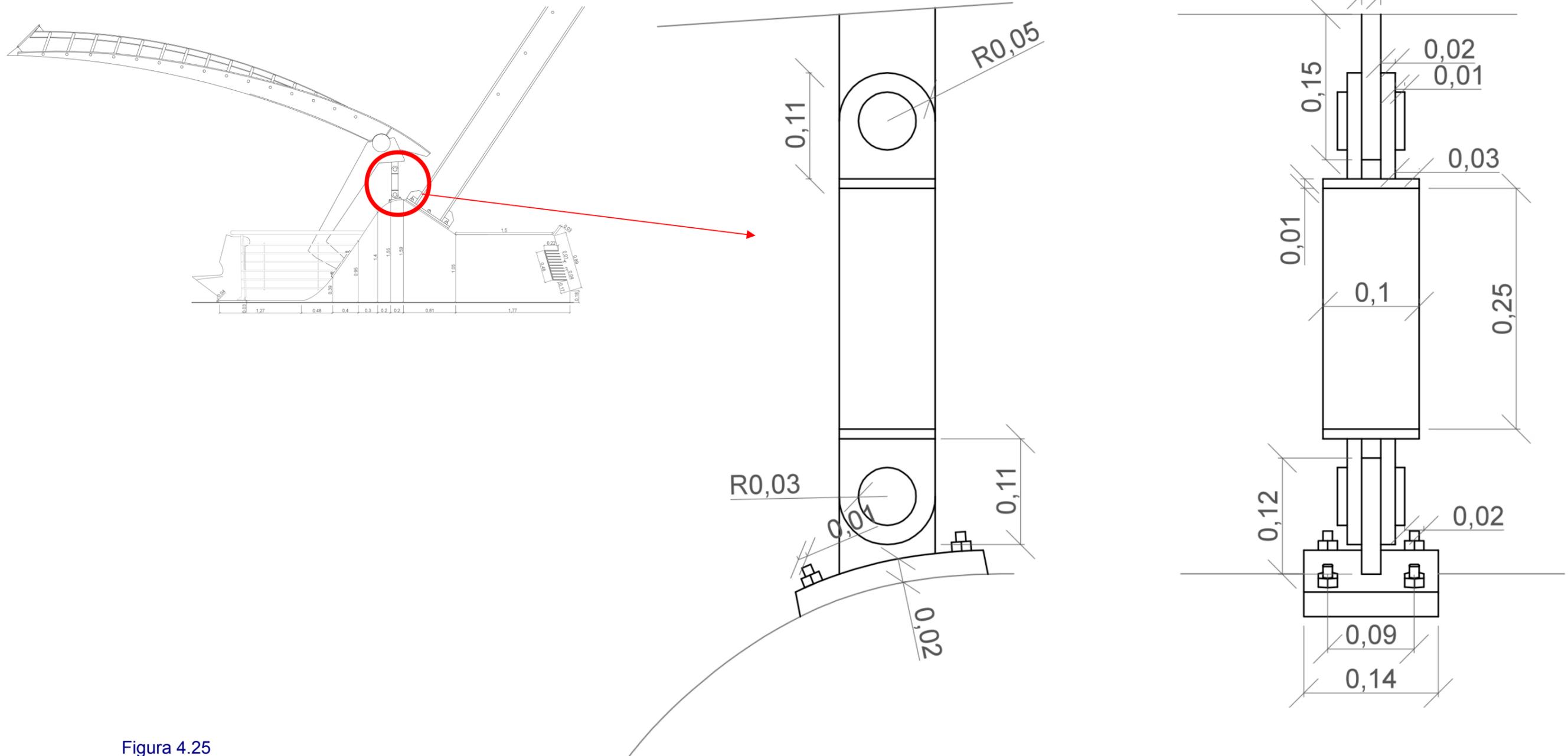


Figura 4.25



### HIPÓTESIS DE CÁLCULO DE LA MARQUESINA

Igual que en los arcos de la cubierta, los arcos flotantes descargan su peso propio y cargas variables en los arcos fijos.

Cada arco flotante descarga la mitad de las cargas hacia un arco fijo. Como a cada arco fijo acometen dos arcos flotantes, la resultante son las cargas completas de un arco flotante por cada arco fijo.

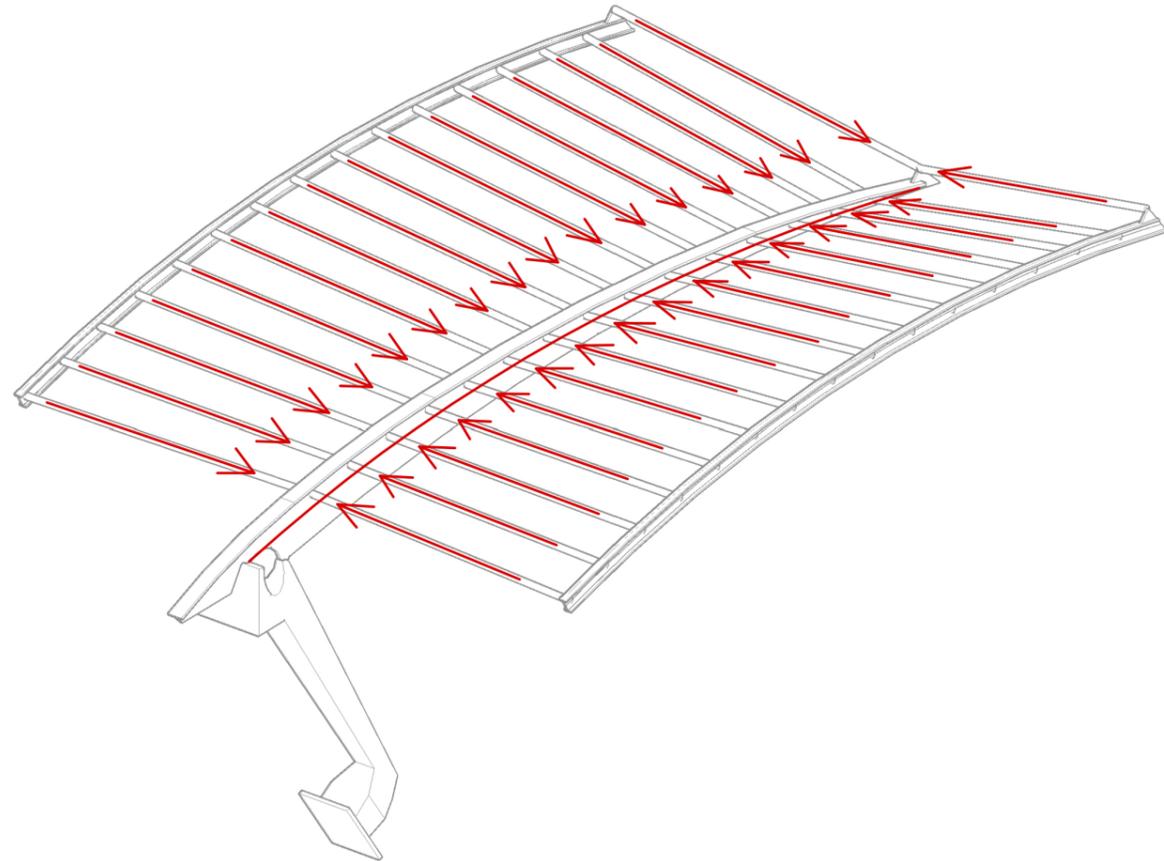


Figura 4.26

-La cargas de los arcos flotantes se traspan a los arcos fijos en forma de carga uniformemente repartida en sentido vertical.  
Las cargas horizontales que se generan por el ángulo de incidencia de las cargas se consideran nulas ya que se contrarrestan entre los arcos flotantes dos a dos en cada arco fijo.

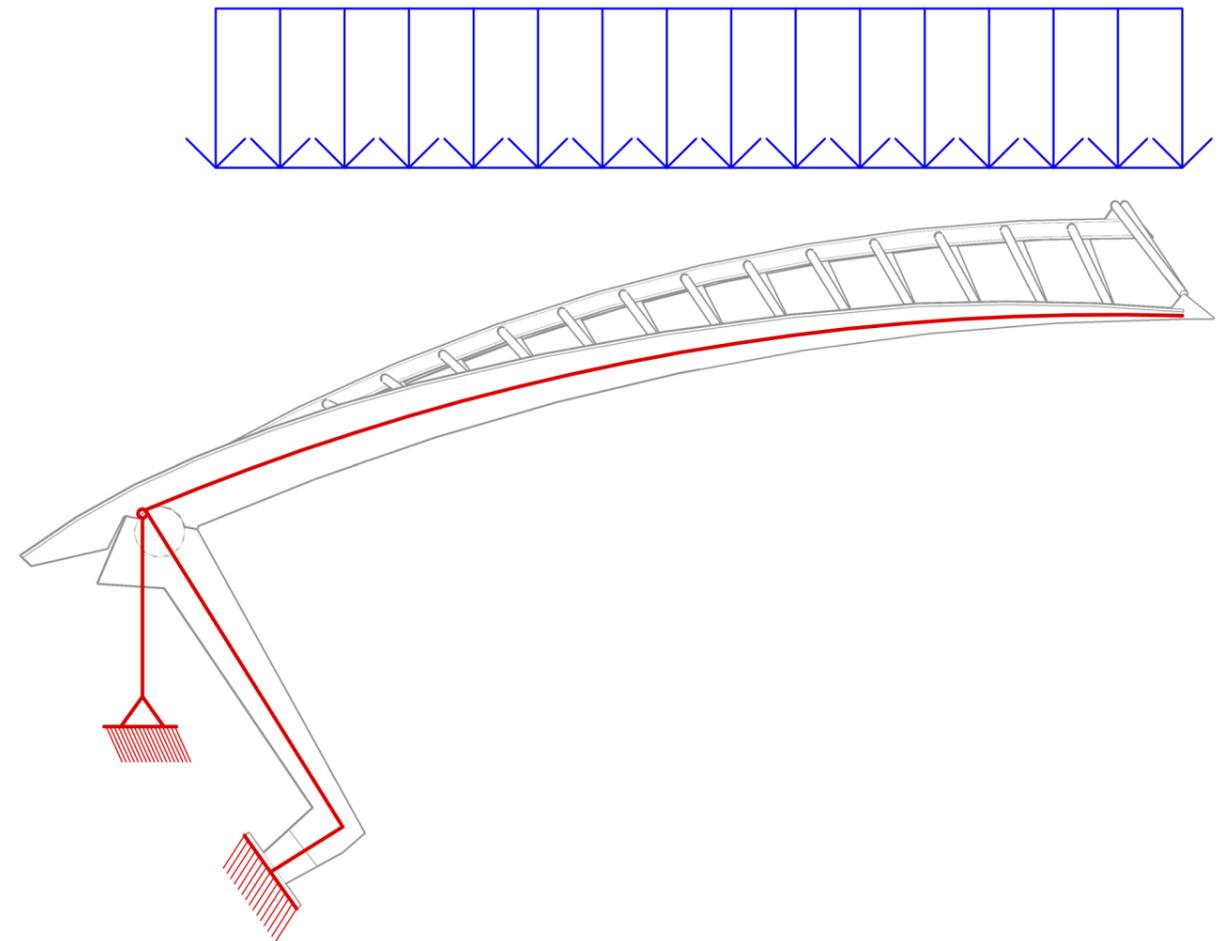


Figura 4.27



**SIMPLIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA PARA EL CALCULO**

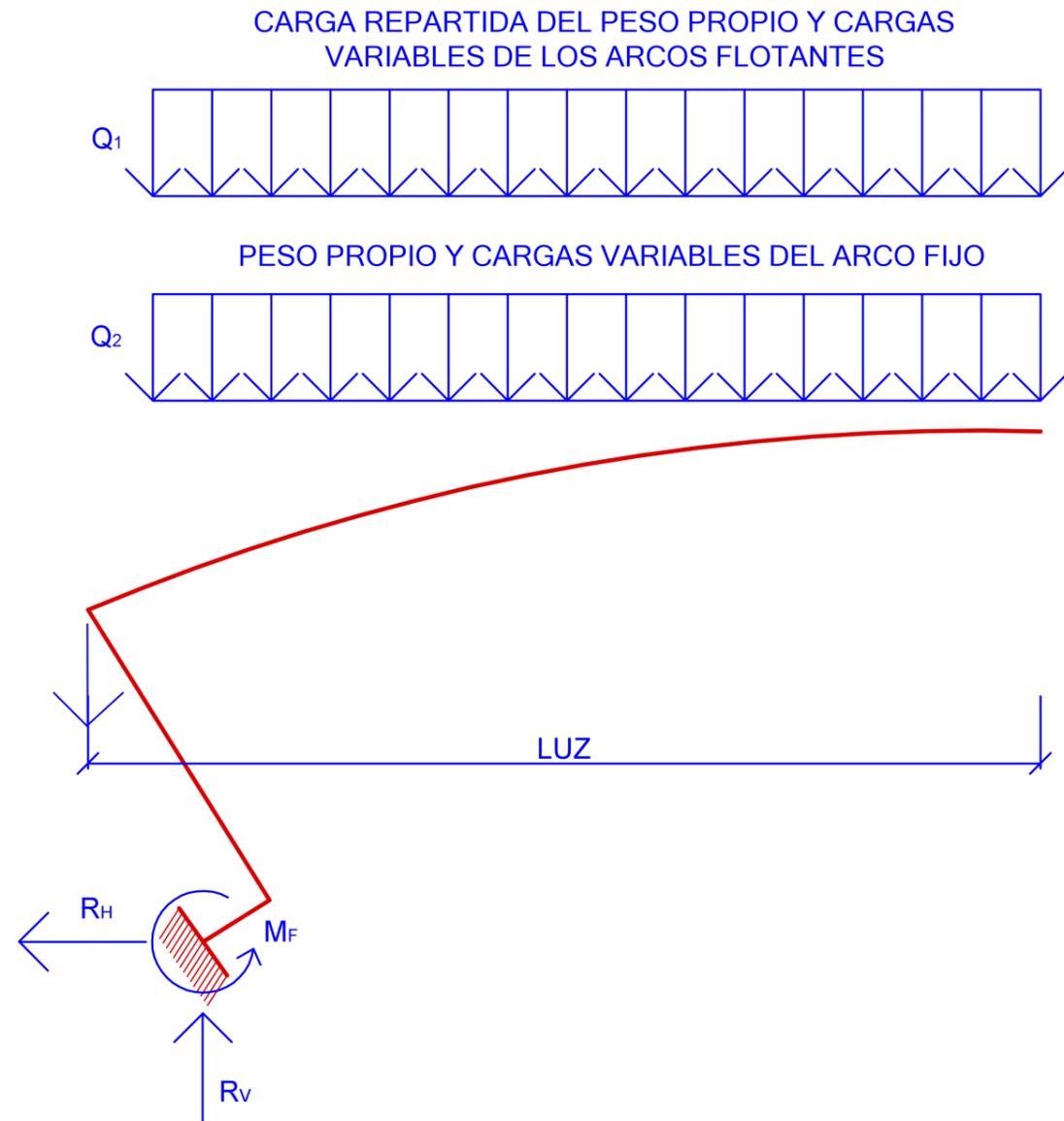


Figura 4.28

-La simplificación de la estructura y su representación de manera exagerada de la forma de trabajo de ésta, nos ayuda a entender su funcionamiento. La estructura trabaja muy parecido a una ménsula, con la excepción del apoyo biarticulado que anteriormente se ha detallado. Este apoyo como se puede apreciar en el gráfico ayuda a la estructura para evitar el vuelco de la ménsula. Claramente se aprecia que funciona a tracción, pero permitiendo el giro en ambos extremos.

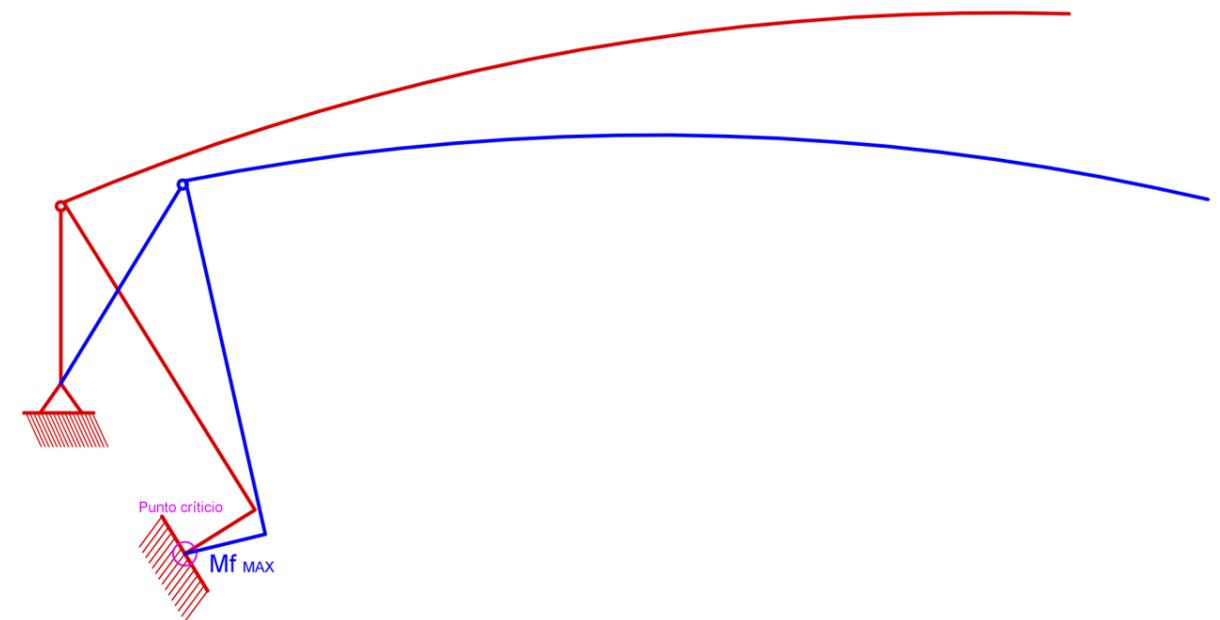


Figura 4.29



# 5. ANÁLISIS CONSTRUCTIVO



## ANALISIS CONSTRUCTIVO DEL CONJUNTO DEL UMBRACLE

En este apartado se va a estudiar de manera somera las diferentes partes que constituyen el conjunto del Umbracle.

El conjunto se podría dividir en cuatro partes para hacer mas fácil su entendimiento.

- El aparcamiento.
- El paseo de arbotantes.
- El paseo mirador y el jardín.
- Estructura metálica de la cubierta del jardín.

La estructura de la cubierta del jardín se estudiará de manera mas detallada en el último apartado ya que es el fin de este proyecto.

El resto de partes se tratarán de manera más liviana simplemente para un mejor entendimiento del conjunto.

### EL APARCAMIENTO

Cuenta con dos niveles y una capacidad para 735 plazas. Tiene una superficie total por planta de 8841,25 m<sup>2</sup>. Una longitud de 275 metros, una anchura de 32,15 metros y una altura de 2,62 metros por planta.

Toda la estructura está ejecutada en hormigón blanco.

Analizando la estructura y después de un estudio comparativo de las diferentes tipologías de forjados y sus respectivas formas de ejecución, aparentemente, y en este caso, podemos decir que se trata de una estructura de forjados unidireccionales, que flecha en una dirección principalmente, que trabaja a flexión, que la dirección de los pórticos está asociada a las vigas, y que por lo tanto, la dirección del forjado es perpendicular a esta. Que transmite sus cargas a las vigas o muros y que su comportamiento general es similar a una losa unidireccional.

Podemos pensar que es un forjado ejecutado con losas y/o placas alveolares pretensadas por su simplicidad de transporte y acopio, por su facilidad, rapidez, rendimiento y seguridad de colocación, o por su utilización inmediata.

Por lo tanto, se trataría de un forjado semiprefabricado, ya que, además del elemento preparado de fabrica (placas alveolares) necesitaría su montaje y acabado en obra.



Vista del parking bajo cubierta. (5.1)

En cualquier caso, y según la EFHE, estos forjados deben cumplir las funciones estructurales de:

- Resistencia de su peso propio y las sobrecargas a las que esté sometido, en este caso, por ser sobrecarga por uso de calzadas y garajes, entre 400-1000 kg/m<sup>2</sup>
- Transmitir las cargas a vigas y soportes
- Dar rigidez transversal a las vigas
- Unión monolítica entre el forjado y los elementos estructurales, para dar mas resistencia a flexión y reducir la torsión
- Resistir los esfuerzos horizontales o de rasante junto con las vigas.

Y las funciones de habitabilidad tales como:

- Apoyo del pavimento
- Permitir instalaciones horizontales, tales como saneamiento, protección contra el fuego, etc.
- Aislar térmica y acústicamente una planta de otra
- Aislar contra el fuego y proteger de los elementos atmosféricos.



EL PASEO DE ARBOTANTES

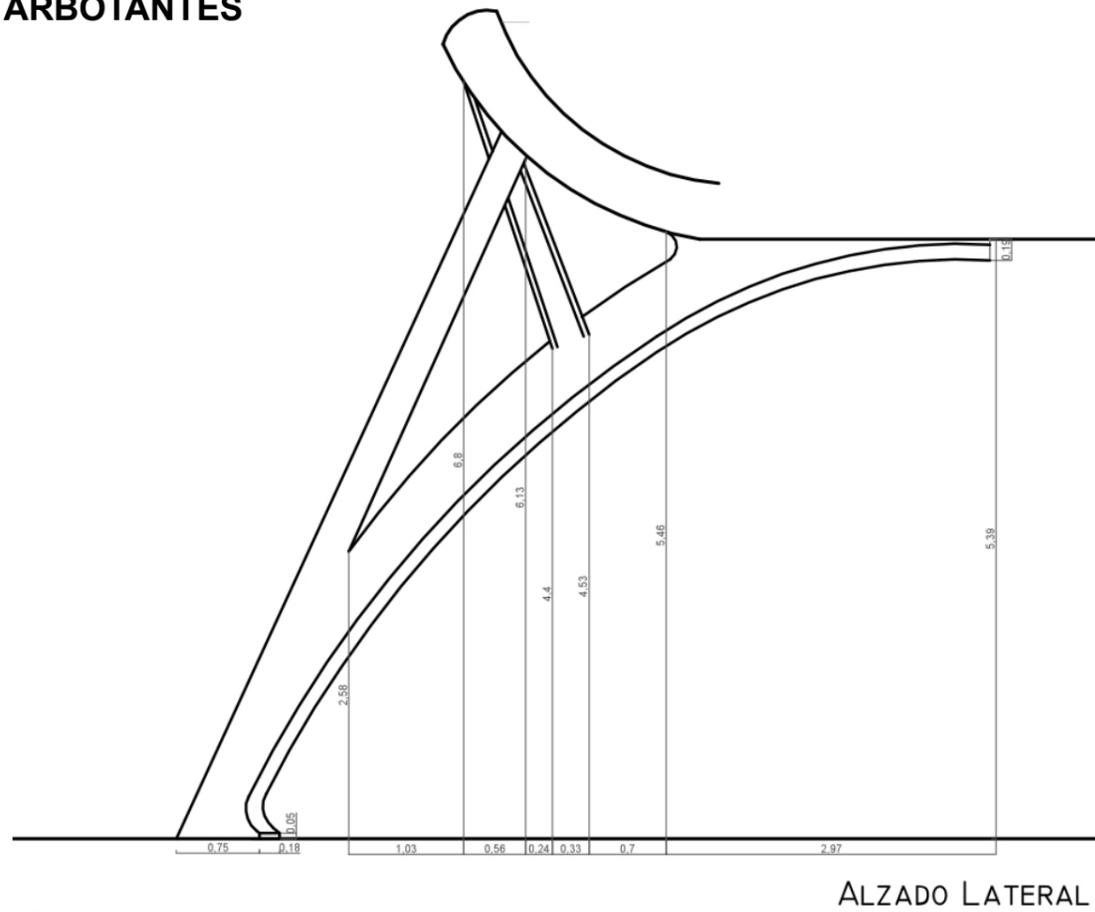
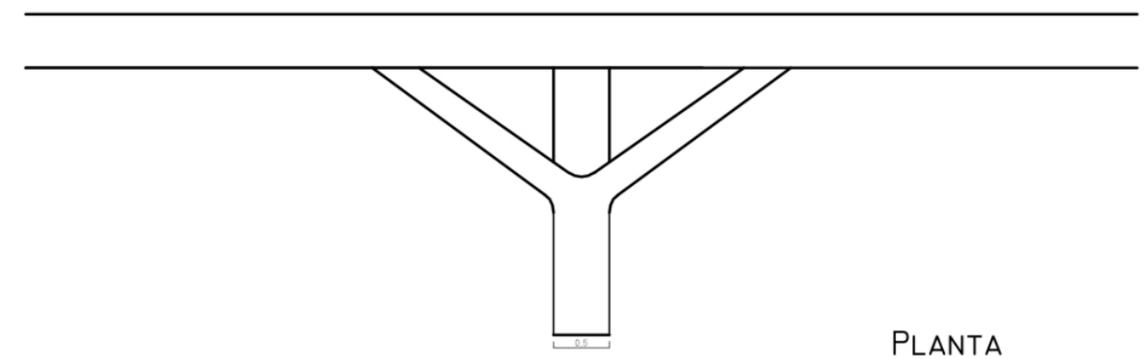
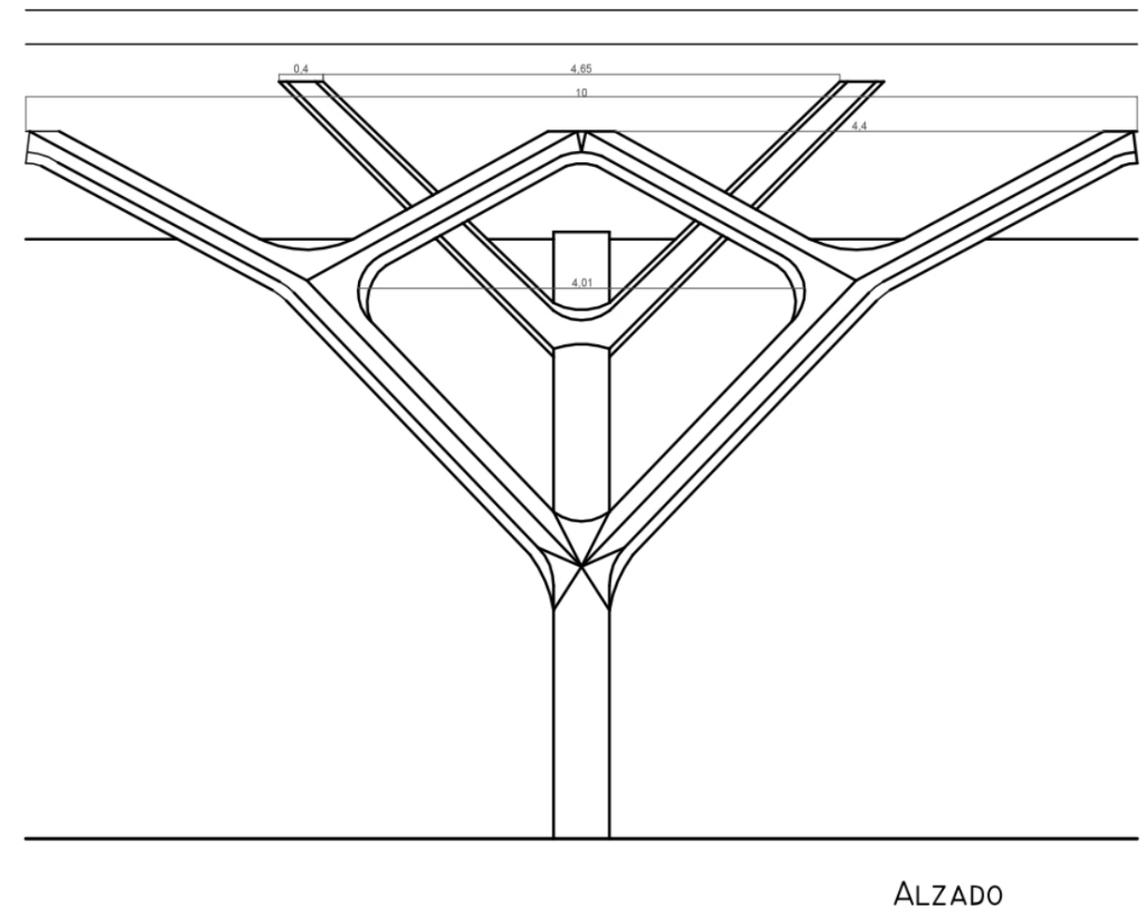


Figura 5.2



Esta situado bajo el mirador. Se le llama así porque los pilares exteriores que soportan el mirador tienen la forma de un arco arbotante. A su vez, estos soportes están unidos entre si intentando crear una serie de arcos ojivales. Estos pilares están ejecutados en hierro blanco, dándole esa forma particular, que realizada con otro material habría resultado más complicado y costoso.



## MIRADOR Y JARDÍN

Situado sobre el paseo de arcos arbotantes y en la cara norte del umbráculo. Tiene una superficie total de 17.500 m<sup>2</sup>. aproximadamente, correspondiendo una longitud de 280 metros y una anchura de 10'64 metros a la zona frente el umbráculo. Toda la superficie esta cubierta con adoquín de granito, que irá apoyado sobre capa de mortero de 2 cm. Aproximadamente. Juntas de dilatación cada 15 metros, coincidiendo con la distancia media entre soporte y soporte. Y juntas de hormigonado cada 2.5 metros. El mirador también contiene una parte destinada a jardín, aunque no es accesible al público, y su misión es puramente ornamental.



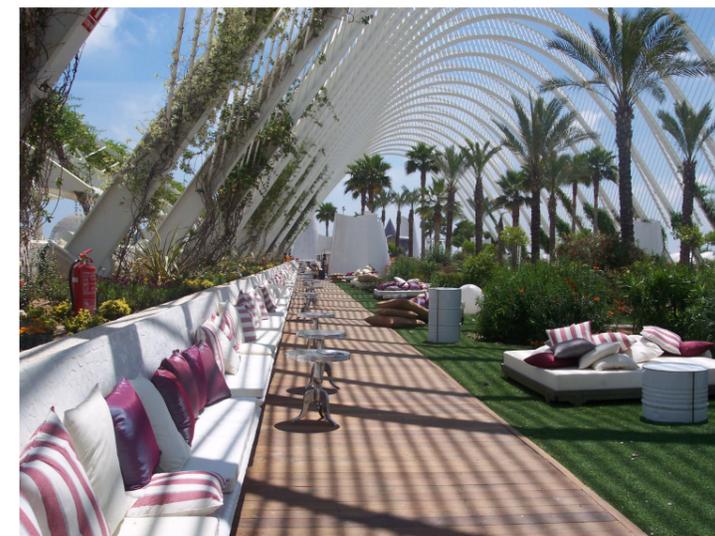
Vista del paseo mirador. (5.3)

El umbráculo en sí se considera una cubierta ajardinada como forjado que alberga un jardín. Este tipo de estructura tiene que estar preparada para soportar mucho peso. Debe contener una protección bicapa aislante, mediante algún tipo de geotextil o fibra de vidrio; una protección antiraíces, mediante algún tipo de material que las repela; una lamina protectora, como un mortero de regulación 1:6 o algún geotextil o fieltro de mucho gramaje; un sistema de drenaje, mediante grava y cazoletas, canaletas, sumideros, etc. para la evacuación de aguas.

Según información recogida en los catálogos de la Ciudad de las Artes y las Ciencias, esta cubierta está prevista para soportar una altura de tierras de 1.25 metros.

Las zonas ajardinadas centrales están divididas por un camino o pasaje de tierra de 3 metros de anchura.

La zona central, o zona de paso a través del umbráculo, está cubierta por adoquines de granito, seguramente sobre capa de mortero de 2 cm. En los pasillos laterales y resto de la superficie que no está compuesta por zona ajardinada, el pavimento está formado por una tarima flotante a base de listones de madera de Teka de 15 cm. De ancho. Esta tipología de madera es muy resistente a la humedad y a toda clase de parásitos, por estar impregnada de aceites resinosos que le dan durabilidad. Es muy apta para parques porque resiste muy bien el rozamiento, y aunque es muy dura, admite buen trabajo por ser de grano muy fino. Siendo para este caso una buena elección.



Vista del jardín de la terraza (5.4)



ESQUEMA CUBIERTA AJARDINADA

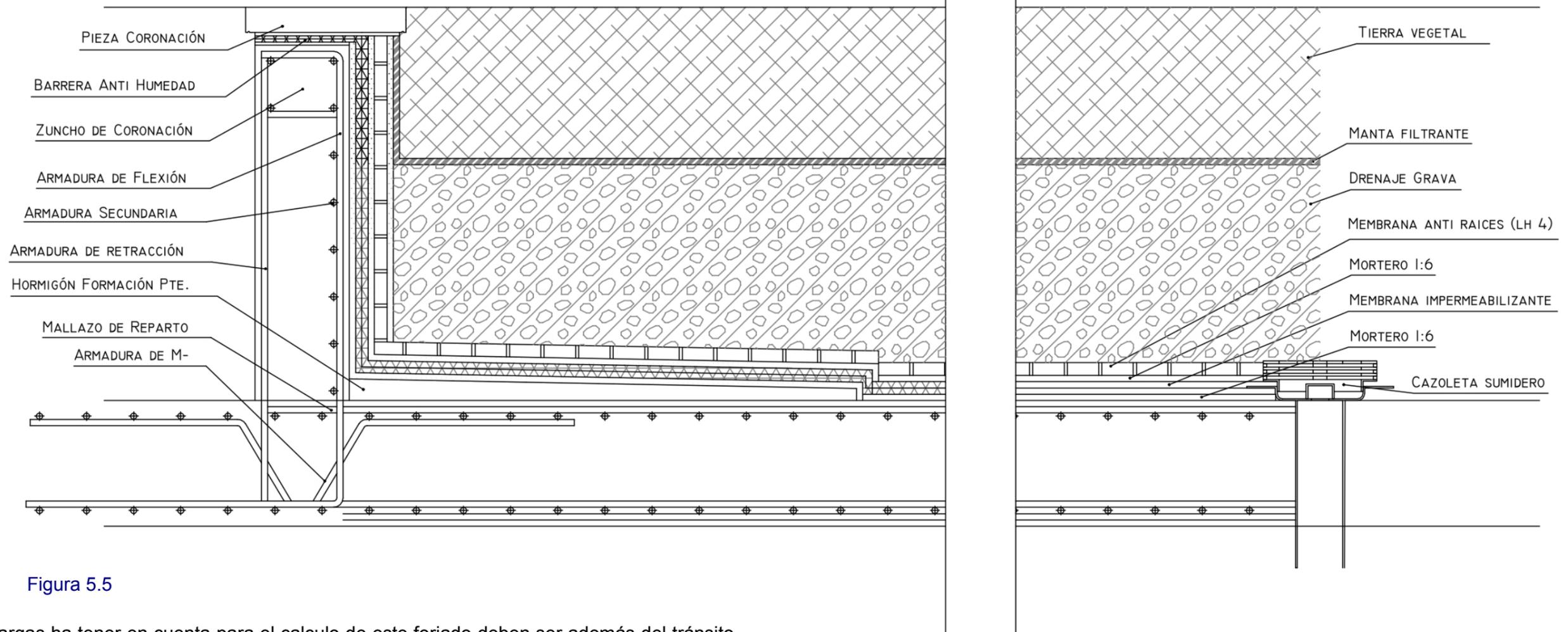


Figura 5.5

Las cargas ha tener en cuenta para el calculo de este forjado deben ser además del tránsito de grupos de personas, la carga de la tierra vegetal, el drenaje de grava, cargas puntuales por la colocación de árboles o grandes arbustos, y la carga que el viento puede llegar a ejercer sobre estos árboles.



PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CUBIERTA POR FASES

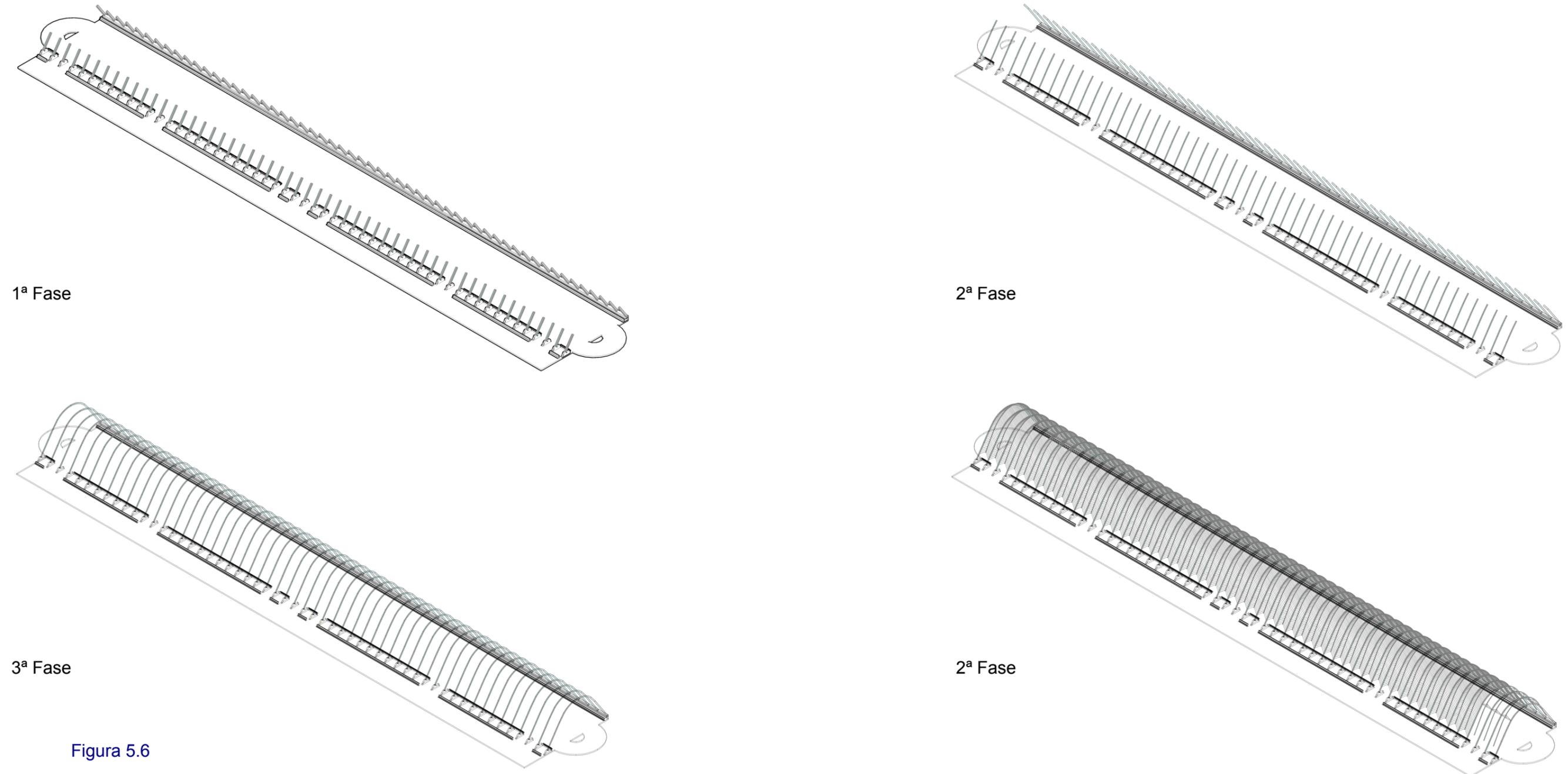


Figura 5.6



**PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CUBIERTA POR FASES (1ª FASE)**

En la primera fase se fijará la primera sección de los arcos a los apoyos de hormigón blanco mediante técnicas de unión que serán estudiadas en el siguiente apartado. Para el levantamiento de las diferentes secciones de los arcos y su colocación se utilizó grúa torre.

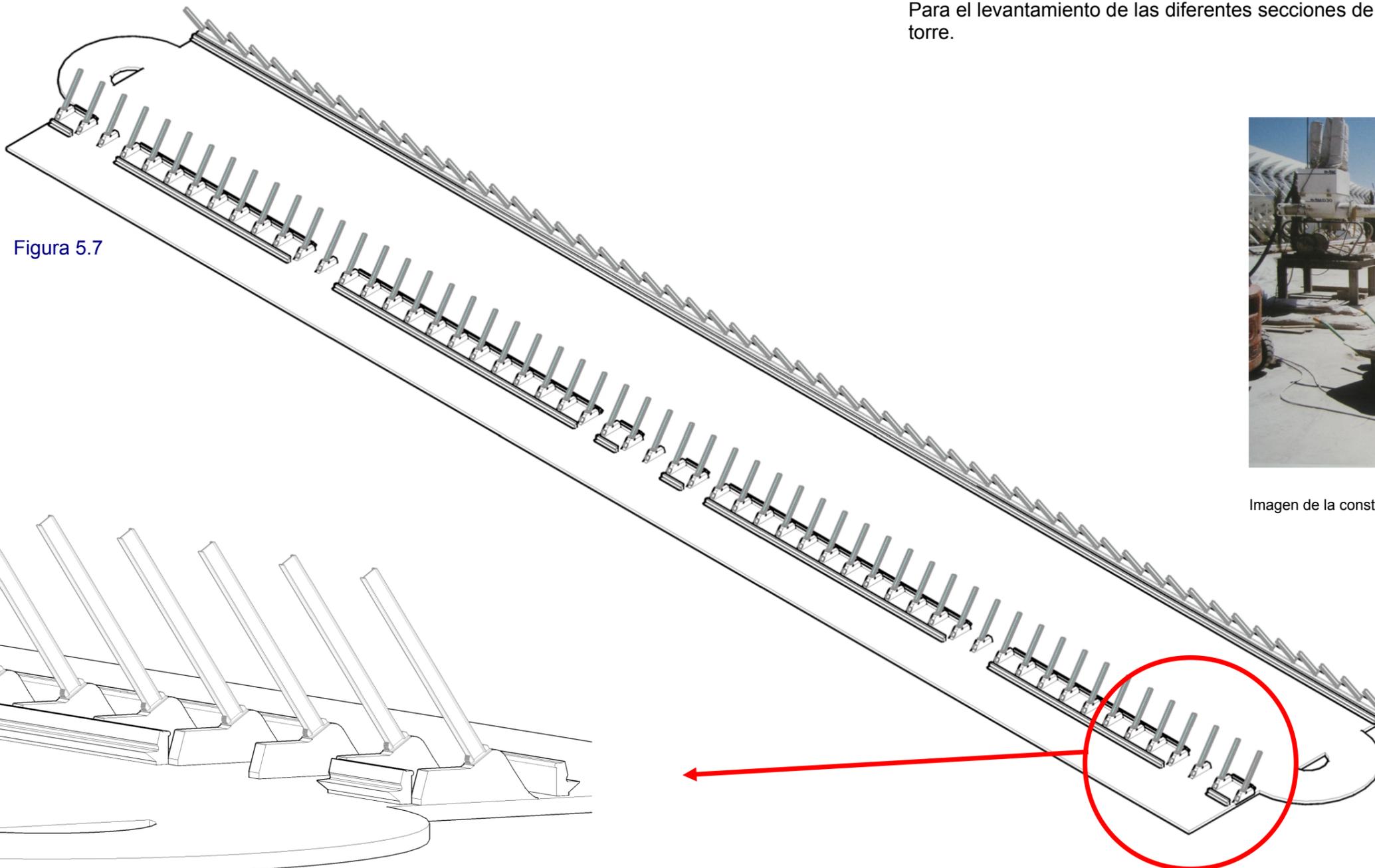


Figura 5.7

Figura 5.8



Imagen de la construcción de la cubierta de Umbracle (5.9)



**PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CUBIERTA POR FASES (2ª FASE)**

En la segunda fase se continuara con la colocación del siguiente tramo de los arcos fijos, estos se izarán con una grúa torre y se fijaran a la sección anterior en su lugar mediante soldaduras que más tarde se estudiaran con detalle. Para realizar la unión el soldador deberá acceder a la zona de la junta con el equipo de soldar a través de una cesta de otra autogrua.

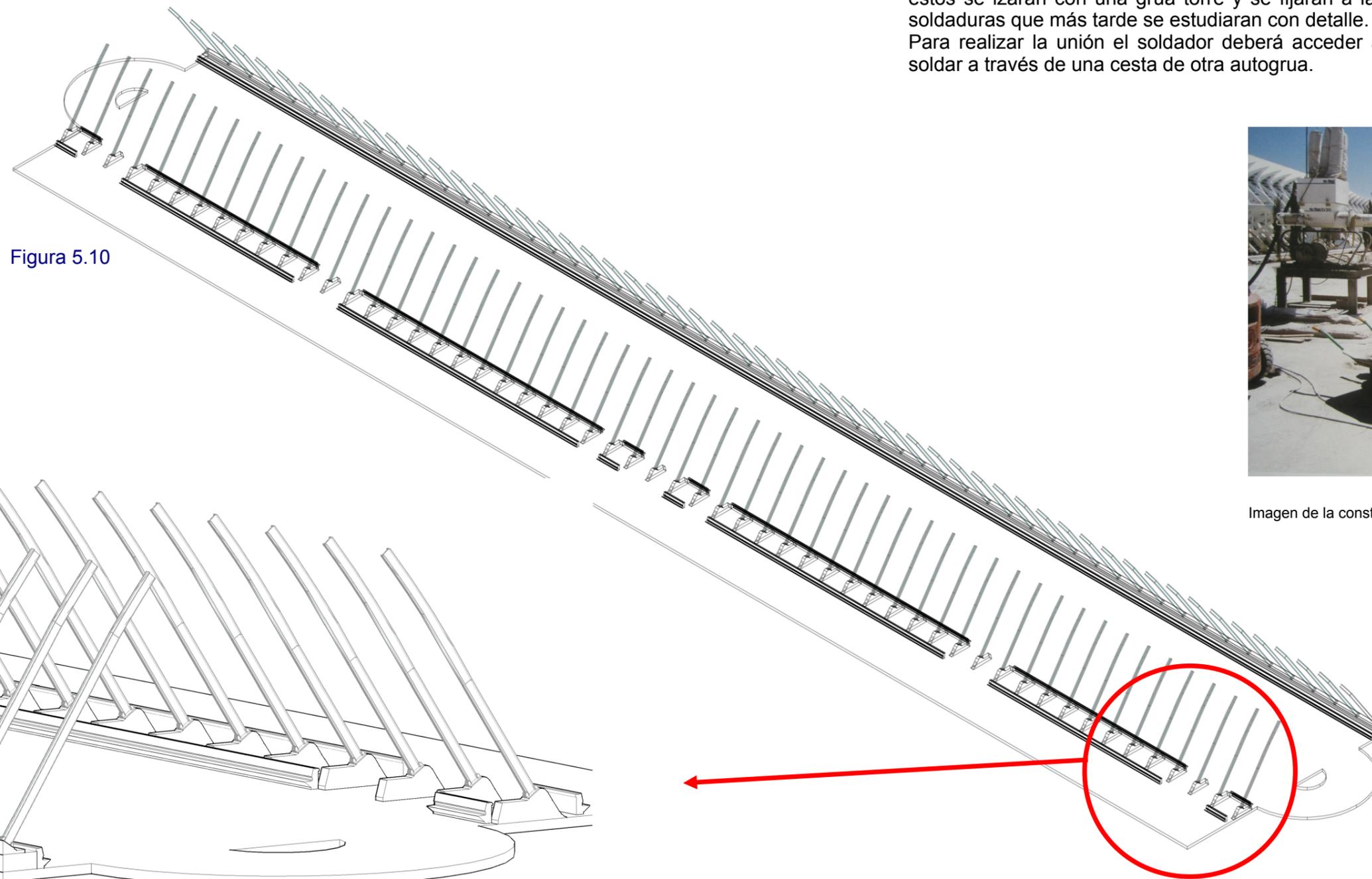


Figura 5.10

Figura 5.11



Imagen de la construcción de la cubierta de Umbracle (5.12)



PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CUBIERTA POR FASES (3ª FASE)

En la tercera fase se termina por cerrar los arcos fijos siguiendo la misma técnica que para la unión de los anteriores tramos de los arcos con el primero. Una vez fijados todos los tramos de los arcos fijos, estos están preparados para entrar en carga y soportar la posterior fase en la que se colocarán los arcos flotantes.

Figura 5.13

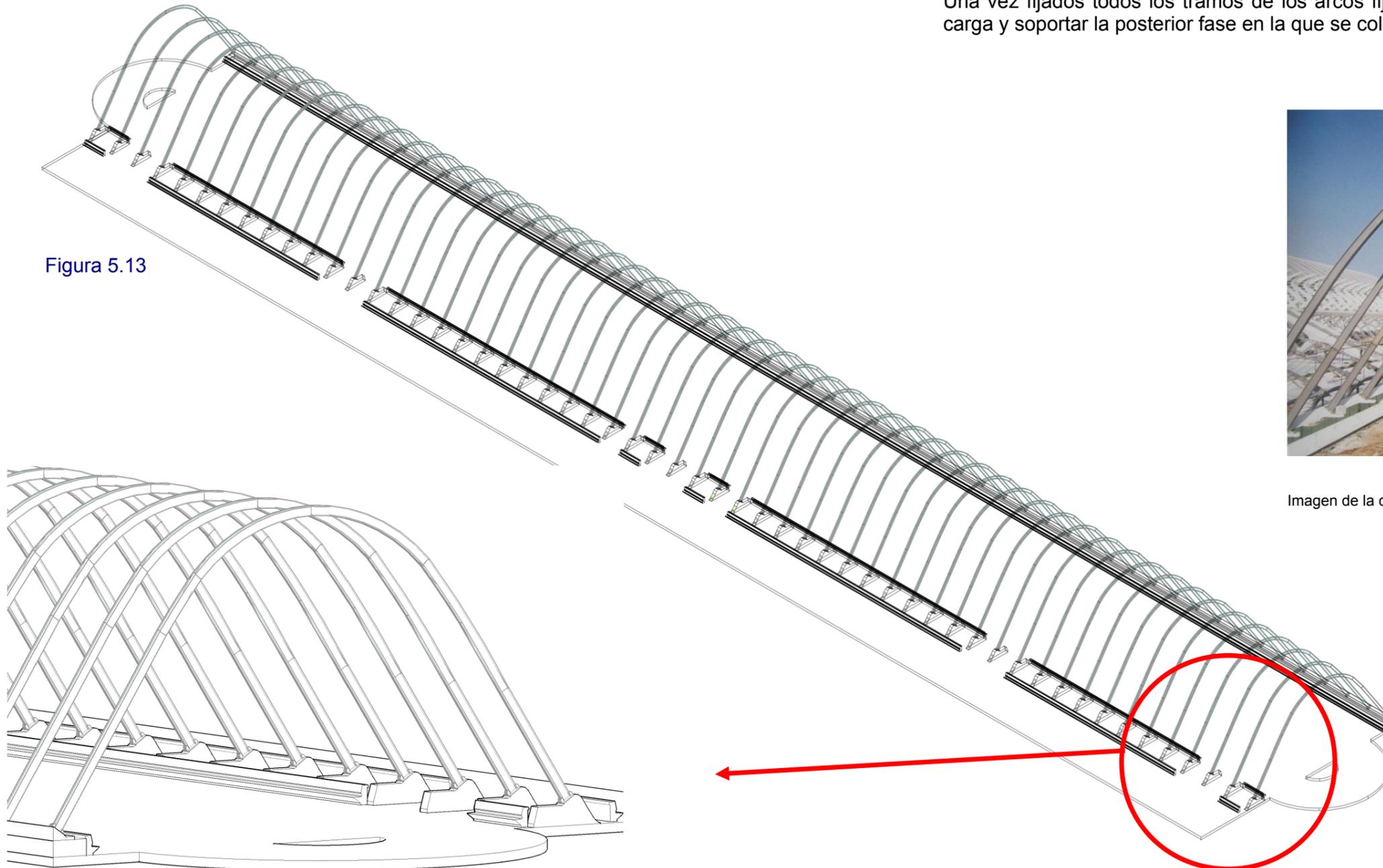


Figura 5.14

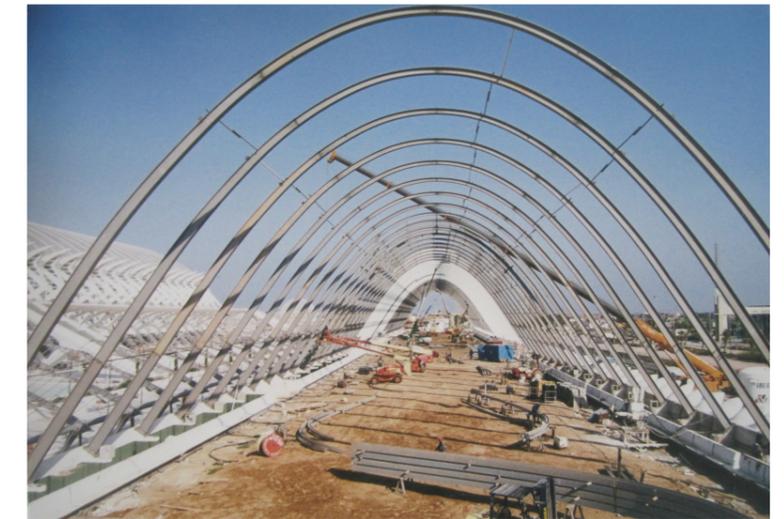


Imagen de la construcción de la cubierta de Umbracle (5.15)



**PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CUBIERTA POR FASES (4ª FASE)**

En la última fase se colocarán los arcos flotantes en su posición utilizando para ello unas estructuras auxiliares en las que se apoyarán de manera momentánea mientras se procede a la unión de los arcos flotantes con los fijos a través de los perfiles huecos de sección circular.

Para la realización de estas uniones se empleara la misma técnica que la usada anteriormente para la formación de los arcos fijos.

Figura 5.16

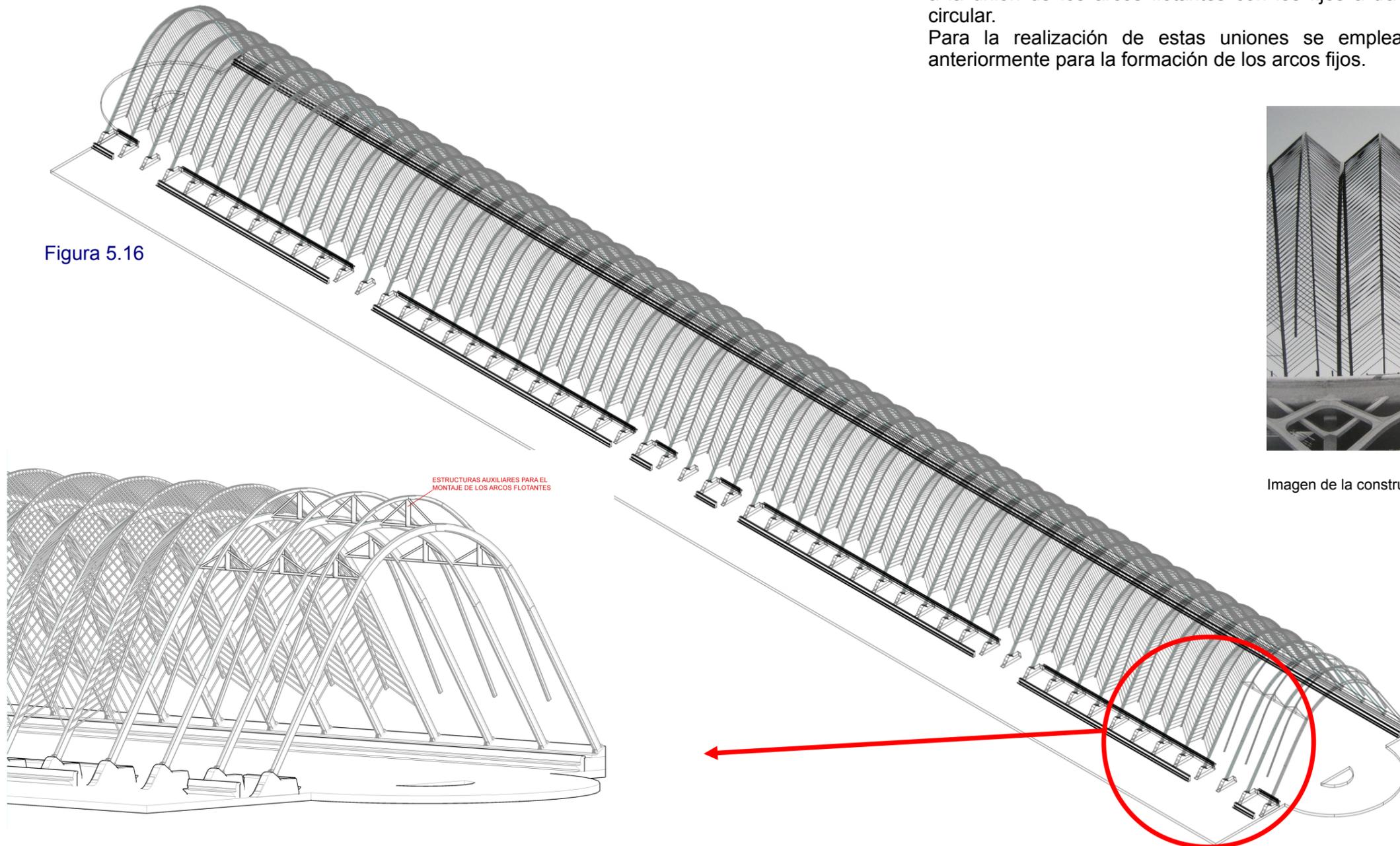


Figura 5.17

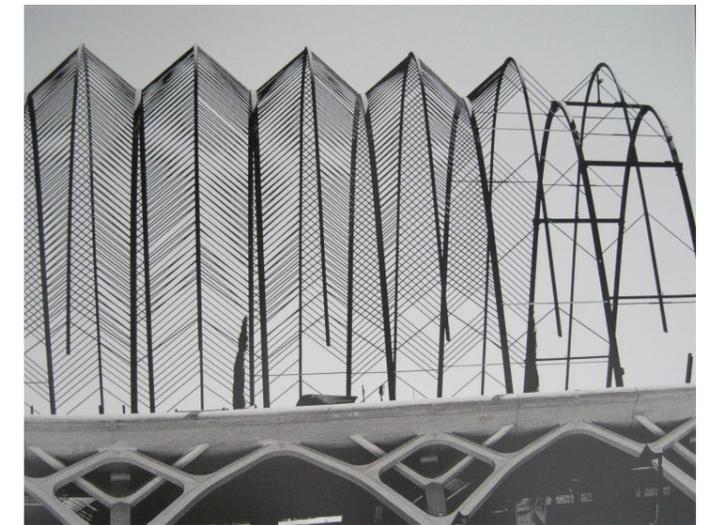


Imagen de la construcción de la cubierta de Umbracle (5.18)



SECUENCIA GRÁFICA DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CUBIERTA

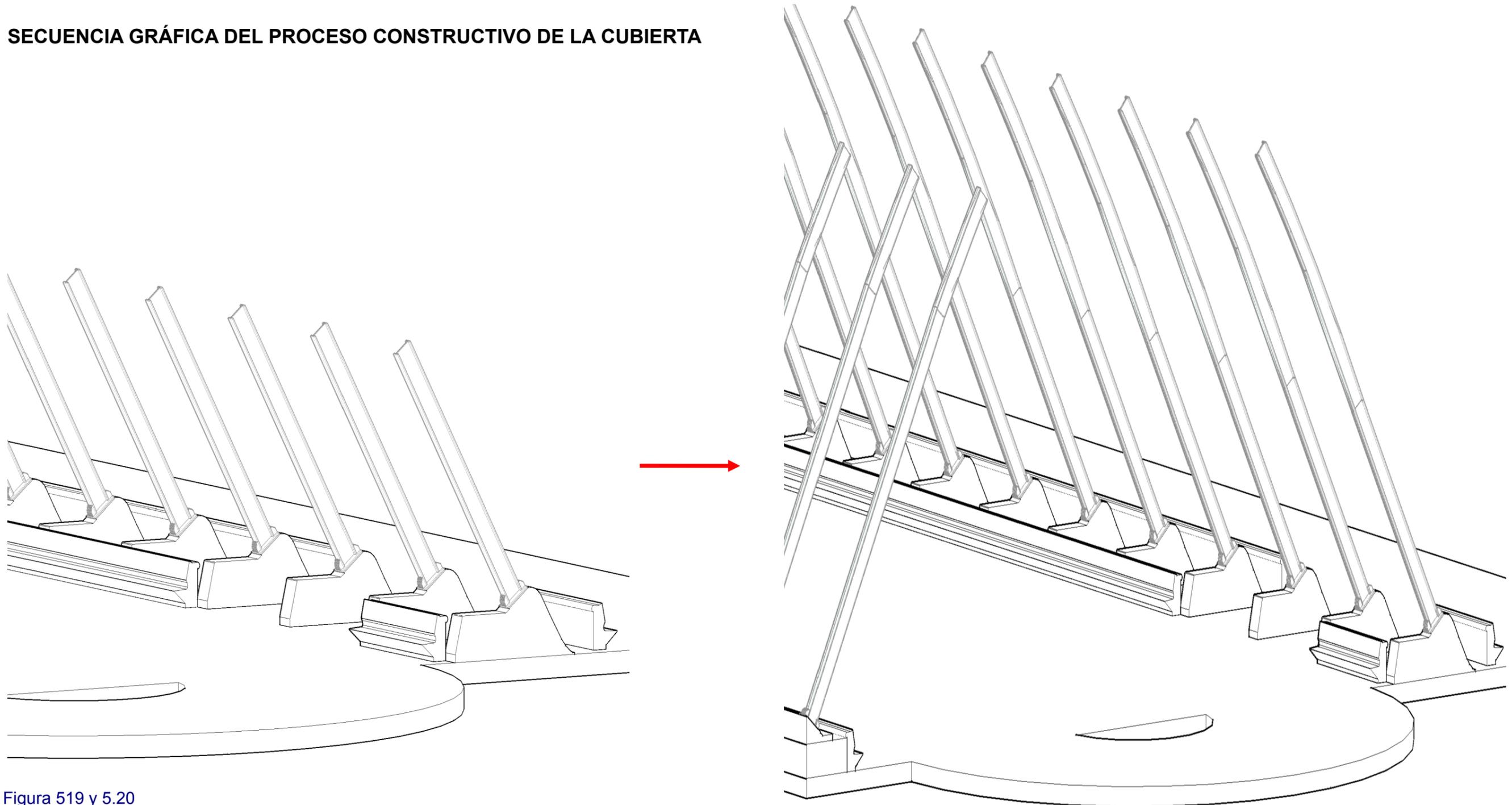


Figura 519 y 5.20



SECUENCIA GRÁFICA DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA CUBIERTA

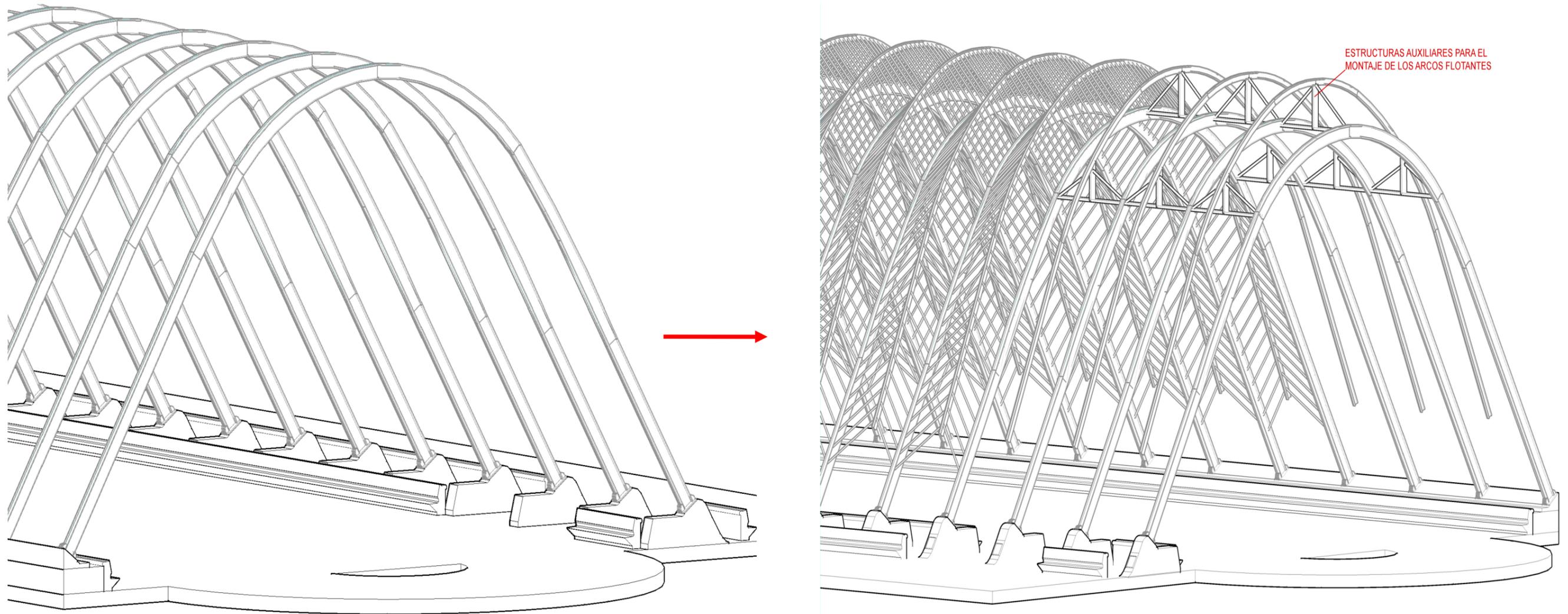


Figura 5.21 y 5.22



### PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA MARQUESINA

El sistema de ejecución de la marquesina es el mismo que el de la cubierta, una serie de semi arcos fijos y otros flotantes unidos a estos mediante perfiles redondos huecos.

Estando estos últimos ligeramente elevados. Ambas series también están formadas por la unión de chapas a modo de perfiles.

El sistema de anclaje a la estructura de hormigón, sin embargo, varía en este caso. Utilizándose en esta ocasión piezas especiales consistentes en un brazo de metal anclado al muro de hormigón en sus dos extremos, a través de una basa, en el inferior, y de un tirante articulado en el superior. Este brazo metálico permanece unido a la marquesina mediante un tubo cilíndrico de 28 cm de diámetro aproximadamente, a lo largo de todo el umbráculo, al que los dos están soldados.

La ejecución de la cubierta en acero laminado supone una serie de ventajas tales como un proceso de construcción más rápido y la posibilidad de realizar secciones más esbeltas. Pero necesita un personal más cualificado y un buen arriostramiento.

Para esto último se cuenta con la estructura de hormigón armado. El hormigón actúa como esa pantalla de arriostramiento, proporcionando a la estructura metálica los núcleos de rigidez necesarios para su estabilidad.



Imagen de la marquesina de Umbralce (5.23)



## SISTEMAS Y TÉCNICAS DE UNIÓN UTILIZADAS

Vamos a distinguir dos tipos de uniones, tanto por el sistema utilizado como por los materiales que entre sí unen:

-La unión entre los arcos fijos y el apoyo de hormigón mediante basas de anclaje atornilladas.

- La unión entre las diferentes piezas y partes que componen los arcos parabólicos de la cubierta mediante soldadura.

Para el estudio de ambos tipos de uniones utilizaremos la NBE EA-95 "Estructuras de acero en edificación" aprobada el 10 de noviembre de 1995 por el Real Decreto 1829/1995.

## UNIONES ATORNILLADAS

Este tipo de uniones se utilizan en la transmisión de esfuerzos entre los arcos fijos y el apoyo de hormigón y en la marquesina con dicho apoyo.

Este tipo de uniones se consideran desmontables aunque eso no impide que la transmisión de esfuerzos se realice como un apoyo fijo sin esta bien realizada la unión.

Vamos a describir las diferentes piezas que componen la unión de los arcos con el apoyo de hormigón:

-Una placa de reparto, de 80 x 44 x 3 cm. que recibe las cargas y las transmite al hormigón de manera homogénea

-Pernos de anclaje, para fijar y nivelar la placa y que trabajan a flexo-tracción, evitando que la placa se levante. Estos pernos supuestamente irán anclados a la armadura del hormigón armado, ya que trabajan a tracción. Están situados simétricamente, sumando un total de 12 pernos por basa. Cada perno tiene un diámetro de 3 cm.

-Para fijar la placa a los pernos se utilizaron tuercas M 30, según la NBE – EA95.

Aparentemente no son tuercas de alta resistencia, ya que no se aprecia que las caras del borde del agujero roscado estén biseladas.

-Y por último, cartelas rigidizadoras de 1,5 cm. De espesor, que impiden que la placa se deforme. Estas cartelas están soldadas simétricamente a las alas del perfil, sumando en total 8 cartelas por basa.

UNIÓN SOLDADA



Tipos de soldadura en la cubierta de Umbracle (5.24)

UNIÓN ATORNILLADA

UNIÓN ATORNILLADA ENTRE ARCOS FIJOS Y BASE DE APOYO DE HORMIGÓN



Imágenes de la unión de los arcos con los apoyos (5.25 y 5.26)

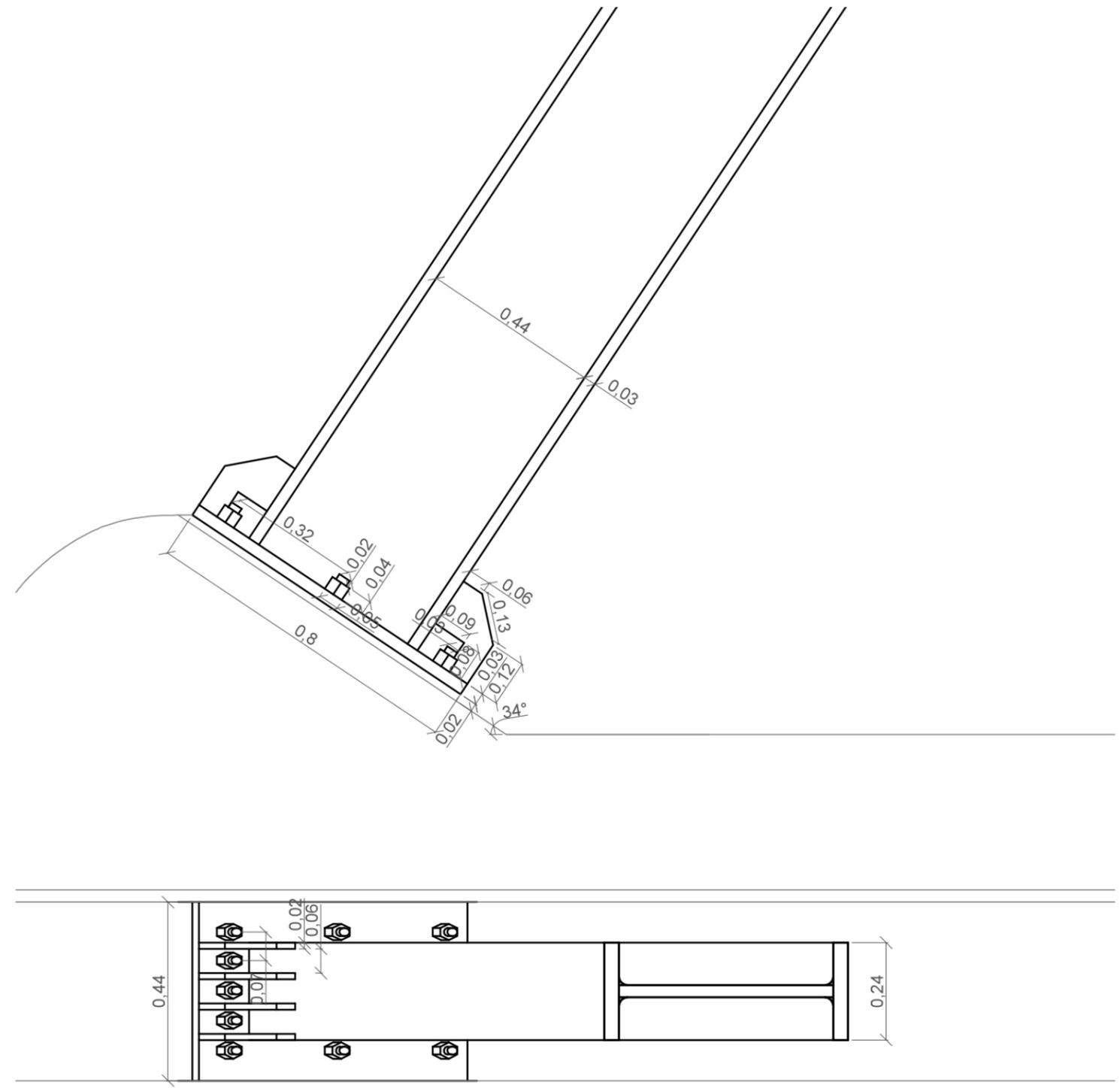


Figura 5.27



### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SEGÚN NBE EA-95

Los tornillos que se usan para el anclaje son tornillos ordinarios. Éstos cumplirán las condiciones de fabricación indicadas en la tabla 2.5.6. de la NBE EA-95.

Según la nomenclatura usada en la NBE EA-95, los tornillos usados en esta unión son:

-T 30x120, 4At, NBE EQ-95

- 30 mm. De diámetro.
- 120 mm. De longitud del vástago.
- El tipo de acero y la referencia a la norma.

Las tuercas usadas se denominan:

-M 30, A4t, NBE EA-95.

Ahora comprobaremos las disposiciones constructivas.

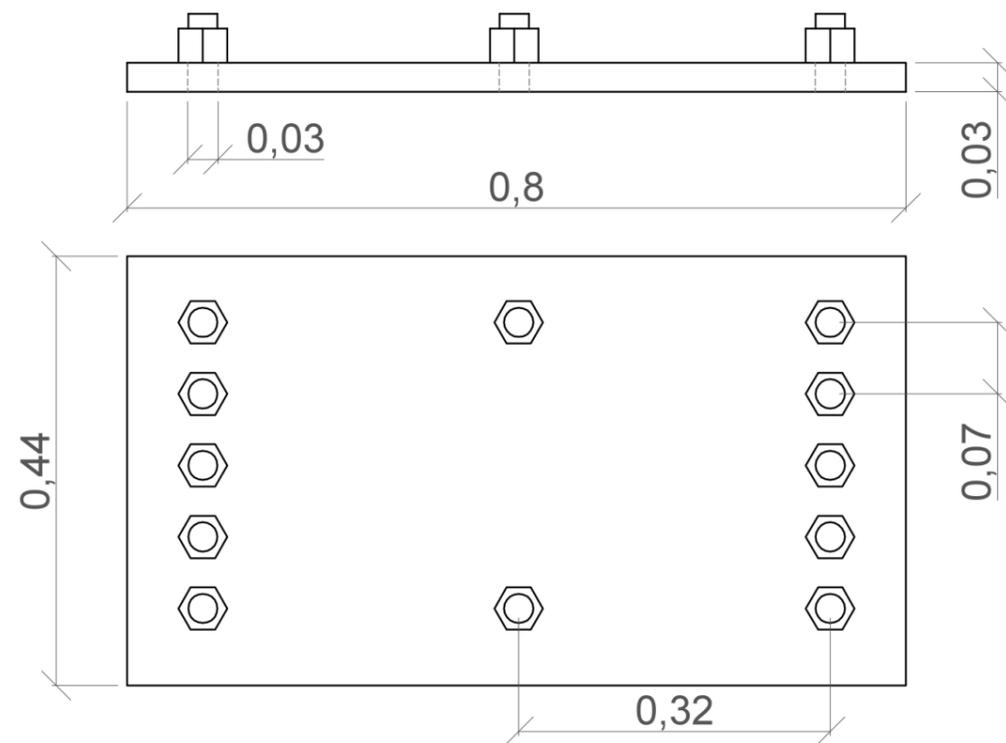


Figura 5.28

Resistencia de los elementos de unión.

Se considerará como sollicitación de agotamiento de un perfil o de una chapa solicitado a aplastamiento contra la espiga de un tornillo a la dada por el producto:

2.  $\sigma_u \cdot A$ , para los tornillos ordinarios.

- $\sigma_u$ : resistencia de calculo del acero que forma la estructura.
- A: área de contacto de superficie resultante de multiplicar el diámetro de la espiga por el espesor del elemento que transmite o recibe el esfuerzo.



## UNIONES SOLDADAS

Se entiende por soldadura el proceso por el que se alcanza una continuidad metálica entre dos piezas. Resulta evidente, por tanto, la necesidad no sólo de conseguir una aparente continuidad entre las piezas, sino de asegurar una resistencia mecánica suficiente de la unión.

Para el estudio de las soldaduras debemos diferenciar en primer lugar entre las soldaduras realizadas en taller y las soldaduras a realizar en obra.

Esto es muy importante ya que el lugar de trabajo nos condiciona el procedimiento de soldadura que podemos usar.

Como se ha visto anteriormente en el proceso constructivo los perfiles que forman los arcos se traen en diferentes secciones para su posterior ensamblaje en obra.

La formación de esas secciones de perfiles tipo IPE que llegan a obras se ha realizado mediante la unión de chapas soldadas en taller.

Los procedimientos usados en soldaduras como hemos dicho son condicionados por el espacio de trabajo en el que se realiza.

Las secciones de los arcos formadas en taller, por esta razón han sido realizadas mediante procesos MIG o TIG. Este tipo de procesos deben realizarse en taller debido a que usan una protección creada por una atmósfera de gas inerte (He o Ar) que rodea al arco y al baño fundido durante la soldificación. Es por esta razón por la que no son métodos que podamos usar en obra, ya que la presencia de corrientes de aire no nos permitiría garantizar la atmósfera de protección.

Probablemente el método utilizado en este caso sería el proceso MIG, que posee una alta penetración y es recomendable en especial para aceros al carbono.

Este método se usaría para unir las chapas que funcionan como alas con las que hacen la función de alma. Es decir, la posición de soldar sería en ángulo en rincón.

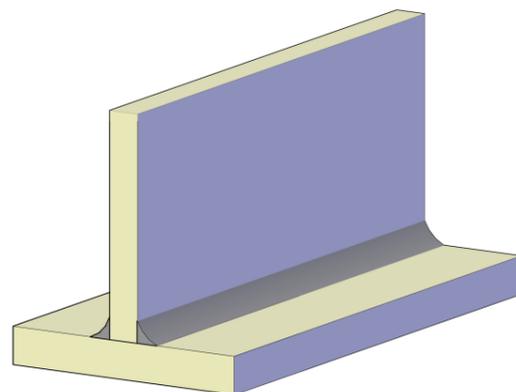


Figura 5.29

Una vez que tenemos a pie de obra las diferentes secciones de los arcos, debemos proceder al ensamblaje de éstas.

Para ello, debemos realizar soldaduras a tope en prolongación en obra.

Una vez tengamos ensamblados todos los arcos fijos se procede a la colocación de los arcos flotantes, apoyándolos sobre unas estructuras auxiliares que se soportan en los arcos fijos.

Una vez colocados los arcos flotantes en su posición se procederá a la sujeción definitiva de éstos mediante la soldadura de los perfiles circulares que unen los arcos fijos con los flotantes.

Esta soldadura es una soldadura en ángulo realizada en obra.

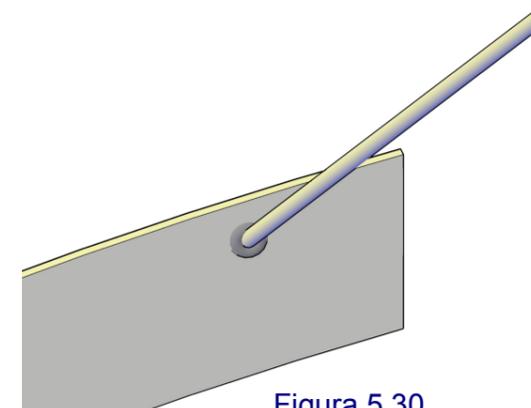


Figura 5.30

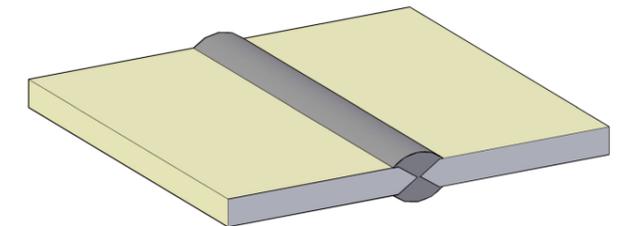


Figura 5.31

Para la realización de estas soldaduras el procedimiento a usar debe ser muy versátil, ya que se va a realizar en obra en posiciones complicadas.

El equipo debe ser fácilmente transportable ya que va a tener que llevarlo el soldador en una cesta de una autogrúa para ir realizando las soldaduras antes especificadas.

Por todas estas razones el método elegido es el SMAW.

Es decir, un método con aporte de metal, semiautomático en el que la protección se consigue mediante la formación de escoria.

Una vez definidos todos los métodos de unión entre las diferentes piezas que componen la cubierta vamos a ver cada una de éstas y sus uniones de manera gráfica



PIEZAS QUE COMPONEN LA CUBIERTA

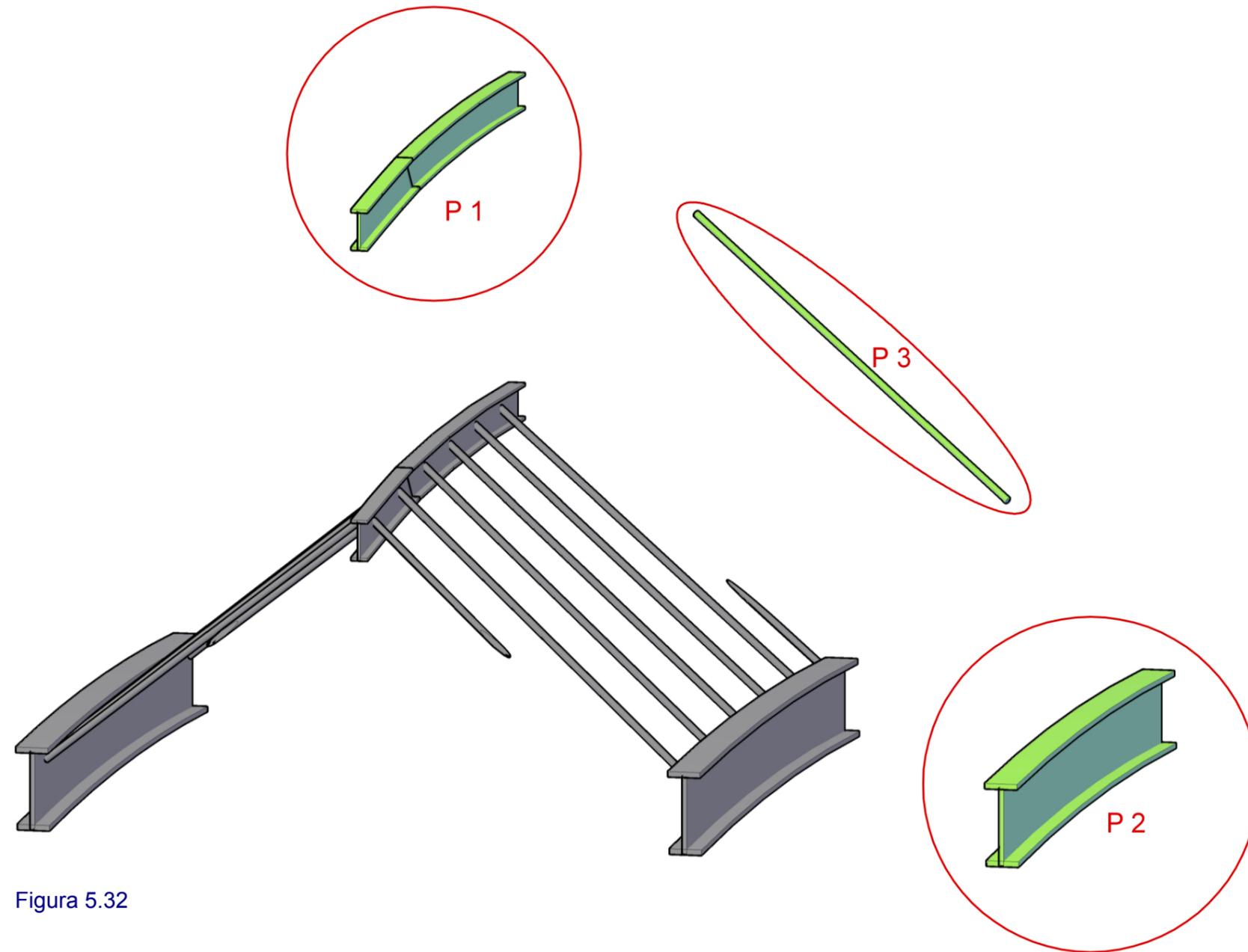


Figura 5.32

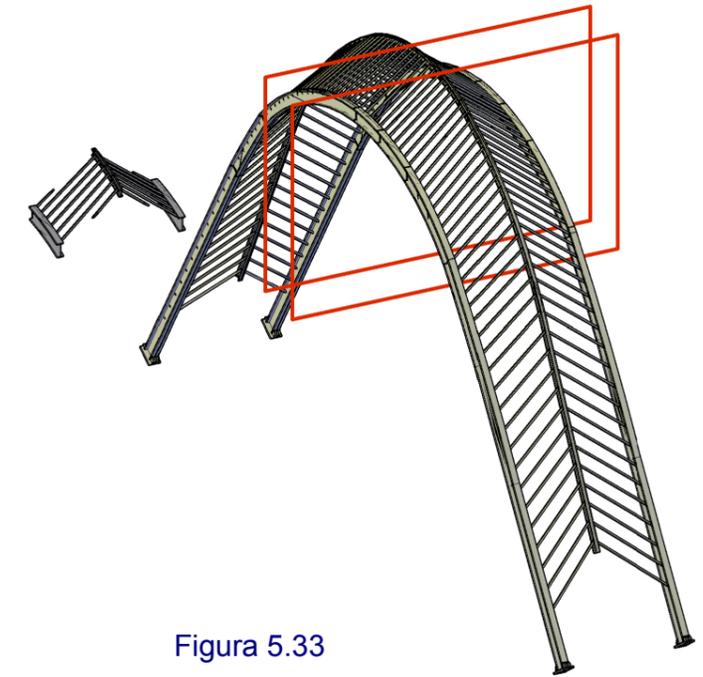
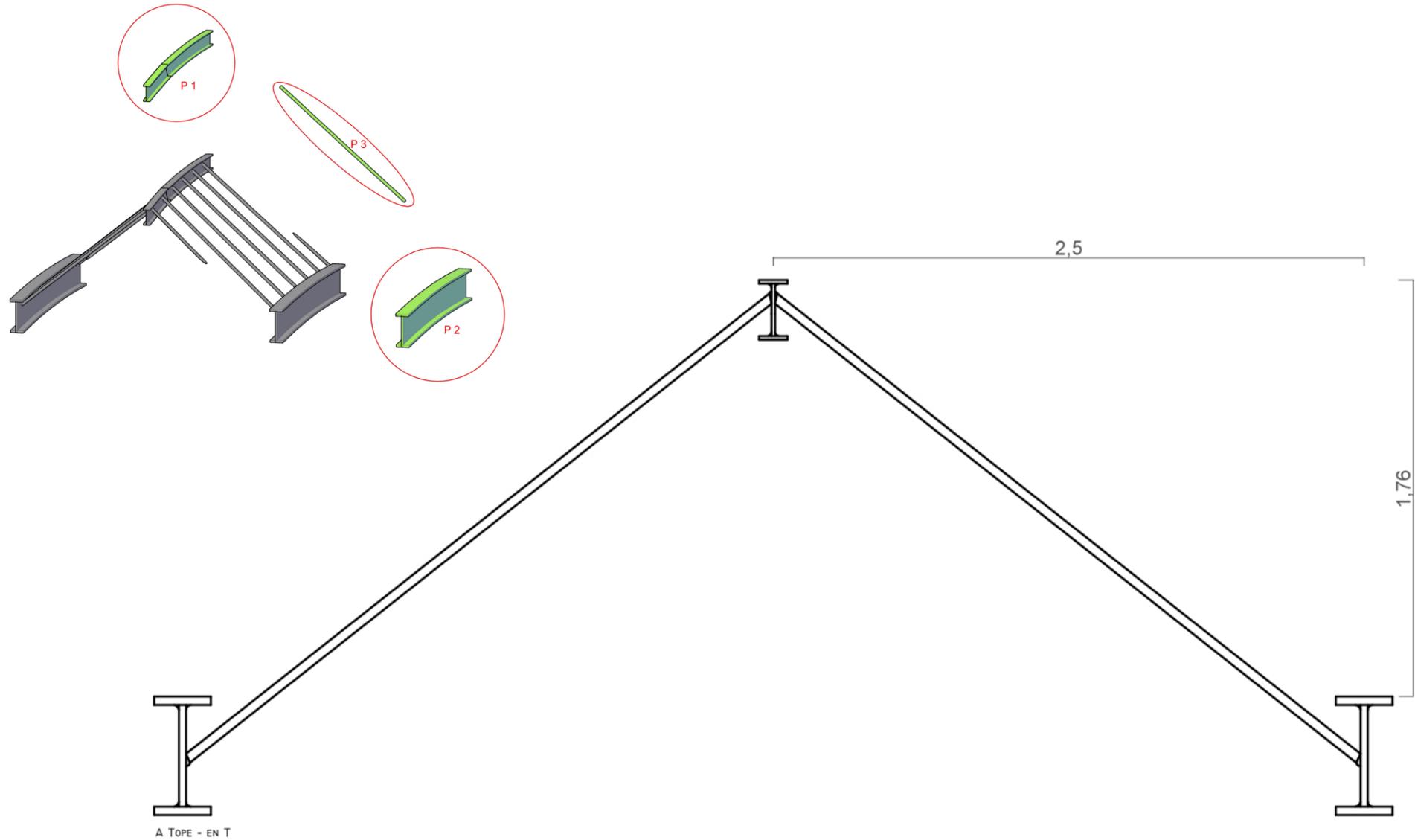


Figura 5.33



PIEZAS QUE COMPONEN LA CUBIERTA



**P 1**

IPE 500

LA UNIÓN DE CHAPAS PARA LA FORMACIÓN DE LOS PERFILES EN I PARA LA EJECUCIÓN DE LOS ARCOS DA LUGAR A UNA SERIE DE PERFILES DE SIMILARES CARACTERÍSTICAS A UN PERFIL IPE, ALAS PARALELAS, ESPESOR CONSTANTE, SIMÉTRICO, TRABAJA A FLEXIÓN Y LO HACE DE MANERA INDEPENDIENTE. POR SUS PROPORCIONES PODRÍAN DAR LUGAR A UN IPE 500 EN EL CASO DE LOS ARCOS FIJOS.

**P 2**

IPE 240

LA UNIÓN DE CHAPAS PARA LA FORMACIÓN DE LOS PERFILES EN I PARA LA EJECUCIÓN DE LOS ARCOS DA LUGAR A UNA SERIE DE PERFILES DE SIMILARES CARACTERÍSTICAS A UN PERFIL IPE, ALAS PARALELAS, ESPESOR CONSTANTE, SIMÉTRICO, TRABAJA A FLEXIÓN Y LO HACE DE MANERA INDEPENDIENTE. POR SUS PROPORCIONES PODRÍAN DAR LUGAR A UN IPE 240 EN EL CASO DE LOS ARCOS FLOTANTES.

**P 3**

PERFIL HUECO REDONDO 40.4

LOS ARCOS FLOTANTES SE UNEN A LOS FIJOS MEDIANTE PERFILES REDONDOS HUECOS SOLDADOS EN ÁNGULO, ELEVANDO LA ALTURA DE LOS FLOTANTES SOBRE LOS FIJOS. ESTOS PERFILES SON HUECOS DE 40 MM. DE DIAMETRO Y 4MM DE ESPESOR.

Figura 5.34



TIPOS DE SOLDADURA EN LA CUBIERTA

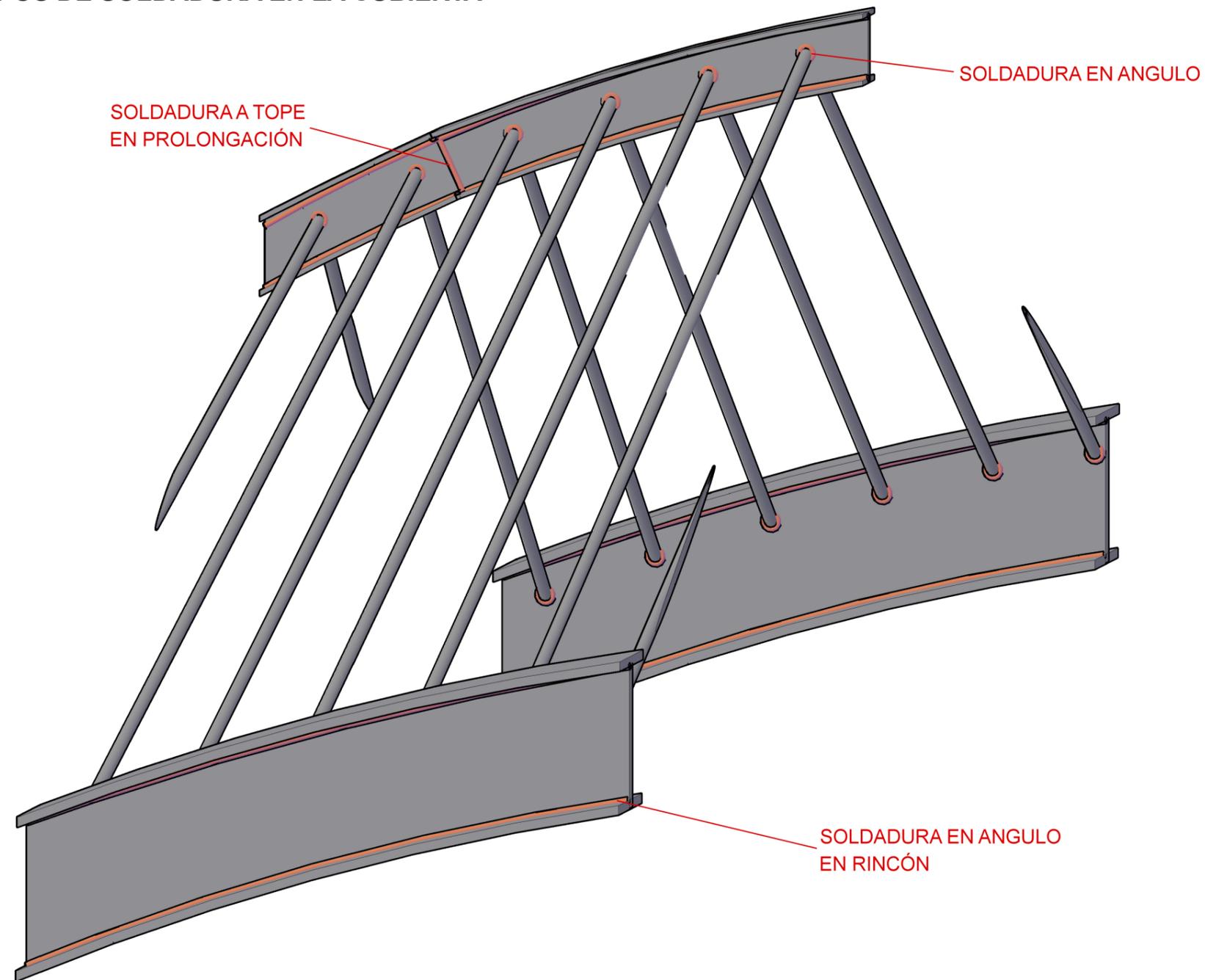


Figura 5.35

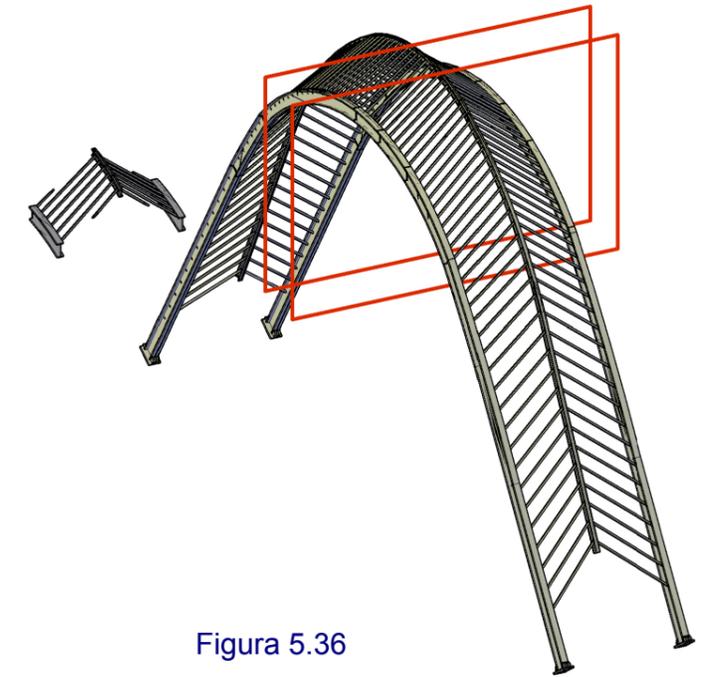


Figura 5.36



### APOYOS DE HORMIGÓN BLANCO Y TRENCADIS

Al igual que el resto de la ciudad el Umbracle está construido en su mayoría en hormigón blanco autocompactante.

Este procedimiento esta especialmente indicado donde las ejecuciones sean complejas (debido a una alta densidad de armado o debido a complicados accesos al punto de hormigonado), donde se demande un buen acabado, como en el hormigón prefabricado o el hormigón arquitectónico.

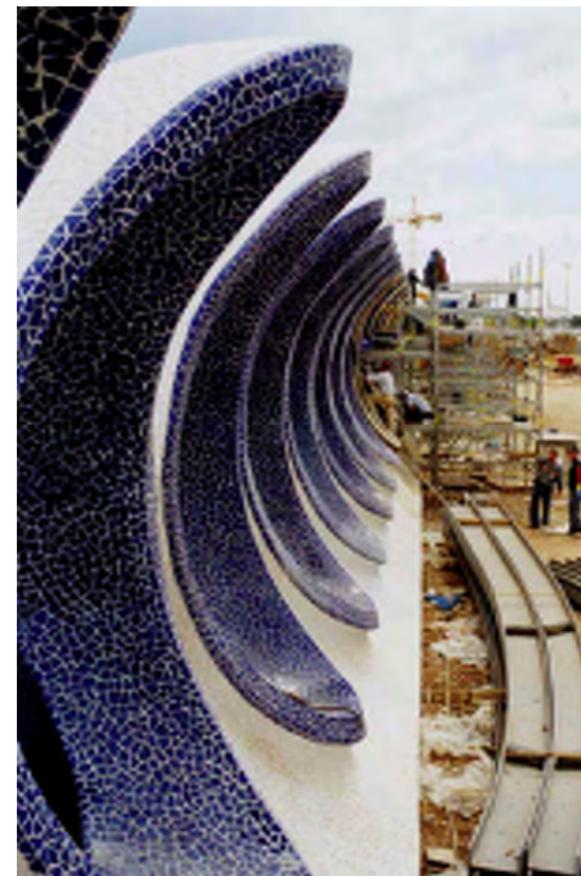
Otro sistema recurrente de Santiago Calatrava tanto en el conjunto de la ciudad como en el resto de su obra es el uso de trencadís como recubrimiento.

Es una solución en la que se colocan fragmentos de azulejos de similar geometría y tamaño para conseguir un efecto de puzzle.

La colocación de este sistema se hace mediante la colocación de un mortero de nivelación y luego una malla de fibra de vidrio sobre la que se pegan los fragmentos de azulejo con mortero blanco para la terminación y el rejuntado.

En la cara sur del complejo se ha solucionado así el recubrimiento de los óculos mediante trencadís blanco y azul.

Sistema de colocación del trencadís en los óculos.

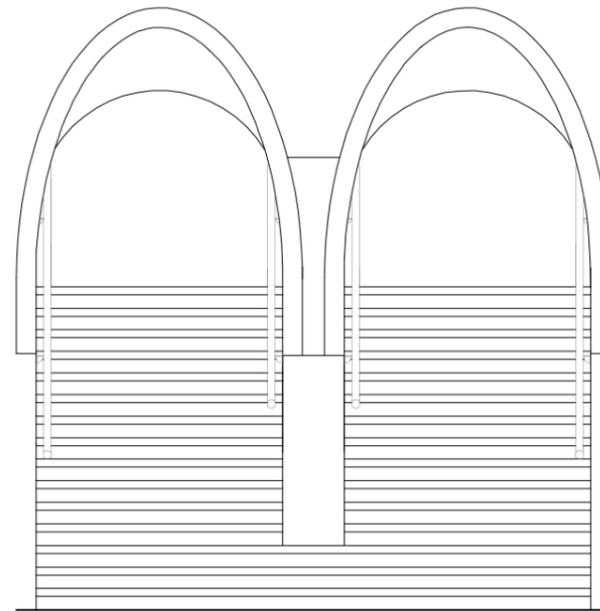


Colocación de trencadis (5.37 a 5.42)

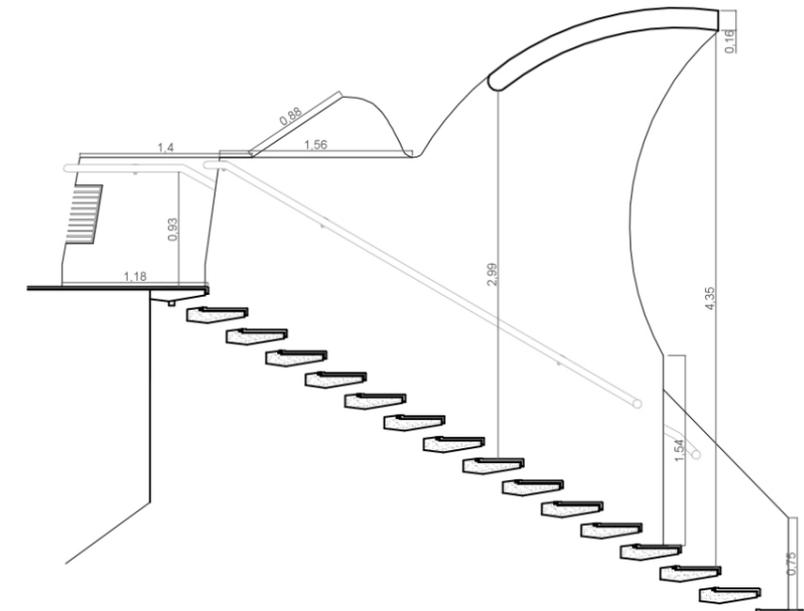


SUPERFICIES ARQUITECTONICAS SINGULARES

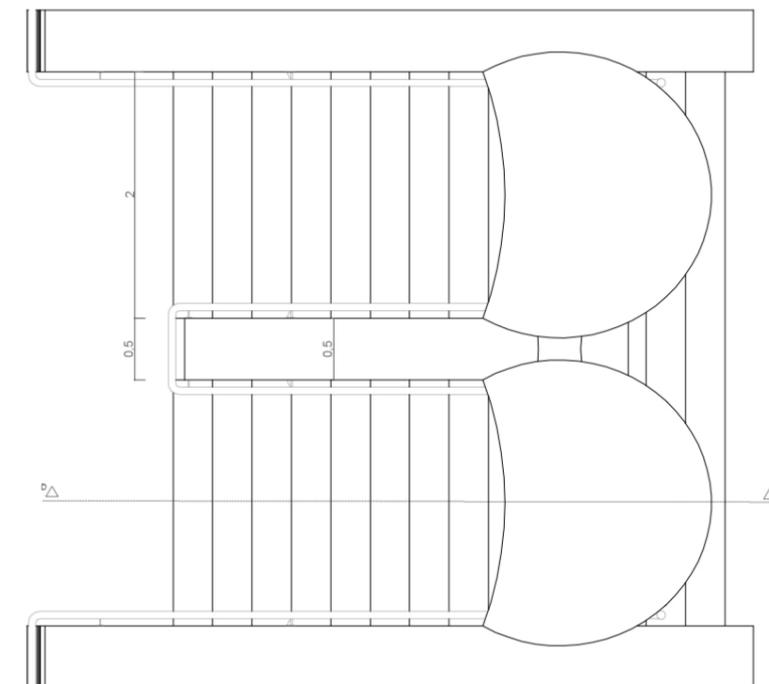
PASEO DE LOS ÓCULOS. ESCALERAS DE ACCESO (FACHADA SUR)



ALZADO



SECCION D - D'



PLANTA

Figura 5.43



# 6. CONCLUSIONES



## CONCLUSIONES A NIVEL PROFESIONAL

Lo primero que remarcaría sería la idea de superación y optimismo que este proyecto de final de grado me ha aportado.

Es decir, la comprensión de como de manera organizada, por fases y con mucho trabajo se puede llevar a cabo una obra de carácter emblemático es un concepto que antes no me había detenido a pensar en profundidad.

Con anterioridad al proyecto, cuando me encontraba ante una obra de este tipo, era como si los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera se quedasen a un lado ante la espectacularidad de este tipo de construcciones.

Las formas, los materiales, la escala, las estructuras y en general el distinto funcionamiento con una construcción de carácter normal, hacía que admirase este tipo de obras desde un punto de vista de mero espectador, sin cuestionarme las soluciones o medios que se han llevado a cabo para su construcción.

Creo que es ese miedo y rechazo que normalmente se tiene a lo distinto y desconocido lo que me impedía dejar a un lado la majestuosidad de este tipo de construcciones, para analizar de manera más técnica y profesional estas obras.

También destacaría el contacto con profesionales involucrados en la construcción de estas obras que aunque en mi caso ha sido breve, me ha ayudado a ver como funciona un poco mejor la realidad.

A un nivel más directo con mi formación académica la realización de este proyecto me ha obligado a realizar un compendio de todos los conocimientos adquiridos previamente para comprender el conjunto de la obra.

Con mayor hincapié me he visto obligado a repasar e incrementar mis conocimientos en varias materias, como geometría, o el manejo y funcionamiento de varios programas informáticos como SketchUp, Autocad 3D, Photoshop, etcétera.

## CONCLUSIONES A NIVEL PERSONAL

A nivel personal este proyecto me ha ayudado a valorar más nuestra profesión, ya que te das cuenta de las maravillas que con esfuerzo se puede llegar a construir.

Esta idea la entendí con mayor amplitud hablando con un profesional que había participado en una fase de la construcción del complejo de la Ciudad.

Con sus explicaciones, te das cuenta de la importancia que para él significaba el haber tomado parte en la construcción de una obra de este carácter.

La idea de recompensa que aporta el hecho de haber tomado parte en la construcción de algo que tanta gente va a admirar a lo largo del tiempo es una visión que hace apreciar más este oficio.

El día a día en la realización del proyecto ha sido bastante llevadero a pesar de los problemas lógicos que iban surgiendo, gracias a una programación por bloques muy bien marcada por los tutores de proyecto sin la cual la culminación del proyecto hubiese sido de mayor complejidad.

También me gustaría destacar el método usado en las tutorías conjuntas, en las cuales uno se involucra en el resto de trabajos de sus compañeros aportando y recopilando ideas útiles unos de otros, lo que ha hecho a mi juicio un proyecto mucho más enriquecedor tanto para uno mismo como para el lector de trabajo.



# 7. BIBLIOGRAFÍA



## LIBROS CONSULTADOS

- SHARP, D.: *Santiago Calatrava*, Ed. E&FN Spon, 1994
- LEFAIVRE, L.: *Santiago Calatrava*, Ed. Motta, 2009
- TZONIS, A.: *Santiago Calatrava*, Ed. Poligrafa, 2004
- McQUAID, M.: *Santiago Calatrava, Structure and Expression*, Ed. The Museum of modern art, New York, 1993
- LEWIS KCUSEL, C y PENDLETON-JULLIAN, A.: *Santiago Calatrava, Conversaciones con estudiantes*, Ed. Gustavo Gili, S.A, 2003
- JODIDIO, P.: *Estação de Oriente*, Ed. Livros e Livros, 1998
- JODIDIO, P.: *Calatrava complete works 1979-2009*, Ed. Taschen, 2007
- CHARLESTON, A.: *La estructura como arquitectura*, Ed. Reverté, 2007
- LEVI, F. y CHIORINO, M.A y BERTOLINI CESTARI, C.: *Eduardo Torroja: from the philosophy of structures to the art and science of building*, Ed. F.Angeli, 2003
- KISER, K.: *Santiago Calatrava: The architect Studio*, Ed. Arvinus 2004
- LEVIN, M.: *Santiago Calatrava: The artworks*, Ed. Basel 2003

## OTROS DOCUMENTOS CONSULTADOS

- PAU BURGOS, L.: *Proyecto final de carrera: Los umbráculos. Del Jardín Botánico a la Ciudad de las Artes y las Ciencias*, 2008
- LÓPEZ PERALES, J.A.: *Tesis doctoral: Modelo de elementos finitos para el cálculo de arcos. Validación en estructuras agroindustriales de acero*, 2003
- NBE EA-95. *Estructuras de acero en edificación*

## WEB CONSULTADAS

- Web de Arquitectura, Ingeniería y Construcción. "www.Construmatica.com"
- Actualidad Valenciana. "www.valenciablog.com"
- Web de Arquitectura, "archikey.com"
- Web oficial de la Ciudad de las Artes y las Ciencias. "www.cac.es"
- Web sobre arquitectura. "www.arcspace.com"
- Web sobre arquitectura. "www.soloarquitectura.com"
- Web sobre arquitectura. "www.arcspace.com"
- Web sobre fotografías. "www.flickr.com"
- Web sobre fotografías. "www.arqhys.com"
- Foro sobre fotografías. "fotos-arquitectura.blogspot.com"
- Web sobre fotografía. "imageshack.us."
- Foro sobre la historia de la inundación de Valencia. "enlamemoriademuchos.blogspot.com."
- Foro sobre historia. "imperioeterno.blogspot.com"
- Foro sobre arquitectura. "maleskinearquitectonico.blogspot.com"
- Web sobre ciudades y lugares "www.360cities.net"
- Videos sobre Santiago Calatrava. "www.youtube.com"



## REFERENCIA DE FOTOGRAFÍAS Y MATERIAL GRÁFICO

### PORTADA

- Fotografía tratada en Photoshop por Damián Pardo Abiatti (Fotógrafo y diseñador de interiores)

### BLOQUE 1. INTRODUCCIÓN

- Fotos 1.1 y 1.2 Folleto informativo de la Generalitat Valenciana
- Fotos 1.3 a 1.5 Capturas de pantalla de google maps.
- Fotos 1.6 y 1.7 Foro “enlamemoriademuchos.blogspot”
- Foto 1.8 Foro “imperioeterno.blogspot.com”
- Foto 1.9 Web “www.emtvalencia.es”
- Foto 1.10 Web “www.cac.es”
- Fotos 1.11 a 1.15 Web “www.flickr.com”
- Foto 1.16 Web “www.urbanity.es”
- Foto 1.17 Web “www.flickr.com”
- Foto 1.18 Web “en.wikipedia.org”
- Foto 1.19 Captura propia
- Foto 1.20 y 1.21 Web “www.arqhys.com”
- Foto 1.22 Captura de video en youtube “Entrevista a Santiago Calatrava”
- Foto 1.23 Web “www.flickr.com”
- Foto 1.24 a 1.26 Libro “Calatrava, Complete works 1979-2009”

### BLOQUE 2. INSPIRACIÓN

- Foto 2.1 Web “www.flickr.com”
- Foto 2.2 Captura propia
- Fotos 2.3 y 2.4 Proyecto final de carrera: Los umbraculos
- Fotos 2.5 y 2.6 Web “www.flickr.com”
- Foto 2.7 Captura de la web “www.360cities.net”
- Foto 2.8 Web “www.cac.es”
- Fotos 2.9 y 2.10 Web “www.flickr.com”
- Foto 2.11 Libro “La Arquitectura de los jardines”
- Fotos 2.12 a 2.15 Web “en.wikipedia.org”
- Fotos 2.16 y 2.17 Libro “Calatrava, Complete works 1979-2009”
- Foto 2.18 Web “www.cac.es”
- Fotos 2.19 a 2.26 Libro “Calatrava, Complete works 1979-2009”
- Foto 2.27 Proyecto final de carrera: Los umbraculos
- Foto 2.28 Web “www.flickr.com”

- Fotos 2.29 y 2.30 Libro “Calatrava, Complete works 1979-2009”
- Foto 2.31 Libro “Estação de Oriente”
- Foto 3.32 Web “www.flickr.com”
- Fotos 2.33 y 2.34 Web “constructor.pixelabdigital.com”

### BLOQUE 3. ANÁLISIS GEOMÉTRICO

- Foto 3.1 Web “www.360cities”
- Figuras 3.2 a 3.24 Diseño y creación propio mediante autocad 3D
- Foto 3.25 Web “www.cac.es”
- Figuras 3.26 a 3.33 Diseño y creación propio mediante autocad 3D

### BLOQUE 4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

- Fotos 4.1 y 4.2 Tesis Doctoral: Modelo de elementos finitos para el calculo de arcos
- Figura 4.3 Diseño y creación propio mediante autocad 3D
- Foto 4.4 Web “arquitecturamashistoria.blogspot.com”
- Fotos 4.5 y 4.6 Web “www.flickr.com”
- Figuras 4.7 a 4.9 Diseño y creación propio mediante autocad 3D
- Fotos 4.10 Proyecto final de carrera: Los umbraculos
- Figuras 4.11 a 4.19 Diseño y creación propio mediante autocad 3D
- Fotos 4.20 Proyecto final de carrera: Los umbraculos
- Figura 4.21 Diseño y creación propio mediante autocad 3D
- Fotos 4.22 Proyecto final de carrera: Los umbraculos
- Figuras 4.23 a 4.29 Diseño y creación propio mediante autocad 3D

### BLOQUE 5. ANÁLISIS CONSTRUCTIVO

- Foto 5.1 Proyecto final de carrera: Los umbraculos
- Figura 5.2 Diseño propio mediante autocad
- Fotos 5.3 y 5.4 Web “www.cac.es”
- Figura 5.5 Diseño propio mediante autocad
- Figuras 5.6 a 5.8 Diseño y creación propio mediante autocad 3D
- Foto 5.9, 5.12, 5.15 y 5.18 Libro
- Figuras 5.10, 5.11, 5.13, 5.14 y 5.16 a 5.22 Diseño y creación propio mediante autocad 3D
- Fotos 5.23 a 5.26 Proyecto final de carrera: Los umbraculos
- Figuras 5.27 a 5.36 Diseño y creación propio mediante autocad 3D
- Fotos 5.37 a 5.42 Documento de la empresa BASF
- Figura 5.43 Diseño propio mediante autocad