

Palacio de las Artes Reina Sofía

Análisis de la cáscara

Proyecto final de grado 2010-2011

Taller 14:

Superficies arquitectónicas singulares

Proyecto:

Alberto Carreras Gumá

Tutores:

Francisco Javier Sanchís Sampedro

Rafael Juan Ligorit Tomás



Alberto Carreras Gumá

Palacio de las Artes Reina Sofía. Análisis de la cáscara

proyecto final de
pfg
grado 2010-2011

Modalidad. Científico Técnico

Taller 14. Superficies arquitectónicas singulares

Titulación. Ingeniería de Edificación

Proyecto

Alberto Carreras Gumá

Tutores

Francisco Javier Sanchis Sampedro

Rafael Juan Ligorit Tomás

Junio 2011



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE INGENIERÍA
DE EDIFICACIÓN

Termino la carrera y me doy cuenta de lo mucho que he aprendido, pero más aún, de lo mucho que me queda por aprender. Hace ya tiempo que despertó en mí la inquietud, la motivación y las ganas por crecer como técnico. La elección de desarrollar este proyecto, de escoger el taller "Superficies arquitectónicas singulares", responde a esas necesidades. Este trabajo suponía el reto de poder juzgar este tipo de superficies y de atravesar la frontera de la rutina del aprendizaje, estancada y limitada a lo común, básico y perpetuo.

ÍNDICE

1 . INTRODUCCIÓN

4	Cáscara del Palacio de las Artes
5	Antiguo cauce del río Turia
6	La Ciudad de las Artes y las Ciencias
9	Palacio de las Artes Reina Sofía
15	Santiago Calatrava

2 . ANÁLISIS ARQUITECTÓNICO

20	Criterios de diseño
24	Diseño y funcionalidad de la cáscara

3 . ANÁLISIS GEOMÉTRICO

26	La geometría
28	Desarrollo geométrico de la cáscara

4 . ANÁLISIS CONSTRUCTIVO

34	Estructura de la cáscara
43	Medios auxiliares
44	Montaje en obra
52	Revestimiento

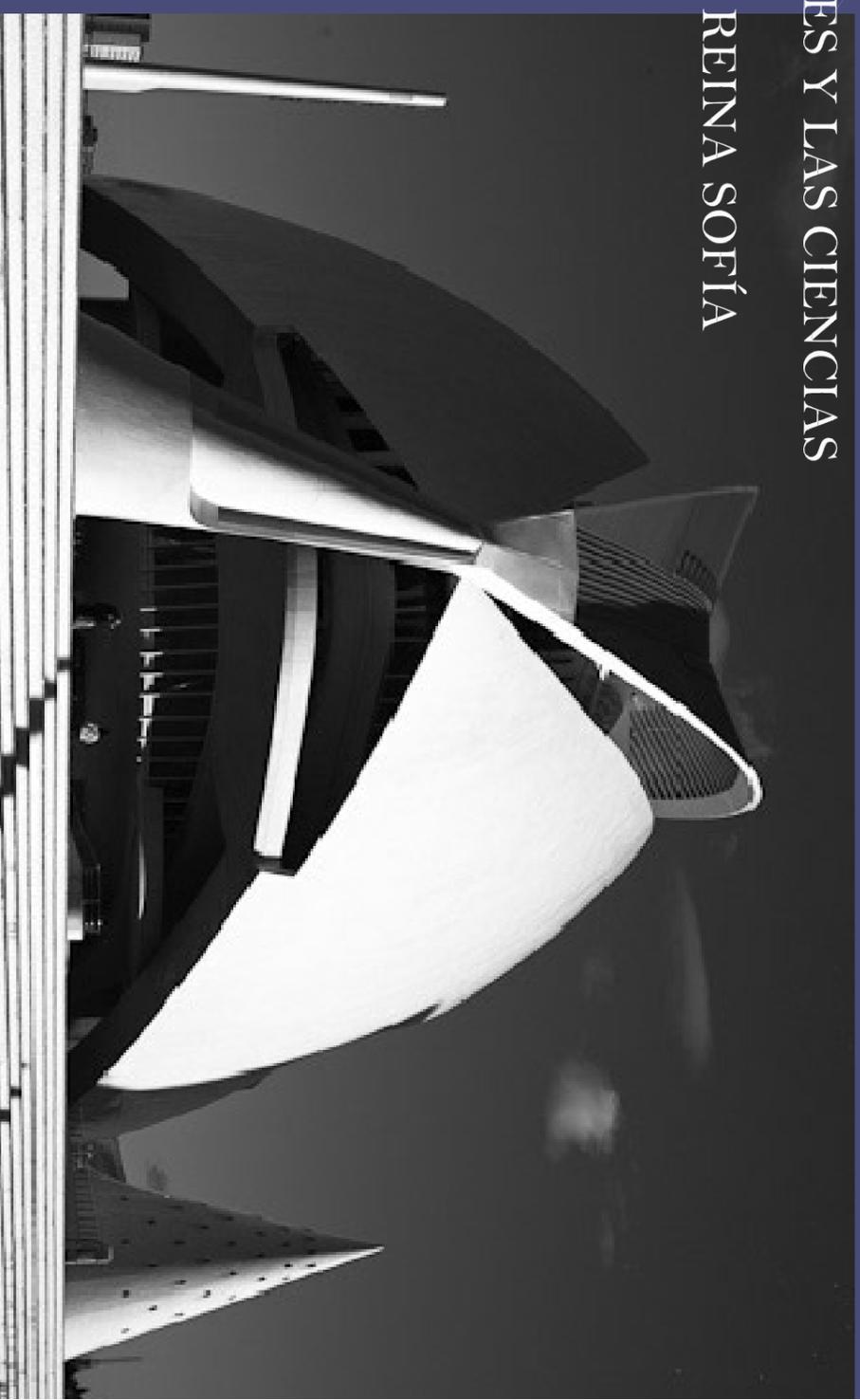
5 . ANÁLISIS ESTRUCTURAL

57	Comportamiento estructural
59	Acciones sobre la cáscara
61	Modelizado y dimensionado

64	Conclusiones
65	Bibliografía
67	Fuentes disponibles. Agradecimientos

1 . INTRODUCCIÓN

- 1 . 1 . CÁSCARA DEL PALACIO DE LAS ARTES
- 1 . 2 . ANTIGUO CAUCE DEL RÍO TURIA
- 1 . 3 . LA CIUDAD DE LAS ARTES Y LAS CIENCIAS
- 1 . 4 . PALACIO DE LAS ARTES REINA SOFÍA
- 1 . 5 . SANTIAGO CALATRAVA



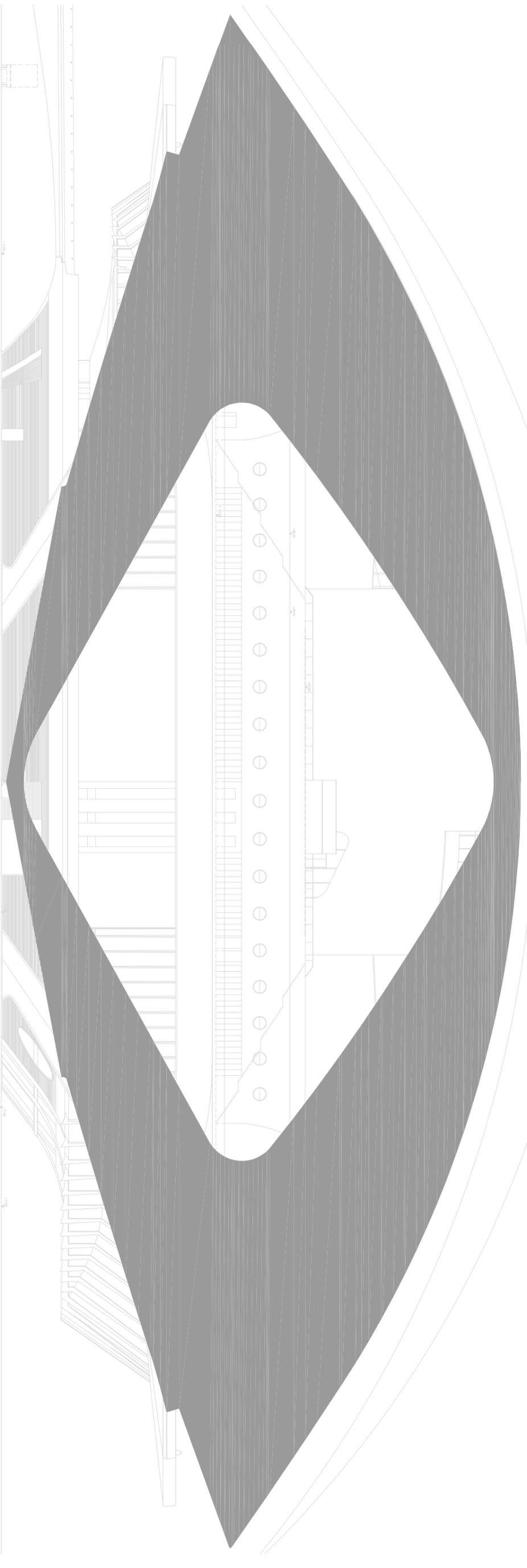


Figura 1. Alzado Sur del Palacio de las Artes. La parte sombreada corresponde a la cáscara del edificio.

Sin escala

Introducción

Es por todos conocidos, en mayor o menor medida, la figura del arquitecto valenciano Santiago Calatrava Valls. El estudio de este proyecto se centra en una superficie de uno de los edificios más emblemáticos de la ciudad de Valencia proyectado por él, el Palacio de las Artes Reina Sofía.

El objeto del estudio se basa en la cáscara, también denominadas carcasa (figura 1), que abraza la estructura del edificio dotándolo de identidad propia y conformando una piel externa que simpatiza con el entorno marítimo - urbano.



Figura 2. Fotografía del alzado norte del Palacio de las Artes donde se aprecia la singular cáscara que envuelve el edificio

Antes de desmenuzar la superficie y analizar pormenorizadamente su diseño, sistemas constructivos y estructurales, puesta en obra, etc., es conveniente dar una pincelada del edificio al que envuelve y el entorno en el que está situado.

El Palacio de las Artes, integra junto a otros edificios la denominada Ciudad de las Artes y las Ciencias, situado en el antiguo cauce del río Turia. El entorno peculiar donde se sitúa el edificio merece unas líneas, por lo que creo conveniente situarlo históricamente y matizar las actuaciones que se realizaron en el antiguo cauce del río en la ciudad de Valencia.

1. 2. Antiguo cauce del río Turia

Historia y actuaciones

Tras numerosos desbordamientos del río Turia, el 14 de octubre de 1957 tuvo lugar una gran inundación en Valencia (figura 3) que causó numerosos muertos y destruyó gran cantidad de edificios.

Después de la catástrofe ocurrida en la ciudad, se decidió desviar su curso hacia las afueras, elaborándose un plan consistente en la desviación del cauce del Turia al sur de Valencia (figura 4), por el llamado Plan Sur. Las obras del desvío del río concluyeron el 22 de diciembre de 1969.

Durante años se vivió el debate en la sociedad valenciana sobre el uso que debía darse a este gran espacio vacío dejado por el agua que

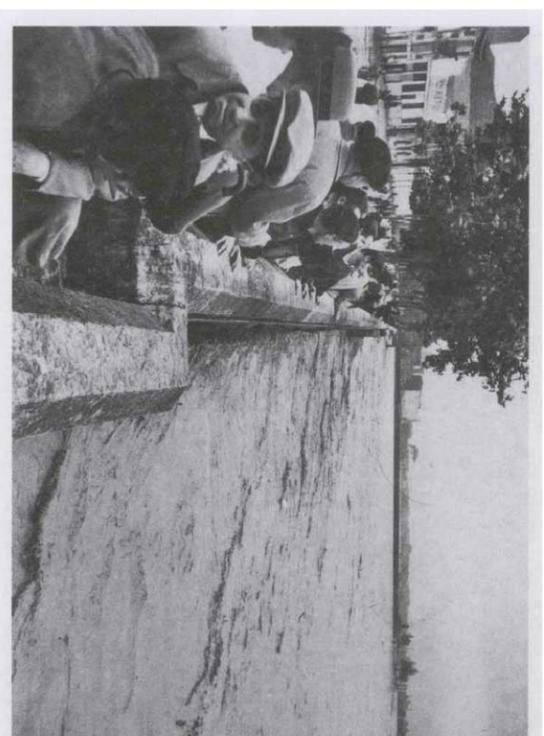


Figura 3. Cauce del río Turia momentos antes del desbordamiento (1957)

contenía el antiguo cauce.

Se presentaron varias propuestas, siendo la escogida la creación de un parque municipal del que todo el mundo pudiera disfrutar.

Hoy el río es parte indispensable de la imagen de la ciudad, sus casi 10 km de extensión están divididos en diferentes tramos, de manera que cada uno de ellos responde a un objetivo concreto formando así, un inmenso jardín con zonas verdes y deportivas (figura 5).

Dentro del antiguo cauce, entre otras zonas no menos importantes, nos encontramos con la conocida Ciudad de las Artes y las Ciencias, integrada por varios edificios proyectados por los arquitectos Félix Candela y Santiago Calatrava.

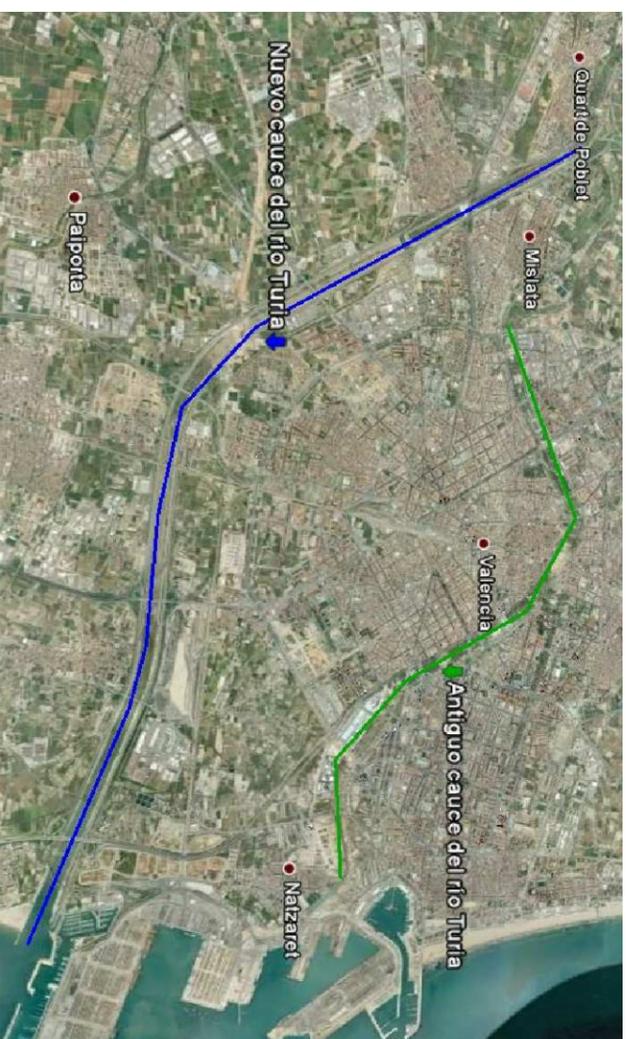


Figura 4. En verde, antiguo cauce del río Turia. En azul, nuevo cauce del río Turia



Figura 5. Zonas verdes del nuevo cauce del río Turia

Imagen de la ciudad de Valencia

La Ciudad de las Artes y las Ciencias está situada al Sur-Este de la ciudad de Valencia, en el tramo final del antiguo cauce del río Turia (figura 7). Este espacio recorre aproximadamente 2 km y presenta una superficie de 350.000 m².

La Ciudad de las Artes y las Ciencias es un gran espacio abierto que se presenta como un complejo de referencia internacional y símbolo de la ciudad de Valencia. Está compuesto por un conjunto de edificios de gran versatilidad, constituyendo un centro turístico-cultural que además sorprende por su arquitectura.

A sabiendas de la gran repercusión internacional del complejo por su arquitectura, merece mención especial la idea del proyecto, cuyo objetivo era abarcar aspectos tan diversos como la ciencia, investigación, arquitectura, tecnología, cultura, medio ambiente y ocio.

Figura 6. Fotografía aérea del conjunto de espacios y edificios que integran la Ciudad de las Artes y las Ciencias: Al fondo, Palau de les Arts Reina Sofía, seguido de l'Hemisfèric, el Museu de les Ciències Príncepe Felipe, l'Umbracle, el Àgora y l'Oceanogràfic.

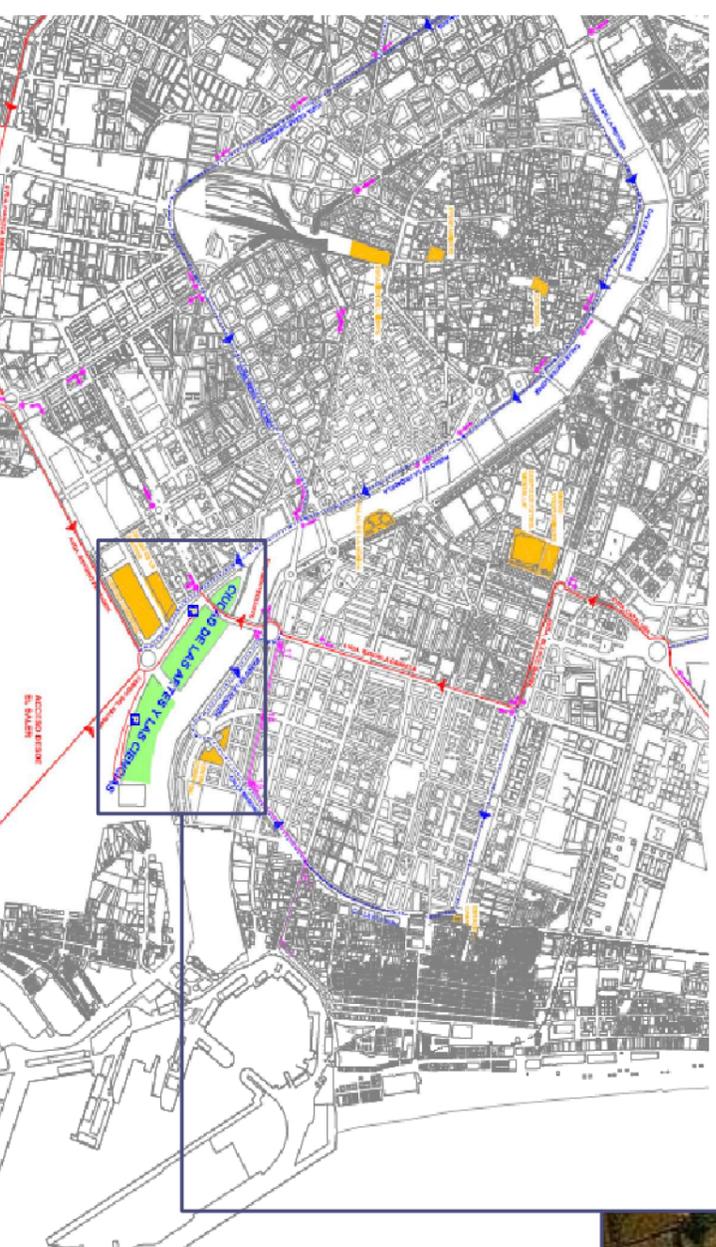


Figura 7. Localización de la Ciudad de las Artes y las Ciencias dentro de la ciudad de Valencia.

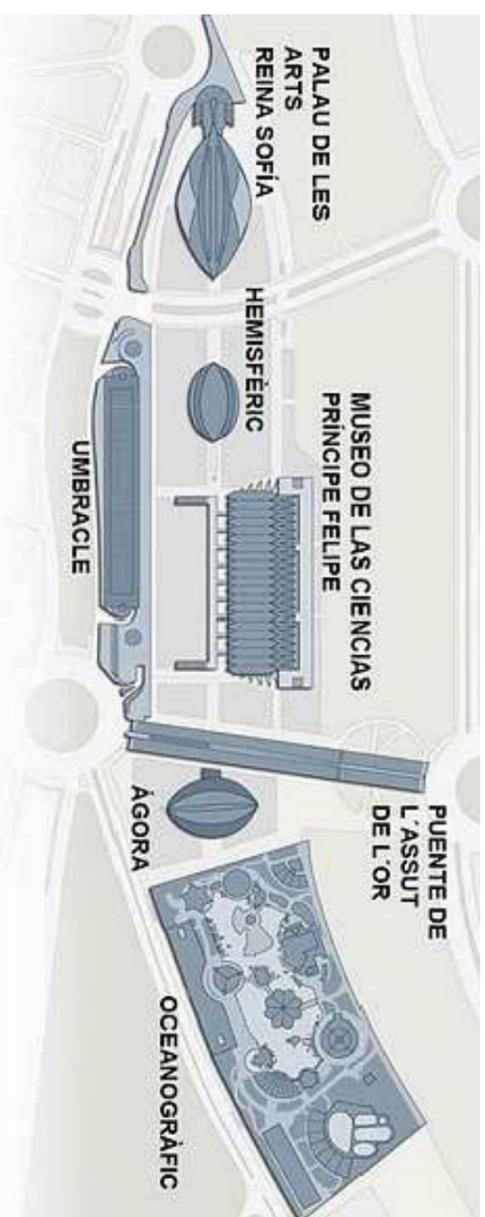
Como se ha mencionado anteriormente, este papel relevante en la arquitectura que ha adquirido el complejo ha sido posible gracias al trabajo de dos arquitectos españoles de prestigio internacional. Por un lado, Félix Candela, artífice de los edificios que integran l'Oceanogràfic, mientras que Santiago Calatrava aportó el Palau de les Arts, l'Hemisfèric, el Museu de les Ciències Príncepe Felipe, l'Umbracle y el Àgora.

Edificios que componen la Ciudad de las Artes y las Ciencias

En el plano de la Ciudad de las Artes y las Ciencias (figura 8) se especifica la ubicación de los edificios que componen el complejo. Situados de Este a Oeste, l'Oceanogràfic, el Àgora, el puente de l'Assut de l'Or, Museu de les Ciències Príncipe Felipe, l'Umbracle, l'Hemisfèric y el Palau de les Arts Reina Sofía.

El Palacio de las Artes será desarrollado con más profundidad en las siguientes páginas. A continuación se comenta brevemente cada uno de estos edificios.

Figura 8. Plano de la Ciudad de las Artes y las Ciencias con la identificación de los edificios que la componen.



L'Hemisfèric

inaugurado en el año 1998, l'Hemisfèric representa un gran ojo humano donde se pueden ver proyecciones audiovisuales. Destaca especialmente su cubierta ovoide de más de 100 m de longitud.



Museo de las Ciencias

inaugurado en el año 2000, el Museo alberga multitud de actividades e iniciativas relacionadas con la divulgación científica y tecnológica. Arquitectura, ingeniería y arte se complementan para originar formas orgánicas que hacen único el edificio.



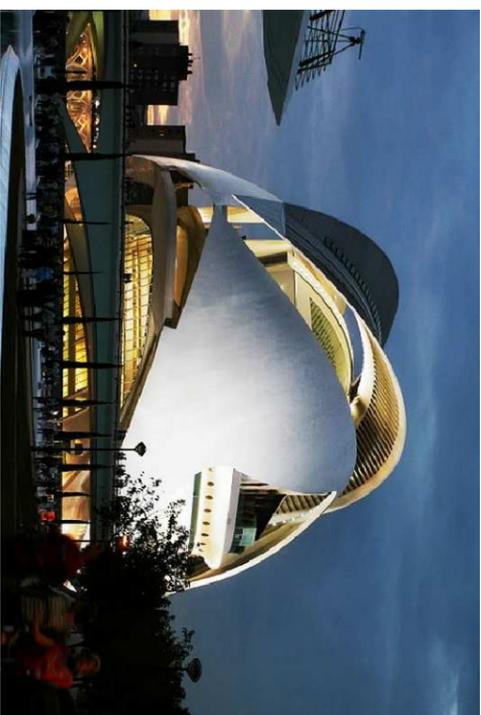
L'Umbracle

inaugurado en el año 2000, l'Umbracle alberga el aparcamiento para el complejo, en la parte superior se sitúa un paseo mirador que alberga esculturas rodeadas de especies vegetales. Arquitectónicamente destacan la sucesión de arcos parabólicos fijos y flotantes.



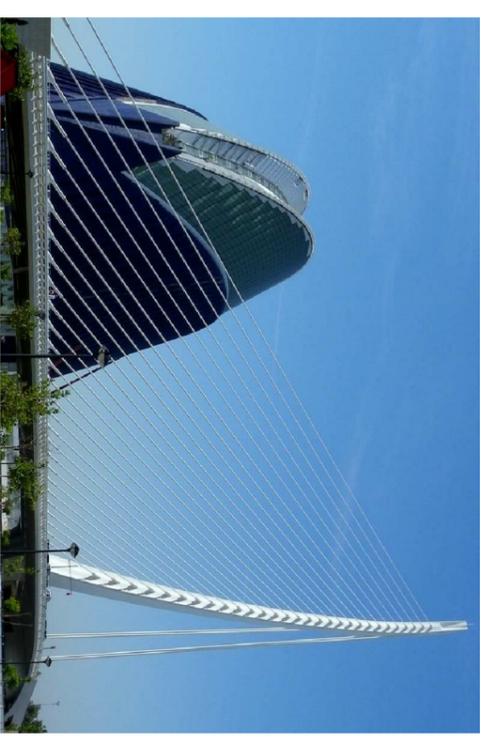
L'Oceanogràfic

inaugurado en el año 2002, el Oceanogràfic es el mayor complejo marino de toda Europa. Destaca por encima de los demás edificios, el restaurante submarino con una cúpula especular formada por la intersección de cuatro paraboloides.



Palau de les Arts

inaugurado en el año 2005, el Palau de les Arts supone para la ciudad de Valencia disponer de la mejor infraestructura para introducir las circuitos internacionales, especialmente en lo referido a la ópera y los grandes espectáculos musicales.



Puente de l'Assut de l'Or

Finalizado en el año 2008, el puente de l'Assut de l'Or destaca por sus 180 m de longitud y 34 m de anchura, cubriendo un vano de 155 m. Se caracteriza especialmente por el pilono, del cual salen 29 cables en su parte delantera, además de ser el punto más alto de la ciudad con sus 125 m de altura.



Ágora

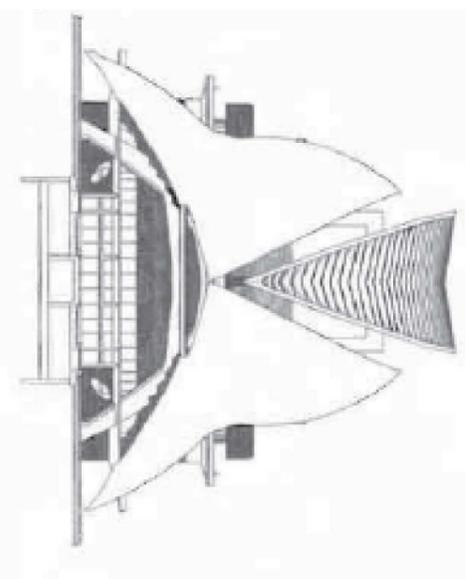
inaugurado en el año 2009, aunque sigue sin estar finalizado, el Ágora es una gran plaza cubierta donde podrán realizarse acontecimientos. Ocupa una superficie elíptica y tiene una altura de 80 m. Aún falta por instalar las "alas" de la parte superior del complejo.



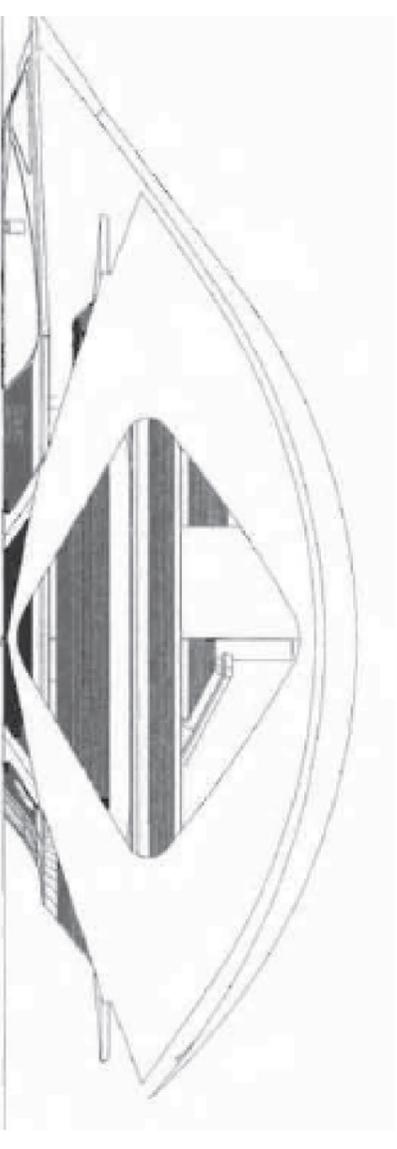
1. 4. Palacio de las Artes Reina Sofía

Descripción

Este edificio, inaugurado el año 2005, está situado al oeste del conjunto de la Ciudad de las Artes y las Ciencias. El Palacio de las Artes es un espectacular edificio que se ha erigido como símbolo de la ciudad de Valencia, tanto en lo referente a su uso funcional como a su innovadora arquitectura. El edificio está concebido como un auditorio múltiple que alberga cuatro salas para diferentes espectáculos de ópera, teatro y música, pero más allá de su uso funcional, el Palacio de las Artes, proyectado por el reconocido arquitecto valenciano Santiago Calatrava, constituye un referente arquitectónico a nivel mundial. Las dimensiones del edificio no dejan indiferentes a nadie a pesar de estar embebido en el antiguo cauce del río Turia, ya que cuenta con una superficie de 37.000 m² y una altura de más de 70 m. Se presenta como una escultura con un alto simbolismo, sus formas náuticas enfatizan la relación con el entorno al estar situado en el antiguo lecho fluvial del Turia.



Alzado Este



Alzado Sur.

Las partes más representativas del conjunto son la cubierta, también denominada "pluma", que se caracteriza por una precisión geométrica y estructural que otorga al edificio una rotunda expresividad, y por otro lado están las cáscaras que rodean al edificio que conforman en gran medida la personalidad del mismo.

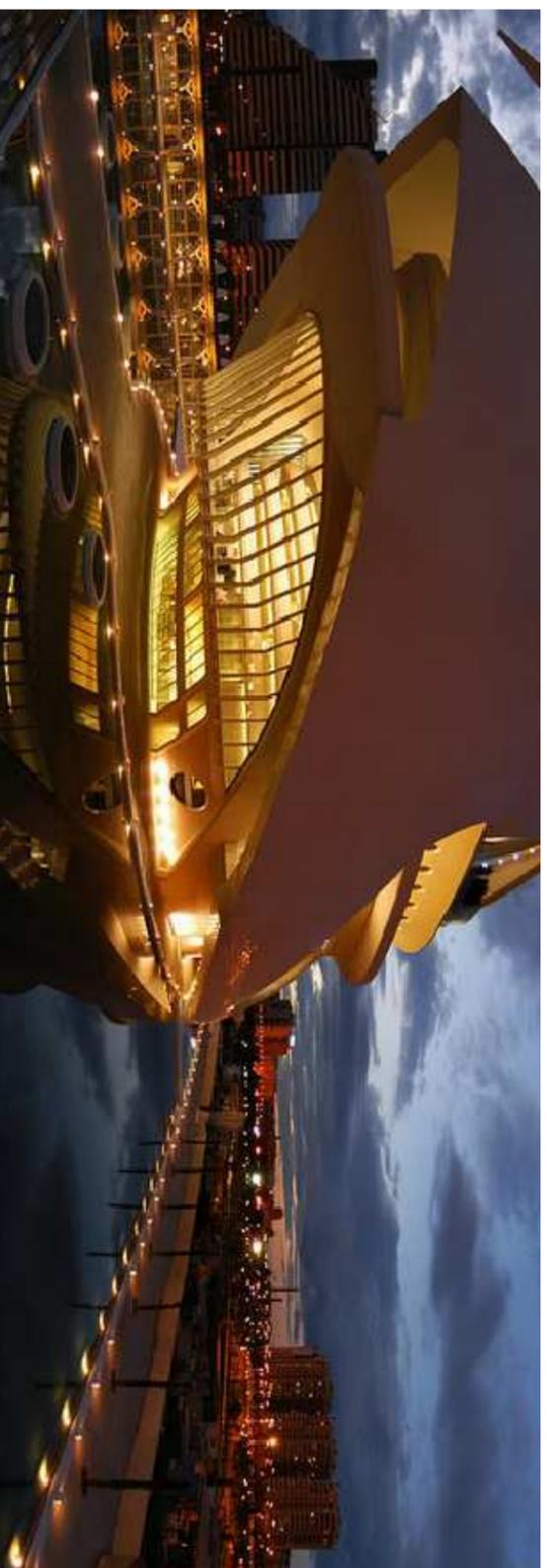
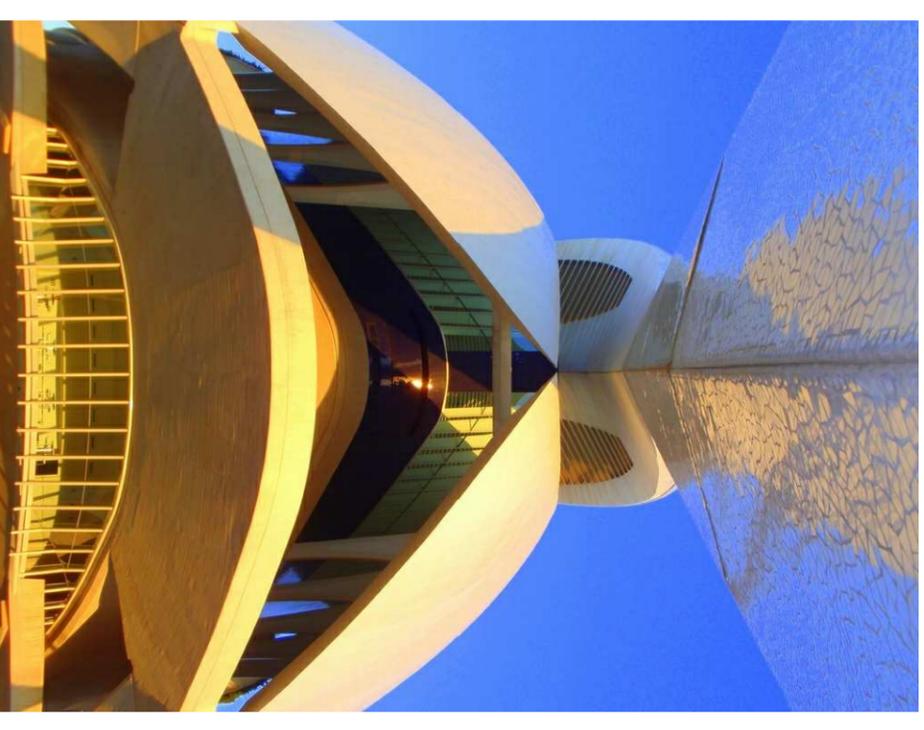


Figura 9, 10 y 11. Arriba, planos del Palacio de las Artes. A la izquierda y derecha, fotografías del mismo edificio.



Programa funcional

Es importante conocer un poco el edificio para darse cuenta de la envergadura del mismo, por lo que se van a dar pinceladas sobre los espacios funcionales y arquitectónicos más representativos del Palacio de las Artes.

El programa funcional del edificio consta de cuatro auditorios:

- La Sala Principal
- Auditori
- Aula Magistral
- Teatro Martín y Soler

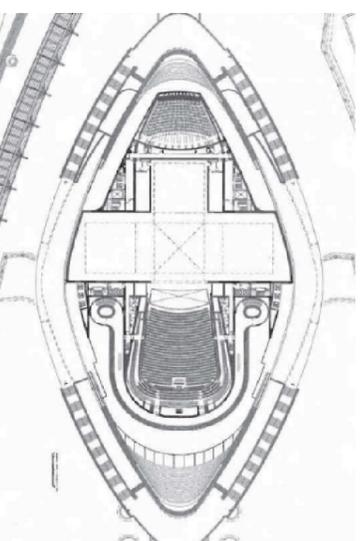


Figura 12. Planta 6. Cota +11,50

En la parte derecha, alzado sur del Palacio de las Artes y planta 1 (cota +1,5). A la izquierda, plantas sin escala a distintas cotas.

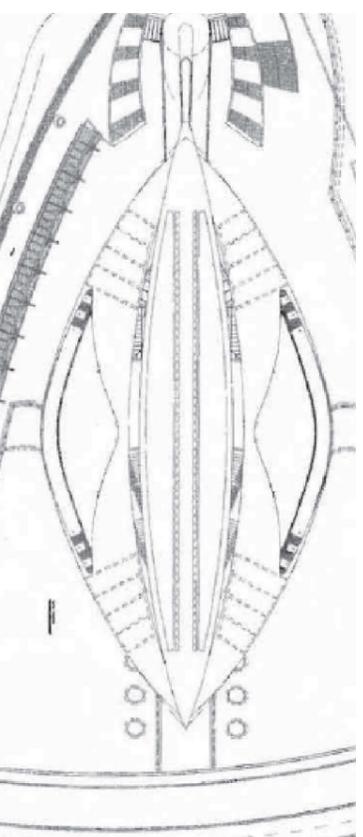
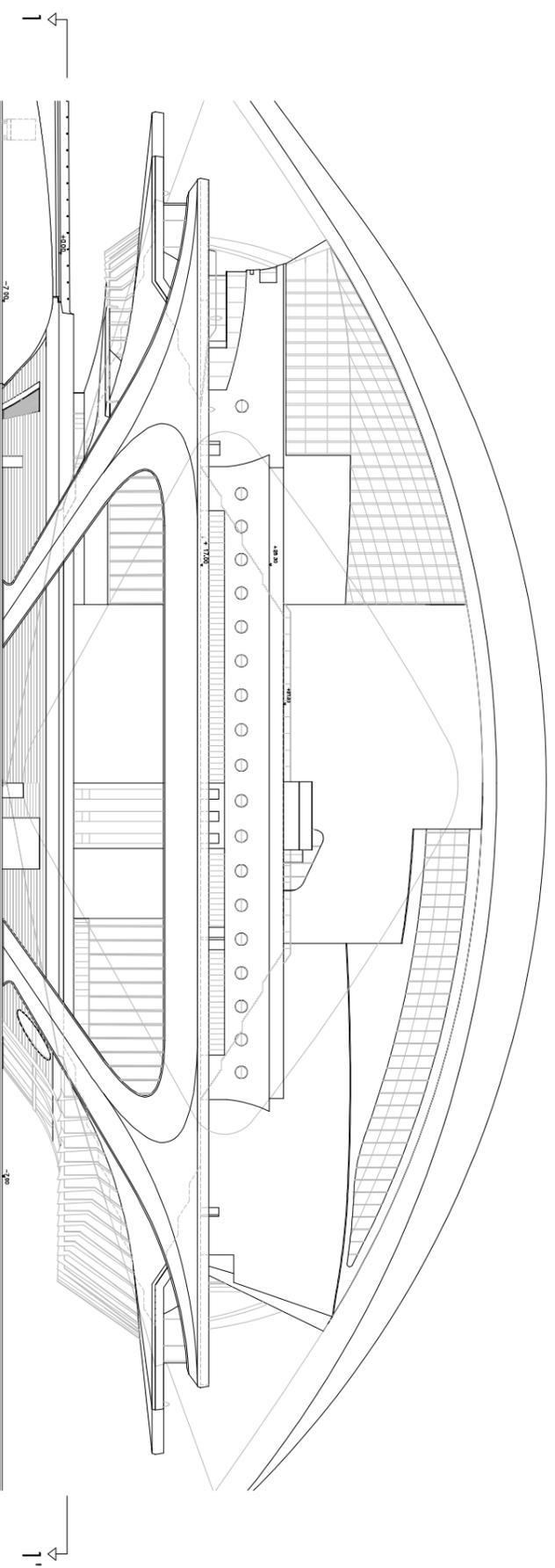
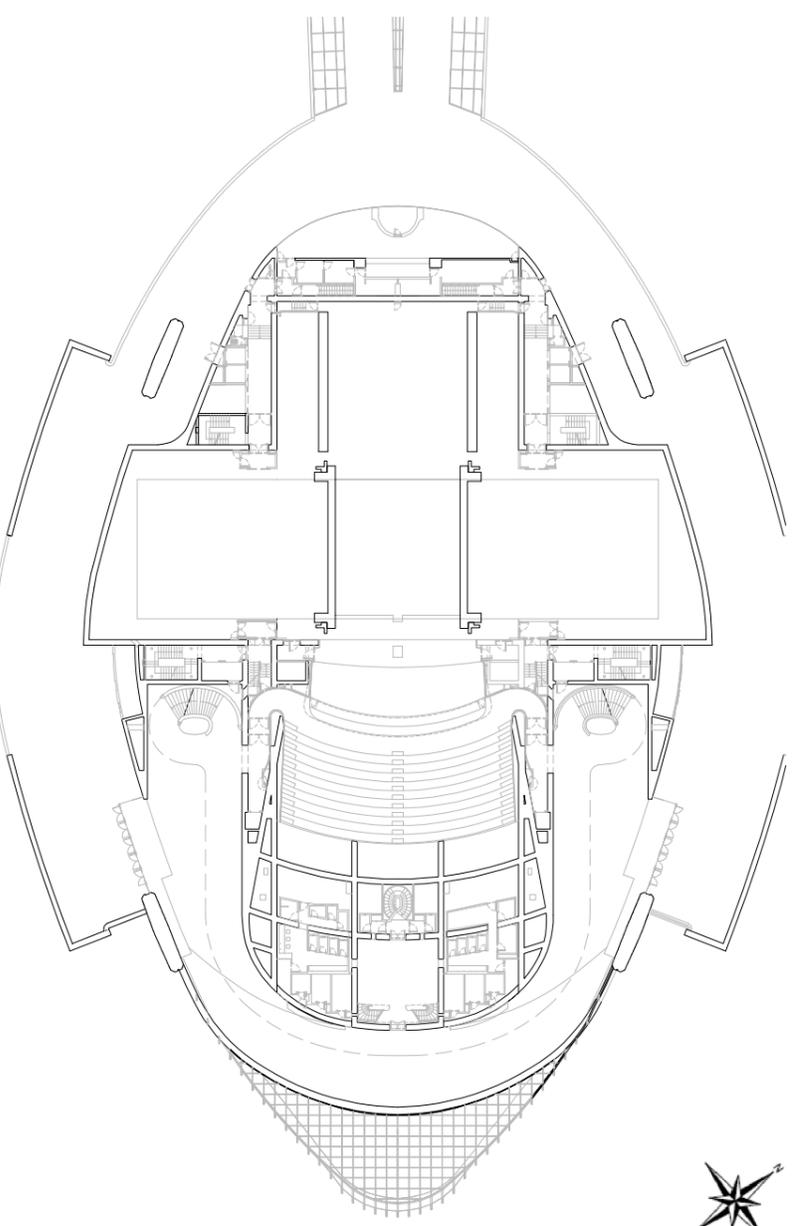


Figura 13. Planta aérea



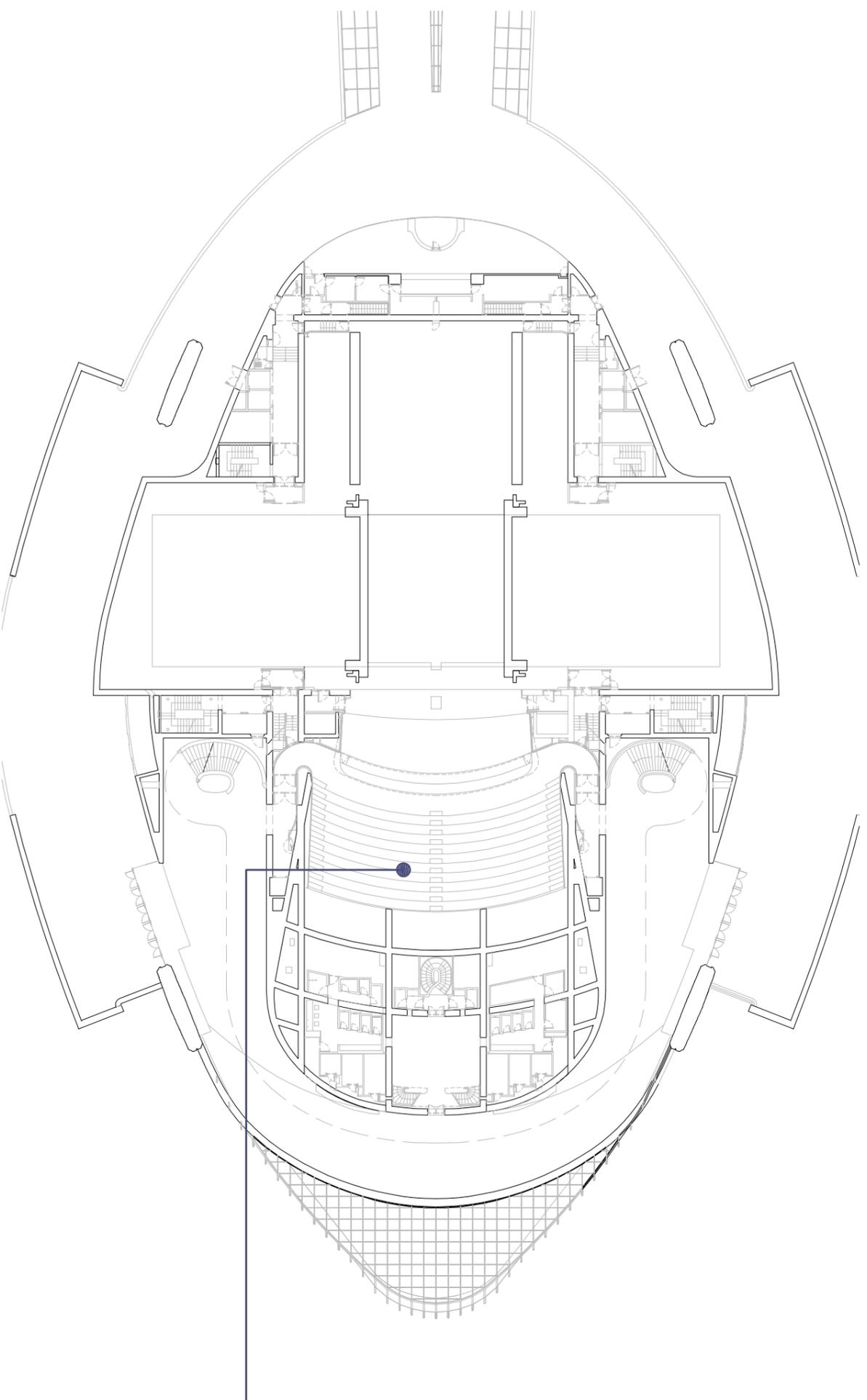
Alzado sur

Escala 1:750



Planta 1-1': Cota +1,5 m

Escala 1:750



Planta 1-1'. Cota +1,5 m

Escala 1:500

Sala principal

La Sala Principal (figura 15), con capacidad para 1.412 espectadores, es el espacio por excelencia del edificio de Santiago Calatrava. En ella tienen lugar las representaciones de ópera, ballet y demás espectáculos escénicos. Consta de una amplia platea y cuatro niveles de palcos distribuidos en herradura.

Los palcos están formados por superficies curvas de hormigón contrastando con el revestimiento de las paredes de trencadís azul.

El foyer de encuentro (figura 14) abraza la sala principal, permitiendo así, un recorrido perimetral con acceso a dependencias anexas a la sala.

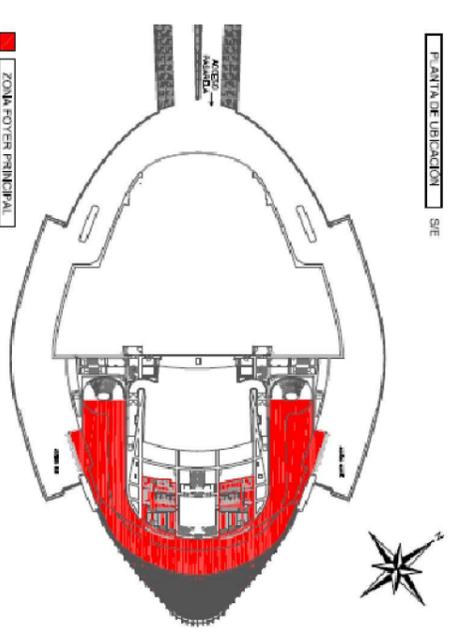


Figura 14. Zona de foyer que rodea la sala principal.

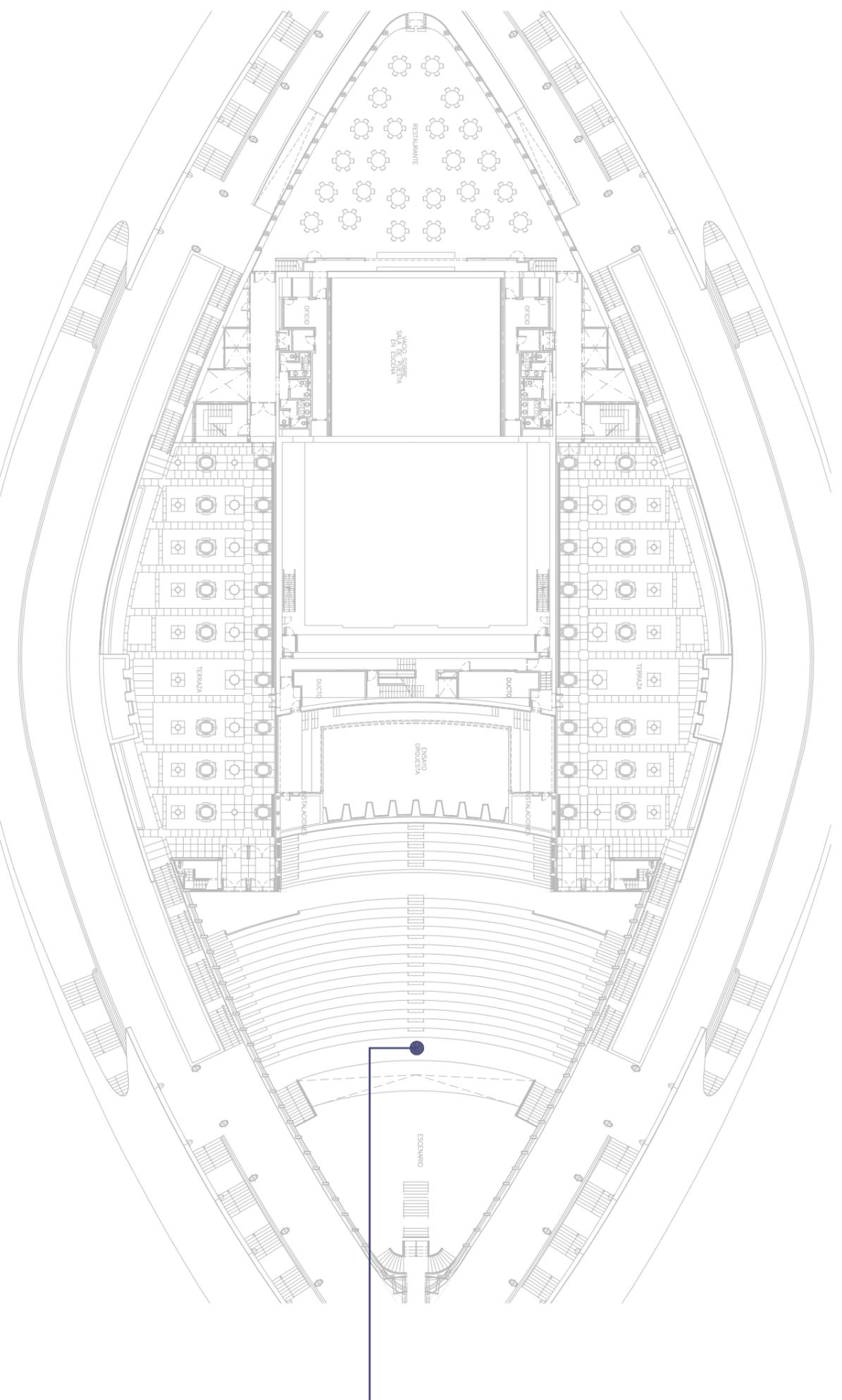


Figura 15. Fotografía de la sala principal

Auditori

El Auditori tiene una capacidad para 1.490 espectadores y por sus características es especialmente adecuado para la celebración de conciertos sinfónicos, estrenos cinematográficos y congresos o eventos especiales. A este recinto se accede por los ascensores

panorámicos y atravesando unas terrazas con vegetación. En el proyecto esta sala estaba concebida para que estuviese abierta al exterior a modo de plaza semicubierta, pero durante la ejecución se rechazó esta opción debido al excesivo ruido que provenía del exterior.



Planta 11. Cota +28,10 m

Escala 1:500

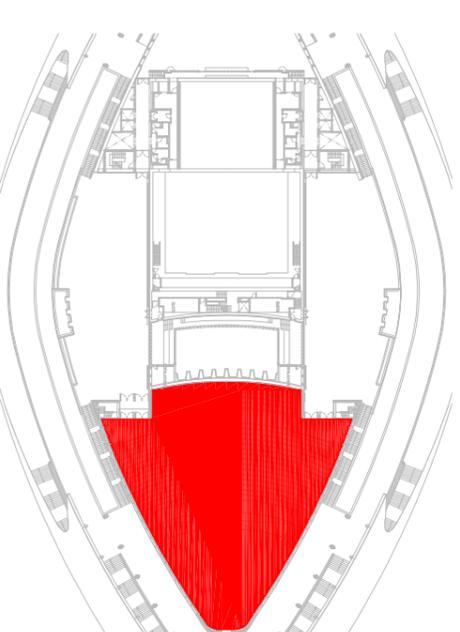


Figura 16. En rojo, Auditori.

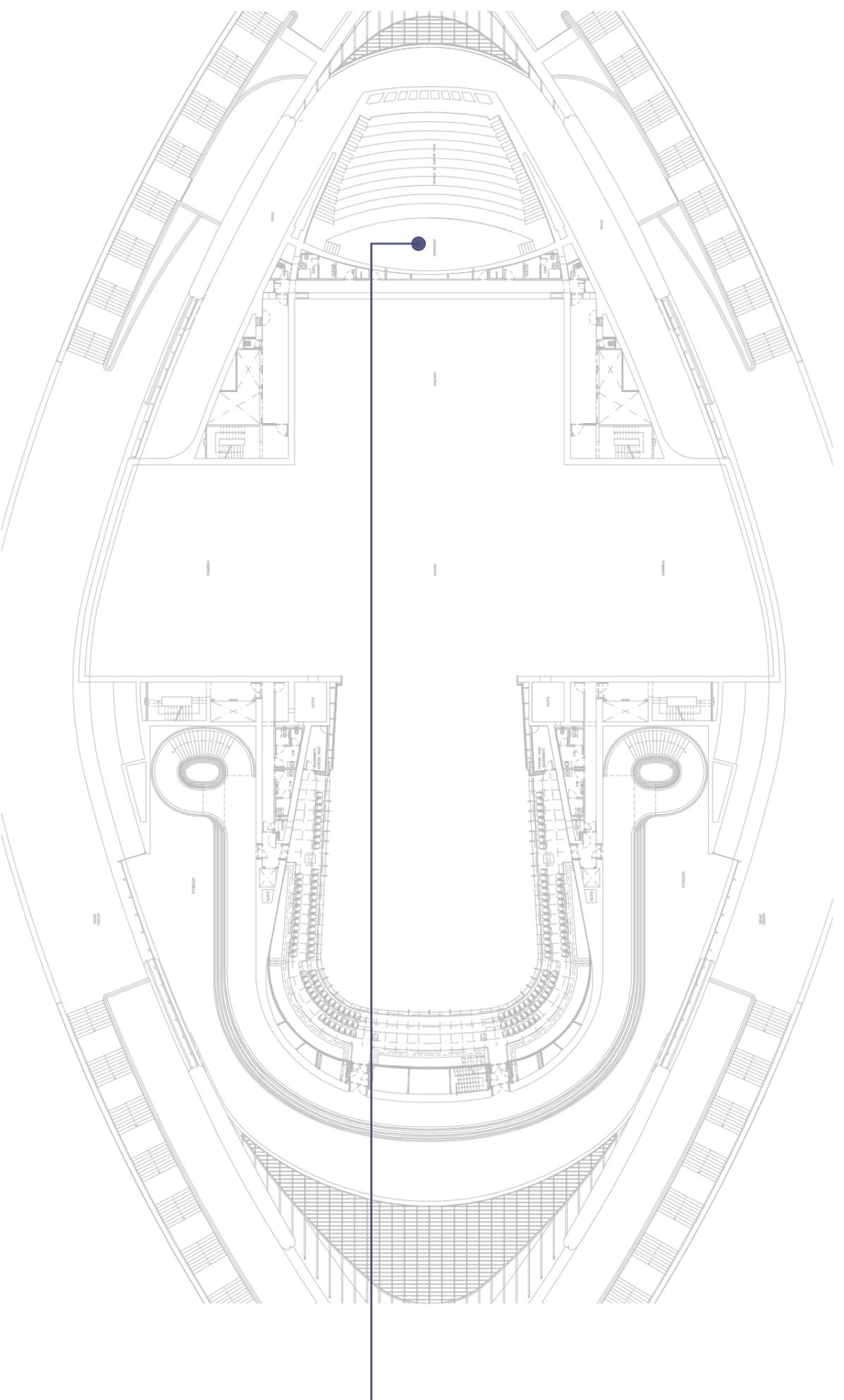


Figura 17. Fotografía del auditori

Aula Magistral

El Aula Magistral tiene capacidad para 378 personas. En ella pueden realizarse eventos de menor formato. Su escenario permite la celebración de conferencias, recitales, encuentros educativos o mesas redondas.

La entrada a la sala se sitúa en la cota +6,00 m, accediendo a ella mediante las escaleras principales laterales, que van dando paso a las distintas plantas del edificio.



Planta 6. Cota +11,50 m

Escala 1:500

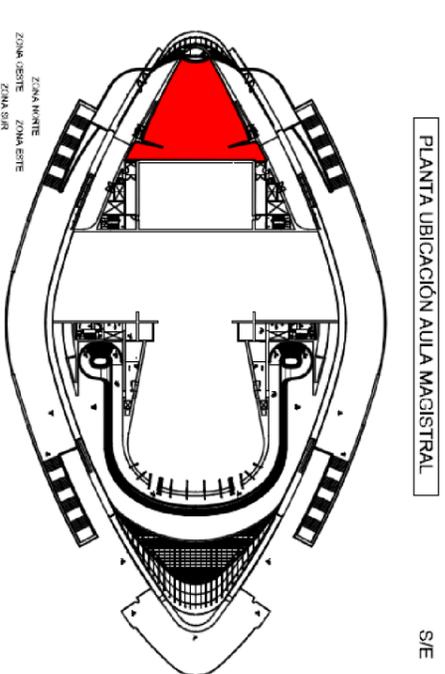


Figura 18. En rojo, Aula Magistral.

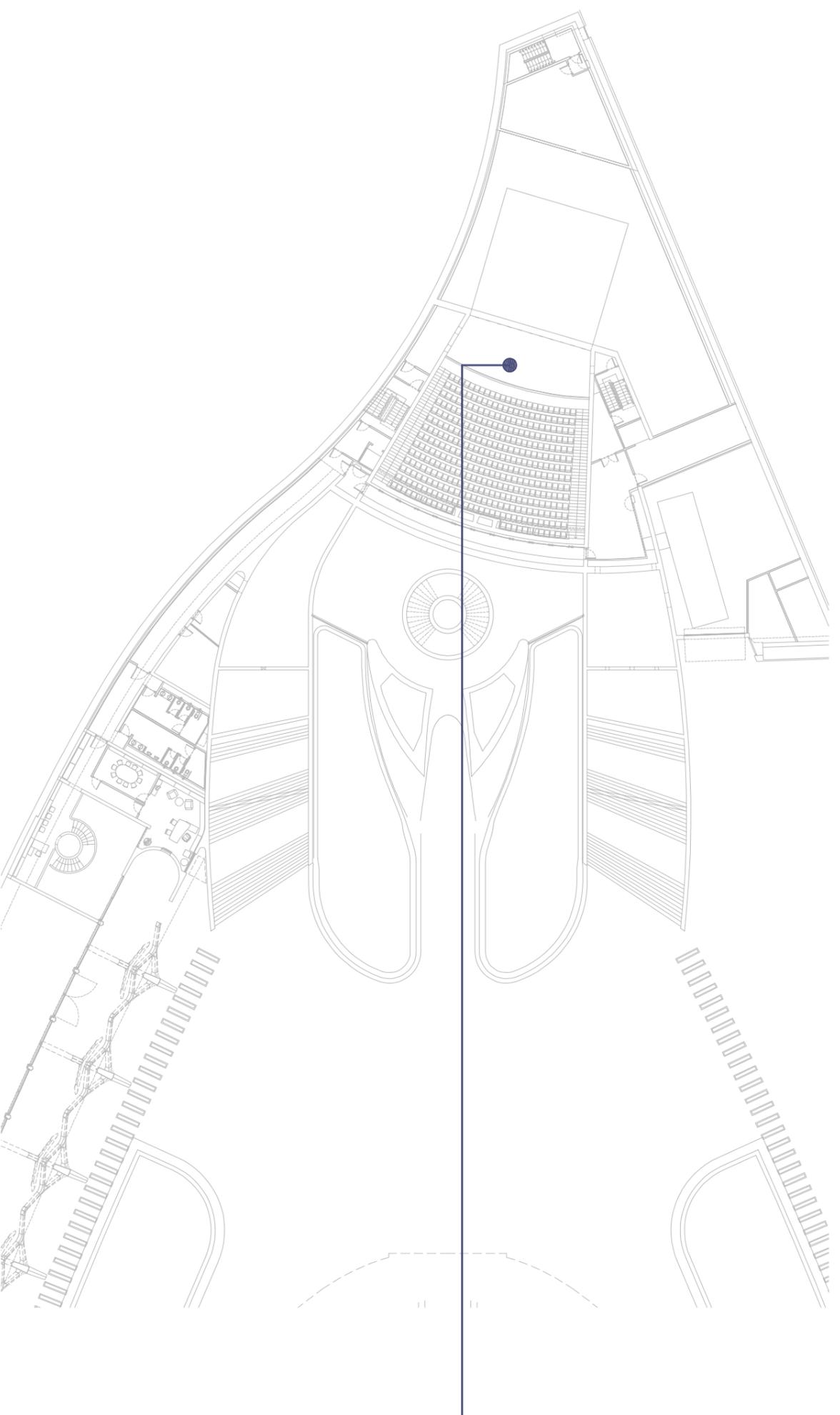


Figura 19. Fotografía del Aula Magistral

Teatro Marín y Soler

El Teatro Marín y Soler tiene su entrada en la planta -2 (cota -7 m) y el escenario se sitúa en la cota -14 m. La sala tiene capacidad para 400 personas. Debe su nombre al compositor valenciano más universal de todos los tiempos.

En ella se programa ópera barroca y música de cámara. Tiene entrada independiente al resto del edificio, lo que permite albergar actos en su exterior.



Planta -1. Cota -3,00 m

Escala 1:500

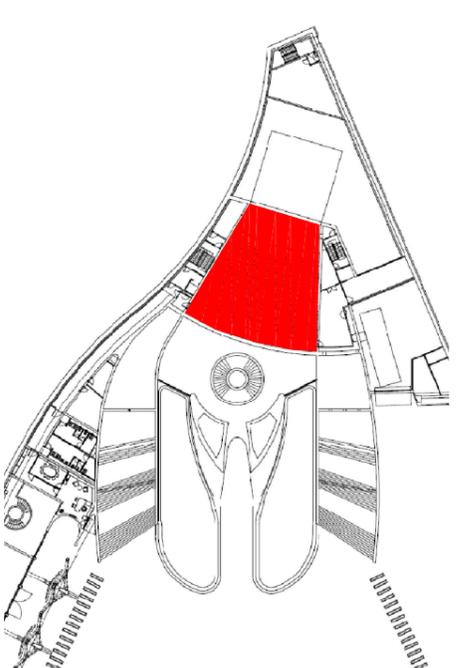


Figura 20. En rojo, Teatro Marín y Soler.



Figura 21. Fotografía del Aula Magistral

1983 — Baumwollhof Balcony, Zurich, Suiza, 1983

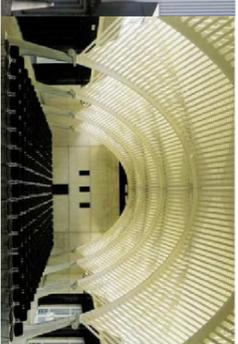


Baumwollhof Balcony

PTT Postal Centre Canopy



Wohlen High School, Roofs and Hall



Lucerne Station Hall



1985 — PTT Postal Centre Canopy, 1983-1985



Ernsting's Warehouse, Coesfeld, Alemania, 1983-1985

1986 — Musical School Concert Room St. Gallen, Suiza, 1986

1987 — TabouretIII Theatre, Basle, Suiza, 1986-1987

1988 — Wohlen High School, Roofs and Hall, Wohlen, Suiza, 1983-1988

1989 — Lucerne Station Hall, Lucerne, Suiza, 1983-1989



Biografía

Santiago Calatrava es, por diversos conceptos, un personaje fuera de lo común. Nació cerca de Valencia, en Benimámet (28 de julio de 1951), y en la ciudad del Turia estudió Arte antes de iniciar la carrera de Arquitectura en la misma capital levantina. Pero más insólito aún es que, después de finalizarla, se decidiera a seguir estudios de Ingeniería Civil en la Universidad Técnica Helvética (ETH) de Zúrich. Allí se doctoró, en el año 1981. En la época en que un buen número de arquitectos famosos no dudan en declararse autodidactas, la formación de Calatrava no podría ser más académica. No sólo habla con total fluidez español, inglés, francés y alemán, sino que también sobrepasa las barreras entre el arte, la arquitectura y la ingeniería. Santiago Calatrava se ha convertido así en una figura muy reconocida en nuestro tiempo.

La casa que le sirve tanto de residencia como de estudio, en las proximidades del Lago de Zúrich, revela buena parte del carácter y del proceso de trabajo propios de Santiago Calatrava. El arquitecto ha remodelado comple-

1990 — Stadelhofen Station, Zurich, Suiza, 1983-1990



Kuwait Pavilion



BCE place: Galleria & Heritage Square



Lyon-Saint Exupéry Airport Railway Station



Recinto Ferrial de Tenerife



Buchen Housing Estate

1992 — Kuwait Pavilion, Sevilla, España, 1991-1992

— Montjuic Communications Tower, Barcelona, Spain, 1989-1992

— BCE place: Galleria & Heritage Square, Toronto, Canada , 1987-1992

1993 — Shadow Machine, New York, USA, 1992-1993

1994 — Lyon-Saint Exupéry Airport Railway Station, Satolas, Lyon, Francia, 1989-1994

1995 — Remodelación de la Plaza de España, Alcoy, España, 1992-1995

— Recinto Ferrial de Tenerife, Tenerife, España, 1992-1995

1996 — Sondica Control Tower, Bilbao, España, 1993-1996

— Buchen Housing Estate, Würenlingen, Suiza, 1987-1996

tamente el edificio, dándole un aspecto moderno y diáfano, que no consiguen perturbar ni los objetos extraños ni el desorden. La relación entre las obras artísticas de Calatrava y sus proyectos arquitectónicos es compleja, aun cuando algunas formas, como la de la Estación del TGV en Lyon-Satolas, pueden reconocerse sin dificultad en sus esculturas.

Santiago Calatrava no parece especialmente preocupado por los respectivos papeles que han de desempeñar la arquitectura y la ingeniería en el proceso de construcción, o incluso en sus propias obras. " En principio el arquitecto es el responsable; el ingeniero trabaja para él", dice al respecto. Sin embargo, debido al interés que simultáneamente manifiesta por el arte, la ingeniería y la arquitectura, Calatrava se encuentra en el foco de uno de los más intensos debates en la historia reciente de la construcción y del diseño.

Su tardío comienzo en el ejercicio profesional no le ha privado de la realización de numerosos proyectos. En 1983 le fue adjudicada su primera obra de cierta importancia. En 2007 le fue concedido el Premio Nacional de Arquitectura. A realizado innumerables obras, en estas páginas se nombran algunas de las más destacadas.

1997 — Puente peatonal Campo Volantín, Bilbao, España, 1990-1997



Estación de Oriente



Emergency Services Centre



SMU's Meadows Museum Wave sculpture



Ciudad de las Artes y las Ciencias



Aeropuerto de Sondica

1998 — Estación de Oriente, Lisboa, Portugal, 1993-1998

1999

Pfalkeller Gallery, St. Gallen, Suiza, 1997-1999

Emergency Services Centre, Moosbrugstrasse, St. Gallen, Suiza, 1988-1999



Bodegas Ysios



Auditorio de Tenerife

2000

SMU's Meadows Museum Wave sculpture, Dallas, USA, 2000

Ciudad de las Artes y las Ciencias, Valencia, España, 1991-2000

Aeropuerto de Sondica, Bilbao, España, 1990-2000

2001

Bodegas Ysios, San Sebastián, España, 1998-2001

Milwaukee Art Museum, Milwaukee, EE UU, 1994-2001

2003

Auditorio de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife, España, 1991-2003



El enfoque. Auditorio de Tenerife

Creo conveniente dedicar unos pocos párrafos al proyecto que, a mi juicio, es posiblemente la obra inspiradora y que presenta más similitudes con el Palacio de las Artes de Valencia. No tan solo es la simple funcionalidad de albergar un auditorio la que los une, sino que la forma arquitectónica, los materiales y los procesos de ejecución, lo señalan como el antecesor del Palacio de las Artes.

No vamos a analizar ni mucho menos el edificio, pero sí quería comentar ciertos aspectos que enlazan ambos edificios. Como es obvio, los dos proyectos están constituidos funcionalmente como auditorios, pudiendo albergar diferentes programas en su interior. En cuanto al diseño, a mi parecer, presentan ciertas relaciones. Situa-

2004

- Complejo Olímpico Atenas, Atenas, Grecia, 2001-2004
- Universidad de Zurich - Law Faculty, Zurich, Suiza, 1988-1999



Complejo Olímpico Atenas



Universidad de Zurich - Law Faculty



Turning Torso



Ciudad de las Artes y las Ciencias



Puente de L'Assut d'Or

2005

- Turning Torso, Malmö, Suecia, 1999-2005
- Palacio de las Artes, Valencia, España, 1996-2005



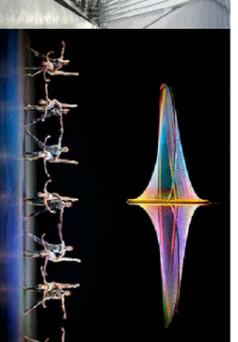
- Petah-Tikva Footbridge, Tel-Aviv, Israel 1998-2006



Ágora



Liège Guillermíns TGV Railway Station



New York City Ballet

2008

- Puente de L'Assut d'Or, Valencia, España, 1992-2008



2010

- New York City Ballet, New York, USA, 2010

dos ambos próximos al mar, el Auditorio de Tenerife, y sumergiéndonos en el carácter metafórico del autor, sus formas presentan ciertas similitudes hacia elementos náuticos, como pueden ser las formas de las velas. En cuanto al Palacio de las Artes, sus formas náuticas enfatizan la relación con su emplazamiento en el antiguo cauce del río Turia. Por supuesto, la cubierta de ambos proyectos tienen una enorme similitud, generando formas muy comunes en las obras de Calatrava. Sin entrar en más detalle, otro aspecto que une ambos edificios, es la utilización de los materiales, dominando en ambos proyectos la utilización del acero y el hormigón blanco, así como el trencadís blanco como material cerámico para revestir la superficie.

2. ANÁLISIS ARQUITECTÓNICO

2.1. CRITERIOS DE DISEÑO

2.2. DISEÑO Y FUNCIONALIDAD DE LA CÁSCARA



El diseño en la arquitectura

Muchos factores influyen en la elaboración y creación del diseño de un edificio, donde el arquitecto intenta lidiar con todos ellos para conseguir un resultado satisfactorio. Aspectos estructurales, de viabilidad constructiva, económicos, relación con el entorno, funcionales, iluminación, eficiencia energética, estética, son parte de un conjunto de condicionantes que serán determinantes a la hora de elaborar el diseño de un edificio. Y no solo hay que tenerlos en cuenta, sino que es necesario encontrar el equilibrio entre todos ellos para optimizar el diseño.

Lo hizo muy bien el arquitecto madrileño Félix Candela, inmerso de lleno en la construcción laminar, consiguió combinar de manera impecable la optimización de la eficiencia estructural a través de la forma geométrica, realizando láminas de espesores muy reducidos (figura 1 y 2).

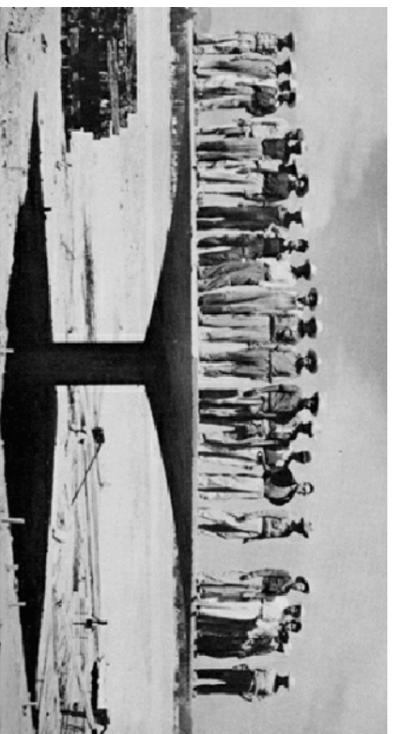


Figura 1. Prueba de carga de una estructura en paraguas formada por la combinación de paraboloides hiperbólicos que se apoyan en un único soporte central. Félix Candela



Figura 2. Restaurante Los Manantiales en Xochimilco construido por Félix Candela con una cubierta formada por la intersección de cuatro paraboloides hiperbólicos.

La forma geométrica que inunda la mayoría de sus obras es el paraboloides hiperbólico, con el que además de optimizar el comportamiento estructural a través de su geometría, conseguía facilitar las soluciones constructivas de la lámina con respecto a otras formas y disminuir costes económicos al permitir encofrar las superficies y reducir los espesores del material. Otro ejemplo es la Ópera de Sydney de Jorn Utzon (figura 3), donde se utilizaron segmentos de una misma esfera de radio constante para la cubierta (figura 5), consiguiendo de esta forma facilitar la producción en serie de doweles modulares, minimizando las tareas de ejecución a partir de una geometría tipo sin perder la belleza que le caracteriza.

Por lo tanto, según las necesidades del edificio y las intenciones y conocimientos del arquitecto, tomarán mas importancia unos u otros aspectos en el diseño.



Figura 3. Vista exterior de la Ópera de Sydney. Jorn Utzon.

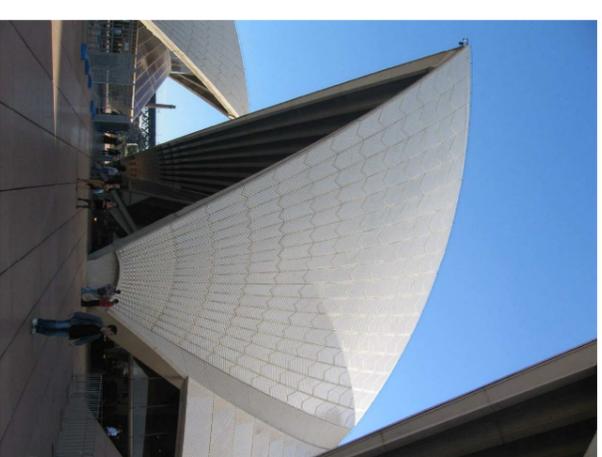


Figura 4. Parte de la cubierta de la Ópera de Sydney donde se aprecia el revestimiento de mosaico cerámico colocado sobre las doweles modulares.



Figura 5. Superficies de la cubierta de la Ópera de Sydney resultante de la misma geometría esférica.

Santiago Calatrava. El diseño en sus obras

Cada arquitecto es un mundo, tiene su manera de pensar, sus ideas, han adquirido bases teóricas distintas, etc., por lo que trataré de contar como entiende Calatrava la arquitectura y como plantea sus obras. A través de unas conferencias impartidas por él en el Massachusetts Institute of Technology conoceremos más de cerca que aspectos toman relevancia en el diseño de sus proyectos.

Realizó una obra en la escuela cantonal de Wohlen (Aargau, Suiza, 1984-1988) que requería una serie de intervenciones en algunos edificios preexistentes. Entre ellas, estaba la de añadir una entrada (figura 6):

" La idea de la entrada se generó a partir de la planta existente y de su geometría, un trapecio que corté mediante una diagonal para crear una marquesina formada por dos conos unidos mediante un arco. Uno de los conos trabaja en una dirección y el otro, en la otra, con un tubo en la sección transversal que proporciona resistencia a torsión y, al mismo tiempo, sostiene el canalón... Y, desde luego, independientemente del hecho constructivo, queda claro, y en especial en el alzado, que subyace la idea de una hoja, de una palmera. Una idea claramente figurativa formó parte del proyecto " .

Otra intervención en la escuela Wohlen fue la creación de una cubierta para la biblioteca (figura 7 y 8). En este caso, contaba lo siguiente:

" Decidí colocar la cubierta en el centro del espacio de manera que pareciera que flotaba. Su apoyo principal es un pilar hacia el que se inclina la cubierta y que recoge en su interior el agua de la lluvia. Las esquinas permanecen fijas de manera que la cubierta no se desplace lateralmente y todo el peso descansa en el pilar central. Así, la luz cae tangencialmente a lo largo de las paredes... En la génesis de este proyecto comencé a pensar en un libro, un libro abierto " .

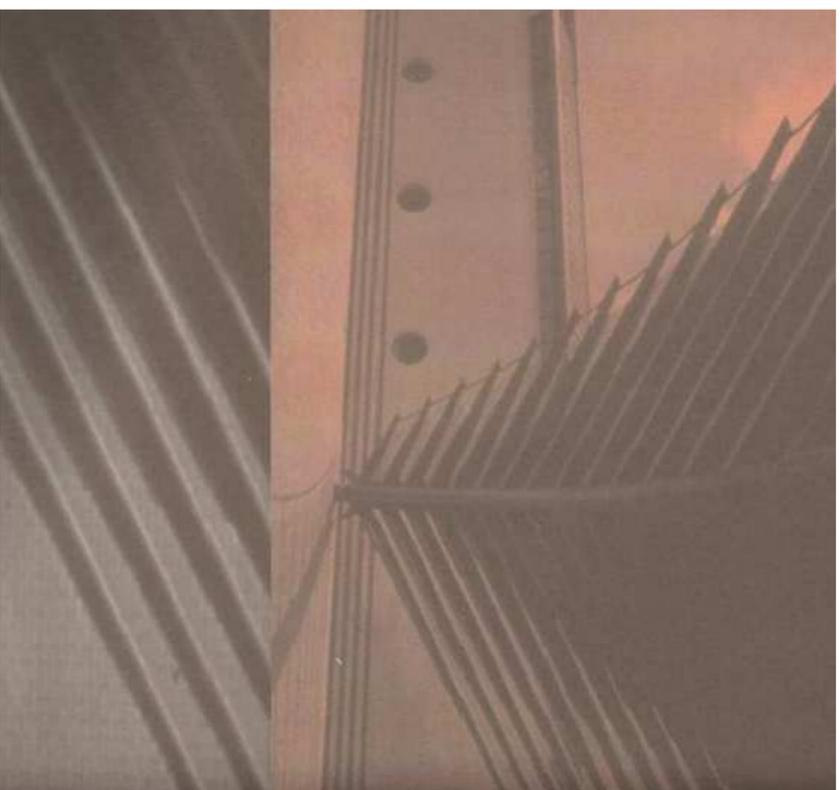


Figura 6. Entrada para la escuela cantonal de Wohlen realizada por Santiago Calatrava.

Santiago Calatrava. Conversaciones con estudiantes

Para el proyecto (figura 9 y 10) de la estación de ferrocarril del aeropuerto de Satolas (Lyon, Francia, 1989-1994), explicaba:

" La estación se ha construido con hormigón, aluminio, acero, vidrio y pavimentos de granito. El hormigón es blanco... cuyo color nos recuerda al lugar. La cubierta es de aluminio y refleja la luz del sol " .

" El ala de la estación está orientada al sur. Trazamos el ángulo de la cubierta de acuerdo a la inclinación del sol en el solsticio de manera que, entre mediados de junio y noviembre, el sol no entra en el interior del espacio. "

" Después de noviembre, la fachada deja entrar la luz en todo el volumen del espacio, lo que permite tener un edificio con muy poca necesidad de climatización adicional " .

" Me interesaba la idea de crear una estructura basada en ciertas proporciones del cuerpo humano. La unión de muchos de estos cuerpos sustenta las cubiertas de la estación. Toda la cubierta se basa en este sistema modular " .

" La idea para la forma de la estación y su cubierta se generó a partir del ojo, algo que creo que es muy importante... Pues el instrumento de trabajo de un arquitecto es el ojo: la capacidad de ver, juzgar e inventar objetos " .



Figura 7. Cubierta de la biblioteca en la escuela Wohlen por Santiago Calatrava.



Figura 8. Boceto de la idea de un libro abierto para la cubierta de la biblioteca de la escuela de Wohlen por Santiago Calatrava.

Santiago Calatrava. Conversaciones con estudiantes



Figura 9. Bocetos sobre la idea de un ojo para el proyecto de la estación de ferrocarril del aeropuerto de Sotoleros.

Santiago Calatrava. Conversaciones con estudiantes

”Hagamos lo que hagamos, la magnitud o dimensión de un objeto está siempre relacionada con nuestro cuerpo.”

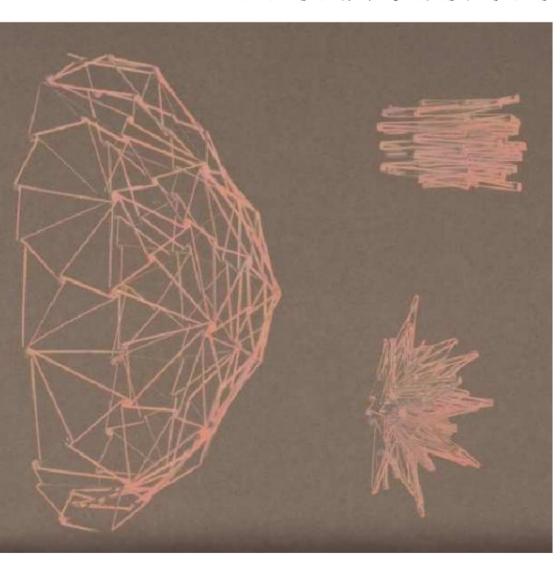
Santiago Calatrava

La trayectoria que sigue la formación de Santiago Calatrava, la cual culmina con su tesis doctoral (figura 11) sobre la "plegabilidad de las estructuras" y, trasladándola a sus obras, nos hace ver su enorme interés por transmitir el movimiento en sus proyectos. En ocasiones manifiesta este movimiento de manera intuitiva a través de formas naturales o humanas como se aprecia en sus bocetos y en sus conferencias. En cambio, otras veces, y más íntimamente relacionado con sus últimos años de formación como ingeniero, intenta plastificar este movimiento, haciéndolo real mediante estructuras móviles integradas en sus obras.

Figura 10. Estación de ferrocarril del aeropuerto de Sotoleros por Santiago Calatrava.



Figura 11. Imagen sobre la tesis doctoral de Santiago Calatrava titulada "Sobre la plegabilidad de las estructuras". Se centraba en el estudio de la topología del poliedro y en cómo se podía plegar hasta convertirse en un haz con todas las aristas paralelas. La cuestión fundamental se refería al complejo proceso geométrico de cambio de forma de un haz a una semiesfera.



Prueba de ello es la construcción del pabellón de Kuwait en la Exposición Universal de Sevilla (España, 1992) donde Santiago Calatrava explicaba lo siguiente:

" Construimos el pabellón utilizando medios arcos de madera que podían abrirse. Esta estructura cubría una terraza con un pavimento de mármol traslucido. Bajo esta terraza se encuentra el interior del pabellón y durante el día la luz del sol se filtra a través del mármol para iluminar el espacio interior. Los elementos de la cubierta se apoyan en unas piezas de hormigón y pueden moverse mediante un motor individual de manera que, muy lentamente, la cubierta se abre y se transforma. Dado que los elementos son independientes, pueden controlarse las diferentes fases de la apertura de la cubierta. En el movimiento de la cubierta uno puede imaginarse unas manos con sus dedos doblados protegiendo el espacio, y al abrirse, las palmas hacia arriba, ahuecadas hacia el cielo "

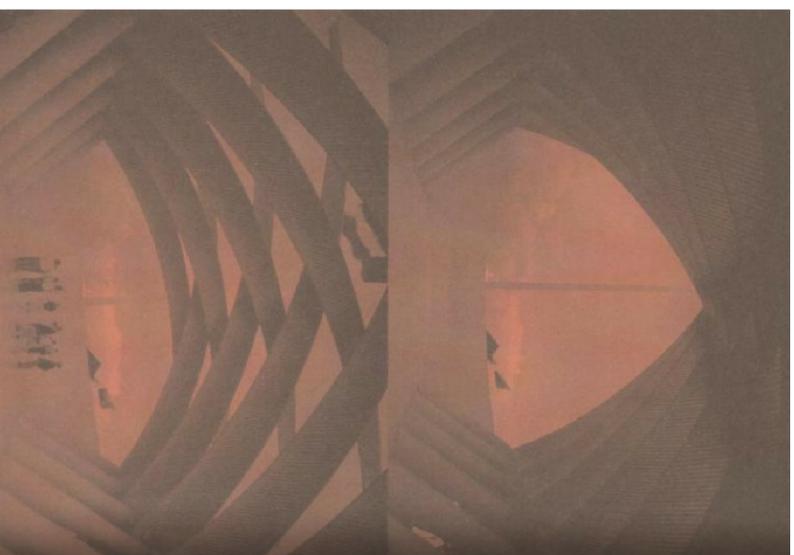


Figura 12. Vista interior del pabellón de Kuwait donde se aprecia la cubierta en apertura.

Santiago Calatrava. Conversaciones con estudiantes

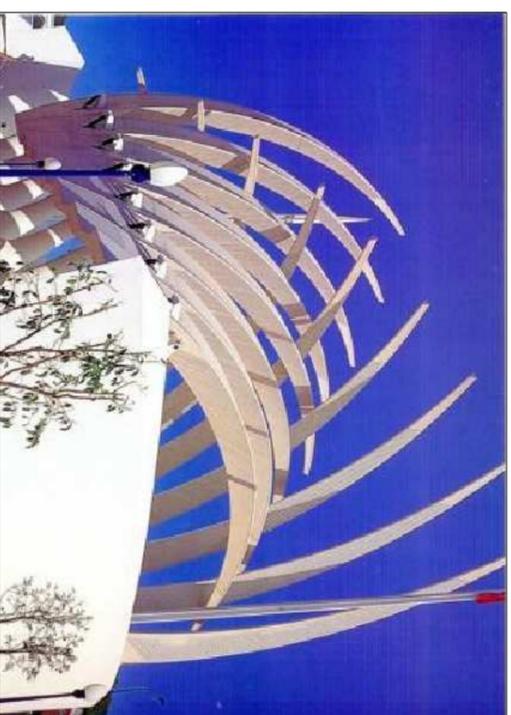


Figura 13. Vista exterior del pabellón de Kuwait. Apertura en diferentes fases de los medios arcos de madera que constituyen la cubierta.

Santiago Calatrava

En la figura 14, se muestra una pequeña estructura construida con partes de juguetes de sus hijos. Santiago Calatrava contaba:

" La fuerza de la piedra suspendida se transmite a través de todas las piezas y se materializa en piedra, madera, cuerda y partes de acero...No hay duda de que el simple acto de colgar una piedra en el aire puede ser una cuestión de expresión "

" Las fuerzas de la máquina se hallan estrechamente relacionadas en su condición estática con el movimiento, lo que significa que la presencia de la fuerza está siempre relacionada con un movimiento que no se puede establecer antes de activarse "

Por todo ello podemos extraer los aspectos fundamentales que forman el eje de su arquitectura. Se le ha catalogado como un arquitecto orgánico. Es cierto, como hemos visto, que fundamenta sus obras en una idea que proviene de formas naturales y, siguiendo un camino mas personal, lo encauza hacia

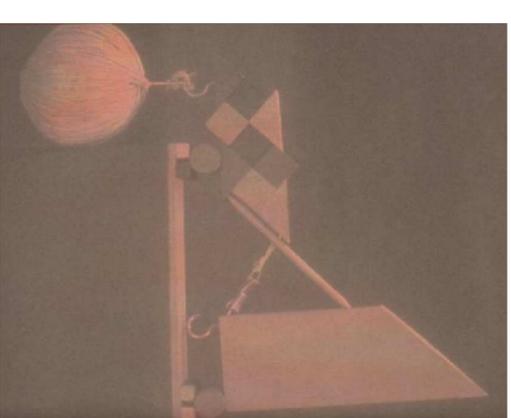


Figura 14. Figura construida con partes de juguetes de sus hijos mostrando un sistema en equilibrio donde la piedra permanece colgada. Relaciona la condición de estático con el movimiento que está presente pero no activado.

Santiago Calatrava. Conversaciones con estudiantes

formas relacionadas con el cuerpo humano. También toma especial interés la iluminación natural, con la que intenta jugar en numerosos proyectos. En muchas ocasiones hace uso de sus nociones teóricas sobre las estructuras para incorporar mecanismos móviles. En cuanto a los materiales, juega principalmente con el hormigón, el acero, la madera y el vidrio, pero sin lugar a dudas, el hormigón blanco es el material que abunda en la mayoría de sus proyectos. Buscando su estilo propio, el arquitecto valenciano tiene predilección por la utilización de pocos materiales en una misma obra, llegando a proponer la idea de construir algún día, una obra toda del mismo material.

Durante estos últimos años, Santiago Calatrava enfatiza el uso del hormigón blanco y el uso del trencadís, el cual, junto con la expresión de formas naturales en sus obras y otros factores, hacen inevitable la similitud con el arquitecto catalán Antonio Gaudí.

Criterios de diseño. Cáscara del Palacio de las Artes

La cáscara del Palacio de las Artes conforma la envolvente del edificio, una piel externa que propicia en gran medida la singularidad del mismo. Sin duda alguna es el elemento que define su personalidad, cuya forma ha sido catalogada en muchas ocasiones de lenticular.

En este caso, la cáscara actúa como cerramiento-cubierta del edificio, envolviendo un edificio que recuerda ciertas formas náuticas. Aquí se manifiesta la idea del proyecto que caracteriza al autor, enlazándola con el entorno, sugiriendo su cercanía al mar y su situación en el antiguo cauce del río Turia.

Más allá de la idea que concibe la obra, otros aspectos nos recuerdan la evolución y la importancia que da Santiago Calatrava a sus proyectos. La cáscara está hecha de acero, el cual utiliza mucho en sus obras. Pero, por encima de todo, el material que le identifica es el trencadís blanco, material cerámico que emplea para revestir la superficie y que utiliza en multitud de obras, entre ellas, las que conforman la Ciudad de las Artes y las Ciencias. El hormigón blanco junto con el trencadís, saltan a la vista en todo el complejo y lo dota de unidad.

El Palacio de las Artes está orientado en la dirección principal del eje que sigue el complejo de la Ciudad de las Artes y las Ciencias, quedando la cáscara constituida por dos grandes hojas orientadas a norte y a sur. En el centro de estas hojas se abre un hueco romboidal que deja a la vista gran parte del edificio que envuelve. A través de estos huecos es posible divisar parte de la ciudad de Valencia, ya sea desde sus pasarelas perimetrales o por los ascensores panorámicos.

Condicionantes funcionales

El elemento ámbito de nuestro estudio, es decir, la cáscara, no responde a un criterio específico de funcionalidad. Únicamente, y como ya hemos citado, la cáscara se constituye a modo de cerramiento-cubierta ocultando ciertos espacios del edificio y junto a la "pluma" que recorre toda la longitud del edificio, actúa

como cubierta evacuando las aguas. También es cierto que dota a ciertas zonas del edificio de sombra, evitando la penetración directa de la luz solar, pero el fin principal de su diseño y construcción, no es otro que el carácter estético que imprime al edificio.



Figura 15. Vista exterior del Palacio de las Artes

” Aunque la naturaleza de la obra es muy personal, también se trata de la culminación de todo aquello que he aprendido durante mi vida: el enfoque de diferentes artistas, el acercamiento al concepto del arte, del arte de la ingeniería, del arte de la arquitectura y de como se conectan todas estas cosas. ”

Santiago Calatrava

” Mi objetivo final ha sido siempre que los aspectos funcionales, estructurales y estéticos de un proyecto formen una unidad integrada, tanto en esencia como en apariencia ”

Eduardo Torroja

3. ANÁLISIS GEOMÉTRICO

3.1. LA GEOMETRÍA

3.2. DESARROLLO GEOMÉTRICO DE LA CÁSCARA



La geometría como expresión plástica

Antes de pasar directamente a analizar la geometría de la cáscara, creo conveniente saber un poco como funciona e influye en distintos aspectos, que nos ayudarán posteriormente a entender mejor su utilización en nuestro ámbito, la arquitectura.

Si nos paramos a analizarlo, la geometría está presente en el universo, en la naturaleza, en las estructuras de la materia, en el cuerpo humano, en la arquitectura, etc. Como explicaba Ramón Arojo, profesor titular de la Escuela de Arquitectura de Madrid, las formas del Universo son manifestaciones de acciones físicas, y la geometría es la expresión plástica de una ley de formación.

La naturaleza se presenta como geometría, y sus distintas configuraciones aparecen como la consecuencia del Principio de Mínima Energía:

" En todo cambio que se produzca en la naturaleza, la cantidad de acción para tal cambio ha de ser la mínima posible "

La presencia de la perpendicular se debe a ser el camino mínimo entre dos puntos, mientras que la triangulación y las redes hexagonales configuran los recorridos mínimos entre un conjunto de puntos en el plano. Soluciones mínimas son también la cicloide, la catenaria y naturalmente el círculo y la esfera.

Las "formas de igual resistencia" son aquellas que optimizan su sección para los esfuerzos a que están sometidas, como las barras de los esqueletos. Las "superficies mínimas", aquellas que minimizan la cantidad de material y la tensión de trabajo.

Los organismos que producen calor suelen tener forma esférica, minimizando de esta forma la superficie de intercambio con el medio,

mientras que las que ganan calor por radiación adoptan envolventes plegadas, para lograr máximas ganancias.

Por lo tanto, las formas naturales aparecen como el acuerdo entre todas las acciones a que están sometidas.

Quizás la naturaleza sea el espejo al que debamos mirar para utilizar y aprovechar la geometría en la arquitectura.

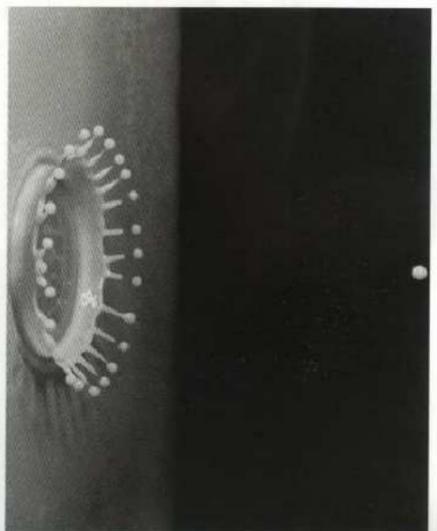


Figura 1. Salpicadura fotografiada por Harold Edgerton.

Uso de la geometría en la arquitectura

La geometría ha estado presente en la arquitectura desde sus inicios, pero también es cierto que ha evolucionado la utilización de la misma en gran medida. Quizás muy empujada por la aparición de nuevos materiales y técnicas constructivas, y por la mentalidad y necesidades de cada época.



Figura 2. La forma de los organismos biológicos se explica como el compromiso entre el óptimo mecánico y el energético.

Según Attenborough, las estrías verticales permiten al saguaro aumentar su volumen para almacenar hasta una tonelada de agua. En lugar de hojas que pierden agua por evaporación, tiene espinas, que colaboran a crear en su superficie una capa de aire inmóvil que le protege de las corrientes de aire. Su estructura en hélices enrolladas le hace elástico y resistente.

” El hombre primitivo ha detenido su carro, decide que éste será su suelo. Elige un claro, abate los árboles demasiado cercanos, allana el terreno de los alrededores, abre el camino que le unirá con el río o con la tribu que acaba de dejar. Planta las estacas que han de sostener su tienda y la rodea de una empalizada, en la cual pone una puerta. El camino es todo lo rectilíneo que le permiten sus herramientas, sus brazos y su tiempo. Los postes de su tienda forman un cuadrado, un hexágono o un octógono. La empalizada forma un rectángulo cuyos cuatro ángulos son iguales y rectos. La puerta de la choza se abre en el eje del cercado y la puerta de éste se halla frente a la puerta de la choza. [...] No hay hombre primitivo, hay medios primitivos. La idea es constante y poderosa desde el principio mismo. ”

Le Corbusier. *Hacia una Arquitectura*. Poseidón. 1997.

Desde la arquitectura de la antigüedad, donde la base de la misma era un sistema modular (figura 3), basado en un conjunto de relaciones geométricas, hasta la libertad formal que adquiere hoy en día la arquitectura (figura 4), importando menos la coherencia y el rigor de la forma. Todo ello pasando por el racionalismo, basado en un sistema reticular de pilares y forjados que organiza la forma y posteriormente la aparición de láminas, mallas espaciales, membranas, etc.

Las nuevas tecnologías nos han abierto un abanico enorme de posibilidades, donde los programas informáticos son capaces de calcular cualquier superficie. Esto nos conduce a un punto donde la arquitectura se basa en el diseño de la forma, siendo ésta fruto de la imaginación, y posteriormente, ya se debatirá como se construye, que materiales se utilizan y como se plasma la forma deseada, dejando un poco de lado la optimización estructural, constructiva, energética, etc., que es capaz de aportarnos la geometría.



Figura 4. Con el Guggenheim se abre una posibilidad que nunca los arquitectos habían contemplado. El edificio es pura creación plástica, resultado de un proceso de diseño basado en la experimentación sobre la forma. Después habrá que buscar el procedimiento más adecuado para hacer viable la construcción.

Frank O. Gehry

La geometría en las obras de Santiago Calatrava

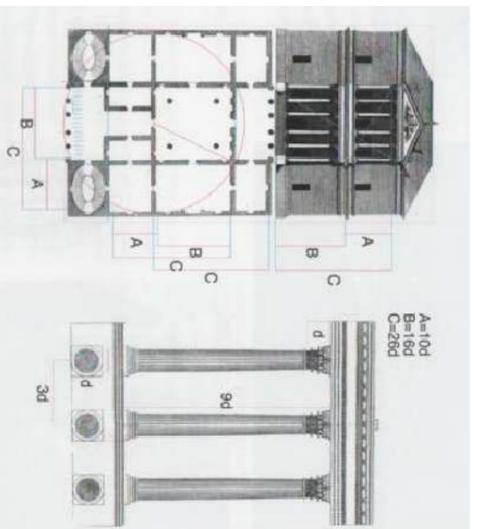
Ya hemos comentado algunas obras de Calatrava y hemos visto como afronta el diseño de las mismas. Es cierto que Calatrava se inspira en formas naturales y humanas, pero no por ello hay que catalogarlo como un arquitecto cuya única preocupación es plasmar su inspiración, sino que también tiene en cuenta aspectos como la geometría, el comportamiento mecánico, la iluminación y elección de materiales. Como ejemplo del tema tratado, en el auditorio de Tenerife (figura 5) utiliza varias formas geométricas para constituir el conjunto. A continuación analizaremos geométricamente la cáscara del Palacio de las Artes.



Figura 5. Auditorio de Tenerife por Santiago Calatrava.

Figura 3. Villas de Andrea Palladio (1508-1580), trazadas sobre el módulo del diámetro de la columna, igual al espesor del muro en planta baja.

Tectónica 17

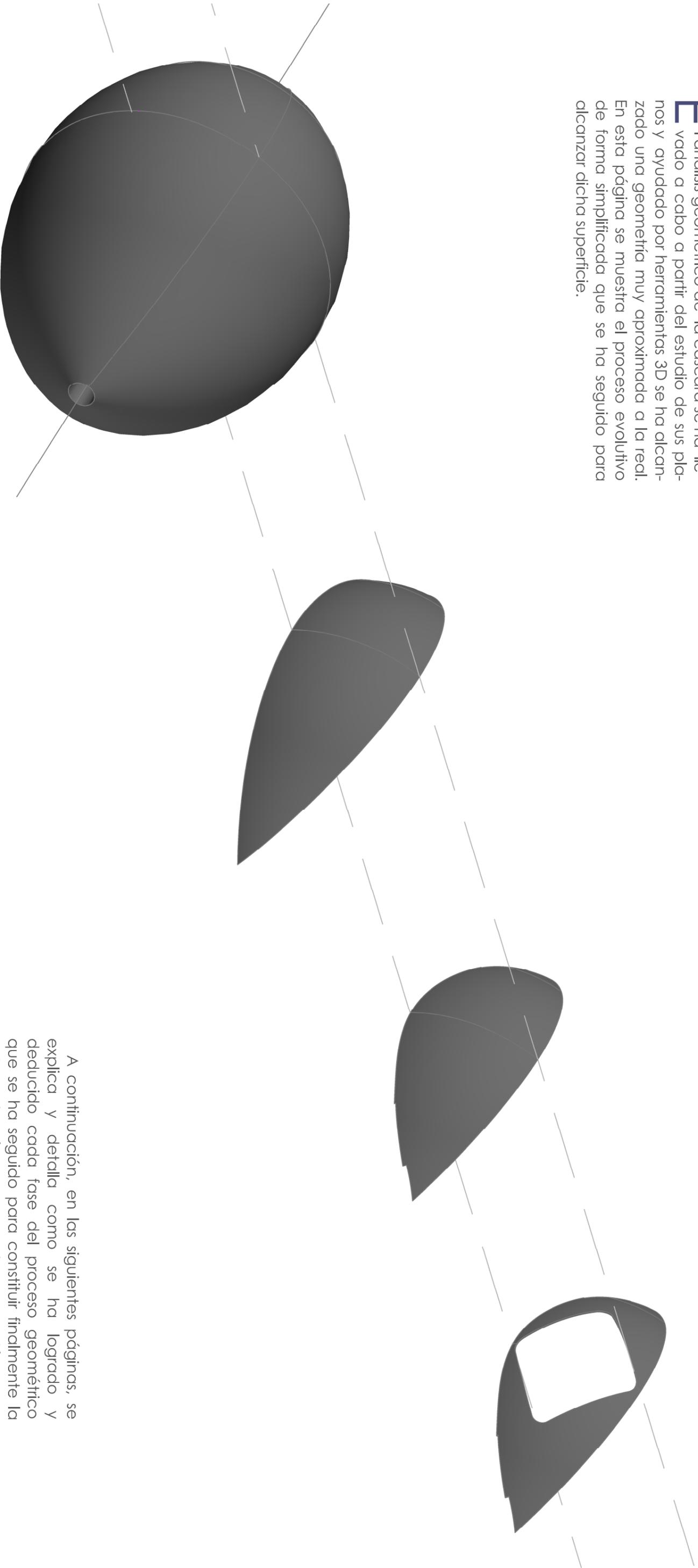


TTA

3.2. Desarrollo geométrico de la cáscara

Proceso geométrico

El análisis geométrico de la cáscara se ha llevado a cabo a partir del estudio de sus planos y ayudado por herramientas 3D se ha alcanzado una geometría muy aproximada a la real. En esta página se muestra el proceso evolutivo de forma simplificada que se ha seguido para alcanzar dicha superficie.



A continuación, en las siguientes páginas, se explica y detalla como se ha logrado y deducido cada fase del proceso geométrico que se ha seguido para constituir finalmente la hoja de la cáscara, desde la generación de un volumen por revolución hasta la creación del hueco romboidal existente en la cáscara.

T14

Fase 1

Esta fase, a mi parecer, es la crucial del desarrollo geométrico. No solo porque un error en la misma condicionaría el resultado final de la forma, sino por la dificultad de la obtención de la superficie de doble curvatura que genera la cáscara. Posteriormente solo habrá que pulirla, moldearla y cortarla por determinados planos para la consecución de la geometría definitiva.

través de la directriz circular obtenemos el volumen final de esta fase (figura 8).
A partir de aquí, trabajaremos con este volumen para aproximar la geometría lo más posible a la real.

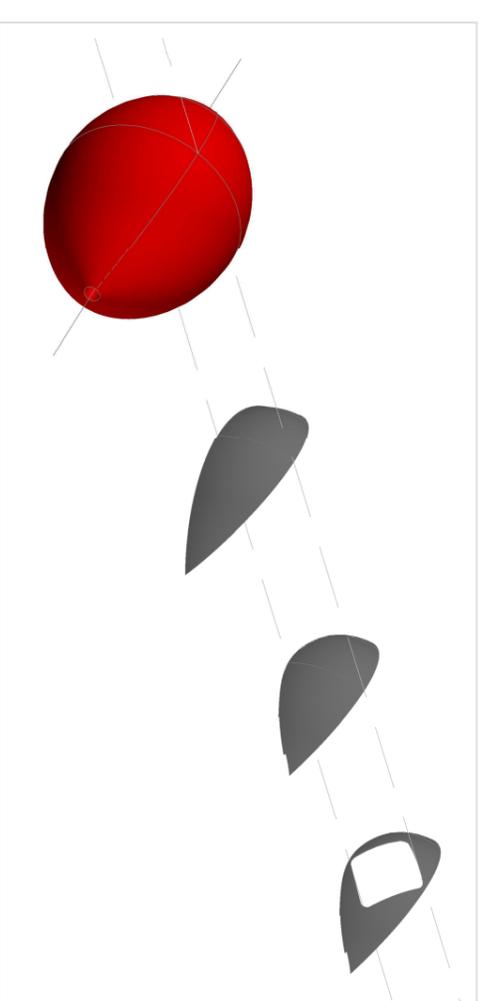


Figura 6. Esquema del desarrollo geométrico. En rojo, fase tratada en esta página.

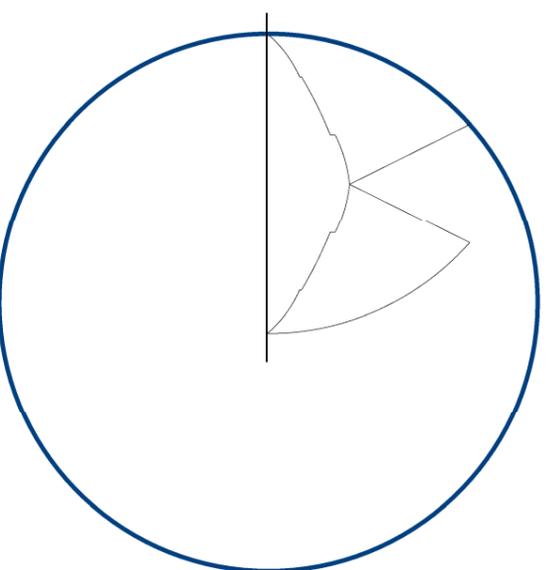


Figura 7. Alzados de la cáscara, de los cuales extraemos la directriz y generatriz de la superficie de doble curvatura.

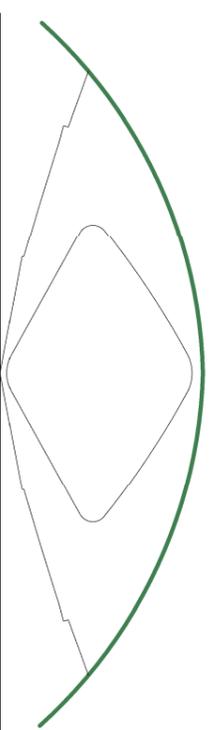
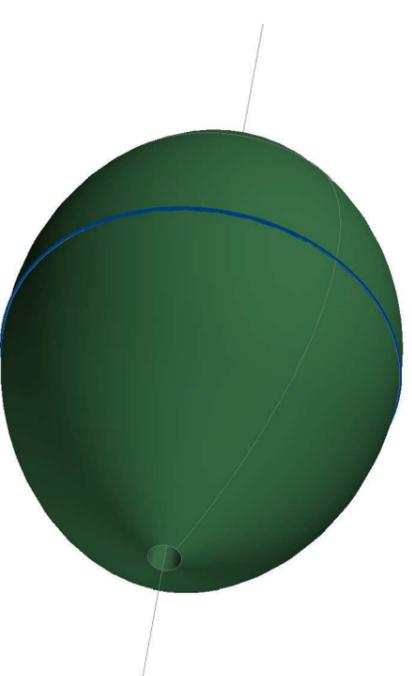
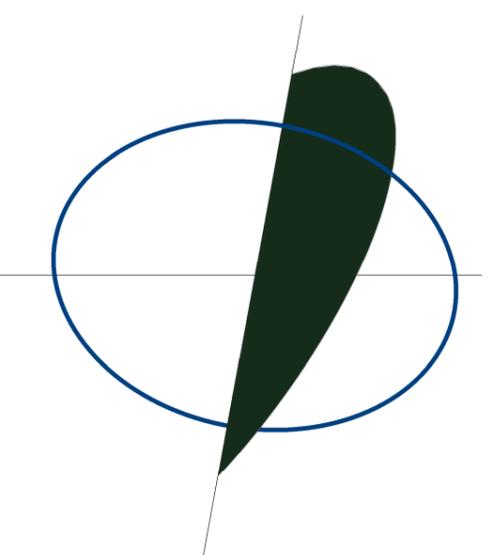


Figura 8. Debajo de estas líneas, proceso de generación del volumen de doble curvatura a partir de la revolución de una superficie a través de la directriz.

Para alcanzar el volumen coloreado en rojo de la figura 6, hemos partido de los alzados que constituyen la cáscara. De ellos hemos sacado las curvas que generan la superficie de doble curvatura de la hoja de la cáscara. Por un lado, la generatriz elíptica de la superficie, la cual está representada en color verdoso (figura 7) y por otro, la directriz circular, representada en color azul (figura 7).

A continuación, revolucionando una superficie constituida a partir de la generatriz elíptica a



Fase 2

Una vez generado el volumen, procedemos a cortarlo por dos planos. En la figura 10, que representa un alzado de la cáscara, se aprecian los planos de corte. El plano P, corta el volumen horizontalmente, definiendo así el punto de apoyo inferior de la cáscara que pasará por dicho plano. El plano Q, corta la cáscara en un ángulo oblicuo que determinará el punto de mayor cota de la superficie. Ambos planos forman un ángulo aproximado de 64° .

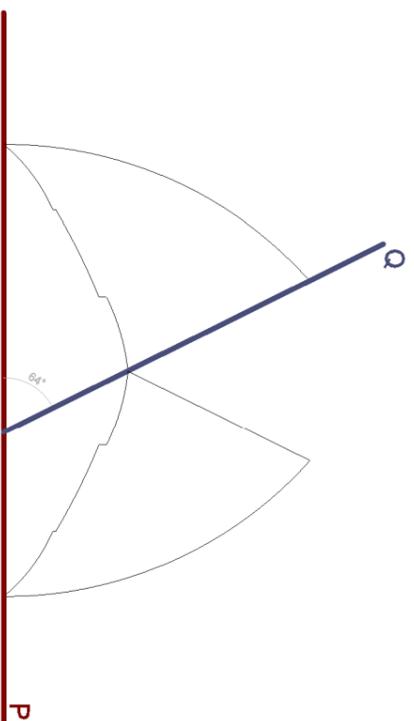


Figura 10. Alzado de la cáscara donde se indican los planos de corte P y Q de la superficie y el ángulo que forman.

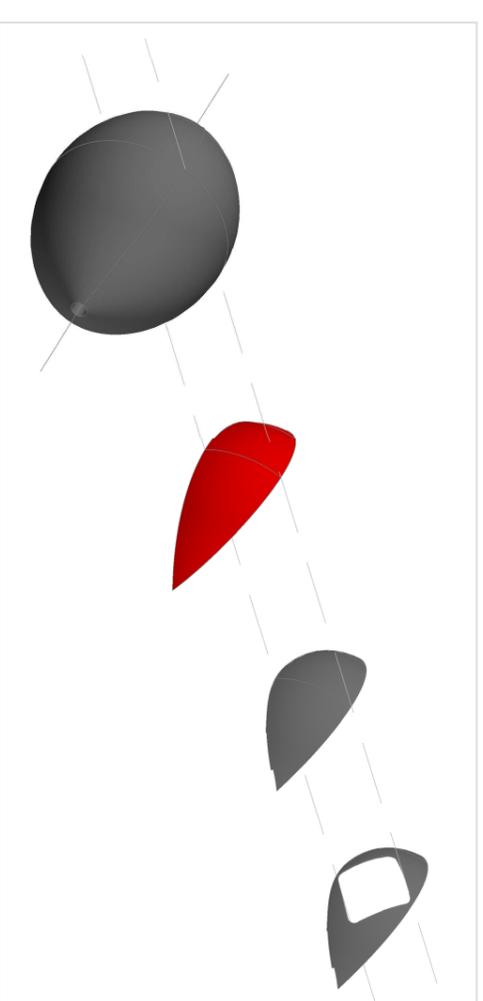


Figura 9. Esquema del desarrollo geométrico. En rojo, fase tratada en esta página.

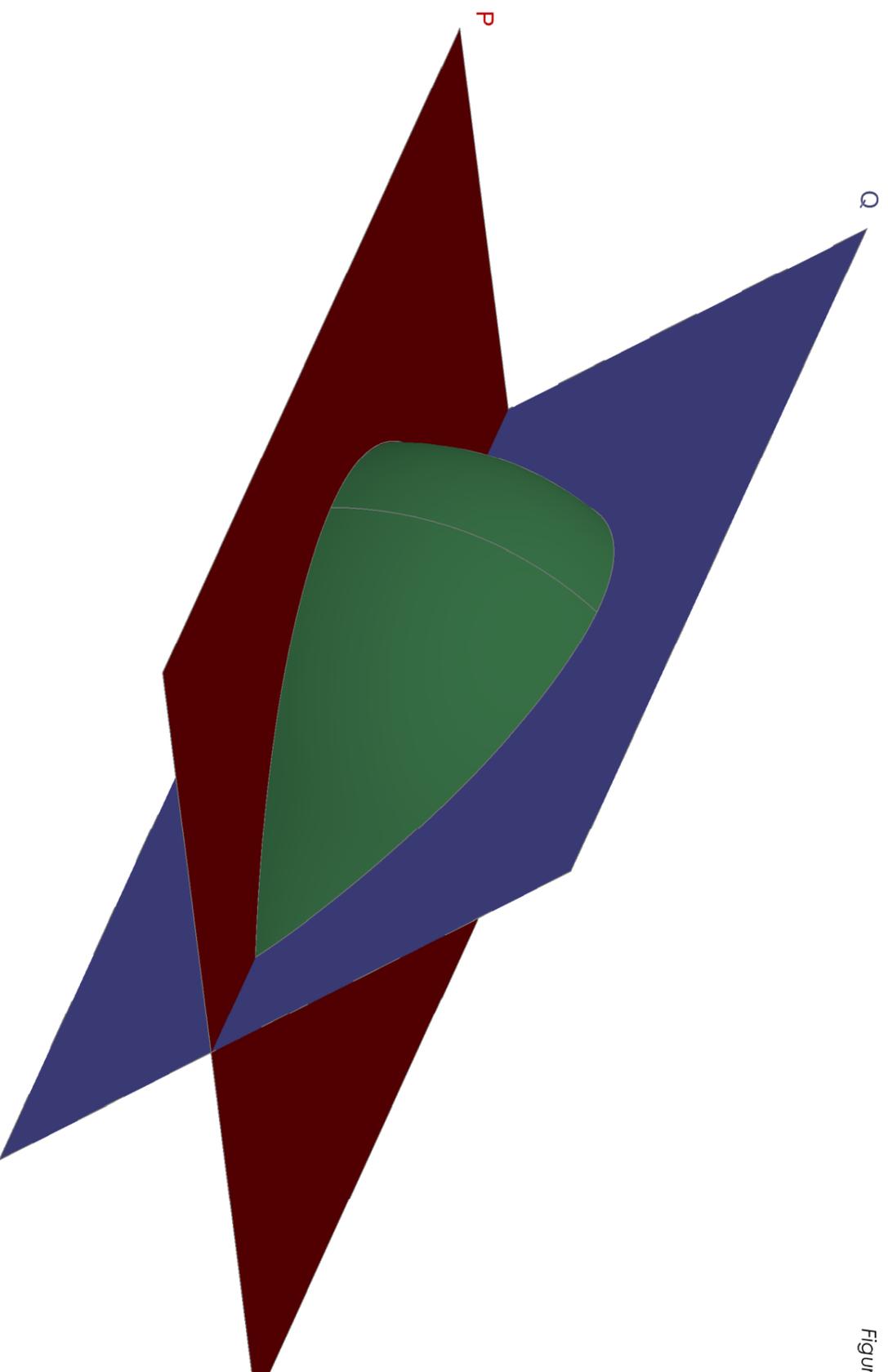


Figura 11. Perspectiva de la fase 2 del proceso geométrico. En ella, el volumen es cortado por dos planos. En primer lugar, el plano P, representado con color granate, corta la superficie horizontalmente. Por otro lado, el plano Q, representado con color azul, corta la superficie oblicuamente. Ambos planos de corte forman un ángulo de 64° aproximadamente.

Fase 3

La superficie ya está muy aproximada. Tan solo falta darle la forma definitiva a los laterales, consiguiendo que la superficie termine en punta en sus lados este y oeste. Para ello, partiendo desde el mismo alzado que hemos usado para definir los planos de corte de la fase 2, generamos un sólido que intersecte la superficie que tenemos formando así, el contorno final de una de las hojas que forma la cáscara.

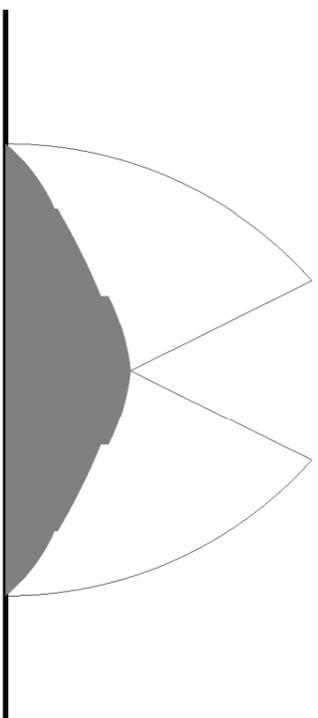


Figura 13. Alzado de la cáscara. En color gris, sólido que atraviesa la superficie para generar el contorno definitivo de la cáscara.

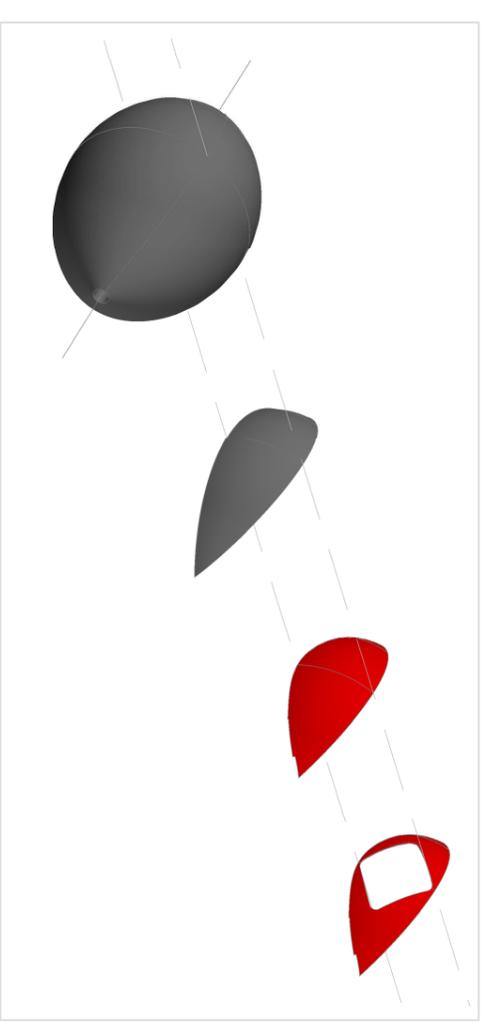


Figura 12. Esquema del desarrollo geométrico. En rojo, fase tratada en esta página.

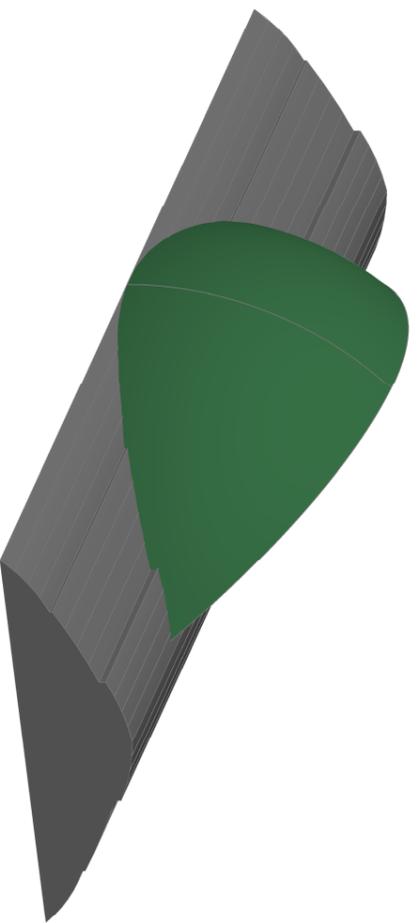
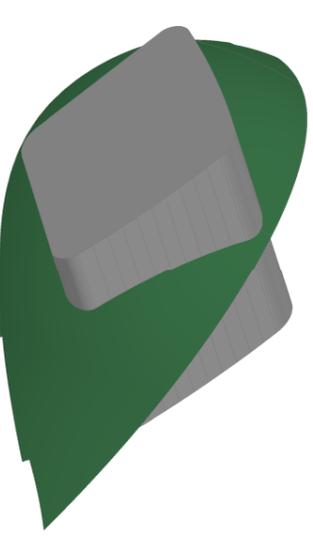


Figura 14 y 15. A la izquierda, perspectiva de la fase 3. Intersección de un sólido con la superficie generando el contorno definitivo de la misma. A la derecha, perspectiva de la fase 4. Intersección de un sólido con la superficie generando el hueco romboidal de la cáscara.



Fase 4

Por último, el diseño del hueco romboidal que presenta la cáscara, lo realizamos a partir de un sólido, que al igual que en la fase 3, atraviesa la superficie generando de esta forma el hueco deseado. Este proceso se aprecia a través de una perspectiva en la figura 15.





Figura 17. Perspectiva donde se ve la porción que ocupa la superficie de la cáscara respecto al volumen del que ha sido generada.

Figura 16. Volumen final de la superficie donde se aprecia la forma geométrica de las dos hojas simétricas que constituyen la cáscara del Palacio de las Artes.

T14

4. ANÁLISIS CONSTRUCTIVO

4.1. ESTRUCTURA DE LA CÁSCARA

4.2. MEDIOS AUXILIARES

4.3. MONTAJE EN OBRA

4.4. REVESTIMIENTO



Elementos componentes de la cáscara

La Cáscara del Palacio de las Artes de Valencia es una cubierta singular, tanto por su diseño como por su definición geométrica. Está constituida por dos grandes hojas orientadas al norte y al sur, con una longitud máxima de 172 m y una altura máxima de 58 m. En el centro de estas hojas se diseña un gran hueco romboidal cuyas diagonales horizontal y vertical miden 84 m y 52 m respectivamente.

Dadas las condiciones de simetría de la Cáscara, queda completamente definida describiendo un cuarto de la estructura. Los elementos que definen esta singular estructura son los siguientes: el sándwich, las vigas de borde, los arbotantes, el balancín, el trípode y la escalera.



Figura 1 y 2. A la izquierda, fotografía del Palacio de las Artes. En la parte inferior, croquis de una hoja de la cáscara donde se identifica la ubicación de los principales elementos que componen la misma (trípode, sándwich, arbotantes, balancín y escalera).



Sándwich y vigas de borde

El sándwich es el conjunto formado por dos chapas de acero laminado de 8 mm de espesor separadas 400 mm, que albergan en su interior un entramado de nervios (tubos de 400 x 200 x 10 mm y chapas de 400 x 10 mm) verticales y horizontales con separaciones variables.

El sándwich, dadas sus grandes dimensiones y para facilitar el transporte y montaje en obra, está estructurado en diferentes piezas, las cuales se muestran en la figura 3. La pieza clave es la correspondiente a la parte superior que se une al trípode constituyendo el apoyo superior. Esta pieza, a diferencia del resto, está constituida por chapas separadas entre sí 1000 mm debido a los elevados esfuerzos que se originan en esa zona.

Figura 3. Croquis donde se indica la tipología de piezas que componen el sándwich de la cáscara, facilitando de esta forma el transporte y montaje por fases de la misma durante la obra.

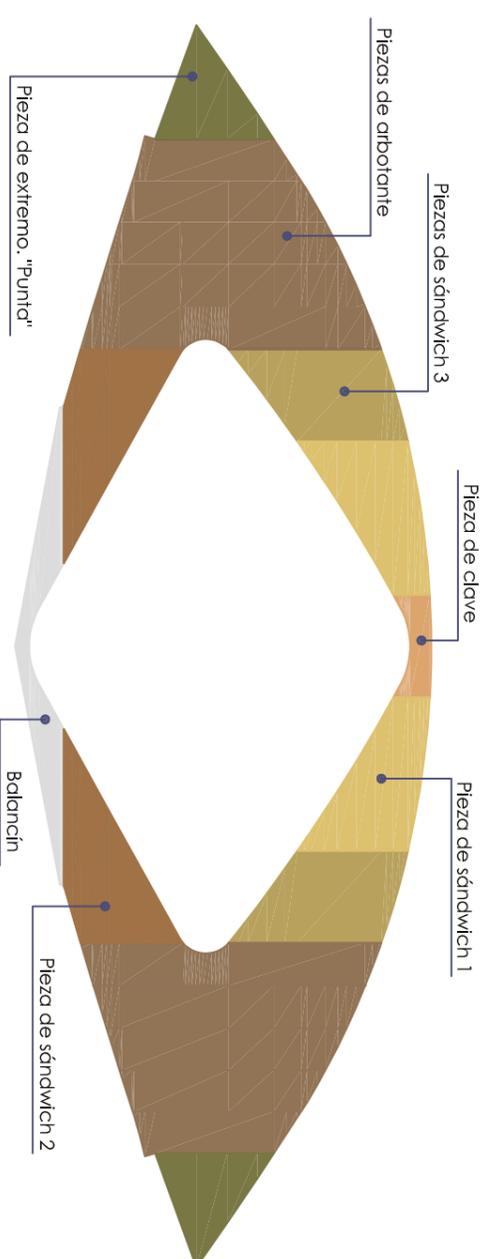


Figura 4. Fotografía de la hoja interior del sándwich conformada por pequeñas chapas unidas mediante soldadura.



Figura 5. Vista del conjunto de sándwich (pieza de sándwich 3 según croquis de la figura 3) y de las vigas de borde superior e inferior antes de ser izada.



Figura 6. Vista de una parte de la cáscara por su cara interior.

Las piezas de extremo, también denominadas "punta", son las que se colocarán en último lugar para conectar a través de unas vigas de cajón ambas hojas de la cáscara (figuras 7 y 8). Podemos distinguir también las piezas de arbotantes, las cuales están divididas en 5 partes que contendrán un arbotante cada una. Las demás piezas han sido divididas para facilitar el montaje, que, juntos con las ya descritas, formarán el conjunto del sándwich. El balancín es un elemento de hormigón del cual se hablará posteriormente.



Figura 7. Viga en cajón en el extremo este, conectando ambas hojas de la cáscara. También se aprecian las vigas de borde que acometen en la punta.



Figura 8. Viga de cajón en el extremo oeste.

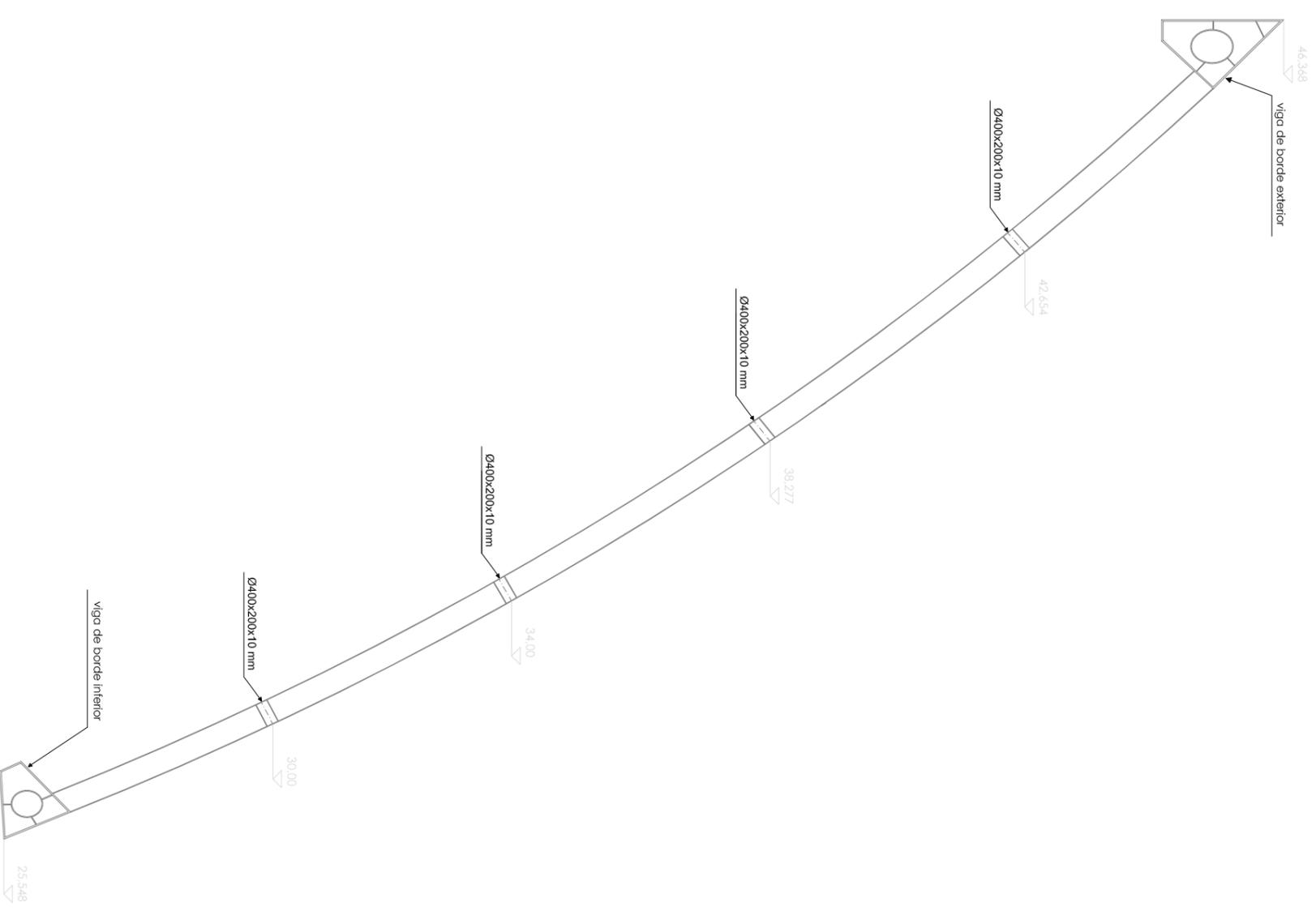


Figura 9. Sección de la cáscara

Escala 1:100

T74

El sándwich, excepto en su parte inferior donde se encuentra el balancín y la escalera, está compuesto en su perímetro por unas vigas (tanto en el contorno exterior como en el interior que define el hueco central) denominadas vigas de borde, formadas por chapas de 15 y de 25 mm de espesor que dan rigidez a los bordes de la estructura definida por el sándwich. Estas vigas de borde se definen por secciones trapezoidales rigidizadas en su interior.

En los extremos de la cáscara se encuentran las puntas, una al este y otra al oeste, que unen entre sí la cáscara del lado norte con la del lado sur, con el fin de asegurar la transmisión de esfuerzos de viento entre ambos lados. En el extremo oeste, la unión se realiza por medio de una viga en cajón de chapas de 30 mm de espesor.



Figura 10. Viga de borde inferior

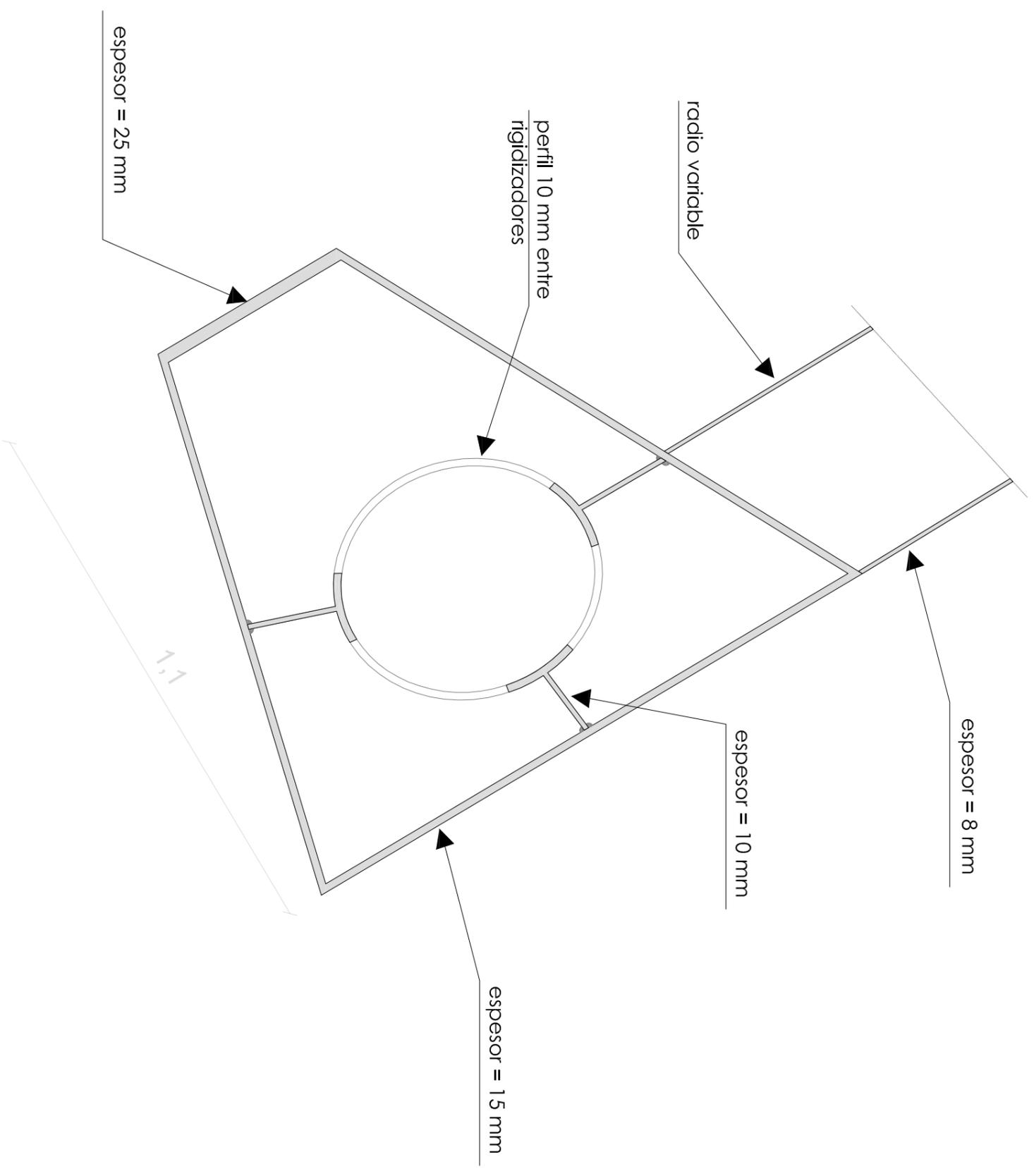


Figura 11. Detalle en sección de la viga de borde inferior

Escala 1:10

Balancín

Como se ha mencionado anteriormente, cada hoja de la cáscara consta de tres apoyos. El primero de ellos, el cual describimos a continuación, es el balancín. Éste se sitúa en la parte inferior de la cáscara como se aprecia en la figura 12.

El balancín es el único elemento del conjunto que está realizado con hormigón armado, además incorpora un tirante de pretensado en su parte superior.

Las cargas de la cáscara se transmiten a la pieza a través de una pieza de transición, con-

formada por una estructura mixta de acero y hormigón, uniendo de esta forma ambos materiales y asegurando la transmisión de los esfuerzos. El balancín a su vez, está apoyado en su cota mas baja, a la cota -7,00, sobre una rótula esférica, haciendo de conexión entre el balancín y la cimentación.

Era necesario que el balancín no presentara en ningún momento del montaje de la cáscara tracciones en la cara superior del mismo. Para ello se calculó el orden y la fase de tesado de los 7 cables que incorpora el tirante.

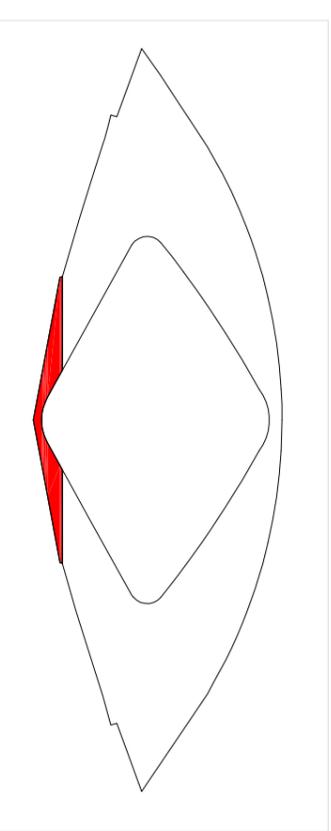


Figura 12. Alzado de la cáscara. En rojo, elemento denominado balancín



Figura 13. Vista del encuentro entre balancín y rótula.

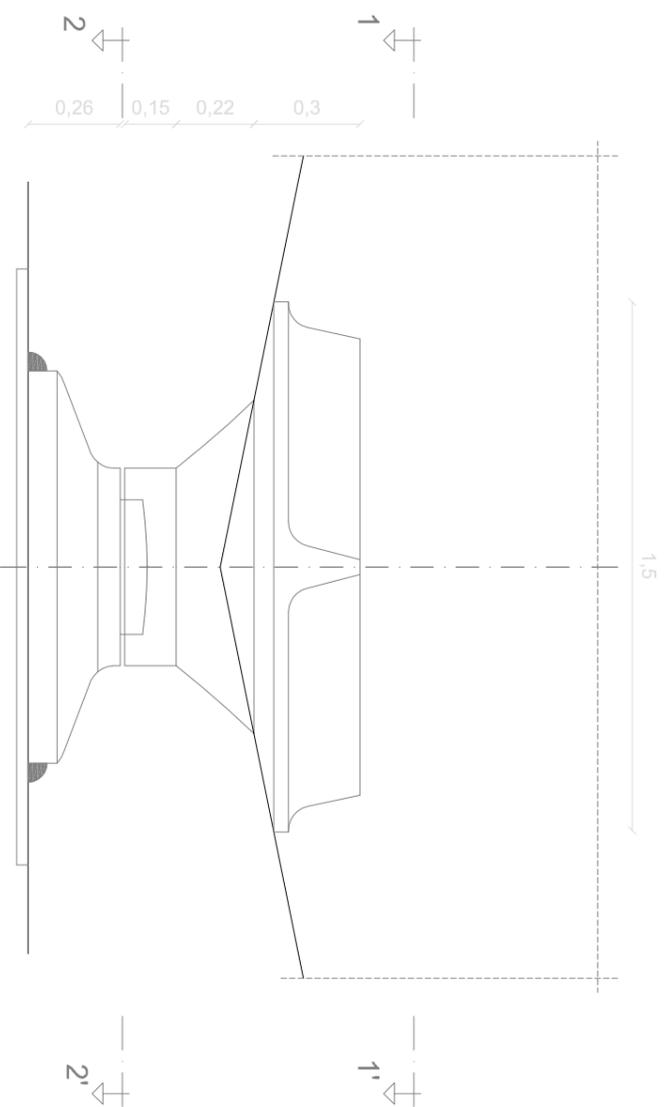


Figura 14. Detalle de la rótula, con una pieza superior y otra inferior.

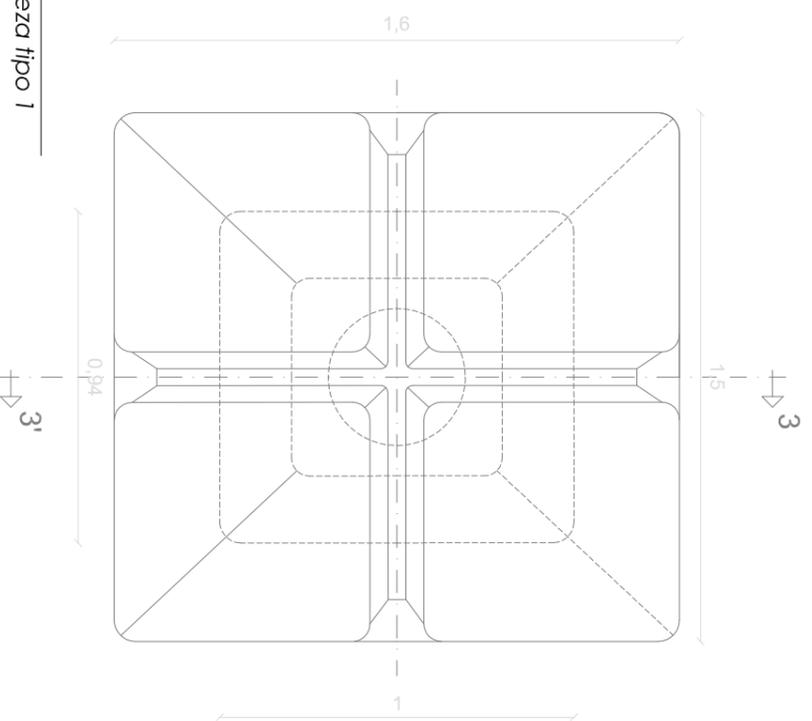


Figura 15. Vista del balancín con apoyos provisionales.

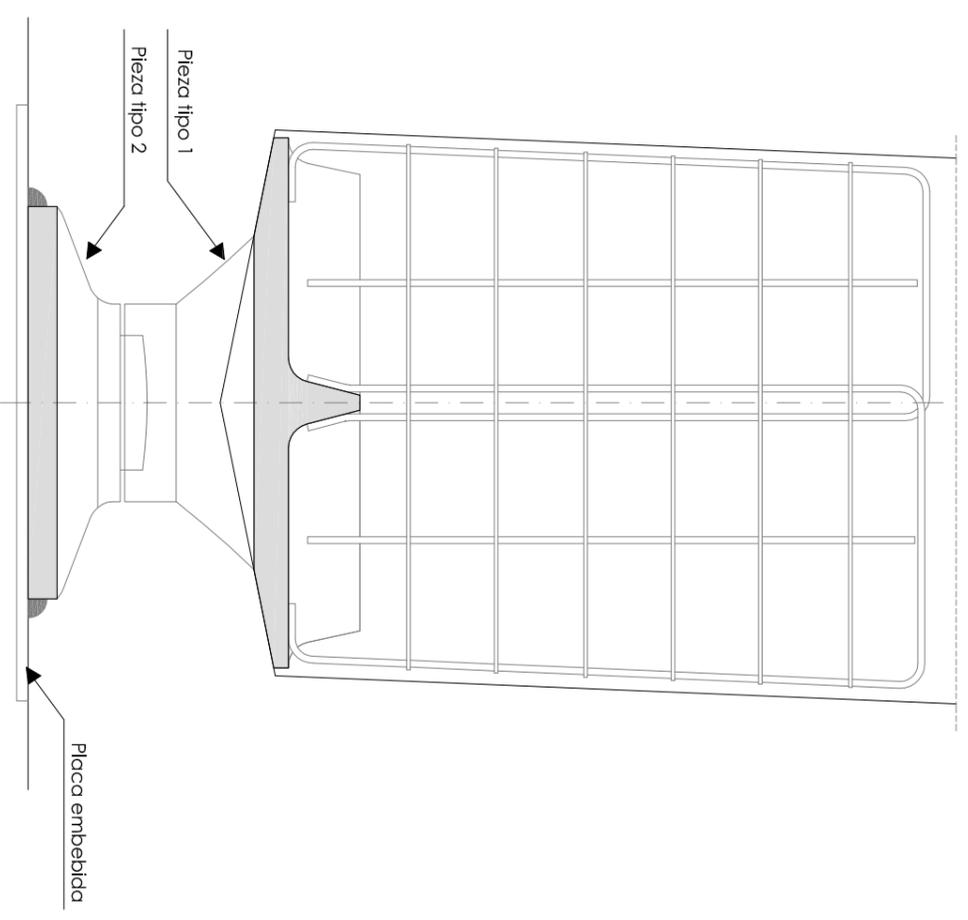
Detalle constructivo del encuentro entre balancín y rótula.
Escala 1:25



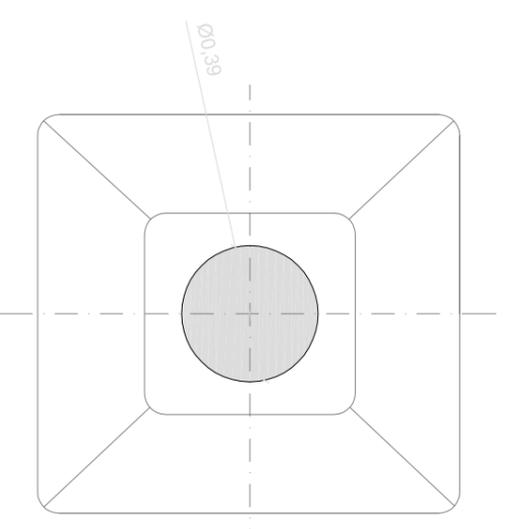
Alzado



Sección 1-1'. Pieza tipo 1



Sección 3-3'. Pieza tipo 2



Sección 2-2'. Sección por rótula (pieza tipo 2).

T74

Trípode

Esta pieza constituye el apoyo superior de la cáscara. En la cota 48,418 aproximadamente, se sitúa este elemento que, empotrado en el muro de la caja escénica, forma el apoyo de la pieza clave de la cáscara. El nombre que recibe deriva de su constitución, estando formado por tres patas, dos de ellas situadas en el mismo plano horizontal formando una "V". La otra pata se ubica un poco más abajo, formando un ángulo de aproximadamente 46° con la vertical.

La pieza clave apoya en el trípode en dos puntos, uno formado por una rótula y otro por un pasador a modo de articulación.



Figura 16. Vista del trípode.



Figura 17. Vista del trípode durante la construcción.

En la siguiente página se ve el detalle constructivo del trípode con todos los elementos que lo constituyen y su encuentro con la pieza clave de la cáscara.

Escalera

Este elemento de la cáscara lo constituye la escalera que que presenta en su parte interior, mediante la cual se accede a las pasarelas exteriores del Palacio de las Artes. Ésta se define entre las cotas +0,34 y +1,34. Presenta un ancho de 4,5 m y trabaja a modo de ménsula empotrada a la estructura inferior del sándwich.

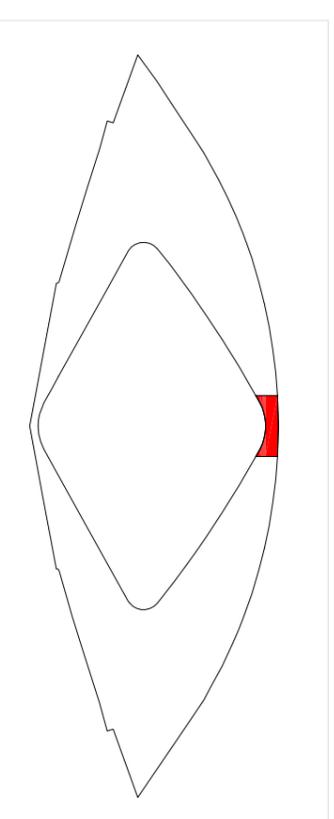
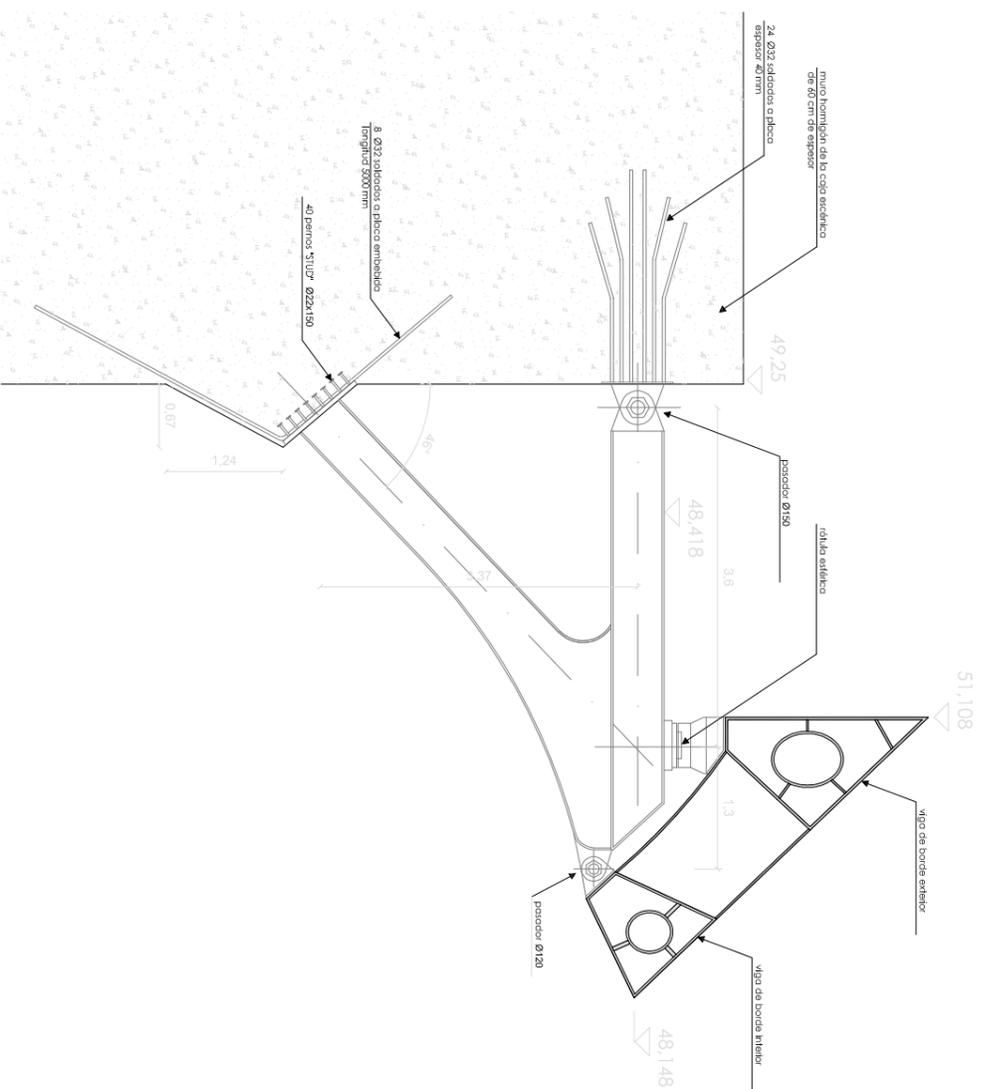


Figura 18. Alzado de la cáscara. En rojo, pieza clave del sándwich, la cual apoya en su parte posterior sobre el trípode.



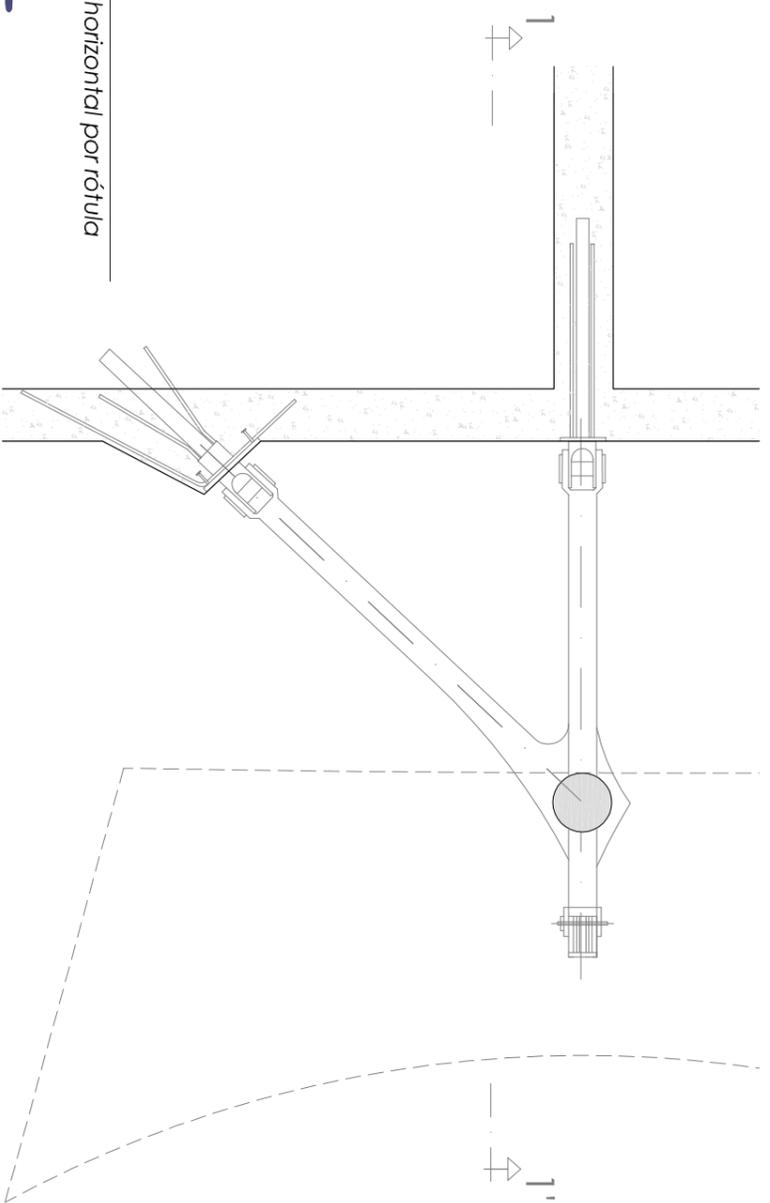
Figura 19. Fotografía de la escalera durante su construcción.



Sección vertical 1-1'

Alzado

Escala 1:75



Sección horizontal por rótula

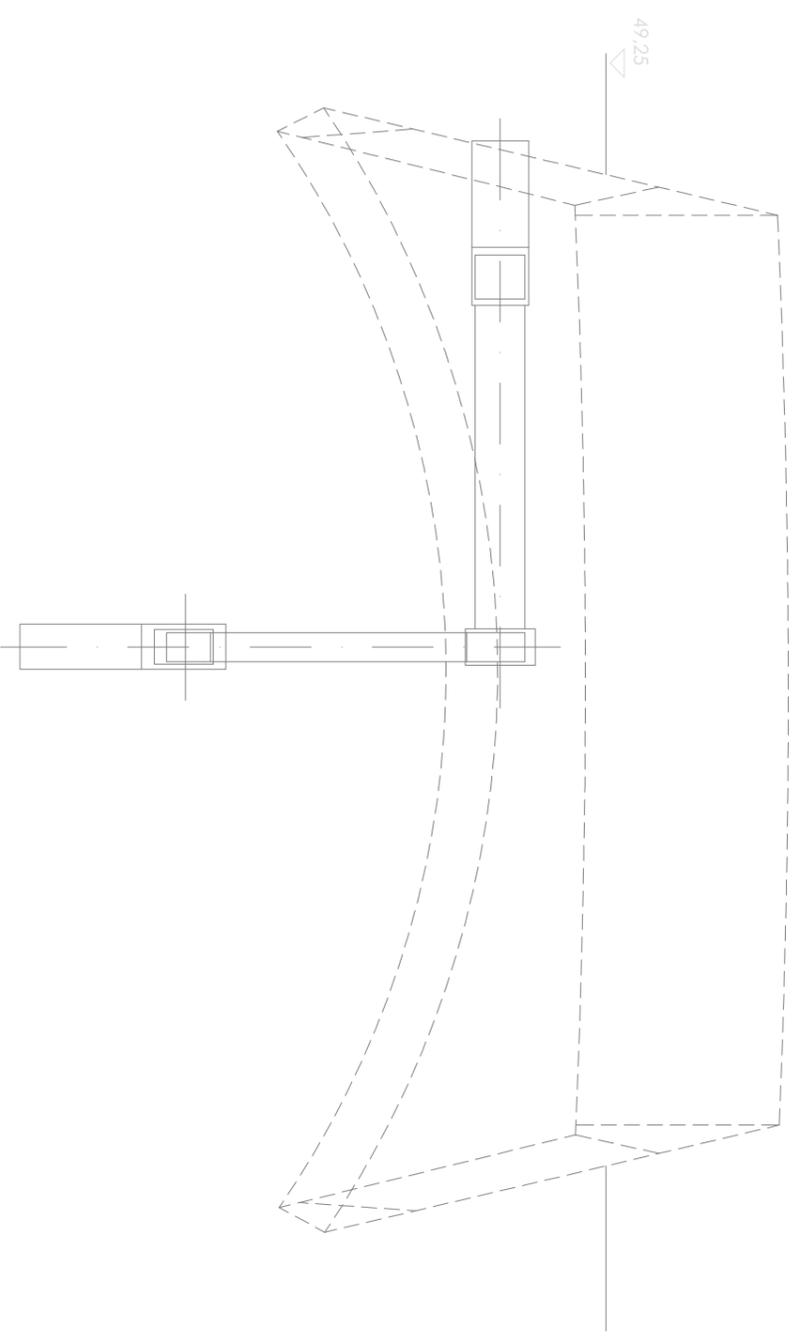


Figura 20. Imagen de la cáscara en fase de montaje. Se aprecia la unión entre el trípode y la pieza clave del sándwich.

Arbotantes

Por último, la cáscara presenta otro apoyo intermedio formado por 5 arbotantes en cada cuarto de cáscara, es decir, 10 arbotantes en cada una de las hojas. Estos elementos tienen una sección en cajón metálica en la parte denominada pilar, la cual apoya en el pórtico principal. La otra zona está formada por dos piezas denominadas arbotante superior e inferior que están unidas a la cáscara en toda su altura para rigidizarla.

En el detalle constructivo presente se marcan las distintas piezas los puntos de empalme en obra. Éstos se realizarán con tornillos y posterior soldado.



Figura 21 y 22. Arriba, vista de los arbotantes con la obra ya terminada. A la derecha, colocación del segundo arbotante con su correspondiente pieza de sándwich durante la obra.



Figura 23. Empalme entre piezas del arbotante.

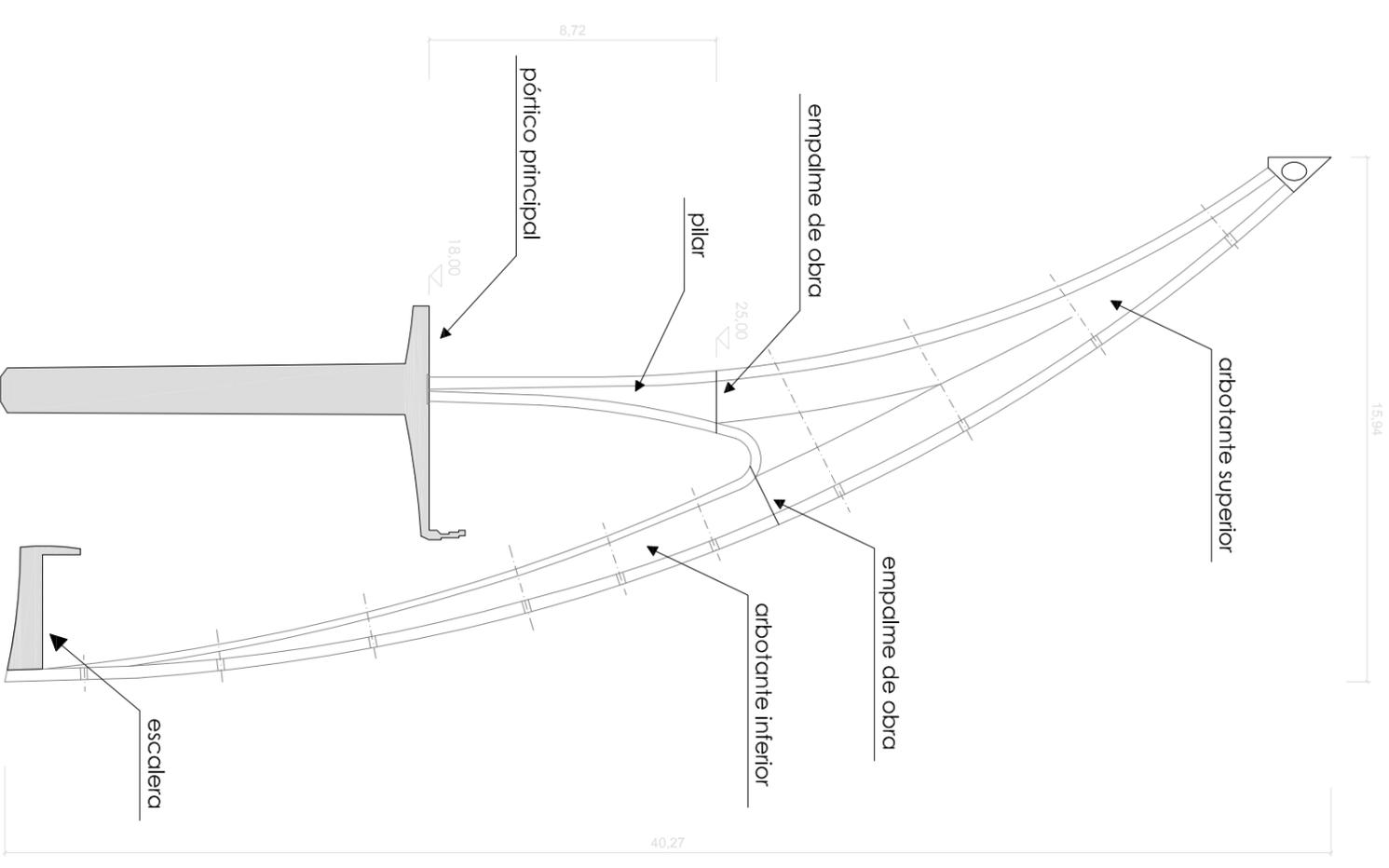


Figura 24. Sección del arbotante

Escala 1:200

Medios auxiliares utilizados: Apeos

Para el montaje de la cáscara, se utilizaron apeos provisionales que facilitaron la ejecución de la misma y la posterior entrada en carga de la estructura. Estas torres de apoyo tenían diferentes tipologías y alturas, desde los 6 m hasta los 20 m.

Se emplearon varias tipologías en función de la fase de montaje en la que se estuviera, garantizando de esta forma la estabilidad del conjunto. Cabe destacar que, al formar parte directamente del montaje de la cáscara, estos castilletes junto con sus características mecánicas fueron modelizados en el cálculo de la estructura.

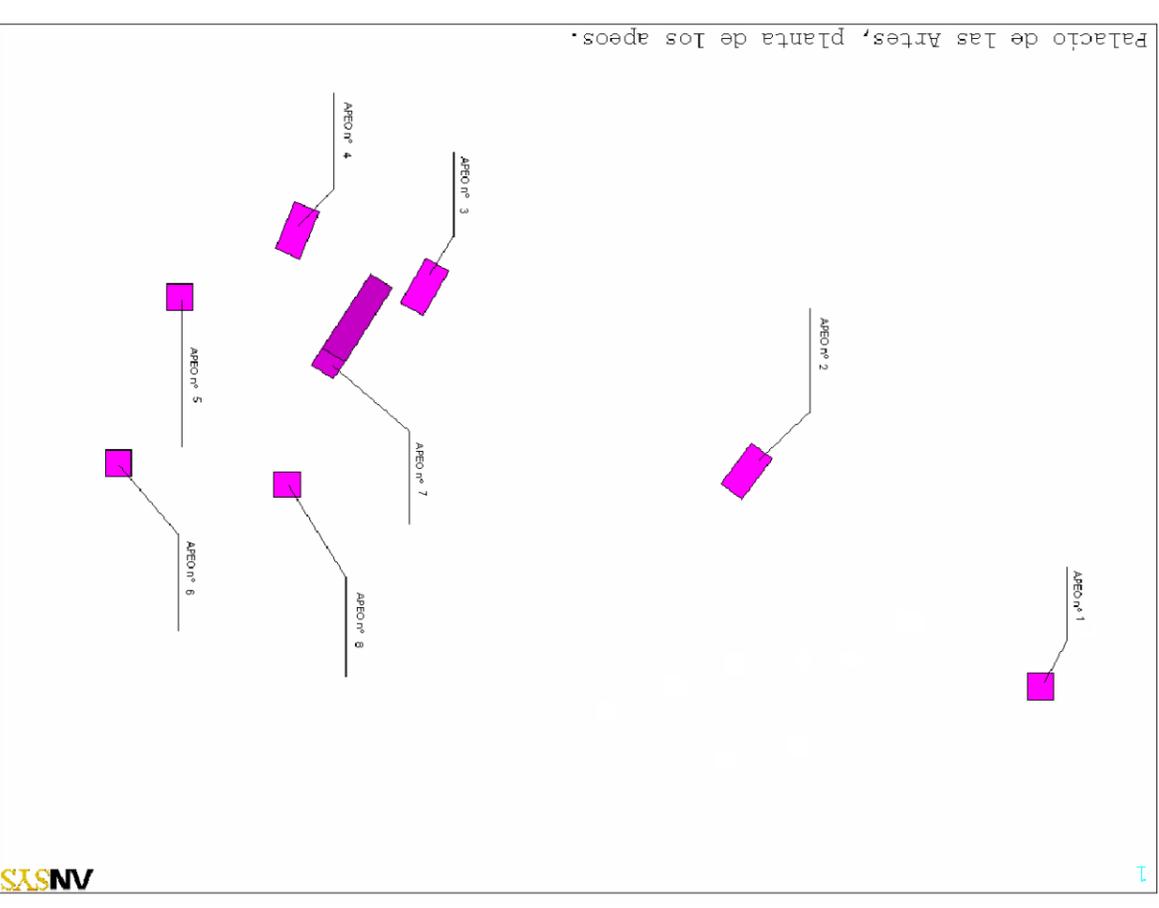
Pero sin lugar a dudas, el punto de inflexión y de mayor criticidad fue el correspondiente al desmontaje de los castilletes, donde había que transferir el peso gradualmente a los apoyos finales de la cáscara, controlando en todo momento la carga y los desplazamientos que se producían. Además, existía la incertidumbre de las posibles cargas horizontales no controladas en las cabezas de las torres.

Para esta última maniobra descrita, la transferencia gradual de cargas a los apoyos, se utilizó un sistema de control hidráulico informatizado. Con el fin de transferir las cargas gradualmente y simultáneamente a los apoyos, se dispusieron gatos hidráulicos en los castilletes. Este descenso simultáneo de la cáscara apoyada sobre los gatos hidráulicos se realizó en tres escalones de carga, obteniendo un descenso total de 27 mm.

Todo este proceso fue modelizado, al igual que los propios apeos, en el programa informático para prever los efectos, tensiones y deformaciones producidas.



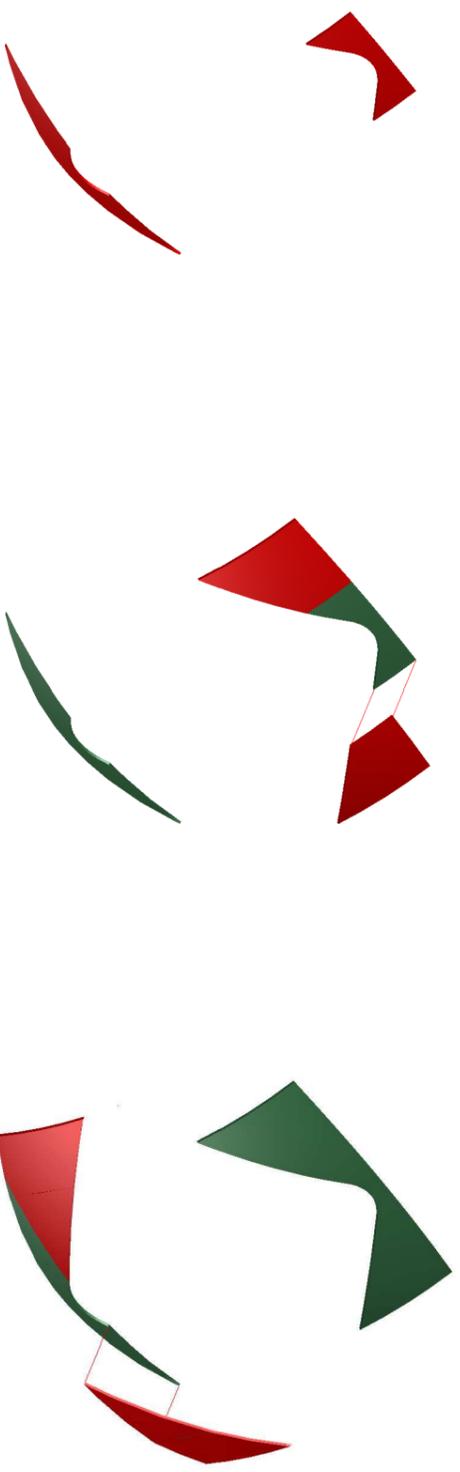
Figura 25, 26 y 27. Encima de estas líneas, imágenes de los apeos utilizados para el montaje de la cáscara, con sus correspondientes gatos hidráulicos para el control del descenso simultáneo de la cáscara. A la derecha, plano de los apeos introducido en el modelo de cálculo.



Secuencia de montaje

La secuencia de montaje de la cáscara se estableció en diversas fases. En esta lámina se aprecia las distintas piezas que conforman la totalidad de la cáscara y su orden de colocación en obra. Cada fase fue calculada individualmente para soportar los esfuerzos a los que estaba sometida. Las fases son:

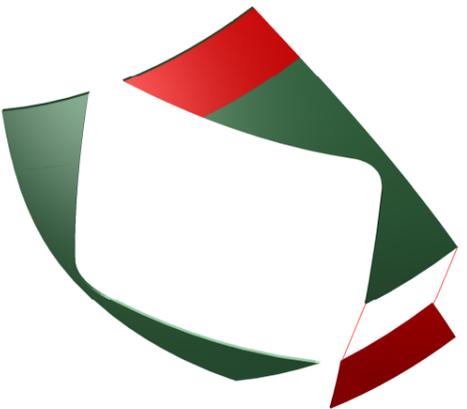
- Fase 1. Pieza clave y escalera.
- Fase 2. Siguiente pieza del panel sándwich.
- Fase 3. Colocación del sándwich unido al balcón.
- Fase 4. Pieza continuación de la colocada en fase 2.
- Fase 5. Panel y arbotante nº1.
- Fase 6. Panel y arbotante nº2.
- Fase 7. Panel y arbotante nº3.
- Fase 8. Panel y arbotante nº4.
- Fase 9. Panel y arbotante nº5.
- Fase 10. Pieza del extremo, denominada "punta".
- Fase 11. Descenso de los apoyos provisionales y tesado del balancín



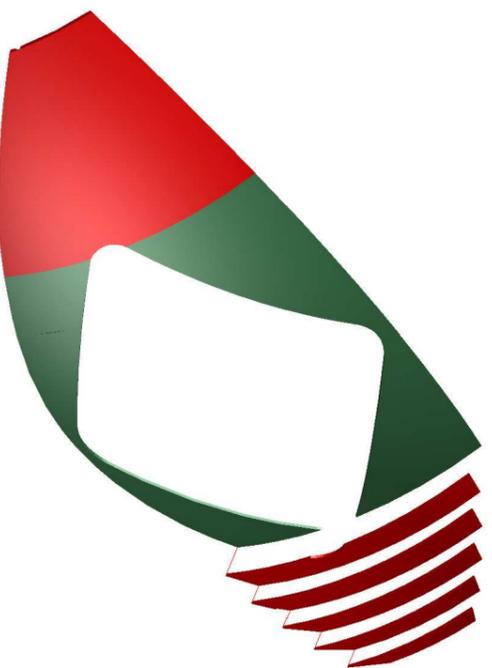
Fase 1

Fase 2

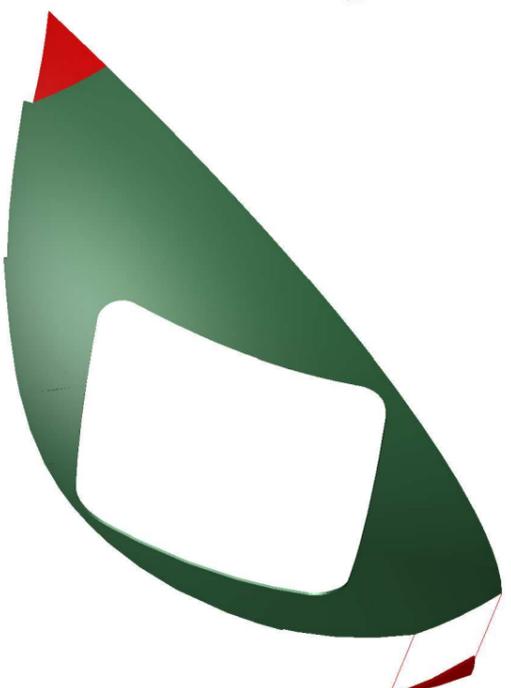
Fase 3



Fase 4



Fase 5, 6, 7, 8 y 9



Fase 10



Fase 11

Fase 1. Colocación de pieza clave y escalera

En esta primera fase se procede a la colocación de la pieza clave y la placa que conformará la escalera. Ya se ha tenido en cuenta la previa disposición y ejecución de los apoyos superior e inferior correspondientes al trípode y al balancín, respectivamente.

Al tratar los elementos que componían la cáscara, se mencionó la existencia de un tirante de pretensado con 7 cables en el balancín. La correlación de fases en el tesado de los cables se debe al cálculo realizado para evitar tracciones en la losa superior del elemento.

Por lo tanto, antes de la colocación de la pieza clave y la escalera, se produjo el tesado de 2 de los 7 cables que incorpora. Éste, se realiza en tres fases, siendo las siguientes:

- 1) Aplicación de un 10% del esfuerzo total de pretensado.
- 2) Tesado de los tendones hasta alcanzar el 70% de la carga de rotura.
- 3) Inyección de las vainas con lechada de cemento y aditivo plastificante.

Una vez tesados los cables del balancín, se procedió a la colocación de las piezas descritas. En cuanto a la pieza clave, se colocó uniéndola al trípode y quedando toda ella volada. Por su parte, la escalera se colocó apoyada sobre tres apoyos provisionales.

En el cálculo se engloba en una única fase debido a la independencia de esfuerzos entre ambas piezas.

En la figura 28 se aprecia la disposición de los apoyos provisionales para sujetar la escalera, así como el balancín y la pieza clave.

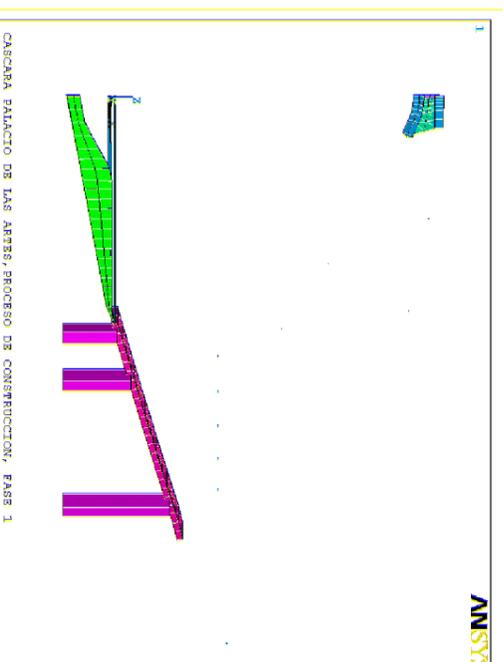


Figura 28. Perspectiva del modelo de cálculo. En verde, balancín. En morado, apoyos provisionales.

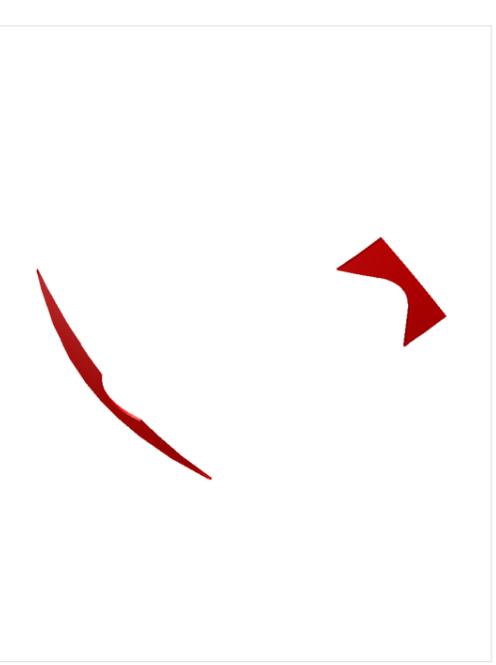


Figura 29. Perspectiva de la fase 1



Figura 30. Fotografía durante la colocación de la pieza clave en obra.

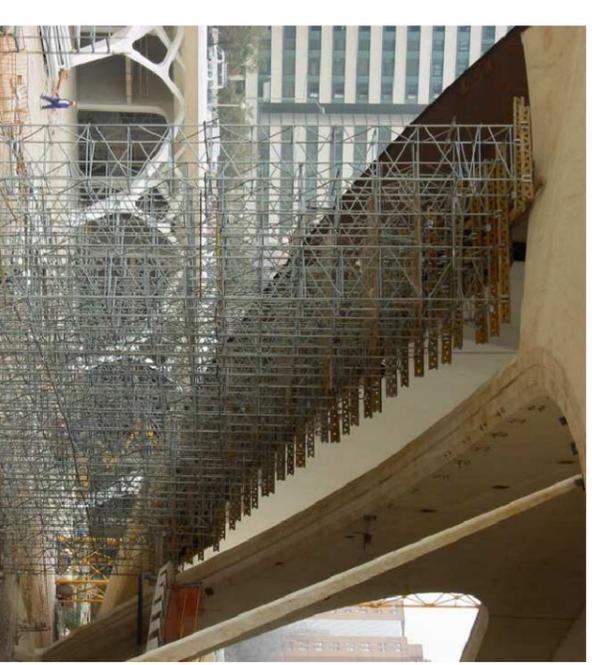


Figura 31. Escalera en una fase posterior a la mencionada.

Fase 2. Colocación de la siguiente pieza del panel sándwich

En la fase 2, se procede a la colocación de la segunda pieza del sándwich, la cual se une a la pieza clave ya montada en la fase 1. Además, como se ve en la figura 32, se disponen dos castilletes provisionales en los extremos de la pieza.

Fase 3. Colocación de la pieza de sándwich unida al balancín

La siguiente pieza a colocar es la que se conecta en la parte inferior con el balancín. En este caso no es necesario de ningún apoyo complementario, ya que es suficiente con los dispuestos anteriormente para la sujeción de la escalera.

La unión entre las distintas piezas de acero que componen el conjunto de la cáscara se realiza mediante tornillería y, posteriormente, se procede a soldar dicha unión.



Figura 34. Fotografía de la obra correspondiente a la fase 2 de montaje de la cáscara

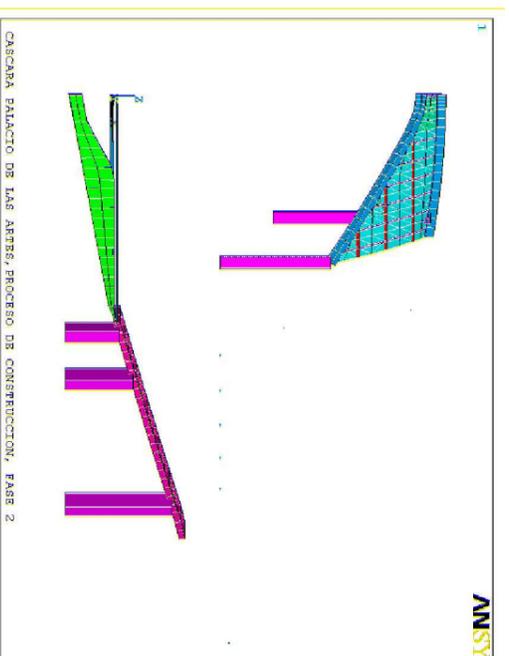


Figura 32. Perspectiva del modelo de cálculo de la fase 2

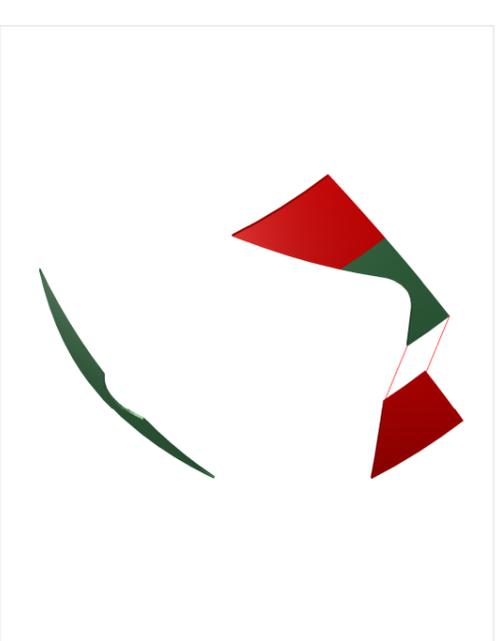


Figura 33. Perspectiva de la fase 2

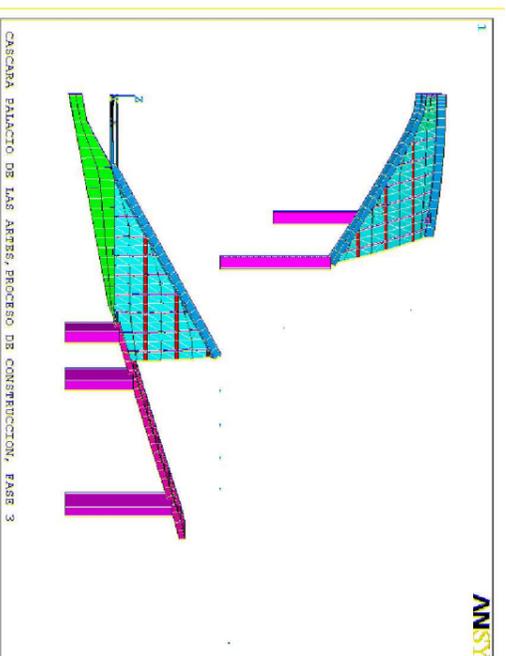


Figura 35. Perspectiva del modelo de cálculo en la fase 3



Figura 36. Perspectiva de la fase 3

Fase 4. Colocación de la pieza que sigue a la colocada en la fase 2

Se coloca la pieza continuación de la colocada en la fase 2, apoyándose en los castilletes ya dispuestos para la fase 2 y en otros dos castilletes provisionales contruidos para apoyar los extremos de esta pieza.

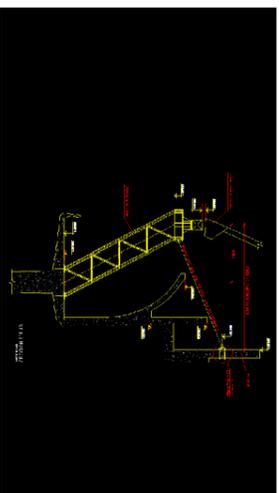


Figura 39. Detalle constructivo de un castillete utilizado para la colocación de la pieza correspondiente a la fase 4.

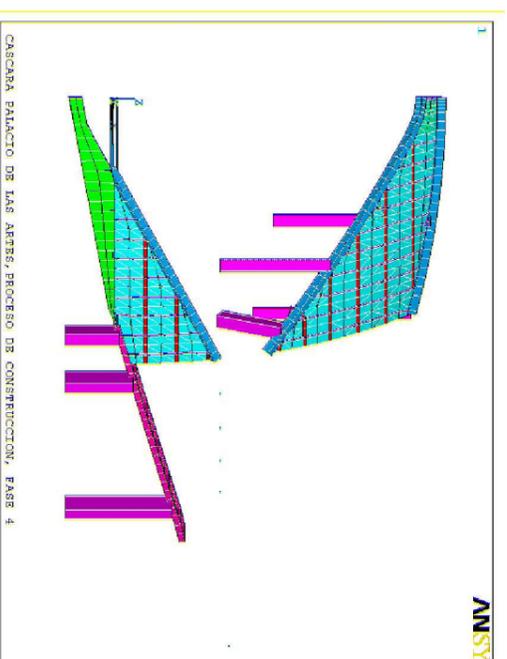


Figura 37. Perspectiva del modelo de cálculo de la fase 4



Figura 38. Perspectiva de la fase 4

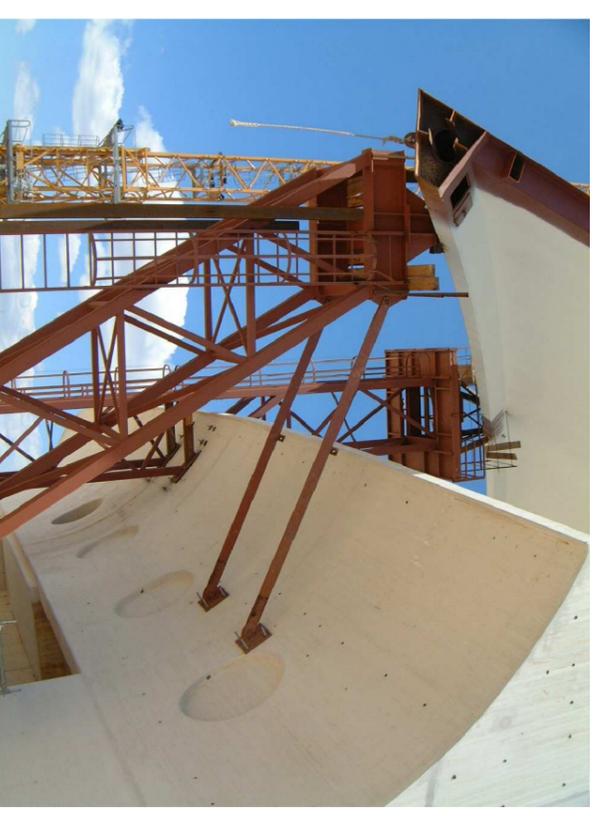


Figura 40, 41 y 42. Imágenes de la cáscara en la fase de montaje 4 con sus correspondientes apoyos provisionales.

Fase 5, 6, 7, 8 y 9. Colocación de los arbotantes

Para ese a suponer fases distintas, con montajes por separado y cálculos independientes, los engloba conjuntamente por la similitud y repetición de procesos que representan. Cada una de estas fases supone la colocación de un arbotante con su correspondiente pieza de sándwich. En total forman un total de 5 arbotantes por cada $\frac{1}{4}$ de cáscara.

Una vez colocado el primer arbotante, se produce la transmisión de esfuerzos entre las piezas superiores y las inferiores. Por ello, una vez ejecutada la fase 5, se procede al desmontaje de los dos castilletes provisionales que se colocaron para el montaje de la pieza correspondiente a la fase 4.



Figura 44 y 45. A la izquierda, unión atornillada entre distintas piezas que componen el arbotante. A la derecha, colocación del segundo arbotante y su correspondiente panel en obra.

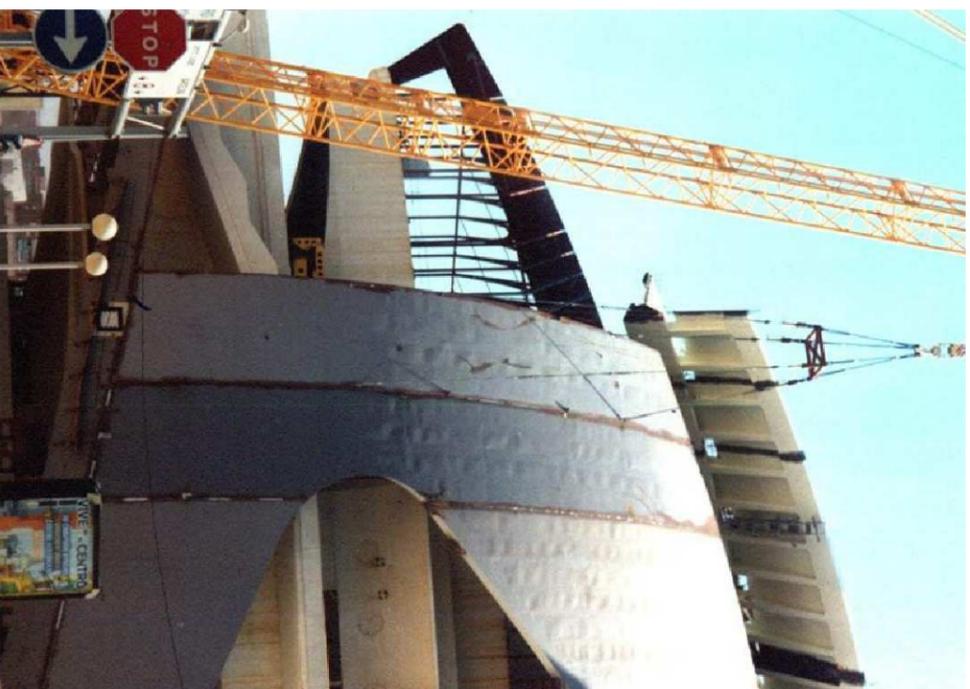


Figura 43. Perspectiva de la fase 5, 6, 7, 8 y 9.

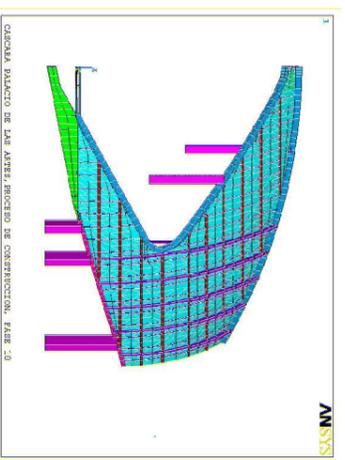
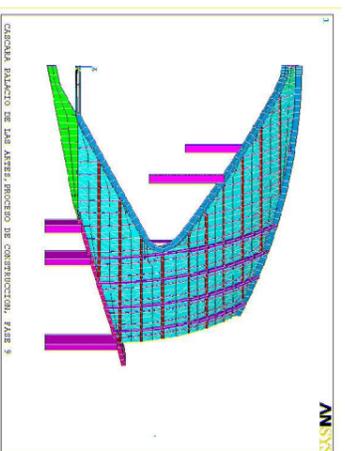
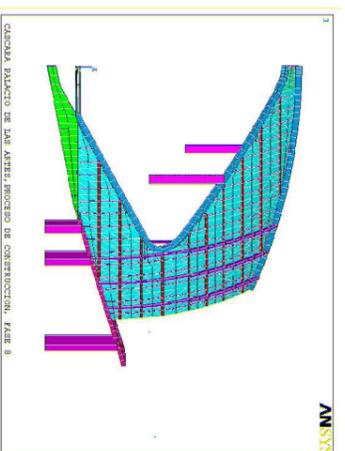
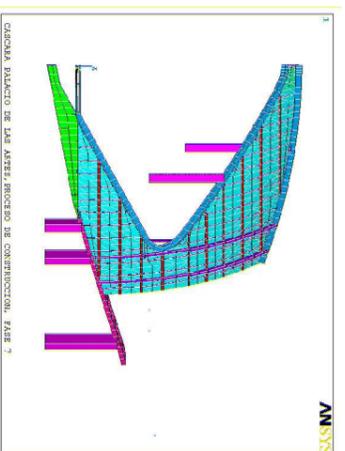
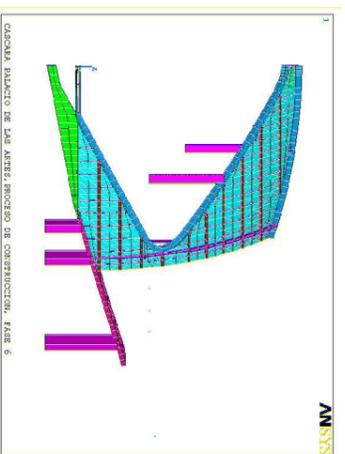


Figura 46, 47, 48, 49 y 50. Perspectivas del modelo de cálculo de las fases 5, 6, 7, 8 y 9 respectivamente.

Fase 10. Colocación pieza del extremo

Con esta fase se termina el montaje de la cáscara. La fase 10 supone la colocación de las piezas de los extremos, también denominadas "punta". Para el montaje de esta pieza se coloca un último castillete en el extremo.

Una vez finalizadas las dos hojas de la cáscara y conectadas ambas mediante las vigas en cojín descritas anteriormente para la transmisión de los esfuerzos de viento, se desmontará el apeo del extremo.

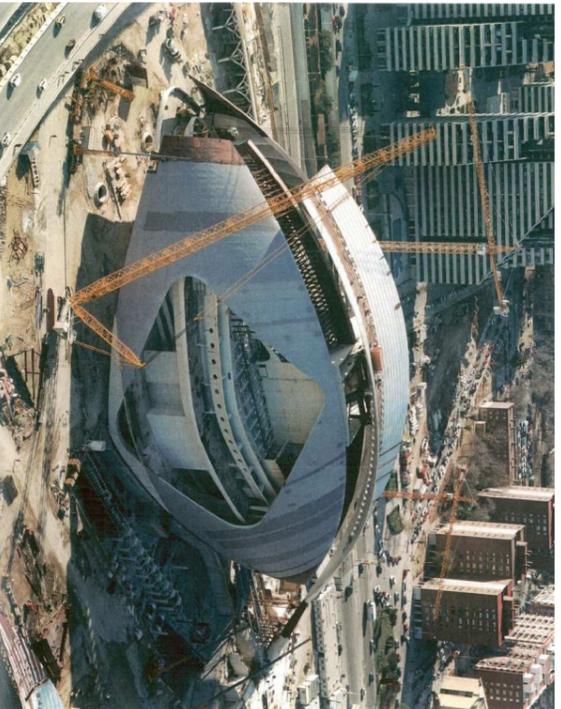


Figura 53. Vista aérea de la obra en la fase 10 de montaje.

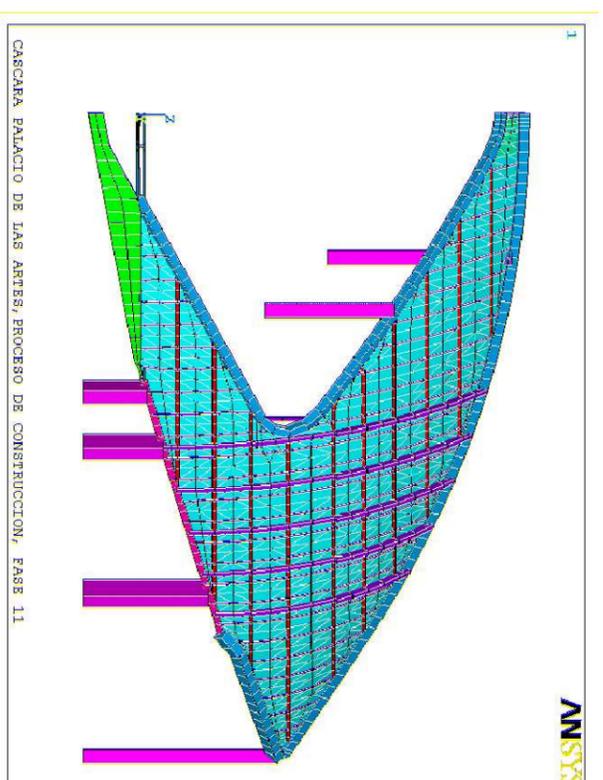


Figura 51. Perspectiva del modelo de cálculo de la fase 10.

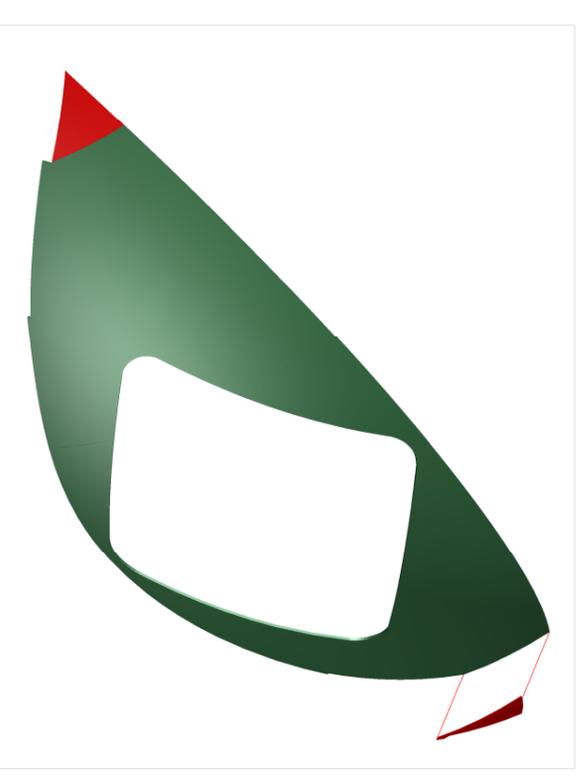


Figura 52. Perspectiva de la fase 10.

Fase 11. Descenso de los apoyos provisionales y tesado del balancín

Una vez terminado el montaje de la cáscara, se procedió al desmontaje de los apoyos provisionales. Para llevar un control de la entrada en carga definitiva de la estructura se calculó esta fase como cualquier otra. Finalmente se estimó realizar el descenso en tres escalones. Este proceso se llevó a cabo con la colocación de un gato en cada castillete.

Además, durante la ejecución del descenso de los apoyos se auscultó la cáscara tomando medidas de los parámetros más significativos (temperatura, presiones, desplazamientos y tensiones) por medio de instrumentos (traductores de presión, bandas extensométricas

lineales, sondas de temperatura y aparatos de medida topográficos) que permitieron realizar un análisis del comportamiento real de la estructura y su comparación con el comportamiento teórico de proyecto.

En cuanto al tesado de los cables del balancín, se realizó simultáneamente con el descenso escalonado de la cáscara. Para cada escalón de carga producido, se aplicaba una fuerza determinada en los 5 cables que restaban por pretensar.

A continuación se muestran unos cuadros y gráficas relativos a datos obtenidos con el modelo de cálculo para esta fase.

DESCENSO ACUMULADO DE GATOS (mm)						
ESCALÓN DE CARGA	APEO Nº 1	APEO Nº 2	APEO Nº 3	APEO Nº 4	APEO Nº 5	APEO Nº 6
1	10	7	4	2	8	9
2	19	15	8	5	16	18
3	29	22	12	7	25	27

En el cuadro superior se muestra el descenso acumulado de los gatos calculado para los tres escalones de carga descritos.

En cuanto al tesado de los cables del balancín, se muestra un cuadro donde se ve la fuerza aplicada a cada tendón en cada escalón de carga.

ESCALÓN DE CARGA	FUERZA POR TENDÓN (*) (t)
1	72
2	72
3	72
TOTAL: 1+2+3	216



Figura 54. Perspectiva de la cáscara montada.

Una vez aplicado los tres escalones de carga se retiraron los apeos existentes salvo el de los extremos de las puntas. Estos apeos se mantuvieron hasta la entrada en carga de la otra mitad de la cáscara y la unión entre ambas hojas, soportando las fuerzas horizontales existentes.

Análisis de las reacciones

La entrada en carga definitiva de la cáscara y la retirada de los apoyos provisionales supuso un aumento de las tensiones en los apoyos definitivos. A continuación se muestran unas gráficas donde se aprecia el % de cargas que absorbe cada apoyo, antes de la retirada de los apoyos provisionales y una vez retirados.

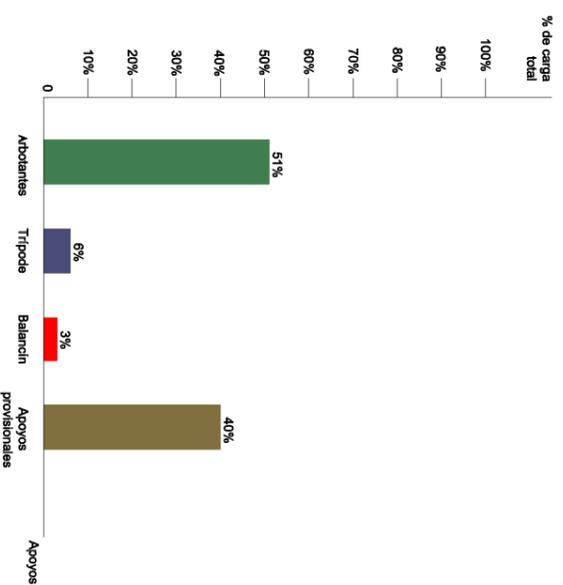


Figura 55. Gráfico del % de cargas que recibe cada apoyo antes de la puesta en carga de la cáscara.

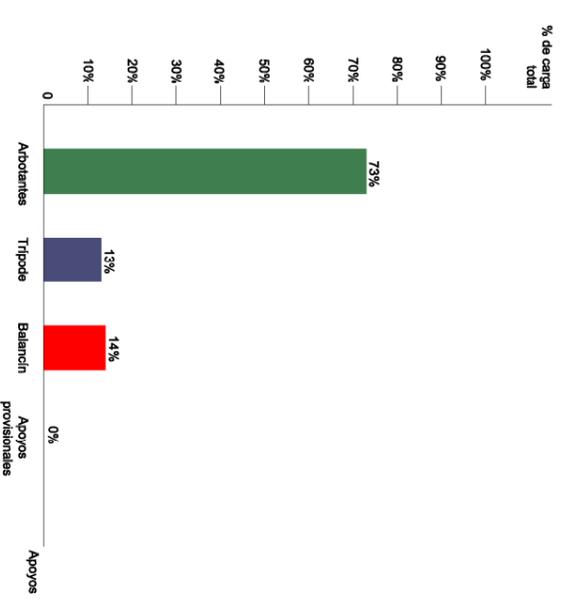


Figura 56. Gráfico del % de cargas que recibe cada apoyo después de la puesta en carga de la cáscara y la retirada de los apoyos provisionales.

Secuencia fotográfica del montaje de la cáscara



El trencadís. Antecedentes

Más de 35000 m² de trencadís revisten las cáscaras y diferentes espacios del Palacio de las Artes Reina Sofía. Esta técnica consiste en la realización de una especie de mosaico cerámico que tiene como peculiaridad que las piezas usadas para su fabricación provienen de azulejos troceados.

Sus inicios se remontan al Modernismo, donde Antonio Gaudí, de la mano de Josep Maria Jujol fue el precursor de esta técnica. La utilizó por primera vez en el llamador de la entrada de la finca Güell, en la avenida de Pedralbes de Barcelona. En esta finca, la arquitectura sinuosa convirtió en necesidad romper baldosas donde no se podían utilizar enteras. Al trocearlas y realizar una nueva composición sin relación con los dibujos de las piezas enteras, unido a la mezcla de fragmentos de diversas piezas, se consiguen efectos visuales peculiares y distintivos de esta técnica.



Uso del trencadís por Gaudí y Calatrava

Actualmente, el arquitecto Santiago Calatrava es el máximo representante de esta técnica. Por ello, entre otras cosas, es sabida la gran influencia que a supuesto Gaudí en su arquitectura. Sin embargo, viendo la utilización del trencadís en obras de ambos arquitectos, salta a la vista las diferencias en la forma de utilizarlo. Sin entrar en críticas ni debates, se aprecia la riqueza y el juego con distintos tonalidades y colores del material que adopta Gaudí en sus obras, modulando, geometrizando y teniendo en cuenta hasta el más mínimo detalle. En cambio, Santiago Calatrava lo utiliza como mero revestimiento, sin investigar en el amplio abanico de tonalidades y posibilidades que ofrece este material. Se limita a revestir las superficies con el trencadís de color blanco y azul, haciendo eco de una de las características que representa su arquitectura, la utilización de pocos materiales y colores.

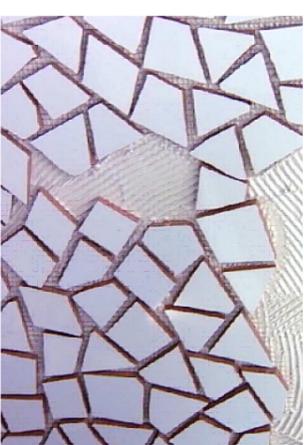


Figura 57. Imagen de la colocación del trencadís blanco en una zona del Palacio de las Artes

En el Palacio de las Artes representa el segundo material más utilizado por detrás del hormigón blanco. Aparte de las cáscaras, está presente en otros espacios como el interior de la Sala Principal, en los muros exteriores de la caja escénica, el exterior del auditorio y en el exterior de la urbanización y zonas de acceso. En el interior de la Sala principal, a diferencia de las cáscaras, se ha utilizado trencadís de color azul cobalto.

Este revestimiento tan característico de la obra de Santiago Calatrava, permite la coherencia y homogeneidad visual del Palacio de las Artes con el resto del complejo de la Ciudad de las Artes y las Ciencias.

Figura 58 y 59. De izquierda a derecha, imagen del Parque Güell y dragón situado en la entrada al parque Güell. Ambas obras realizadas en trencadís por el arquitecto catalán Antoni Gaudí

Características del material

Como se ha mencionado con anterioridad, el trencadís es un conjunto de piezas de azulejo cerámico roto, de forma irregular, que conforman un mosaico. El cuerpo de estas piezas, llamado bizcocho, está formado por pasta roja. En cuanto a la cara vista, está cubierta por un esmalte vitrificado de color blanco.

La razón de la utilización de esta técnica es puramente estética, consiguiendo la armonía en todo el conjunto de la Ciudad de las Artes y las Ciencias. Podríamos hablar de otras propiedades del material cerámico, como

características mecánicas y de durabilidad, pero éstas desaparecen al romper los azulejos en trozos pequeños para conformar el mosaico, trasladando las exigencias de durabilidad al material de agarre y de soporte.

En cuanto al suministro del trencadís, se realizó en mallas de fibra de vidrio estándar de dimensiones 60 x 60 cm. Un problema que se produce con estas mallas, las cuales poseen un tipo de frontera en zig-zag, es la aparición del "efecto damero", el cual se observa en la figura 62.

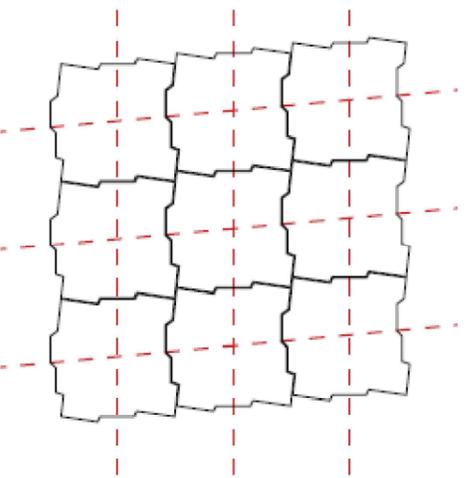
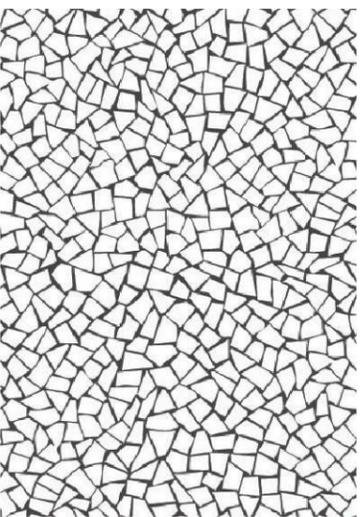


Figura 60 y 61. A la izquierda, ejemplo de trencadís de color blanco. Debajo, esquema de una malla con frontera invisible patentada por Trencadís Innovación S.L., en el que se logra un efecto visual uniforme y sin fronteras. El encaje de las mallas es horizontal y diagonal en un sentido y diagonal en otro, así evitando el "efecto damero" producido en otros trencadís con frontera zig-zag.



Figura 62. Fotografía de la cáscara y detalle de una zona en la misma donde se aprecia el "efecto damero", identificándose claramente la disposición de las distintas mallas y las juntas entre ellas.

Colocación en obra

Dadas las características del elemento y las dificultades que presenta un proyecto arquitectónico de esta envergadura, la colocación en obra del trencadís supone un trabajo muy complejo, debido principalmente a las dimensiones de la cáscara y la altura a la que hay que trabajar.

Por lo tanto, el adhesivo a utilizar debía presentar ciertas características que hiciesen viable su colocación. En primer lugar, debía ser compatible con la superficie de acero de la cáscara, tener unas propiedades reológicas que permitiesen la colocación del material a gran altura sin deslizamientos y lograr una buena adherencia y durabilidad del trencadís.



Pero, por encima de todo, para no dañar el carácter visual de toda la superficie, no debía presentar juntas de dilatación. Sin lugar a dudas, este hecho es el más curioso y complejo a la vez, ya que se trata de recubrir una superficie de 172 m de longitud y 58 m de altura.

La solución técnica que se aprobó para la colocación del material cerámico fue la utilización del sistema adhesivo Kerakoll Superflex. Sus propiedades hacen posible la colocación del trencadís cumpliendo con todos los requisitos e inconvenientes presentes.

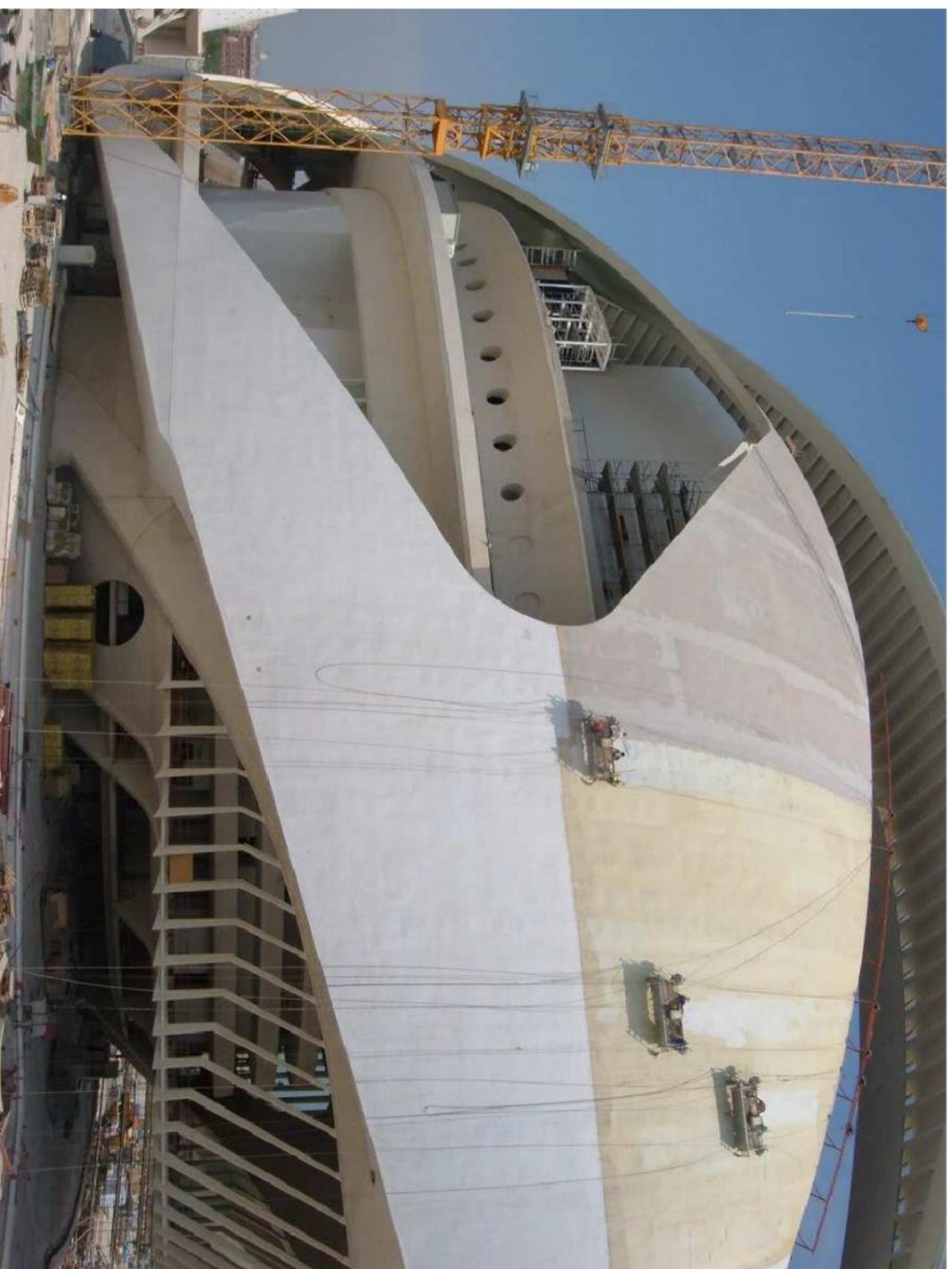


Figura 63, 64, 65 y 66. A la izquierda, imágenes de la colocación de mallas en la cáscara, así como la colocación de piezas cerámicas individualmente en zonas especiales. A la derecha, vista general de la aplicación del adhesivo Superflex, apreciándose la complejidad de los trabajos por la geometría de la cáscara.

Este adhesivo es un sistema poliuretánico de elevada elasticidad para la regularización del soporte metálico y la posterior puesta en obra del recubrimiento cerámico. Sus propiedades elásticas permiten abarcar toda la superficie sin juntas, resolviendo el principal inconveniente. También posee unas propiedades tixotrópicas que evitan el deslizamiento vertical del adhesivo y una trabajabilidad que garantiza su uso en diferentes condiciones climáticas.

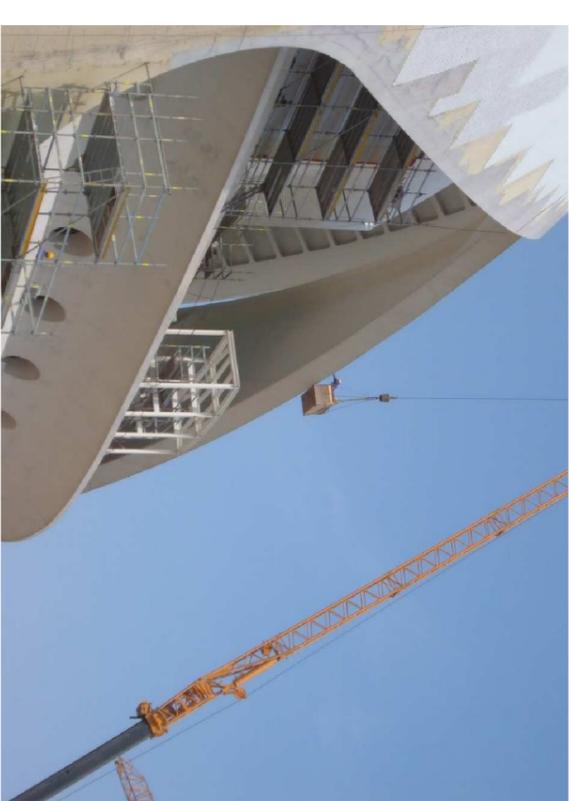
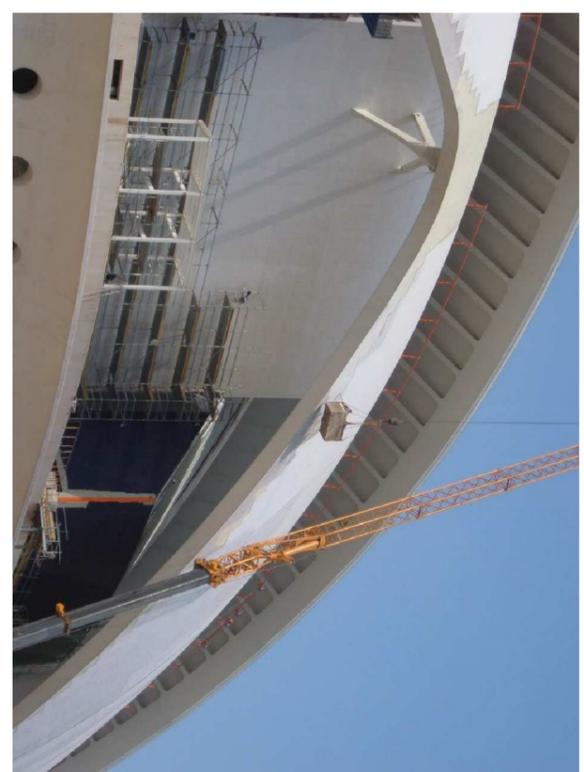


Figura 67, 68, 69, 70 y 71. Imágenes de la aplicación del adhesivo Superflex y de la colocación de las mallas de trencaadís. En la última imagen se aprecia la diferencia de tonalidad y brillo que adquiere el revestimiento al aplicar el rejuntable con el sistema Fugabella 2-12.

5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

5.1. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

5.2. ACCIONES SOBRE LA CÁSCARA

5.3. MODELIZADO Y DIMENSIONADO



Condicionantes del comportamiento estructural

Una serie de acciones actuantes en un elemento estructural condicionarán el dimensionado del mismo. Pero antes de pasar al cálculo, el cual hoy en día se podría decir que es un simple trámite derivado del avance tecnológico que se ha experimentado en los últimos años con la aparición de programas informáticos, otros aspectos definidos en la fase de proyecto tomarán fuerza a la hora de optimizar o no el comportamiento estructural de un elemento. En el caso que nos ocupa, la cáscara del Palacio de las Artes, estos aspectos son importantes debido a la dimensión y luz que presenta el elemento.

Félix Candela, gran conocedor del comportamiento estructural de superficies laminares, expresaba la vital importancia que tenían una serie de factores en la concepción del diseño estructural. Según Candela, la primera fase era establecer y definir las acciones actuantes, pero las más importantes eran las fases 2 y 3, consistentes en la definición del esquema estructural y la elección del material y sus características.

El esquema estructural. La forma

Esta fase es la más creativa del proceso, donde se definirá la forma y mecanismos para soportar las acciones.

Eduardo Torroja señala en su tratado «Razón y Ser de los Tipos Estructurales», al comentar las bases a las que debe ajustarse el planeamiento estructural de un construcción:

“...esquemmatizándolo en forma matemática podría decirse que se tienen las siguientes:

<u>Ecuaciones</u>	<u>Incógnitas</u>
Finalidad utilitaria	Material
Estatismo (Función estática)	Tipo estructural
Cualidades estéticas	Forma y dimensión resistentes
Condiciones económicas	Proceso de ejecución

A estas ecuaciones han de añadirse las que podrían llamarse de compatibilidad, que establecen las mutuas exigencias e influencias de unas incógnitas en otras. Todas ellas hacen el sistema incompatible, en el sentido de que no es posible satisfacerlas todas plenamente o en todo el grado que se quiera; y es necesario conformarse con resolver el problema aproximadamente, limitando, al mínimo, los inconvenientes y sacrificando, en parte, condiciones menos importantes. Solamente puede pretenderse que el sistema cierre con el mínimo error”.

Eduardo Torroja. «Razón y Ser de los Tipos Estructurales».

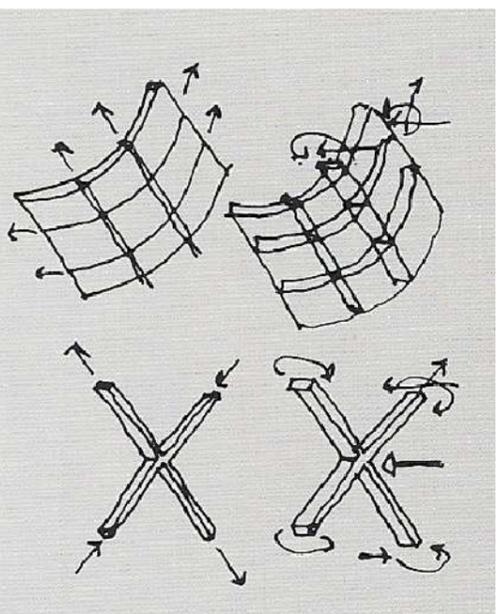


Figura 1. Emparillado con esfuerzos de flexión y con esfuerzos de membrana. La arquitectura como técnica (1)

Hecho este paréntesis, y trasladando el esquema estructural al caso que nos ocupa, vamos a ver como la forma arquitectónica de la cáscara influye en el comportamiento estructural.

La cáscara presenta una superficie de doble curvatura. La idoneidad formal en este tipo de superficies seña la de trabajo como membrana, es decir, eliminando los esfuerzos de flexión en la misma. Esta condición es difícil de adquirir, sobre todo en elementos con ciertas dimensiones y especialmente en los puntos de bordes libres. Por todo ello y sin entrar en más detalles, la composición de la cáscara se ha solucionado mediante un emparillado de barras con nudos rígidos y unas chapas metálicas que cubren el entramado formando un sándwich que, con su correspondiente dimensionado, soportará los esfuerzos a los que está sometido.



Figura 2. Vista de conjunto de sándwich y de las vigas de borde antes de ser izada.

La elección del material. El acero

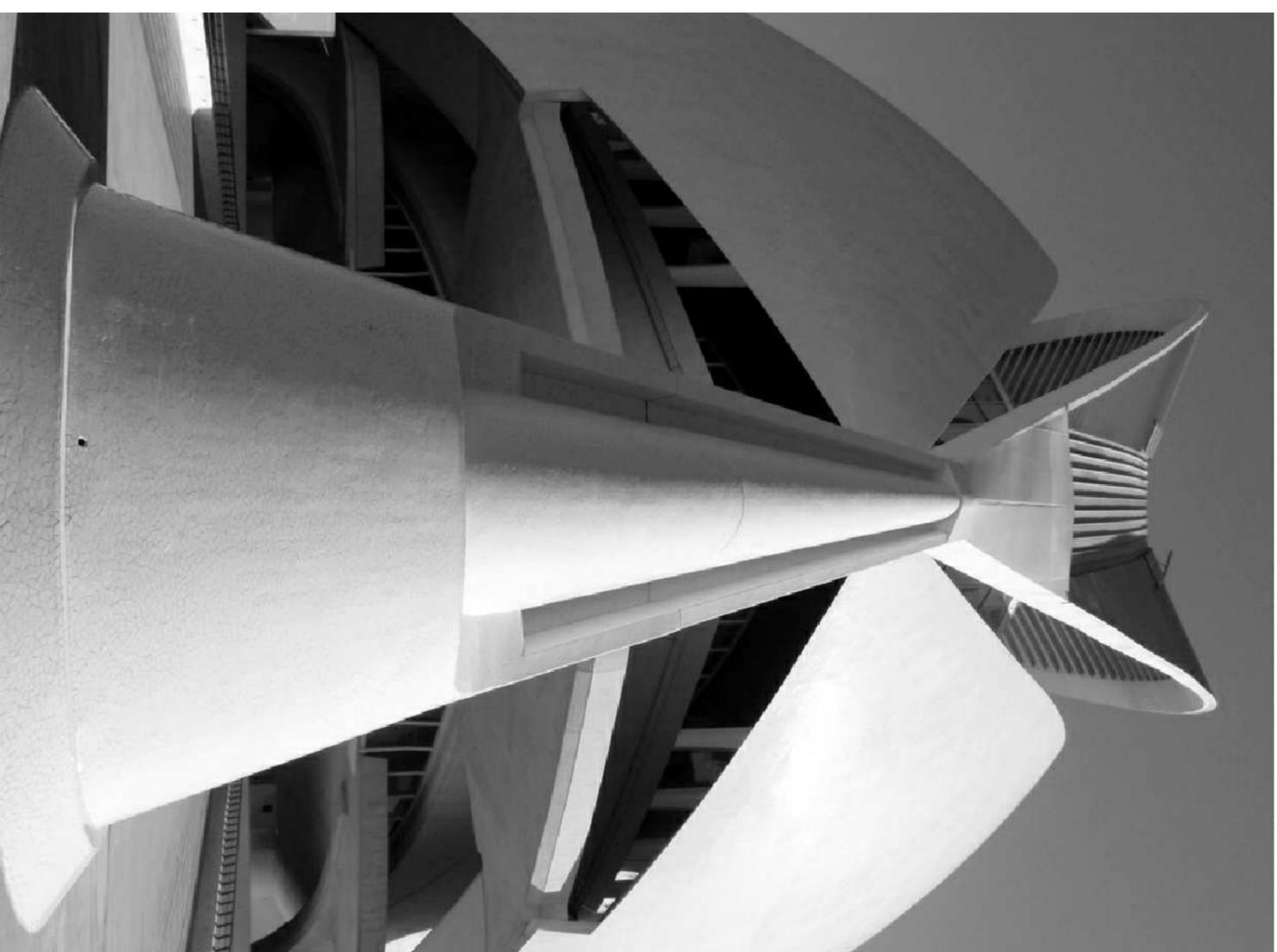
La elección del material es otro aspecto fundamental para garantizar un buen comportamiento estructural. Éste vendrá condicionado y ligado al esquema estructural, a la forma del elemento, la cual, junto con las acciones, provocarán unas tensiones que propondrán el uso de uno u otro material según sus características y comportamiento frente a las mismas. Seguramente todos pensemos en la utilización del hormigón armado o el acero para la constitución de la cáscara, por ser los materiales más extendidos en la actualidad y que mejor podrían combatir estas sollicitaciones.

Pues así es, en el diseño original realizado por Santiago Calatrava, la cáscara era de hormigón armado, pero posteriormente se realizó, por diversos factores, en acero. Quizás no se deba la elección del material únicamente al comportamiento estructural, ya que ambos son capaces de absorber las tensiones producidas por una superficie de doble curvatura. Pero si es cierto que la elección del acero, utilizando un sistema rígido de nervios, facilita enormemente el montaje, la prefabricación y la ejecución frente a la utilización del hormigón, con su consecuente dificultad de encofrado y armado. Además, se redujo el espesor y peso propio de la cáscara, aliviando las cargas que llegaban a la cimentación.

” No considero lícito, sin embargo, buscar esta belleza alterando la forma natural de una estructura, en aras de un escandaloso sensacionalismo, pero no hay razón económica que nos impida moldear de manera arbitraria la configuración particular de cada elemento... Hay campo más que sobrado en este tratamiento sensitivo de los detalles para expresar la propia personalidad y talento sin tener que recurrir a soluciones extravagantes que estén en desacuerdo con las inmutables Leyes de la Estática.”

Félix Candela

Figura 3. Fotografía donde se aprecia la curvatura de la cáscara del Palacio de las Artes Reina Sofía. Vista oeste.



Acciones intervinientes

Antes de proceder al cálculo y dimensionado de la estructura, es necesario conocer las acciones a las cuales va a estar sometida y como actuarán sobre ella. Los principales esfuerzos intervinientes en la estructura son los producidos principalmente por las cargas de peso propio, carga muerta, sobrecargas, acciones de viento y las acciones térmicas. La determinación de todas estas cargas, reguladas por normativa, posteriormente se introducirán en un modelo de cálculo para dimensionar el elemento.

Al tratarse de un elemento singular y con unas dimensiones considerables, se consideró oportuno realizar unas pruebas en un túnel de viento para saber con mayor exactitud los efectos que produciría el viento sobre la estructura, por lo que a continuación dedico unas líneas para explicar este proceso debido al gran interés que despierta por su escasa utilización.

Ensayo de túnel de viento

Un túnel de viento, o túnel aerodinámico, permite estudiar fenómenos relacionados con el viento atmosférico y su acción, en nuestro caso, con estructuras arquitectónicas.

Mediante la aplicación de corrientes de aire sobre una maqueta de la estructura a estudiar dotada de sensores se consiguen evaluar: los esfuerzos y deformaciones que sufre la estructura debido al viento, las vibraciones que se producen en el edificio, la percepción de los movimientos en el interior (muy importante para los usuarios del edificio) y el efecto de la estructura en el "clima de vientos" de su entorno debido a las perturbaciones que produce.

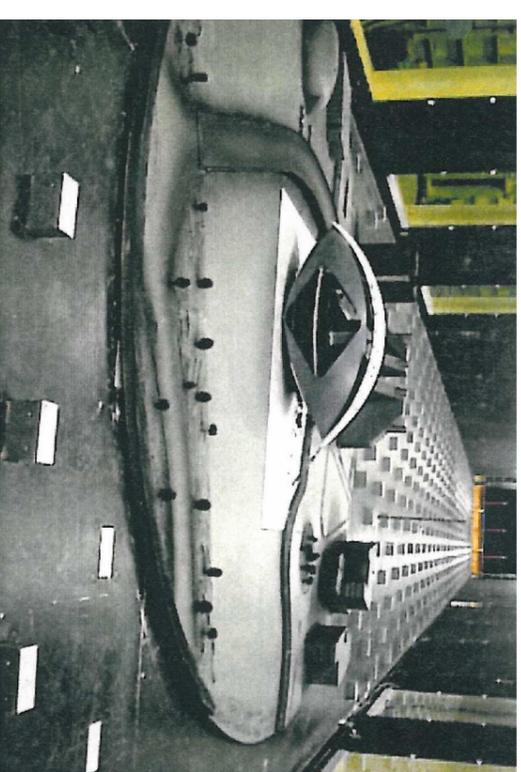
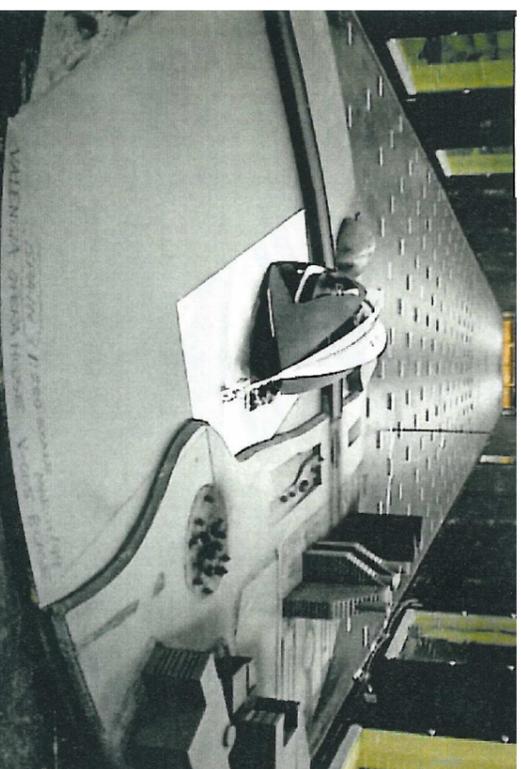


Figura 4. Vistas del modelo aerodinámico de escala 1:200 para el túnel de viento, ensayado desde distintos ángulos.

Los modelos se montan para su estudio en un equipo llamado balanza a la cual están adosados los sensores que proporcionan la información necesaria para calcular los coeficientes de sustentación y resistencia, necesarios para conocer si es factible o no emplear el modelo en la vida real. Además son empleados otros dispositivos para registrar la diferencia de presiones en la superficie del modelo en cuestión. Posteriormente, los resultados prácticos deben ser comparados con los resultados teóricos.

El ensayo de túnel de viento del modelo del Palacio de las Artes se llevó a cabo por The

Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory de la Universidad Occidental de Ontario (UWO).

Se realizó un modelo a escala 1/200 que reproducía la geometría de la estructura, con la equivalencia de propiedades elásticas y de masas respecto al de la estructural real, de manera que el modelo aerodinámico equivalente simulaba las propiedades mecánicas de la estructura en sus principales modos de vibración. El edificio en su conjunto también fue modelado.

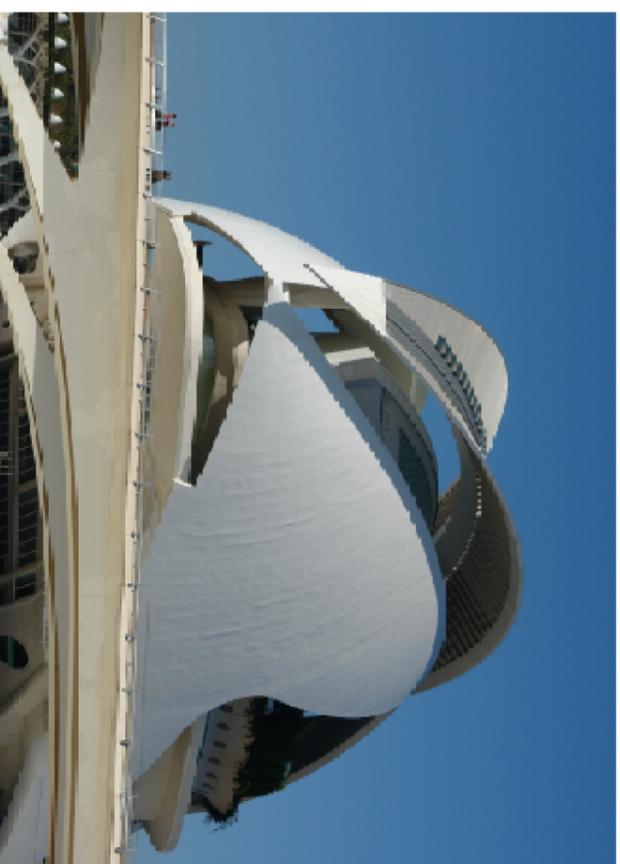
La distribución de gradientes de las velocidades de viento fue desarrollado a partir de los datos meteorológicos del área de Valencia.

Las cargas y respuestas inducidas por el viento

medidas en el túnel fueron combinadas con la distribución probable de diseño para pronosticar los valores extremos para varios periodos de retorno.

Las medidas tomadas en intervalos de 10° hasta completar el rango de giro de 360°, fueron tomadas en 504 puntos. En principio se probaron ocho velocidades de viento en un rango que va desde el 80 % al 180 % de la velocidad de viento en 50 años, y cerca de las velocidades de viento de máxima respuesta se ensayaron 29 incrementos de velocidades, en un rango del 10 % al 140 % de los datos de 50 años.

Wind Engineering Study



Wind Tunnel Model

<i>Client</i>	Palacio de las Artes	<i>Architect</i>	Santiago Calatrava	<i>Contractor</i>	NECSO Entrecanales Cubiertas
<i>Overall Dimensions</i>	230m (L) x 88m (B) x 70m (H)	<i>Year Tested</i>	1999	<i>Model Scale</i>	1:200

La velocidad de viento para un periodo de retorno de 50 años obtenido en el modelo de BLWTL es de 40,4 m/s, que es muy similar a la obtenida en los cálculos realizados

anteriormente a los ensayos del túnel de viento, en los que se tomó una velocidad de viento de 40 m/s. El estudio de viento en este aspecto no ofreció cambios sustanciales sobre lo previsto. Sin embargo, sí se vio que variaba la dirección y magnitud del viento, con vientos predominantes del oeste, donde se obtuvieron las mayores velocidades.

Se comprobó que la distribución de presiones estaba fuertemente condicionada por el ángulo de incidencia del viento.

Los máximos valores puntuales de presión y de succión observados se encuentran en el cuadrante sudeste, siendo los valores de 220 kg/m² de succión y de 150 kg/m² de presión. Estos valores se obtienen en puntos de medida ubicados en la viga de borde interior.

Los máximos valores de presiones obtenidos, no influenciados por efectos de borde, se encuentran en el cuadrante sobre los que inciden los vientos dominantes del oeste.

El posterior cálculo del viento sobre la Cáscara se ha realizado teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos de túnel de viento.

Peso propio

El peso propio de la cáscara lo componen todos los elementos, teniendo en cuenta un aumento del mismo debido al revestimiento de trencadis. Por lo tanto, se estimó un peso total de 2056 kN/m².

Estos esfuerzos, junto con los producidos por sobrecargas, deformaciones por acciones térmicas, etc., se introducirán en un modelo de cálculo de elementos finitos para dimensionar la estructura de la cáscara.

Figura 5. Imagen extraída del Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory de la Universidad Occidental de Ontario (UWO), donde se ven los datos del modelo para el ensayo del túnel de viento, una imagen del modelo a escala 1:200 y una fotografía del edificio.

Bases del modelo

La cáscara del Palacio de las Artes está constituida por dos hojas simétricas orientadas a sur y a norte. A la vez, cada hoja es simétrica en sus dos mitades. Por ello, la modelización de la cáscara se hizo sobre 1/4 de la misma, utilizando el programa de elementos finitos ANSYS.

Como la cáscara está compuesta por diversas piezas que hemos explicado anteriormente y su montaje y colocación en obra se realizó por etapas, hubo que calcular la estructura para todas las fases de montaje y, por supuesto, para el estado final de servicio. De esta forma se consiguió conocer las reacciones, los esfuerzos, las tensiones y deformaciones de cada elemento en cada una de las etapas que conforman el proceso constructivo de la estructura hasta su completa terminación.

Acciones consideradas

Se han mencionado ya en el apartado anterior, siendo éstas el peso propio, incluyendo el peso del trencadís, las sobrecargas, acciones térmicas, acciones de viento y añadiendo la carga producida por el pretensado de los cables durante el montaje, equivalente a 15000 kN.

Elementos del modelo

Es necesario definir el tipo de elemento finito para cada pieza de la cáscara, consiguiendo simular la forma de trabajo de la misma. Por lo tanto, habrá que conocer el funcionamiento de los elementos que componen la cáscara.

Para el panel sándwich, se emplearon elementos tipo Shell63, los cuales están definidos

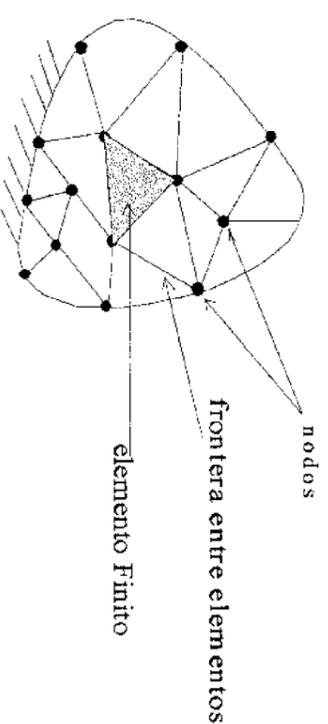


Figura 6. Modelo de elemento finito de un medio

por cuatro nodos, son elásticos y pueden soportar cargas de membrana y de flexión. El parámetro fundamental para definir el comportamiento de la placa es el espesor de la misma, siendo éste de 16 mm, ya que está formado por dos chapas de 8 mm. Para la placa de escalera se ha utilizado el mismo tipo de elemento.

En las vigas de borde, se ha utilizado un elemento BEAM44, siendo éste un elemento con capacidades para modelar cargas de tensión, compresión, torsión y flexión. La elección de este elemento viene determinado porque admite cambios de sección, con variaciones de área, inercia y espesores.

Para los arbotantes, rigidizadores horizontales y verticales y perfiles de la escalera, se han utilizado elemento BEAM4, modelizando las vigas

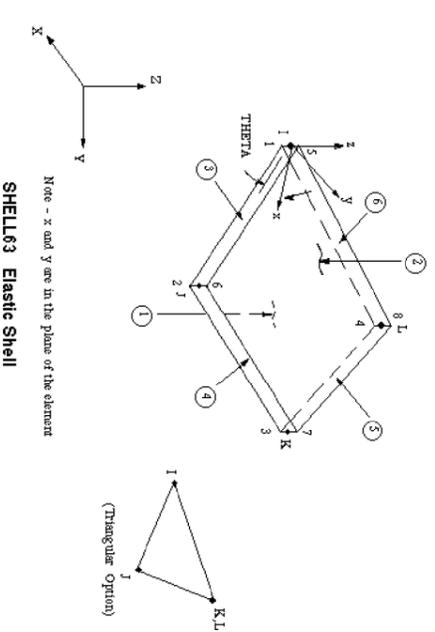


Figura 7. Elemento Shell63

que presentan una geometría sencilla, sin cambios de sección.

También se han modelizado los gatos que están en contacto entre la cáscara y los apoos, así como un apoyo elástico que simboliza la flexibilidad de la estructura de hormigón sobre la que se apoya la cáscara con elementos CONTACT52 y COMBIN12, respectivamente.

Características geométricas y mecánicas de los materiales

En el modelo se han utilizado hormigón en el balancín, acero estructural para la cáscara y acero de pretensar para los cables de tesado.

Las propiedades introducidas en el modelo

de estos materiales son las siguientes:

Hormigón.

$E = 30.000 \text{ MPa}$
 Densidad (Peso específico) = 25 kN/m^3
 Poisson = $0,18$

Acero estructural

$E = 210.000 \text{ MPa}$
 Densidad (Peso específico) = $78,5 \text{ kN/m}^3$
 Poisson = $0,3$

Acero de pretensar

$E = 190.000 \text{ MPa}$
 Densidad (Peso específico) = $78,5 \text{ kN/m}^3$
 Poisson = $0,3$

También se indicaron las áreas de las secciones de cada elemento, sus espesores e inercias.

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno son restricciones de desplazamientos y rotaciones que se aplican a la matriz resultante que conforma el modelo.

En nuestro caso, estas condiciones de contorno representan las condiciones de simetría del modelo, al haber modelizado solo $\frac{1}{4}$ de la cáscara y las restricciones establecidas en los apoyos de la misma. En su estado final, dispone de tres puntos de apoyo, uno en su parte inferior mediante una pieza denominada balancín, otra en su parte superior mediante un panel en la clave sujeto a un trípode y otro mediante unos arbotantes que descansan en los voladizos del pórtico principal de la estructura del edificio. Además, durante el montaje se dispusieron apeos que sirvieron de apoyos provisionales de la estructura, formando todos estos elementos las condiciones de contorno introducidas en el programa para el cálculo.



Figura 8. Fotografías de los apoyos definitivos de la cáscara. De izquierda a derecha, pieza clave sobre trípode, balancín sobre rótula y arbotantes apoyados en el pórtico principal.

Cabe destacar que los arbotantes, al estar apoyados en el voladizo, actúan como un muelle, por lo que se tuvo que calcular la rigidez elástica de los mismos.

Nudos y elementos

Con todo lo descrito anteriormente, el modelo para el cálculo con el programa de elementos finitos ANSYS incluía 1003 nudos y 2625 elementos, que representan el sándwich, las costillas verticales y horizontales, la escalera, las vigas de borde, los arbotantes y el balancín.

Por último, señalar que la cáscara, al estar montada sobre castilletes provisionales, tuvo que analizarse el proceso de puesta en carga de la misma con el fin de pasar gradualmente las cargas desde estos castilletes a los apoyos definitivos (arbotantes, balancín y trípode).



Figura 9. Fotografía de un operario sobre un castillete provisional provisto de un gato hidráulico.

Resultados

Aquí se aprecian los resultados obtenidos del modelo, viéndose los esfuerzos, tensiones y deformaciones producidos en el cálculo durante todas las fases de montaje analizadas.

Los diagramas que se muestran son los correspondientes a la fase 12 de montaje, es decir, una vez montada la estructura completamente y entrada en carga. Comentándolos brevemente, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

En los elementos correspondientes al sándwich y a las vigas de borde se aprecia que las tensiones máximas se producen en la pieza clave, de ahí que la sección del sándwich pase de 400 mm en todo el elemento a 1000 mm en la sección de la pieza clave. Las rigidez verticales y horizontales tienen una distribución uniforme de las cargas, con ligeros aumentos de tensiones en la zona superior del hueco romboidal, lugar donde no presenta arbotantes

que ayuden a la absorción de estas tensiones. En cuanto a las deformaciones, la zona superior al hueco romboidal y en especial, la zona de la punta, presentan las mayores deformaciones, las cuales disminuirán al conectar mediante vigas en cajón las dos hojas que conforman la cáscara. Y, por supuesto, el triángulo y los arbotantes son los elementos que soportan más cargas por ser los puntos de apoyo de la cáscara.

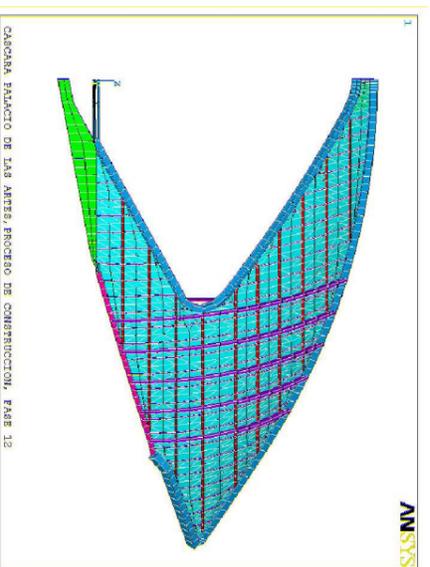


Figura 10. Perspectiva del modelo de cálculo

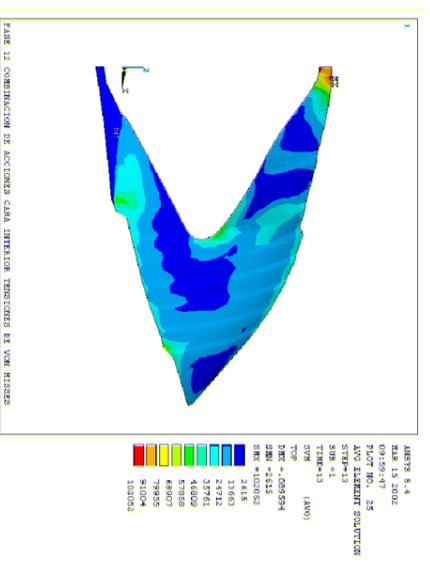


Figura 11. Tensiones en la cara interior del sándwich

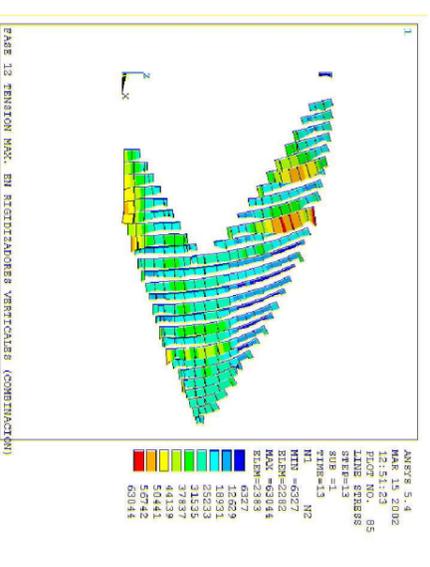


Figura 12. Tensiones en los rigidizadores verticales

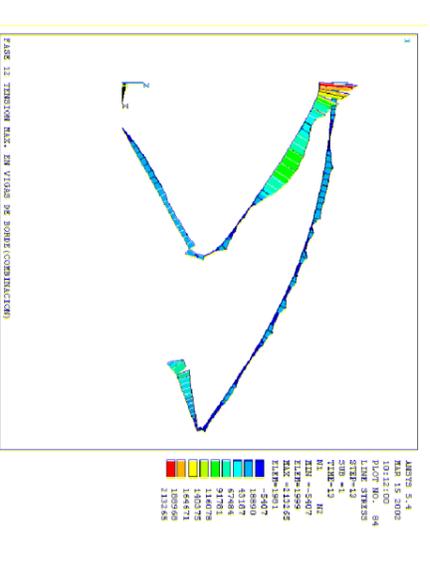


Figura 13. Tensiones en las vigas de borde

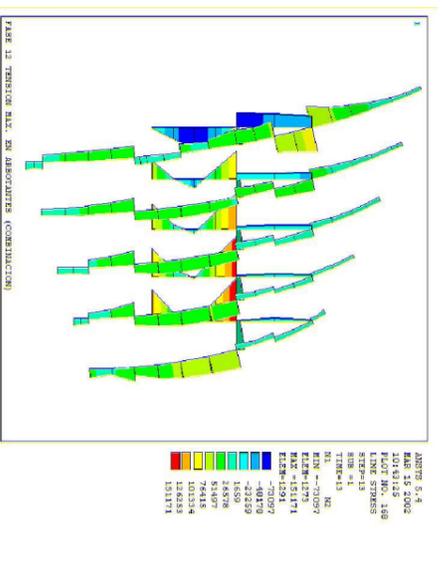


Figura 14. Tensiones en los arbotantes

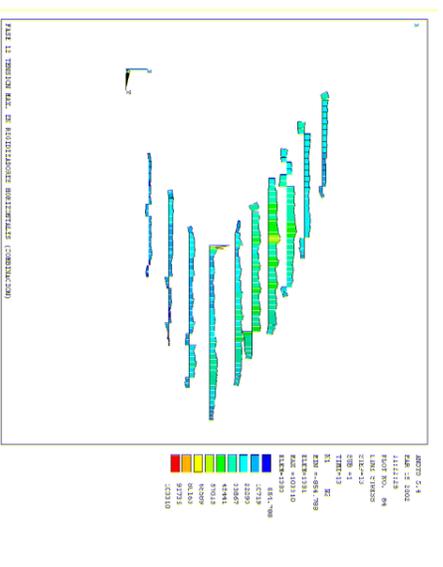


Figura 15. Tensiones en los rigidizadores horizontales

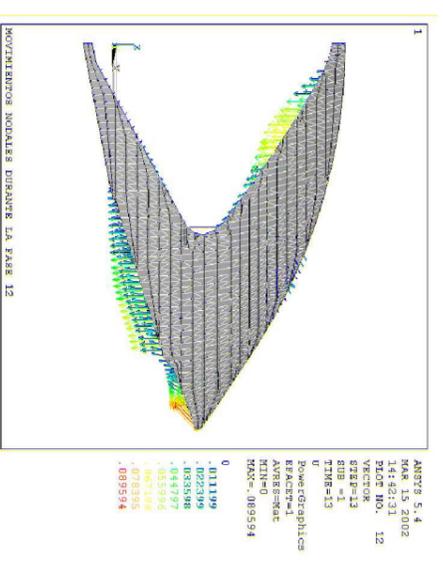


Figura 16. Deformaciones en fase 12

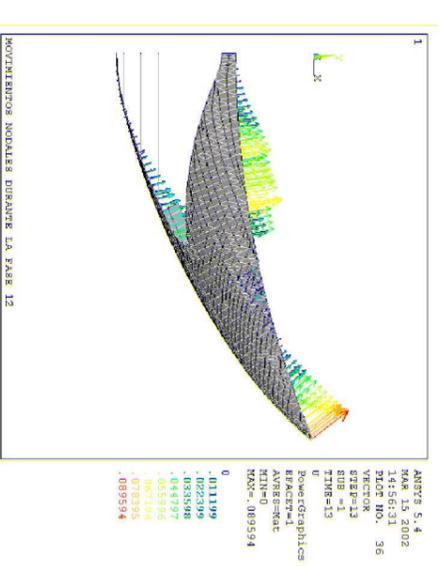


Figura 17. Deformaciones en fase 12

Conclusiones

Puedo pasear por Valencia, por el antiguo cauce del río Turia, contemplar la arquitectura del lugar y no sentirme extraño por no entenderla. Contestando a mis primeras líneas escritas en este proyecto en relación a la motivación e inquietud sobre este tipo de superficies singulares, puedo expresar mi satisfacción por la culminación de un proyecto que me ha enseñado multitud de cosas, no por ello saciando mi afán de aprender, sino alimentándolo.

Podría definir este proyecto como un trabajo de investigación, en el cual, como si de un puzzle se tratara, he tenido que buscar las piezas para componerlo. Toda la información adquirida y las conversaciones con personas participes en la construcción de la cáscara del Palacio de las Artes han formado el núcleo de mi proyecto. Sin embargo, he intentado dar respuesta a esa información, buscar el "porqué" de cada cosa e intentar dar mi punto de vista. Puedo decir que el material de la cáscara es el acero, pero, ¿porqué utiliza acero y no hormigón?, también puedo comentar la forma que tiene pero, ¿porqué tiene esa geometría?, ¿es una simple decisión estética o tiene una razón de ser?.

Por lo tanto, quiero remarcar que este proyecto ha significado un trabajo de investigación y de análisis.

Concluyo mencionando la satisfacción que ha supuesto la realización del mismo, abriéndome una nueva fuente de aprendizaje que pocos técnicos tienen el placer de experimentar.

Bibliografía

Artículos

- GONZALO DE ANDRÉS, C.: «Las riadas del Turia en Valencia», *Revista RAM*, diciembre 2003.
- PÉREZ ORTIZ, J.: «La cólera del Turia», *Periódico ADN*, Octubre 2007.
- «El Palacio de las Artes: campus de las artes escénicas», *Revista Informes de la Construcción*, núms 469-470, 2000, págs. 17-26.
- ARAUJO ARMERO, R.: «Geometría, técnica y arquitectura», *Revista Tectónica*, núm. 17, 2004, págs. 4-17.
- SARRABLO, V.: «La construcción de formas complejas», *Revista Tectónica*, núm. 17, 2004, págs. 18-29.
- IBÁÑEZ, R. y MACHO, M.: «Un paseo por la geometría», *Universidad del País Vasco*, 2004.
- GIL MEDRANO, O.: «La geometría plegable de Santiago Calatrava», *Universidad de Valencia*.
- MEDINA, R.: «Análisis de estructuras navales mediante el método de elementos finitos», *Síntesis Tecnológica V.2 Nº 1*, 2005, págs. 27-36.
- BIEDMA GARCÍA, M.: «Cáscara del Palacio de las Artes de Valencia», *IV Congreso ACHE*, Valencia, 2008.
- BIEDMA GARCÍA, M.: «Sobrecubierta auditorio de Tenerife», *III Congreso ACHE*, Zaragoza, 2005.
- MONTEDERE, J.: «Arquitectura y matemáticas. La geometría al servicio del arte: de Gaudí a Gehry», *Universidad de Valencia*.
- LADRET, P.: PALOMARES LOSADA, T.; PÉREZ RODRÍGUEZ, C.: «Desapeo del Palacio de las Artes», *II Congreso ACHE*, 2002.

Libros y tesis

- JODIDIO, P.: *Santiago Calatrava*, Ed. Taschen, Cologne, 2001.
- CASINELLO, P.: *Félix Candela: La conquista de la esbeltez*, Ed. Universidad Politécnica de Madrid y Fundación Juanelo Turriano, Madrid, 2010.
- LEWIS KAUSEL, C. Y PENDLETON-JULLIAN, A.: *Santiago Calatrava: conversaciones con estudiantes*, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2003.
- ARAUJO ARMERO, R.: *La arquitectura como técnica (I)*, Ed. A.T.C. Ediciones, Madrid, 2007.
- NOOCITO, G.: *Los cuerpos geométricos en la arquitectura de Gaudí*, Tesis doctoral, UPC, Barcelona.
- LÓPEZ CASTRO, A.: *Análisis de esfuerzos dinámicos en un transformador del tipo acorazado*, Tesis doctoral, ESIME, México, 2001.

Páginas web

- | | |
|--|--|
| www.cac.es | www.trencadis.es |
| www.lesarts.com | www.freysinnet.es |
| www.calatrava.com | www.iberinsa.es |
| www.viaarquitectura.net | www.e-ache.com |
| www.urbanity.blogspot.com | www.trencadis.info |
| www.ctav.es | www.gaudiallgaudi.com |
| www.accionainfraestructuras.es | www.chocolate-fish.net |
| www.arcspace.com | www.caballano.com |
| www.wikipedia.org | www.copisto.com |
| www.visualvalencia.com | www.fotovalencia.com |
| www.arquitecturamashistoria.blogspot.com | www.urbanity.es |
| www.blwtl.uwo.ca | www.pais.com |
| www.kerakoll.com | www.lovingcity.com |
| www.basf.es | |

Otros documentos

- Guía de la baldosa cerámica
- Memoria del cálculo de la Cáscara del Palacio de las Artes, IBERINSA S.A.
- Vídeo de la colocación del trencadís en obra por la empresa Kerakoll

Fuentes disponibles



Martínez Segovia, Fernández, Pallás y Asociados Ingeniería y arquitectura S.A. Colaboradores en fase de proyecto
No han facilitado ningún tipo de información.



Constructor.
UTE Palacio - Dragados & Necsso (Acciona)
Se agradece la voluntad, pero tampoco han podido facilitar información.



Constructor.
UTE Palacio - Dragados & Necsso (Acciona)
No han facilitado ningún tipo de información.



Cálculo estructural de la cáscara y asistencia en obra durante el montaje.
Se agradece la entera disposición y la facilitación de información.



Encargados del encofrado y desencofrado del Palacio de las Artes.
Han facilitado información.



Empresa encargada de la colocación del trencadís en distintos espacios de la Ciudad de las Artes y las Ciencias.
Han facilitado información.



Empresa encargada de la colocación del trencadís en el Palacio de las Artes.
Me han facilitado un vídeo que contiene la aplicación del sus productos en el Palacio de las Artes.



Empresa suministradora de trencadís.
Han sido amables y han contestado a las preguntas que les he realizado.

Agradecimientos

Este proyecto es fruto de un intenso trabajo. Quiero agradecer a mis tutores Francisco Javier Sanchis Sampetro y Rafael Juan Ligorit Tomás la motivación transmitida, el interés mostrado, la tutorización constante y la entera disposición por ayudar a llevar a buen puerto este proyecto.

También quiero agradecer la colaboración de todas las empresas que me han facilitado información. En especial quiero mencionar a Manuel Bledma García, jefe del Departamento de Estructuras Metálicas y Mixtas de IBERINSA, cuya ayuda ha sido indispensable para la realización del proyecto, facilitándome información, contestando preguntas y atendíéndome en todo momento.

T74

