



# **PABELLÓN DE PORTUGAL EN LA EXPO DE LISBOA DE ÁLVARO SIZA**

**APROXIMACIÓN ARQUITECTÓNICA Y DISEÑO ESTRUCTURAL**

## **TRABAJO FINAL DE GRADO**

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

**GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA**

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS  
Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS

**ALUMNA | MUÑOZ PUIG, ROSALÍA**

**TUTOR | MAZARREDO AZNAR, LUIS MARÍA DE**

**COTUTOR | FENOLLOSA FORNER, ERNESTO**

CURSO ACADÉMICO | 2016 - 2017



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
ARQUITECTURA





*“Si se ignora al hombre, la arquitectura es innecesaria. El trabajo del arquitecto es una respuesta al espacio, que demanda, y también una pregunta: cómo transformarlo.”*

*Álvaro Siza*

## RESUMEN

El Pabellón de Portugal para la Expo de Lisboa del año 1998, proyectado por el arquitecto Álvaro Siza, fue concebido con la función de permanecer en la ciudad como símbolo de la modernidad. El tema de la Expo *“Los océanos: un patrimonio para el futuro”*, exigió al arquitecto una interacción sensible entre el pabellón y el puerto.

El programa se articula en dos sectores diferenciados: el primero, formado por un edificio organizado entorno a un patio interior que permite dotarlo de iluminación; y el segundo, constituido por un espacio exterior cubierto destinado a funciones ceremoniales.

La característica más icónica del pabellón es una estructura curva, delgada y elegante que cubre el enorme espacio exterior. Una fina cubierta impermeable por su constitución y fiel a las bases de la arquitectura minimalista gracias al uso del hormigón.

El modelado informático de dicha cubierta y el análisis detallado de tensiones y deformaciones nos muestran la idoneidad de la estructura propuesta.

## PALABRAS CLAVE

Pabellón | Portugal | Siza | Cubierta | Análisis estructural | Hormigón | Tirantes

## RESUM

El Pabelló de Portugal per a la Expo de Lisboa de l'any 1998, projectat per l'arquitecte Álvaro Siza, va ser concebut amb la funció de permanéixer en la ciutat com a símbol de la modernitat. El tema de la Expo "*Els oceans: patrimoni per al futur*", va exigir a l'arquitecte una interacció sensible entre el pabelló i el port.

El programa s'articula en dos sectors diferenciats: el primer, format per un edifici organitzat entorn de un pati interior que permet dotar-ho d'il·luminació; i el segon, constituït per un espai exterior cobert destinat a funcions cerimonials.

La característica més icònica del pabelló és una estructura curva, prima i elegant que cobrix l'espai exterior. Una fina coberta impermeable per la seua constitució i fidel a les bases de l'arquitectura minimalista gràcies a l'ús del formigó.

El modelatge informàtic de la coberta i l'anàlisi detallat de tensions i deformacions, ens mostren la idoneïtat de l'estructura proposada.

## PARAULES CLAU

Pabelló | Portugal | Siza | Coberta | Anàlisi estructural | Formigó | Tirants

## ABSTRACT

The Pavilion of Portugal for the Lisbon Expo of 1998, designed by the architect Alvaro Siza, was conceived to remain in the city as a symbol of modernity. The main theme of the Expo: "*The oceans: a heritage for the future*", demanded to the architect to achieve a sensitive interaction between the Pavilion and the port.

The program is divided into two distinct sectors: first of them, an organized building surrounding a courtyard which provides it with lighting; on the other side, a covered outdoor space aimed to ceremonial functions.

The most iconic feature of the Pavilion is a curve, thin and elegant structure that covers the huge outdoor space. A fine and waterproof roof due to its constitution and faithful to the foundations of minimalist architecture through the use of concrete.

The computer modelling from the cover and the detailed analysis of stresses and deformations show the suitability of the proposed structure.

## KEYWORDS

Pavillion | Portugal | Siza | Roof | Structural analysis | Concrete | Stress cables

## **OBJETO**

El presente trabajo tiene como objeto el estudio del Pabellón de Portugal para la Expo de 1998 de Lisboa (Portugal). Proyectado entre 1995 y 1997 por Álvaro Siza, logra mantenerse fiel a las bases de la arquitectura minimalista gracias al uso del hormigón en su elemento más icónico: la cubierta curva del espacio exterior.

En primer lugar, se realizará una introducción que permita entender el contexto histórico, social y político del lugar y del propio arquitecto. De esta forma se pretende establecer las bases y entender las motivaciones que desembocaron en el edificio finalmente construido y objeto de análisis.

En segundo lugar, se hará un análisis del edificio desde el punto de vista de la inserción en el lugar, la funcionalidad, la espacialidad, etc., proporcionando documentación gráfica para entender el proyecto. Además, se estudiarán la materialidad y ejecución de la obra, centrándonos en el sector exterior cubierto del edificio.

El siguiente capítulo supondrá un detallado análisis de la estructura de dicho sector exterior del edificio. Aquí se explicará la función de cada uno de los elementos estructurales y su modelización informática.

Llegados a este punto, se analizarán los resultados obtenidos mediante el modelo estructural informático de elementos finitos. Se estudiará en detalle cada uno de los elementos estructurales permitiendo conocer así el comportamiento conjunto de la estructura.

Por último, se desarrollarán las conclusiones del estudio realizado.

## ÍNDICE

<b>1   INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>	<b>4.3   ASIGNACIÓN DE CARGAS</b>	
1.1   LA CIUDAD, LISBOA		4.3.1   CARGA PERMANENTE: PESO PROPIO	
1.2   SEDE DE LA EXPO '98		4.3.2   CARGA PERMANENTE: TESADO	
1.2.1   ANTECEDENTES		4.3.3   CARGA VARIABLE: SOBRECARGA DE USO	
1.2.2   RECUPERACIÓN AMBIENTAL		<b>4.4   COMBINACIÓN DE CARGAS</b>	
1.2.3   LA EXPOSICIÓN		4.4.1   COMBINACIONES ESTADO LÍMITE ÚLTIMO (ELU)	
1.2.4   EL PARQUE DE LAS NACIONES		4.4.2   COMBINACIONES ESTADO LÍMITE DE SERVICIO (ELS)	
<b>2   EL ARQUITECTO</b>	<b>12</b>	<b>4.5   CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES</b>	
2.1   ÁLVARO SIZA VIEIRA		<b>5   ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>44</b>
2.2   TRAYECTORIA PROFESIONAL Y OBRAS		5.1   COMPORTAMIENTO GENERAL DE LA ESTRUCTURA	
<b>3   EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO</b>	<b>17</b>	5.1.1   ELS A _ PESO PROPIO + SOBRECARGA DE USO	
3.1   ENTORNO E IDEA		5.1.2   ELS B _ PESO PROPIO + TESADO	
3.2   FORMA, VOLÚMEN E IMPLANTACIÓN		5.1.3   ELS C _ PESO PROPIO + TESADO + S. USO	
3.3   ORGANIZACIÓN DEL PROGRAMA FUNCIONAL		5.2   ANÁLISIS DETALLADO POR ELEMENTOS	
3.4   MATERIALIDAD Y CONSTRUCCIÓN		5.2.1   ANÁLISIS DE LOS MUROS LATERALES	
3.4.1   MATERIALIDAD		5.2.2   ANÁLISIS DE LAS LOSAS INCLINADAS	
3.4.2   CONSTRUCCIÓN		5.2.3   ANÁLISIS DE LA CUBIERTA CURVA	
<b>4   DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y SU MODELIZACIÓN</b>	<b>28</b>	<b>6   CONCLUSIONES</b>	<b>59</b>
4.1   DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA		6.1   PROYECTO	
4.1.1   CUBIERTA CURVA		6.2   ESTRUCTURA	
4.1.2   SOPORTES		6.3   ANÁLISIS	
4.1.3   CIMENTACIÓN		<b>7   BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>64</b>
4.2   ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y SU MODELIZACIÓN		7.1   BIBLIOGRAFÍA DOCUMENTAL	
4.2.1   CIMENTACIÓN		7.2   BIBLIOGRAFÍA FOTOGRÁFICA	
4.2.2   SOPORTES			
4.2.3   CUBIERTA CURVA			

## 1 | INTRODUCCIÓN



## 1.1 | LA CIUDAD, LISBOA

Lisboa es la capital de Portugal, situada en la desembocadura del río Tajo. La ciudad cuenta con una población de 547.773 habitantes en un área metropolitana de unos 2.921,90 km<sup>2</sup>, conteniendo el 20% de la población del país y siendo la ciudad más rica de Portugal.

La ciudad fue fundada por los Fenicios bajo el nombre de Ulissipo y al poco tiempo fue conquistada por griegos y cartagineses. En el año 711 cayó en manos de los musulmanes, hasta que en 1147 fue reconquistada por Alfonso I.

Durante el reinado de Alfonso III se sentaron en la ciudad las bases de la expansión marítima de Portugal y es a partir del siglo XV cuando el puerto de Lisboa se convierte en uno de los más importantes del mundo. La centralización del comercio proveniente de las costas de Cabo Verde en Lisboa, la instalación de grandes casas de la época en la ciudad y la restauración de la independencia en 1640, permitieron que ésta viviera una época de gran esplendor durante el siglo XVII.

Un gran terremoto en noviembre de 1755 dio la oportunidad de reconstruir la ciudad Baixa según un plano regular con grandes avenidas de estilo clásico.

Durante la Segunda Guerra Mundial fue refugio de gran cantidad de exiliados de los países ocupados por el eje en tránsito a Estados Unidos y Gran Bretaña.



IMAGEN 1.1 Lisboa desde el mar

Ya en 1974 un golpe de estado acabó con la Dictadura existente hasta entonces, hecho conocido como la "Revolución de los claveles". En esta época Lisboa sufrió un gran cambio, tanto demográfico como expansivo.

En 1986, Portugal entró a formar parte de la Comunidad Económica Europea, siendo la ciudad de Lisboa proclamada Capital Europea de la Cultura en 1994. Desde entonces ha acogido gran cantidad de eventos internacionales con gran impacto en el desarrollo de actividades e infraestructuras de la ciudad. Desde sede para la Expo'98 o la Euro 2004, hasta diversas iniciativas como la Gymnaestrada, el MTV Europe Music Awards y el Rally Dakar, o los 50 años de la Tall Ships' Races, regata internacional de grandes veleros.

## 1.2 | SEDE DE LA EXPO'98

La Exposición Universal en Lisboa en 1998 no sólo realizó internacionalmente a Portugal y destacó el rol de los océanos en la historia y el desarrollo de los pueblos, sino que también supuso un interesante proyecto de renovación urbana, cuyos logros son perceptibles hasta la actualidad. El edificio más significativo de la Expo fue el Pabellón de Portugal, proyectado por Álvaro Siza, premio Pritzker en 1992 y uno de los arquitectos más trascendentes de nuestro tiempo.

### 1.2.1 | ANTECEDENTES

A finales del siglo XV Portugal y España competían por hallar una ruta que les permitiera llegar a India y acabar con el monopolio árabe del comercio de especias. Mientras Cristóbal Colón fallaba en su intento de llegar a la India al toparse con el continente americano, el portugués Vasco de Gama logró bordear las costas africanas exitosamente y llegar a la India en 1498, suponiendo el inicio de las colonizaciones portuguesas en tierras americanas, africanas y asiáticas.

La Exposición Universal de Lisboa, bajo el lema "Los océanos, un Patrimonio para el futuro", conmemoró el 500º aniversario de la llegada de Vasco de Gama a la India y la gran colaboración portuguesa a la navegación.

### 1.2.2 | RECUPERACIÓN AMBIENTAL

El área seleccionada para el desarrollo de la Exposición era una zona con gran deterioro ambiental a orillas del río Tajo. La existencia de una fábrica de armas o una refinería de petróleo, entre otras, suponían actividades

altamente contaminantes. Por esto, los organizadores no sólo se plantearon recuperar esta zona, sino también convertirla en un área dinámica para el posterior desarrollo de la ciudad. No queriendo seguir el ejemplo de otras Expos donde el área de exposición quedó prácticamente inutilizada tras el evento, como el caso de la Expo de Sevilla del '92, la intención de Lisboa fue, desde el principio, integrar las áreas de exposición al futuro desarrollo de la ciudad.

La zona de la Expo conformó un nuevo distrito, Olivais, conectado a la ciudad mediante una nueva línea de metro, el puente Vasco de Gama, y una estación multimodal diseñada por el arquitecto valenciano Santiago Calatrava.

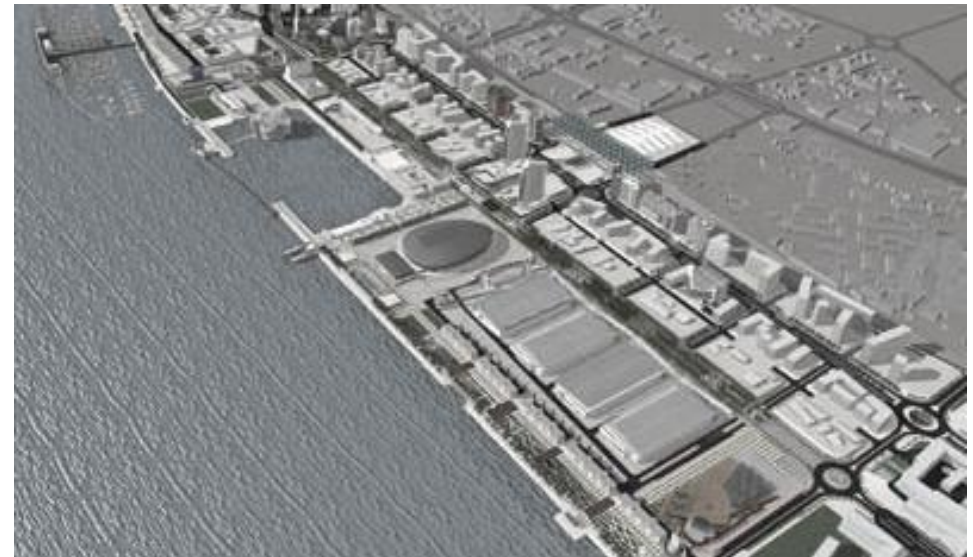


IMAGEN 1.2 Vista aérea proyecto Expo '98

### 1.2.3 | LA EXPOSICIÓN

El Master Plan de la Expo optó por un esquema urbano claro y racional, desarrollado a lo largo de una amplia arboleda y priorizando su contacto visual con el agua. El acceso estaba remarcado con un edificio justo en el centro del conjunto, situado frente a la estación, conformando una circulación en cruz con el eje principal.

Se optó por destinar 2 áreas para salones de exhibición de gran magnitud donde se organizaron los 140 países participantes, garantizando así la futura reutilización de los espacios de forma eficiente. Dichas áreas se ubicaron en las zonas norte y sur de la Expo.

La zona norte estaba constituida por 4 salones, de 10.000 m<sup>2</sup> cada uno, cuyos volúmenes buscaban trabajar de forma dinámica las cubiertas con formas que hicieran referencia a las ondas del mar. Por otro lado, la zona sur se constituyó con edificios organizados entorno a calles y plazas, diseñados por Manuel Salgado.

Entre los edificios de la Expo cabe destacar: el Pabellón de la Utopía, un gran domo de forma ovoidal situado en el centro del conjunto, diseñado por el arquitecto portugués Regino Cruz; el Oceanarium, compuesto por cuatro volúmenes que sobresalen en las esquinas de su planta cuadrada, diseñado por Peter Chermayeff; el Pabellón del Conocimiento de los Mares, un edificio de corte racional y moderno, obra de João Luis Carrillo de Graça; y el Pabellón Portugués, diseñado por el arquitecto portugués Álvaro Siza y que desarrollaremos más adelante en el presente trabajo.

### 1.2.4 | EL PARQUE DE LAS NACIONES

Tras la clausura de la Expo en septiembre de 1998, el área permaneció cerrada para proceder a su remodelación, y fue en 1999 cuando se inauguró como un amplio espacio público, conocido como Parque de las Naciones.

Dicho parque mantuvo algunos de los elementos de la exposición, entre los que se encuentra el Pabellón Portugués, dotándolos de nuevas funciones como ferias, museos o centros comerciales, así como las zonas ajardinadas. Además, los pabellones del área sur se convirtieron en viviendas multifamiliares.



IMAGEN 1.3 Parque de las Naciones

## 2 | EL ARQUITECTO

## 2.1 | ÁLVARO SIZA VIEIRA

Álvaro Joaquim de Melo Siza Vieira nace en 1933 en Matosinhos, Portugal. Su arquitectura destaca por una gran calidad escultórica, de una sencillez engañosa, y una gran sensibilidad con el entorno.

A pesar de su primera idea de ser escultor y por no contradecir a su padre, estudia Arquitectura en la Universidad de la Escuela de Bellas Artes de Oporto entre 1949 y 1955. Otra de las razones que le lleva a convertirse en arquitecto es su visita a Barcelona en la década de los 40, donde queda asombrado con la obra de Antonio Gaudí.



IMAGEN 2.1 Álvaro Siza por Fernando Guerra

La arquitectura de Siza se encuentra entre lo particular y lo general, sin encuadrarse en ningún movimiento o escuela arquitectónica, aunque en sus obras encontramos referencias a Le Corbusier, Wright o Alvar Aalto.

Para el arquitecto existen dos premisas de suma importancia: el lugar a intervenir y las personas que van a hacer uso de él.

Sus obras se caracterizan por su fusión al enclave, incluyendo en sus edificios las características propias del emplazamiento. Además, se trata de una arquitectura humana, preocupada por comprender y respetar las necesidades de las personas que van a hacer uso constante de sus edificios.

Otro aspecto de gran importancia en su trabajo es el dibujo, Siza convierte sus esbozos en instrumentos que le ayudan a resolver problemas concretos de sus proyectos. Al mismo tiempo, no sólo se trata de esto, sino que el arquitecto dibuja por placer.

El uso de materiales autóctonos, la defensa del trabajo artesano o un exhaustivo estudio de la luz, son otros de los factores característicos de la obra de Siza.

Todo esto le ha convertido en uno de los arquitectos más respetados de la época, ganando numerosos premios durante toda su trayectoria, entre los que destaca el prestigioso Premio Pritzker en 1992.

## 2.2 | TRAYECTORIA PROFESIONAL Y OBRAS

Álvaro Siza ve construida su primera obra en 1954, antes de terminar sus estudios de arquitectura, un conjunto de 4 viviendas unifamiliares en Matosinhos, su ciudad natal. Una vez graduado, en 1955, abre su propio estudio de arquitectura en Porto, en el que todavía hoy sigue desempeñando su actividad.

Entre 1966 y 1969 trabaja como profesor en la Escuela Superior de Arquitectura de Porto, donde regresa en 1976 para dedicarse en exclusiva a la Cátedra de Construcción de esta Universidad.

Entre las obras de su primera época destaca el Restaurante Da Boa Nova (1958 – 1963), donde ya aparece un tema recurrente en su arquitectura, la preocupación por el lugar (*Imagen 2.2*). Situado en un acantilado rocoso al borde del mar, emerge entre los elementos naturales que lo rodean, integrándose en el paisaje.



IMAGEN 2.2 Restaurante Da Boa Nova



IMAGEN 2.3 Piscinas de Leça de Palmeira

Probablemente la obra más reconocida de Siza son las Piscinas de Leça de Palmeira (*Imagen 2.3*), construidas en la década de 1960 en Matosinhos. El proyecto incluye dos piscinas conformadas con las rocas existentes, una de adultos y otra de niños; una cafetería, vestuarios y baños. Se encuentra situado bajo la línea de calle que recorre la playa, conformado por una serie de muros de hormigón visto, interiores de madera oscura y cubiertas de cobre.

*“Mi proyecto pretendía optimizar las condiciones creadas por la naturaleza, que ya había iniciado por su parte el diseño de una piscina en aquel mismo*

*sitio... Así nació una ligazón mucho más estrecha entre lo natural y lo construido”, dice Siza en su libro “Imaginar la Evidencia”.*

Tras finalizar la dictadura en Portugal (1974), Siza comienza a colaborar con el nuevo gobierno y realiza diversos proyectos de arquitectura social, con gran interés por la regeneración del espacio urbano. Es entonces cuando realiza varios proyectos de vivienda social, como las de Senhora das Dores (1974 – 1977) y Quina da Malagueira (1977 – 1979).

Es a principios de los 80 cuando Siza comienza a trabajar en la escena internacional, llevando a cabo la rehabilitación de una manzana en el barrio Kreuzberg de Berlín, una zona conflictiva de mayoría turca. La International Building Exhibition concedió el primer premio a la obra.



IMAGEN 2.4 Sucursal del banco Borges & Irmao, premio Mies van der Rohe



IMAGEN 2.5 Fundação Serralves

En 1985 realiza la recuperación del área de ‘Campo de Marte’ de Venecia. Más adelante, siguiendo el trabajo de regeneración urbana, finaliza la intervención en el barrio de Schilderswijk (1994), en La Haya, con especial atención a las costumbres de sus habitantes.

Tras su itinerario europeo, Siza vuelve a trabajar en Portugal participando en el proyecto de reconstrucción del casco antiguo de Lisboa ‘Chiado’, después del incendio de 1988. Algunas de sus obras más destacadas en Portugal son la sucursal del banco Borges & Irmao, 1980 – 1986 (*Imagen 2.4*); la Biblioteca Universitaria de Aveiro, 1988 – 1994; la Iglesia de Santa María de Marco de Canaveses, 1990 – 1997; la Fundación Serralves (*Imagen 2.5*), 1991 – 1999; o el Pabellón de Portugal para la Expo de Lisboa de 1998.

El Centro Galego de Arte Contemporánea (1988 – 1993), en Santiago de Compostela; el Centro Meteorológico de la Villa Olímpica (1989 – 1992), en Barcelona; el Centro Municipal de Rosario (1997), en Argentina; el Museo Mimesis (2006 – 2009), en Corea del Sur (*Imagen 2.6*); o la

Fundación Ibere Camargo (1998 – 2008), en Brasil, son algunas de sus obras más conocidas por todo el mundo.

Álvaro Siza es, además de arquitecto de prestigio a nivel mundial, profesor y conferenciante en diversas universidades mundiales, como la Escuela Politécnica de Lausana, la Universidad de Pennsylvania, Universidad de Los Andes de Bogotá y la Escuela Superior de Diseño de la Universidad de Harvard.



*Imagen 2.6 Museo Mimesis*

Igualmente, ha recibido los más prestigiosos premios internacionales de arquitectura, como el primer premio europeo de arquitectura Mies Van der Rohe en 1988, por el Banco Borges & Irmão (*Imagen 2.4*). En 1992, el

Premio Pritzker de la Fundación Hyatt por el conjunto de su obra. En 1993, el premio Nacional de Arquitectura que concede la Asociación Portuguesa de Arquitectos, la RIBA Gold Medal (2009), la UIA Gold Medal (2011), la medalla de oro de la Fundación Alvar Aalto, el Arnold W. Brunner Memorial Prize, y el Praemium Imperiale, y es Doctor Honoris Causa por las universidades de Valencia, Lausana, Palermo, Santander, Lima y Coímbra.

Recientemente ha ganado el León de Oro, concedido a la trayectoria profesional, de la 13ª Bienal de Arquitectura, celebrada en Venecia en 2012.



## 3 | EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

### 3.1 | ENTORNO E IDEA

Para la celebración de la Exposición Universal en Lisboa '98, Portugal encarga a Álvaro Siza el proyecto, sin celebrar concurso alguno, del Pabellón principal de la exposición. Dicho pabellón debía representar a Portugal, explicando la historia, importancia y compromiso del país y sus habitantes con los mares, así como permanecer en la ciudad como símbolo de modernidad.

El proyecto contó con diversas dificultades que llevaron al arquitecto a modificar la propuesta preliminar, entre las que se encuentran las siguientes:

Siguiendo las premisas de la Expo, el Pabellón debía concebirse como un edificio emblemático y permanente, siendo compatible con el uso posterior a la Expo, indefinido previamente. El edificio se implantaba en el plan general esquemático de la Expo, quedando sujeto a cambios y rodeado de edificios en aquel instante indefinidos o en fases iniciales. Estos hechos impedían a Siza tomar referencias sólidas para guiar la resolución del proyecto.

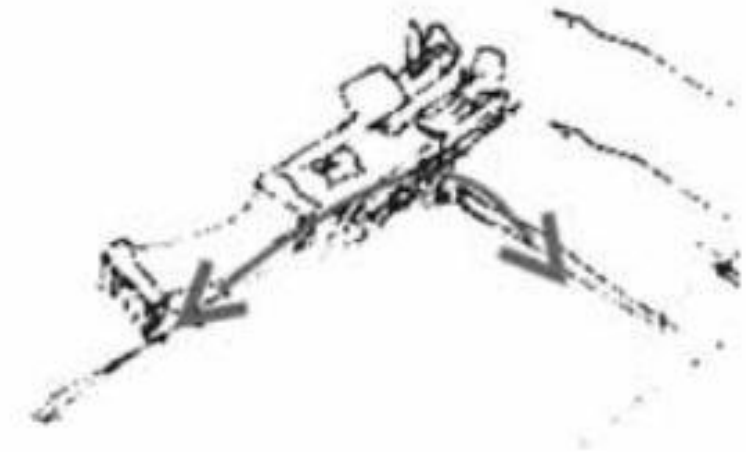
El tema de la Expo, "Los océanos, un Patrimonio para el futuro", exigía al arquitecto una interacción sensible entre el pabellón y el puerto. Originalmente, el edificio se ubicaba en el otro extremo del parque, pero a petición del arquitecto se traslada a la esquina noroeste del muelle para volcarse sobre el río.

Con la ayuda del arquitecto portugués, Eduardo Souto de Moura, y la experiencia en el campo de la ingeniería de Cecil Balmond, Siza crea un

espacio visualmente impactante y satisface de forma eficaz las premisas exigidas por la celebración de la Expo y los requisitos específicos del lugar.

Álvaro Siza, propone una gran nave sólidamente anclada a la orilla, enfatizando la conexión entre el espacio y el río por medio de un espacio cerrado y libre de pilares que enmarca la vista del río (*Imagen 3.1*). Esta nueva asimetría permite establecer una relación dinámica entre el pabellón y el resto de edificios situados a lo largo del muelle, todavía en fase de construcción.

El elemento clave del proyecto es una gran plaza pública cubierta por un techo suspendido y enmarcada por dos pilares monumentales, una impresionante gesta de la tecnología, la ingeniería y el diseño moderno.



*Imagen 3.1 Esquema para el pabellón de la Expo*

### 3.2 | FORMA, VOLUMEN E IMPLANTACIÓN

El edificio diseñado por Álvaro Siza destaca del resto de construcciones de la Expo por la lámina de hormigón de perfil curvo que cubre la plaza exterior. En él, la forma arquitectónica y la estructura trabajan de forma armónica.

Dicha plaza constituye el punto focal del proyecto con una superficie en planta de 90 x 57 m<sup>2</sup>. Aparece cubierta por una delgada lámina de hormigón, de sólo 20 cm de espesor y que alcanza los 75 m de vuelo. Dos muros de carácter monumental sostienen esta cubierta, y detrás de uno de ellos se encuentra el edificio diseñado para albergar los diferentes pabellones expositivos.

Desde la lejanía, el perfil de la cubierta supone un elemento sumamente liviano. Sin embargo, desde abajo, el carácter sólido del hormigón y las dimensiones del recinto crean una sensación de gravedad que genera la expectación de los visitantes. Desde esta perspectiva (*Imagen 3.2*), sólo se hace visible la delgadez de la cubierta en el espacio de separación entre ésta y los pórticos, donde el hormigón desaparece para mostrar los delgados cables que conectan la cubierta a los soportes.

Los 2 muros que soportan la cubierta juegan un importante papel estructural. Cada uno de ellos está formado por 9 grandes pilares, conformados como muros, dispuestos de manera rítmica pero asimétrica. Los profundos cortes entre pilares crean contrastes de luces y sombras, como podemos observar en la *Imagen 3.2*.



*Imagen 3.2 Encuentro de la cubierta y el muro*

En el extremo norte de la plaza pública, aparece un edificio moderno más clásico de planta rectangular, cuyos espacios interiores fueron diseñados por Siza con la colaboración del arquitecto portugués Souto de Moura.

El edificio aparece articulado alrededor de un patio central cuadrado, con un único muro en diagonal hacia el agua en el lado norte, con reminiscencias a la arquitectura tradicional portuguesa.

Exteriormente, se trata de un volumen limpio y sencillo, únicamente roto por la aparición de balcones y losas en voladizo en cubierta, que dotan al edificio de variedad de condiciones espaciales y formales. Dichos voladizos aparecen en la fachada que enfrenta al agua (*Imagen 3.3*), contrastando su ligereza con la masividad de los bloques de la plaza. Se trata de un espacio longitudinal transparente, una galería circundante delimitada por una secuencia de columnatas de escasa sección.



*Imagen 3.3 Galería Este del Pabellón*

El plan general de la Expo buscaba priorizar la relación visual con el agua, por lo que Siza vuelca su obra al agua, situándola en el muelle y abriendo el edificio hacia el río a través de las citadas galerías circundantes. Además, la gran plaza cubierta actúa como una gran ventana hacia el mar.



*Imagen 3.4 Relación del edificio con el agua*

Según los arquitectos, Siza y Souto de Moura, el pabellón permite transmitir un indiscutible legado: "Portugal no es un pequeño país escondido en una esquina de Europa, sino una nación que contribuyó al progreso de la civilización", el desarrollo de este proyecto hizo acordarse a Siza de algunos edificios de la quietísima Venecia y su relación con el agua, tratando de acercar la ciudad al río a través de este edificio, ya que según el arquitecto la ciudad se encuentra desconectada del agua debido a la gran actividad portuaria que se realiza en la ribera.

### 3.3 | ORGANIZACIÓN DEL PROGRAMA FUNCIONAL

El edificio ocupa una estructura modulada en planta de aproximadamente 70 x 90 metros, distribuidos en sótano y 2 plantas con un patio interior cuadrado, un patio exterior orientado a norte y un pórtico orientado a este enfrentado al muelle.

El programa aparece articulado en dos sectores organizados en 3 plantas. El espacio exterior cubierto destinado a funciones ceremoniales constituye el primero de los sectores, con un área aproximada de 3.900 m<sup>2</sup>. El segundo sector está formado por un edificio de unos 14.000 m<sup>2</sup> organizado entorno a un patio interior cuadrado. Este edificio alberga la zona de exposiciones, la zona de recepción de visitantes, los restaurantes y, en planta sótano, la zona de servicios.

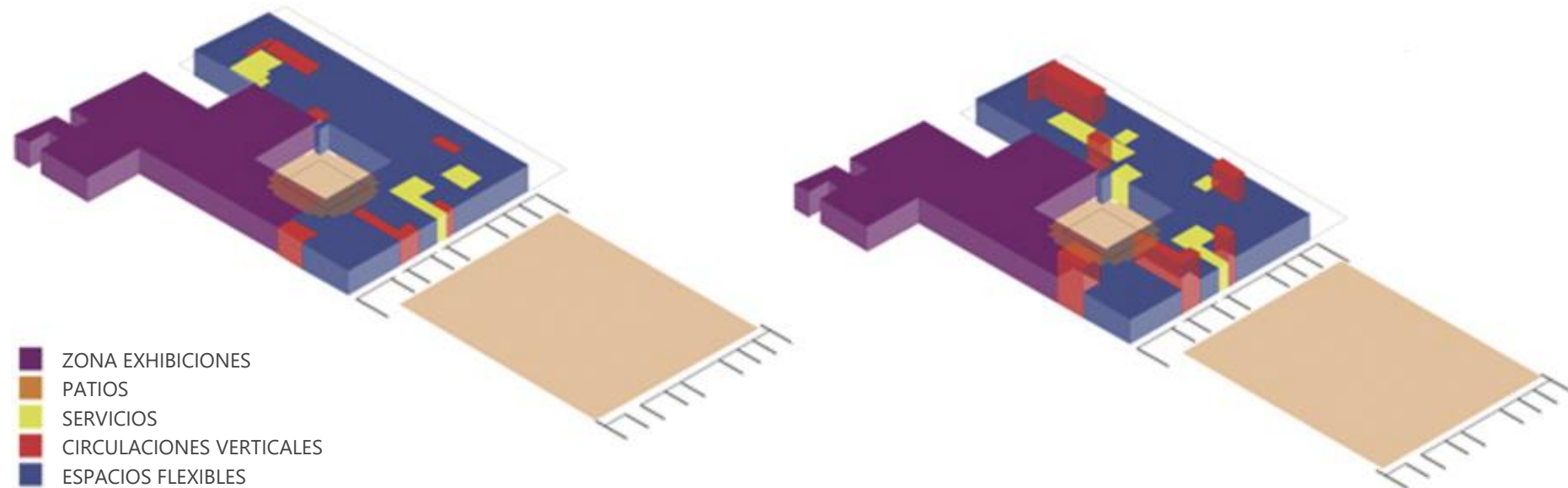


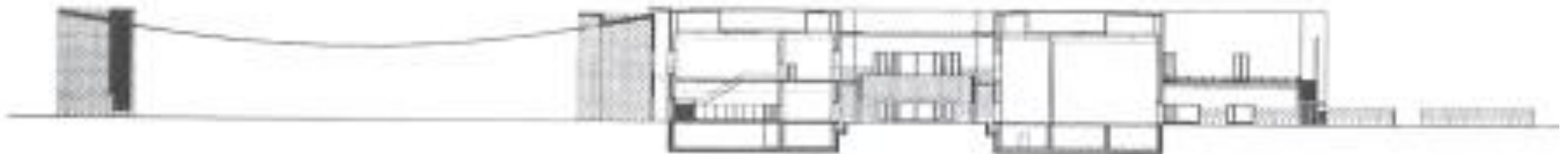
Imagen 3.5 Esquema funcional del Pabellón

### ALZADO Y SECCIÓN LONGITUDINAL

La distribución de huecos modulada y la apertura hacia los patios garantizan la iluminación natural de los espacios interiores. Además, esta distribución regular de los huecos y la localización estratégica de la circulación vertical, permiten una gran libertad a la hora de subdividir los espacios interiores para sus diferentes usos, tanto durante la exposición como posteriormente.



*Imagen 3.6 Alzado Oeste*



*Imagen 3.7 Sección longitudinal*

## PLANTA BAJA

La planta baja está constituida por ambos sectores del proyecto. Por un lado, la plaza exterior cubierta, destinada a funciones ceremoniales. Y, por otro lado, el edificio de pabellón propiamente dicho, en el que aparecen salas de exhibición de doble altura y espacios flexibles volcados al pórtico este del edificio.

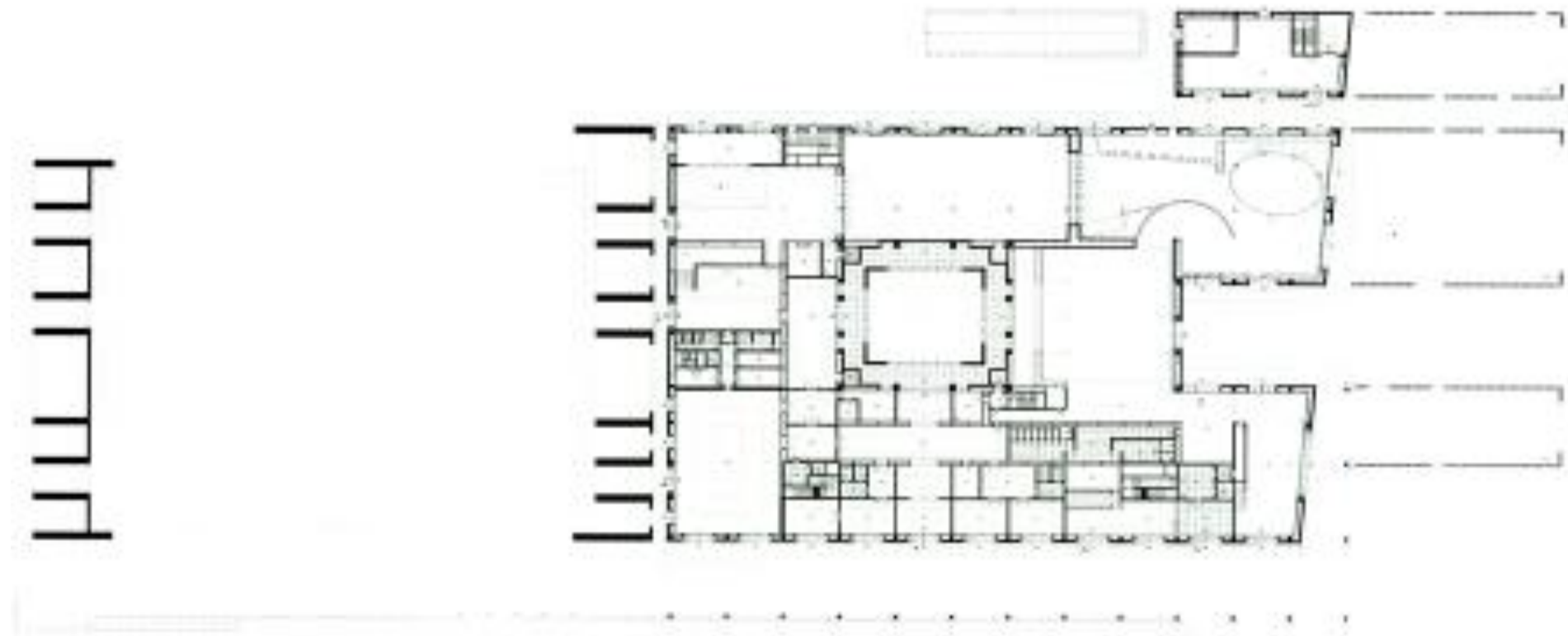


Imagen 3.8 Planta baja

### PLANTA PRIMERA

En planta primera se repite el sistema organizativo del edificio de pabellón, albergando las dobles alturas de los espacios de exhibición y espacios flexibles de mayores dimensiones que en planta baja.

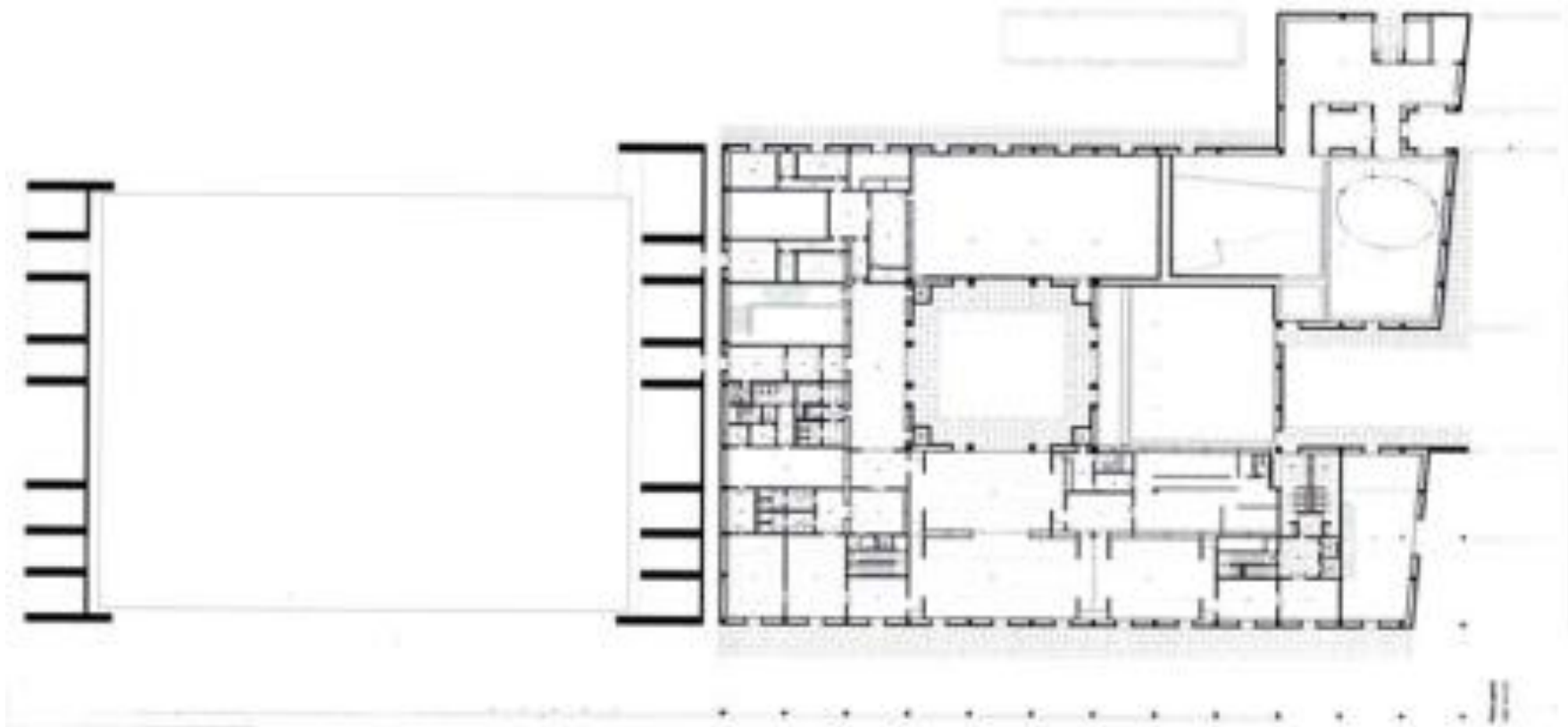


Imagen 3.9 Planta primera



### 3.4 | MATERIALIDAD Y CONSTRUCCIÓN

#### 3.4.1 | MATERIALIDAD

El concepto de materialidad en el proyecto de Siza es el resultado de la unión y vínculo de diferentes elementos. La materialidad del edificio está insertada en el paisaje y estructurada según su relación con el mismo. Además, Siza no se preocupa exclusivamente en la elaboración de cada una de las perspectivas, sino que cuida la claridad y detalle material en cada uno de los paramentos y columnas para conseguir un claro equilibrio de llenos y vacíos, una brillante conexión entre las preexistencias y su nuevo proyecto.



Imagen 3.10 Detalle materialidad interior de los pórticos

El proceso de materialización del edificio nace a través del uso y la combinación de diferentes factores, entre los que se encuentra la idea del arquitecto de representar a su Portugal natal, por lo que hará uso de materiales autóctonos.

La materialidad del edificio se basa en la utilización estratégica de 3 materiales: hormigón, azulejo y piedra caliza.

En primer lugar, la losa que cubre la plaza pública está formada por tirantes de acero de alta resistencia y hormigón visto de color blanco. Por su parte, los contrafuertes que se encargan de sustentar dicha losa están conformados con hormigón con diferentes acabados. Las caras interiores de sus pórticos aparecen revestidas con azulejos de tono oscuro, con la intención de enfatizar la forma de la losa. Este contraste de materiales, unido a la delgadez de la losa y la pesadez de los contrafuertes, permite suavizar la forma de la curva. El resto de paramentos exteriores de los contrafuertes aparecen revestidos con piedra caliza, lo que dota al elemento de cierta ligereza. Además, el uso continuo de revestimiento en los pórticos permite mantener la sensación de espacio cerrado en el exterior, apareciendo únicamente varias puertas de diferentes dimensiones.

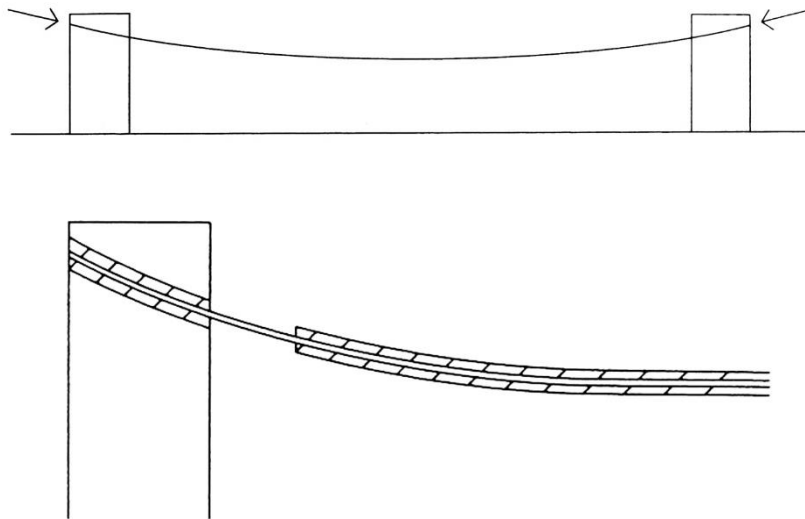
En el caso del edificio de Pabellón propiamente dicho, Siza hace uso en las fachadas de un juego entre el hormigón visto, simplemente blanco, y la piedra caliza.

### 3.4.2 | CONSTRUCCIÓN

Llegados a este punto, centramos el estudio del presente trabajo en la plaza pública cubierta del edificio, concretamente en lo referente a la materialidad de sus elementos, su proceso constructivo y su comportamiento estructural.

Se trata de un espacio cubierto por finos elementos de hormigón anclados a una distancia de unos 70 metros, lo cual parece demasiado pesado y propenso a sufrir grietas por la exposición a las altas temperaturas de Lisboa. Además, existe riesgo de sismo, ya que Lisboa forma parte de una región sísmica. Finalmente, la sencilla idea de una única línea de fuerza que lo hace todo, material, forma, estructura y acabado, se apoderó del resultado final del proyecto.

En lo referente a la construcción, partimos de la base que la cubierta se proyecta siguiendo la curva de la catenaria, hecho que se desarrollará en el siguiente capítulo. Manteniendo la acción de la catenaria, la curva se proyecta directamente hacia los pilares, estando los anclajes de ésta alineados con la curvatura (*Imagen 3.11*).



*Imagen 3.11 La catenaria como elemento estructural y su anclaje*

### PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA PLAZA PÚBLICA

1. Realización de la cimentación por medio de pilotes y zapatas corridas encargadas de unificar el trabajo de los 2 contrafuertes.
2. Disposición del armado y hormigonado de los 2 contrafuertes, así como conformado de los puntos de anclaje de la cubierta.
3. Apuntalado y colocación del encofrado de cubierta.
4. Trazado y fijación de los cables de acero de alta resistencia.
5. Vertido de la capa de hormigón de 20 cm de espesor.
- 6, 7 y 8. Tensado de los cables de acero de forma progresiva hasta alcanzar la tensión completa (estimada en los siguientes capítulos), momento en el cual la cubierta se despega del encofrado por haberse conseguido un sistema equilibrado en la estructura.
9. Retirada de los encofrados y colocación de los acabados en los paramentos de los pórticos.

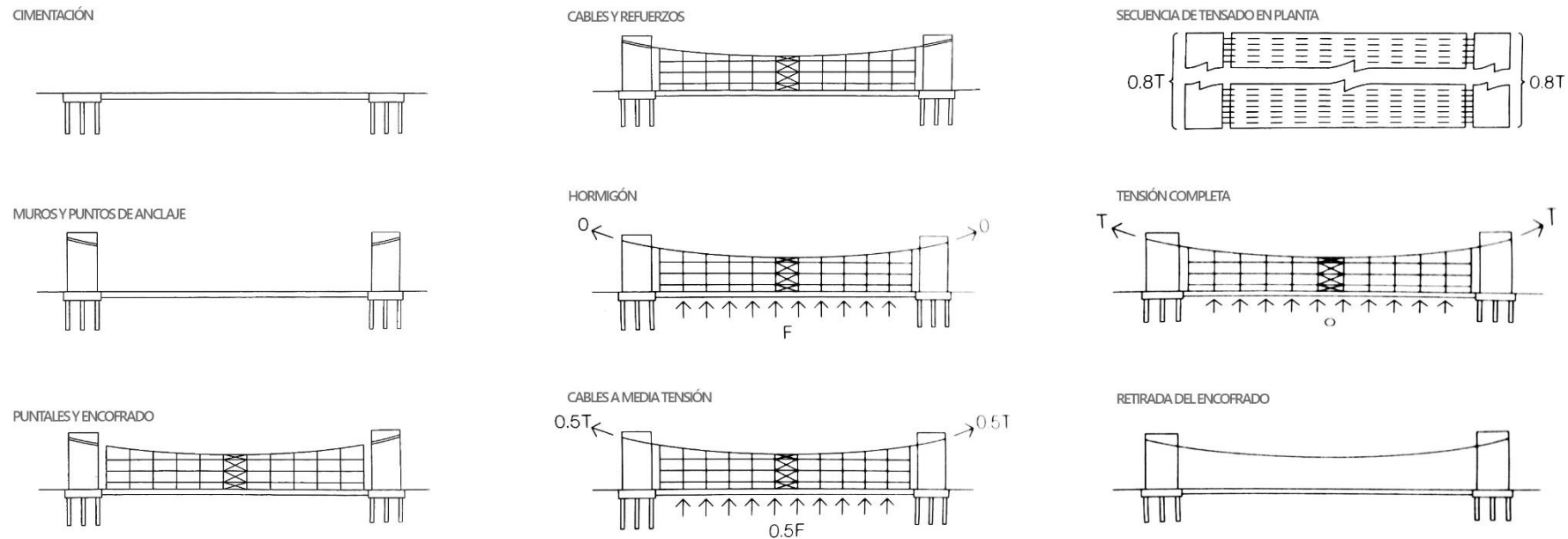


Imagen 3.12 Proceso constructivo

## **4 | DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y SU MODELIZACIÓN**

#### 4.1 | DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA

La estructura básica del pabellón es distinta en los dos sectores que componen el mismo, comentados en el apartado 3.3 | *ORGANIZACIÓN DEL PROGRAMA FUNCIONAL*, teniendo comportamientos independientes el uno del otro. Los dos únicos aspectos que comparten ambos sectores en el ámbito de la estructura son los ejes en sentido norte – sur y la materialidad de la misma, compuesta básicamente por acero de alta resistencia y hormigón armado.

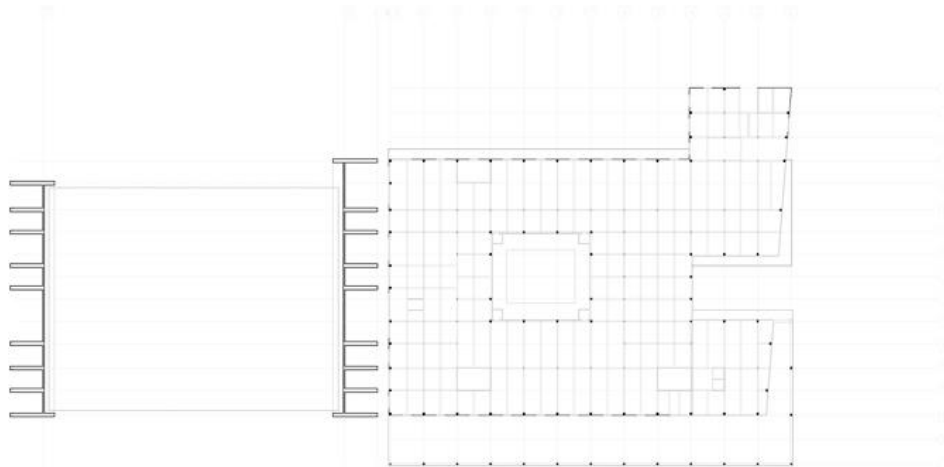


Imagen 4.1 Planta estructural del pabellón

La solución estructural del primer sector (*Imagen 4.2*), formado por el edificio de pabellón propiamente dicho, consiste en una serie de muros de hormigón armado en todo su perímetro y una estructura reticular de pilares y perfiles I de acero en el interior.

En el perímetro del edificio aparecen una serie de pilares de hormigón armado (*Imagen 4.2*). Los pilares interiores de acero generan la posibilidad de modificar el espacio interior con mayor facilidad.

Se trata de una estructura modulada de luces de 5,40 metros. Este módulo se modifica en los espacios interiores, donde aparecen los pilares de acero, con luces de hasta 8 metros para permitir la flexibilidad de los espacios citada anteriormente.

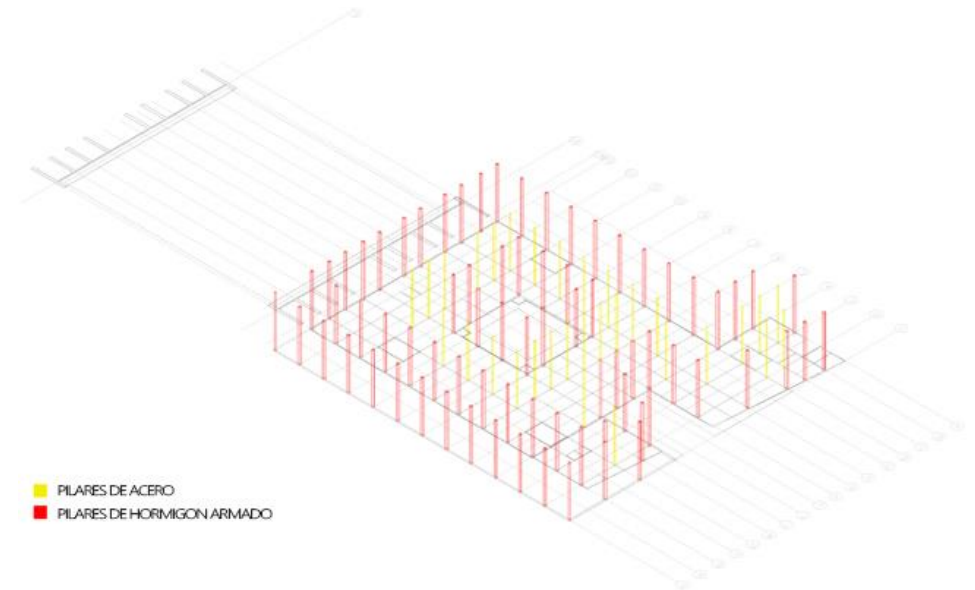


Imagen 4.2 Estructura de pilares del edificio de pabellón

Los forjados del edificio están compuestos por perfiles de acero de sección en I, existiendo una retícula principal y otra secundaria.

Por su parte, la plaza pública cubierta ocupa una superficie rectangular en planta de  $90 \times 57 \text{ m}^2$ , con una luz en su cubierta que alcanza los 75 metros de longitud.

La estructura de dicha plaza, objeto de estudio del presente trabajo, se compone básicamente de 3 elementos (*Imagen 4.3*): cubierta curva, dos soportes y cimentación.



*Imagen 4.3 Esquema estructural plaza pública cubierta*

#### 4.1.1 | CUBIERTA CURVA

*"La representación más simple de un elemento estructural es la línea" - PRESTEL USA, año 2002 / INFORMAL \_ Cecil Balmond y Januzzi Smith*

En el Pabellón de Portugal, esta línea se convierte en la cubierta del espacio exterior, una estructura de hormigón que se extiende entre los dos soportes con una luz de 75 metros sin esfuerzo aparente (*Imagen 4.4*). En sus extremos, justo antes de anclarse a los soportes, el hormigón desaparece y deja al descubierto los cables de acero. De esta forma, se consigue un juego de luz y sombra que permite desmaterializar la cubierta para hacer de ella un elemento más ligero.



*Imagen 4.4 La catenaria como cubierta del espacio público*

En un primer momento, se planteó la posibilidad de crear una red de cables atados a una lámina de metal, pero las grandes succiones que sufriría la cubierta por la acción del viento hicieron revocar esta idea. Si se optaba por cubrir la red de cables de acero con una piel superior e inferior, el espesor de la cubierta crecería.

Una de las alternativas planteaba el uso de cerchas, pero estas comprometían la idea inicial de cubierta ligera, al igual que todos los intentos que se plantearon inicialmente. De esta forma, la única solución posible era utilizar la línea misma como estructura, pero utilizando un material lo suficientemente pesado para conseguir contrarrestar la acción del viento, por lo que se optó por el uso de hormigón.

Ahora el problema consistía en evitar la sensación de pesadez del hormigón y los posibles problemas derivados de la misma, para lo cual se tomaron 3 decisiones clave (Imagen 4.5):

En primer lugar, la lámina de hormigón se hizo tan fina como fue posible, con solo 20 cm de espesor para una luz que alcanza los 75 metros.

En segundo lugar, como ya se ha comentado, la lámina de hormigón desaparece en el punto de anclaje a los soportes consiguiendo aumentar la sensación de ligereza.

Y, por último, el hormigón se desvincula de los cables de acero que lo atraviesan haciendo uso de vainas engrasadas para limitar los anchos de fisura. Así, se consigue separar el hormigón del sistema de carga, reduciendo la estructura a los cables de acero.

Este tercer aspecto no se ha tenido en cuenta a la hora de modelizar la estructura por la dificultad que presentaba a la hora de realizar el modelo mediante el programa informático Architrave©. En nuestro caso, acero y hormigón trabajarán de forma conjunta para soportar los diferentes esfuerzos existentes en cubierta, estudiados en los siguientes capítulos.

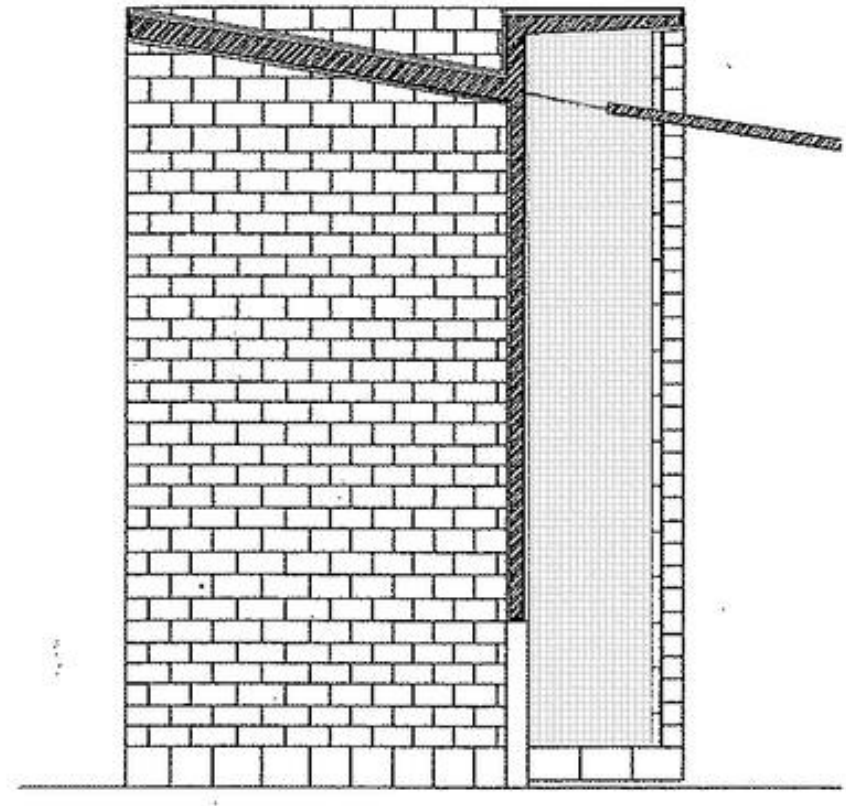


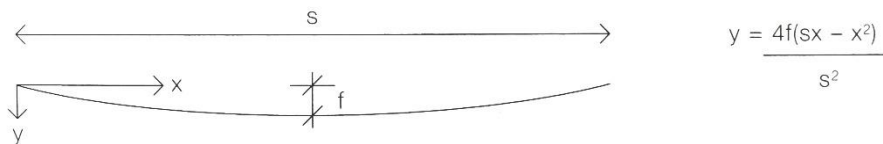
Imagen 4.5 Encuentro de la cubierta y los soportes

La curva de la cubierta es la línea mínima de energía, siguiendo la función matemática de la catenaria (*Imagen 4.6*).

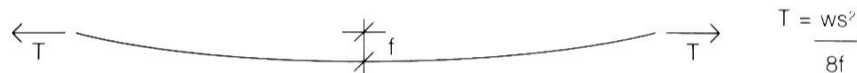
$$y = \frac{4f(sx - x^2)}{s^2}$$

En la catenaria sólo existe esfuerzo axial, siendo esta  $T$  menor cuanto mayor es la flecha  $f$  para una unidad de peso  $w$  expresada en kN/m, como vemos en la expresión de la *Imagen 4.7*:

$$T = \frac{w x s^2}{8 x f}$$



*Imagen 4.6 Función matemática de la catenaria*



*Imagen 4.7 La tensión en la catenaria, esfuerzo axial*

En el caso del Pabellón,

$$T = \frac{w x s^2}{8 x f} = \frac{(0,04 + 3) x 75^2}{8 x 3,50} \cong 610,70 \text{ kN}$$

Siendo,

$$w = 0,04 \text{ kN/m} + 3 \text{ kN/m}$$

$$w_{\text{acero}} = \pi \times R^2 \times \rho = \pi \times 12^2 \times 78 \times 10^{-6} \approx 0,04 \text{ kN/m}$$

$$w_{\text{hormigón}} = 0,6 \times q = 0,6 \times 0,2 \times 25 = 3 \text{ kN/m}$$

$$s = 75 \text{ m}$$

$$f = 3,50 \text{ m}$$

Para mantener la acción pura de la catenaria, la curva se proyecta hacia los soportes, estando los anclajes finales alineados con la estructura, como podemos observar en la *Imagen 4.5*.

Una vez vertido el hormigón y trabajando los cables de acero a máxima tensión, ésta se transmite a la cabeza de los soportes en forma de fuerza axial.



#### 4.1.2 | SOPORTES

Los 2 soportes de la estructura están formados por 9 planos en la dirección de los cables de acero y un plano en dirección perpendicular que se encarga de cerrar el espacio, ambos conformados con muros de hormigón armado de 1,20 metros de espesor.

Los 9 pilares que forman parte de cada uno de los soportes aparecen modulados y separados a diferentes distancias (*Imagen 4.8*), lo que tendrá consecuencias en las tensiones y deformaciones generadas en los diferentes puntos de la cubierta, caso que estudiaremos en el apartado 5.

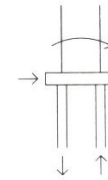
Los cables de acero de la cubierta transmiten una componente horizontal a la cabeza de los pilares, de forma que se crean grandes momentos en la base de los mismos. Este momento flector y el esfuerzo cortante generados en la base de los soportes deberán ser resistidos por la cimentación (*Imagen 4.9*).



*Imagen 4.8 Modulación de los soportes*

#### 4.1.3 | CIMENTACIÓN

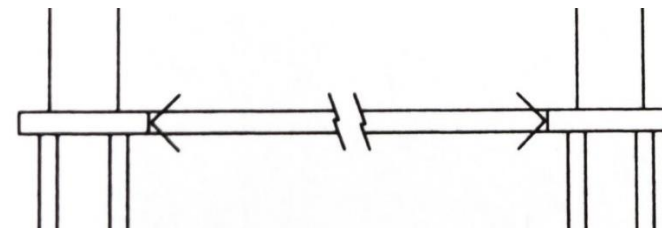
Las solicitaciones existentes en la cimentación, cortante y momento flector (*Imagen 4.9*), son absorbidos por los 2 elementos que la componen: pilotes y zapatas corridas.



*Imagen 4.9 Solicitaciones en la cimentación*

En primer lugar, existe una serie de pilotes encargados de resistir el momento flector, que como comentaremos en el siguiente punto, no se han considerado en la modelización de la estructura.

El esfuerzo cortante en la base de los soportes podría hacer fallar los pilotes, por lo que es necesario un segundo elemento que se encargue de absorberlos. En este caso se opta por el uso de vigas centradoras que unen la base de ambos soportes de la cubierta (*Imagen 4.10*). De este modo se consigue cerrar el trayecto de la carga axial generada en cubierta y evitar el posible fallo de los pilotes por deformación lateral.



*Imagen 4.10 Esquema cimentación 2 muros separados 75 m*

## 4.2 | ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y SU MODELIZACIÓN

Para el estudio del comportamiento de la estructura del Pabellón, se ha procedido al modelizado de la misma a través del programa informático AutoCAD 2016<sup>®</sup>. Para conseguir un modelo con comportamiento lo más semejante posible a la realidad, se ha procedido a su modelado como barras y elementos superficiales (*Imagen 4.13*), calculados mediante el método de elementos finitos. A cada uno de los elementos se le ha asignado propiedades geométricas y mecánicas, así como entidades gráficas que simbolizan las acciones mediante la aplicación Architrave<sup>®</sup>, compatible con AutoCAD 2016<sup>®</sup>.

Una vez realizado el modelo y todos los elementos gráficos que lo componen (38.839 nudos, 13.616 barras, 38.176 elementos finitos, 10 zapatas y 22.208 cargas), se exporta al programa de dimensionado y cálculo de estructuras Architrave<sup>®</sup> a través de un fichero en formato .avex. A través de este programa se analizan y dimensionan los diferentes elementos de la estructura y se obtienen los resultados de cálculo del modelo.

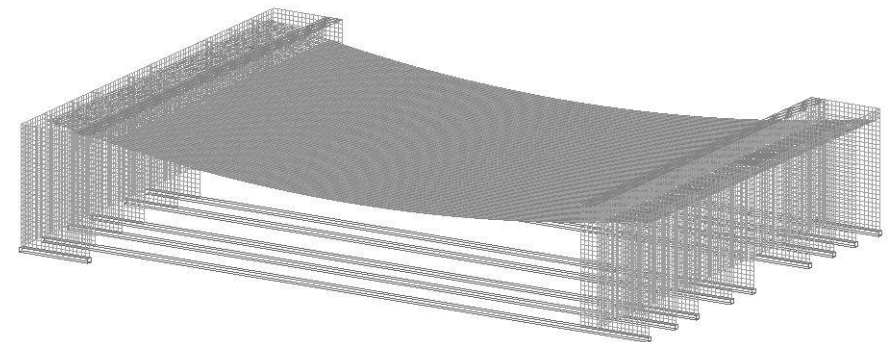
El cálculo de la estructura mediante elementos finitos nos permite realizar un estudio detallado de solicitaciones, tensiones y deformaciones en cada punto de las diferentes mallas superficiales. En el caso del Pabellón este método resulta adecuado por la gran cantidad de elementos estructurales superficiales que lo componen. Este método nos permite realizar un modelado lo más próximo posible a la realidad (condiciones de contorno, tipos de uniones, etc.) para obtener resultados que se asemejen a los reales. Además, se realiza el modelo mediante elementos finitos del menor tamaño posible para mejorar la precisión de los resultados, tanto para el cálculo de ecuaciones diferenciales como para adaptarse a la geometría real de los diferentes elementos estructurales que lo componen.



*Imagen 4.11 Logo AutoCAD 2016<sup>®</sup>*



*Imagen 4.12 Logo Architrave<sup>®</sup>*



*Imagen 4.13 Modelo del Pabellón por medio de barras y elementos finitos*

En el modelo realizado del Pabellón de la Expo '98 no se han tenido en cuenta: cimentación por medio de pilotaje, y la desvinculación de acero y hormigón en cubierta, como se ha explicado en el capítulo 4.1.1 | *CUBIERTA CURVA*, por la dificultad que esto suponía a la hora de realizar el modelo mediante la aplicación informática Architrave<sup>®</sup>.

El modelo informático del Pabellón se compone básicamente de los 3 elementos que forman la estructura real: cimentación, soportes y cubierta curva.

#### 4.2.1 | CIMENTACIÓN

A la hora de modelizar la cimentación del edificio se plantean 2 opciones. La primera de ellas consiste en modelizar una losa a modo de encepado en la base de cada uno de los muros incluyendo apoyos fijos en cada pilote. Esta opción nos permitiría obtener las reacciones en la cabeza de los pilotes, pero se descarta por no ser ese el objeto del presente trabajo.

La segunda opción, escogida en nuestro caso, consiste en modelizar zapatas corridas bajo el ámbito de cada uno de los muros laterales, además de 9 vigas centradoras que se encargan de unir 2 a 2 aquellas zapatas que se encuentran en un mismo plano xz. Esta opción implica desplazamientos y giros nulos en todos los nudos de los muros unidos a la zapata.

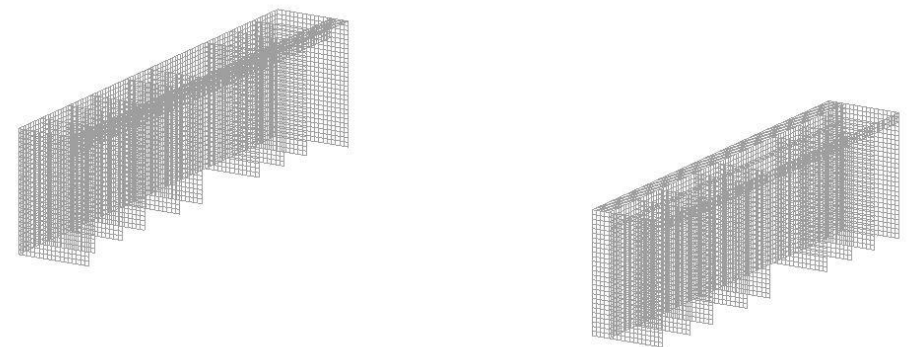
Todas las zapatas se han modelizado mediante el bloque correspondiente de Architrave<sup>®</sup>, asignando un canto de 800 mm en el caso de las vigas corridas centradas; y un canto de 800 mm y un ancho de 1500 mm en el caso de las vigas centradoras.

#### 4.2.2 | SOPORTES

Los dos soportes que componen la estructura (*Imagen 4.14*) se han modelizado de forma análoga, compuestos cada uno de ellos por un plano en dirección Y, y varios planos en dirección X (9 en el caso del soporte sur y 10 en el del soporte norte), de 16,20m de altura en todos los casos. Estos planos X aparecen modulados según el ritmo: 6,00m – 5,40m – 6,00m – 13,80m – 5,40m – 8,40m – 5,40m – 6m – 5,40m, ritmo que tendrá consecuencias claras en el comportamiento de la estructura, como veremos en el próximo capítulo.

Además, se han modelizado 2 planos en dirección Y de 2,40m de altura en la coronación de ambos soportes, para aproximar el modelo a la realidad del edificio.

Todos los planos que componen los soportes se han modelizado por medio de elementos finitos planos, de 600 x 600 mm, y 1200 mm de espesor, de material HA – 25.



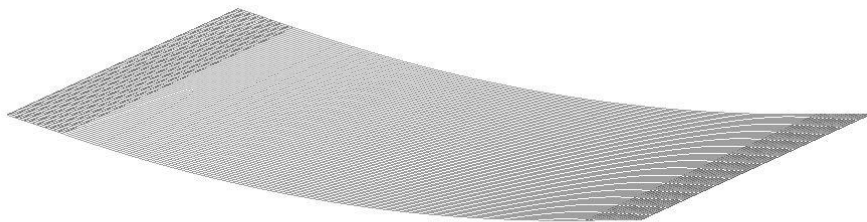
*Imagen 4.14 Modelado de los soportes mediante elementos finitos*

### 4.2.3 | CUBIERTA CURVA

El modelo de la cubierta del edificio está compuesto por 2 tipos de elementos (*Imagen 4.15*). En primer lugar, aparecen una serie de cables de acero de alta resistencia, separados 600 mm entre ellos, como ocurre en la estructura real. Estos cables se han modelizado como líneas de 600 mm de longitud siguiendo la dirección del arco de la cubierta. Cada una de las líneas que componen los cables se modeliza como barra de sección maciza de acero B500 y diámetro 25 mm.

Por otra parte, el hormigón de la cubierta se modeliza por medio de elementos finitos planos de 600 x 300 mm, y 200 mm de espesor, coincidiendo con el espesor real de la lámina, de material HA – 25.

Para conseguir el trabajo conjunto de acero y hormigón, se realiza el modelo haciendo coincidir nudos y modulación de las diferentes barras y elementos finitos que componen la cubierta, estando también estos alineados con el arco que forma la cubierta.



*Imagen 4.15 Modelado de la cubierta curva mediante barras y elementos finitos*

Además, los cables de acero aparecen anclados en sus 2 extremos a un plano que sigue la dirección del cable que llega al soporte, para absorber los esfuerzos generados en cubierta por las diferentes cargas existentes y transmitirlos de esta manera a los soportes, funcionando como una especie de viga inclinada. Dichas vigas se modelizan como elementos finitos planos de 600 x 600 mm<sup>2</sup>, y 600 mm de espesor, de material HA – 25.

Para conseguir que cimentación, soportes y cubierta trabajen de forma conjunta se ha logrado que todos los elementos tengan nudos coincidentes, así como las adecuadas condiciones de contorno.

### 4.3 | ASIGNACIÓN DE CARGAS

Para realizar la asignación de cargas sobre la estructura del Pabellón se ha tenido en cuenta lo establecido en el CTE, concretamente en el DBSE – Acciones en la Edificación. De este modo, distinguiremos dos tipos de acciones: permanentes y variables. En nuestro caso, dentro de las permanentes se encuentran el peso propio y la carga de tesado; y aparecerá la sobrecarga de uso como única acción variable. Cabe destacar que se no se han aplicado cargas de viento ya que, dada la envergadura del presente trabajo, este estudio podría suponer una ampliación del mismo. Además, el arquitecto contempla el viento al escoger el hormigón como material para la cubierta, “... la única solución posible era utilizar la línea misma como estructura, pero utilizando un material lo suficientemente pesado para conseguir contrarrestar la acción del viento, por lo que se optó por el uso de hormigón” [Informal. Prestel USA, año 2002].

#### 4.3.1 | CARGA PERMANENTE: PESO PROPIO

En el caso del Pabellón, el peso propio de la estructura supone la totalidad de las cargas gravitatorias permanentes, ya que no se han tenido en cuenta pavimentos, cerramientos, tabiquería, etc.

El programa informático Architrave<sup>®</sup> empleado para el análisis considera el peso propio del material al indicar que se trata de un hormigón HA – 25, así como su espesor en el caso de los elementos finitos, y un acero B500 en el caso de los tirantes. Por tanto, no es necesario introducir manualmente las cargas correspondientes a peso propio de la estructura.

#### 4.3.2 | CARGA PERMANENTE: TESADO

También como carga permanente, aparece la carga de tesado que se ha calculado por medio del método iterativo hasta alcanzar el valor de deformación deseado. Esta carga se ha aplicado para conseguir que la losa de hormigón se desprege del encofrado, como ocurrió en el proceso constructivo real del Pabellón, siguiendo el siguiente procedimiento:

En primer lugar, se ha calculado la estructura con una hipótesis en la que sólo actúa el peso propio. En este caso, se ha obtenido que el desplazamiento Z en el centro de la lámina de hormigón es de aproximadamente -20,2 cm, como vemos en la Imagen 4.16.

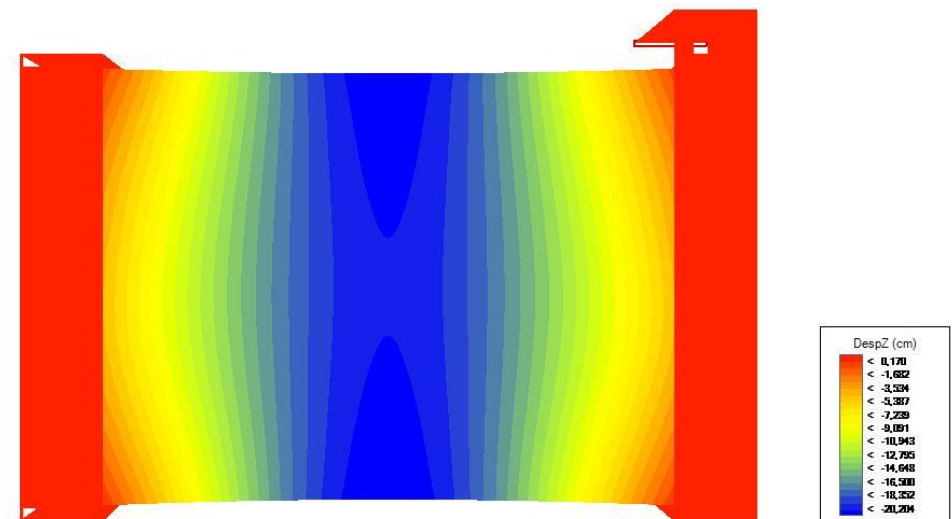
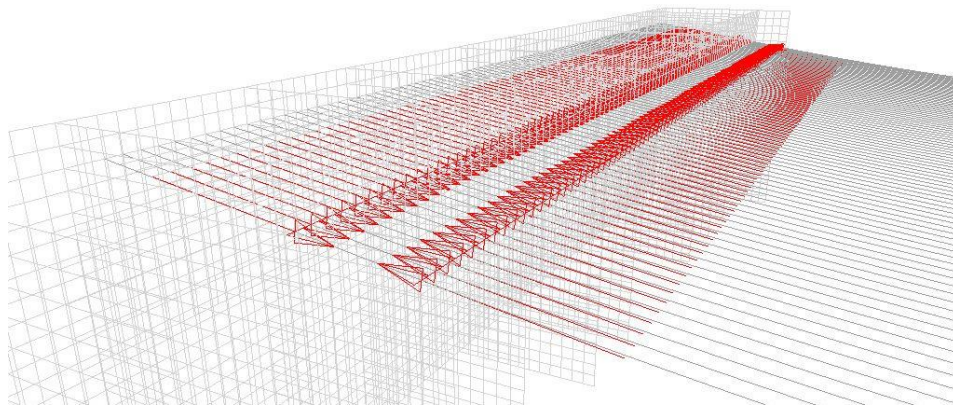


Imagen 4.16 Desplazamiento Z hipótesis peso propio

Ahora debemos estimar una carga que produzca una deformación vertical de igual valor, pero signo contrario, en el centro de la lámina para así conseguir que esta se despegue del encofrado. Para ello, se procede a aplicar dos cargas puntuales de igual valor y dirección, pero sentido contrario, en el extremo de cada uno de los tirantes. El hecho de que debamos aplicar dos cargas con estas características se debe a que tenemos que conseguir una estructura equilibrada, y en todo punto en que exista una acción deberá aparecer una reacción. Como vemos en la *Imagen 4.17*, estas cargas se aplican en el punto en que cada tirante se encuentra con los muros.

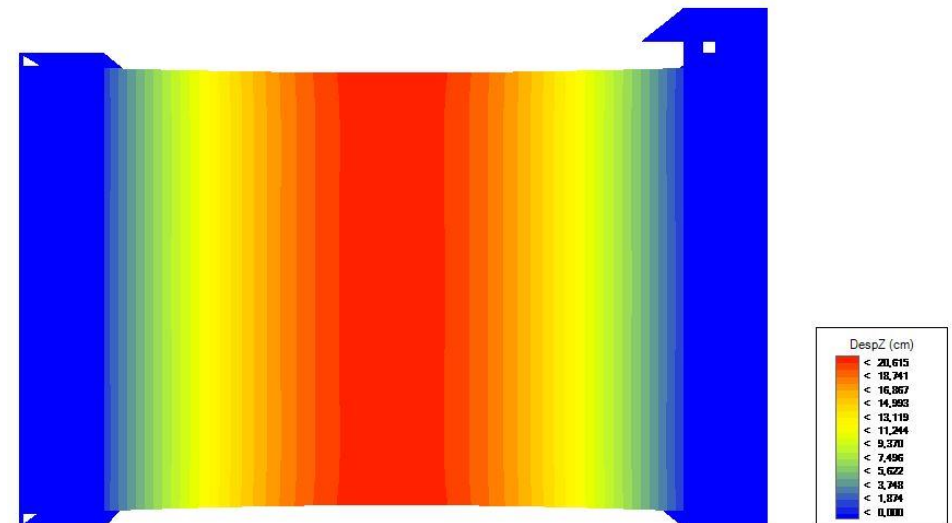


*Imagen 4.17 Cargas de tesado*

Para determinar el valor final de dichas cargas de tesado, se inicia el proceso asignando un valor inicial de 100 kN a cada una de ellas, y se calcula el modelo en el programa informático Architrave<sup>®</sup>. De este modo, determinamos el desplazamiento Z que se produce en el centro de la lámina de hormigón haciendo uso de una hipótesis en la que sólo actúan las cargas de tesado.

Ahora el proceso consiste en ir aumentando el valor de las cargas de tesado y recalculando la estructura hasta alcanzar un desplazamiento Z de igual valor, pero sentido contrario, al obtenido mediante la hipótesis de peso propio (-20,204 cm). Se realiza este proceso varias veces hasta alcanzar el valor de carga deseado.

En nuestro caso, aparecerán 2 cargas en ambos extremos de los cables (*Imagen 4.18*), siendo el valor final de cada una de ellas de **1.800 kN**. De este modo, el desplazamiento Z obtenido por hipótesis de tesado en el centro de la lámina de hormigón es de aproximadamente 20,615 cm, como vemos en la *Imagen 4.18*. Por tanto, obtenemos el efecto de 'levantamiento' de la lámina de hormigón del encofrado al contrarrestar el desplazamiento Z por acción del peso propio de la estructura (-20,204 cm).



*Imagen 4.18 Desplazamiento Z hipótesis tesado*

### 4.3.3 | CARGA VARIABLE: SOBRECARGA DE USO

Se entienden como cargas variables todas aquellas de carácter no permanente, es decir, actúan exclusivamente durante un intervalo de tiempo determinado. Las más significativas son la sobrecarga de uso, el viento y la nieve. En nuestro caso, viento y nieve no se analizarán, como ya se ha comentado más arriba, quedando estas opciones abiertas para una posible ampliación del presente trabajo.

Como única carga de carácter variable aparece la sobrecarga de uso, simulada por la aplicación de una carga superficial vertical distribuida uniformemente sobre los elementos finitos que forman la lámina de hormigón de cubierta.

Para determinar el valor de dicha carga, se consulta la *Tabla 3.1 Valores característicos de la sobrecarga de uso* del DBSE – AE del CTE (*Imagen 4.19*). En nuestro caso, se trata de una cubierta accesible únicamente para conservación, siendo además ésta de unas grandes dimensiones que exceden las características habituales de aplicación de la norma. Dado que resulta improbable la existencia simultánea en toda la cubierta de la carga de mantenimiento detallada por la norma, se decide aplicar la carga especificada para cubiertas ligeras, es decir, **0,40 kN/m<sup>2</sup>**.

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m <sup>2</sup> ]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 <sup>(1)</sup>
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente <sup>(2)</sup>			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación <sup>(3)</sup>	G1 <sup>(7)</sup>	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 <sup>(4)(5)</sup>	2
		G2	Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) <sup>(5)</sup>	0,4 <sup>(4)</sup>	1
				0	2

(1) Deben descomponerse en dos cargas concentradas de 10 kN separadas entre sí 1,8 m. Alternativamente dichas cargas se podrán sustituir por una sobrecarga uniformemente distribuida en la totalidad de la zona de 3,0 kN/m<sup>2</sup> para el cálculo de elementos secundarios, como nervios o viguetas, doblemente apoyados, de 2,0 kN/m<sup>2</sup> para el de losas, forjados reticulados o nervios de forjados continuos, y de 1,0 kN/m<sup>2</sup> para el de elementos primarios como vigas, ábacos de soportes, soportes o zapatas.  
 (2) En cubiertas transitables de uso público, el valor es el correspondiente al uso de la zona desde la cual se accede.  
 (3) Para cubiertas con un inclinación entre 20° y 40°, el valor de q<sub>k</sub> se determina por interpolación lineal entre los valores correspondientes a las subcategorías G1 y G2.  
 (4) El valor indicado se refiere a la proyección horizontal de la superficie de la cubierta.  
 (5) Se entiende por cubierta ligera aquella cuya carga permanente debida únicamente a su cerramiento no excede de 1 kN/m<sup>2</sup>.  
 (6) Se puede adoptar un área tributaria inferior a la total de la cubierta, no menor que 10 m<sup>2</sup> y situada en la parte más desfavorable de la misma, siempre que la solución adoptada figure en el plan de mantenimiento del edificio.  
 (7) Esta sobrecarga de uso no se considera concomitante con el resto de acciones variables.

Imagen 4.19 Valores característicos de las sobrecargas de uso

#### 4.4 | COMBINACIÓN DE CARGAS

La combinación de cargas la realizará de forma automática el programa informático Architrave<sup>®</sup>, de acuerdo con lo establecido en el CTE, concretamente en el apartado DB SE, 4. Verificaciones basadas en coeficientes parciales, 4.2.2 Combinación de acciones. De esta forma se establece que la combinación de acciones correspondiente a una situación persistente o transitoria se determinará mediante la expresión (Imagen 4.20):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{K,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{K,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{K,i}$$

es decir, considerando la actuación simultánea de:

- todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ( $\gamma_G \cdot G_k$ ), incluido el pretensado ( $\gamma_P \cdot P$ );
- una acción variable cualquiera, en valor de cálculo ( $\gamma_Q \cdot Q_k$ ), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;
- el resto de las acciones variables, en valor de cálculo de combinación ( $\gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot Q_k$ ).

Los valores de los coeficientes de seguridad,  $\gamma$ , se establecen en la tabla 4.1 para cada tipo de acción, atendiendo para comprobaciones de resistencia a si su efecto es desfavorable o favorable, considerada globalmente.

Para comprobaciones de estabilidad, se diferenciará, aun dentro de la misma acción, la parte favorable (la estabilizadora), de la desfavorable (la desestabilizadora).

Los valores de los coeficientes de simultaneidad,  $\psi$ , se establecen en la tabla 4.2

##### Imagen 4.20 Combinación de acciones

En base a esto, se establecerán diferentes combinaciones dependiendo de si se analizan Estados Límite Últimos (ELU) o Estados Límite de Servicio (ELS), estudiando en cada caso una de las acciones como principal.

Los coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para acciones en ELU serán:

Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones

Tipo de verificación <sup>(1)</sup>	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0

Imagen 4.21 Coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones

Por otra parte, los coeficientes de simultaneidad ( $\Psi$ ) a aplicar en ELU y ELS serán:

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad ( $\psi$ )

	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)		(1)	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

<sup>(1)</sup> En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

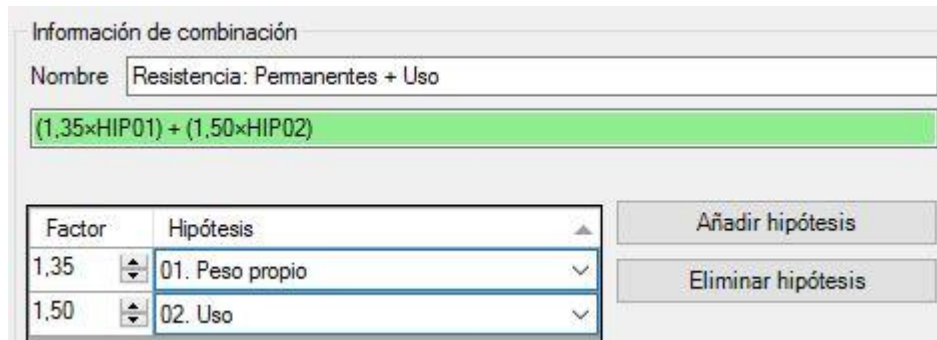
Imagen 4.22 Coeficientes de simultaneidad ( $\Psi$ )



#### 4.4.1 | COMBINACIONES ESTADO LÍMITE ÚLTIMO (ELU)

Se establecen 3 combinaciones para analizar los Estados Límite Últimos (criterios resistentes):

##### A | PESO PROPIO + SOBRECARGA DE USO



Información de combinación

Nombre: Resistencia: Permanentes + Uso

$(1,35 \times \text{HIP01}) + (1,50 \times \text{HIP02})$

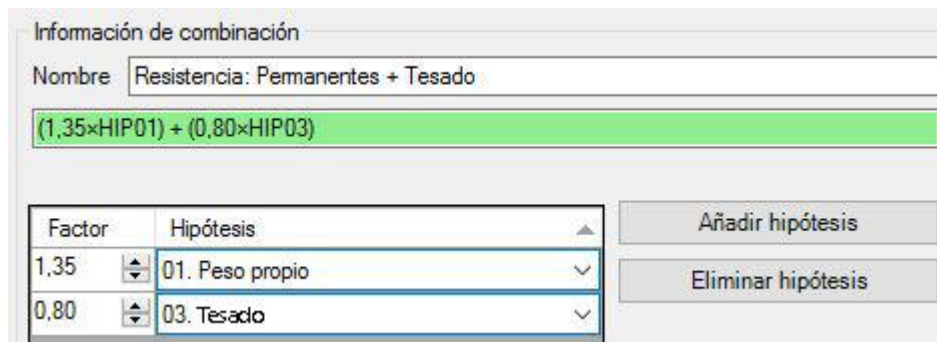
Factor	Hipótesis
1,35	01. Peso propio
1,50	02. Uso

Añadir hipótesis

Eliminar hipótesis

Imagen 4.23 Combinación ELU 01

##### B | PESO PROPIO + TESADO



Información de combinación

Nombre: Resistencia: Permanentes + Tesado

$(1,35 \times \text{HIP01}) + (0,80 \times \text{HIP03})$

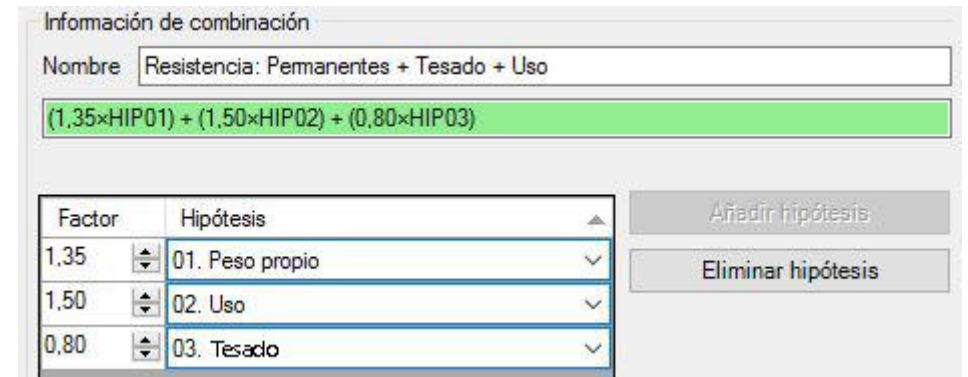
Factor	Hipótesis
1,35	01. Peso propio
0,80	03. Tesado

Añadir hipótesis

Eliminar hipótesis

Imagen 4.24 Combinación ELU 02

##### C | PERMANENTE + TESADO + SOBRECARGA DE USO



Información de combinación

Nombre: Resistencia: Permanentes + Tesado + Uso

$(1,35 \times \text{HIP01}) + (1,50 \times \text{HIP02}) + (0,80 \times \text{HIP03})$

Factor	Hipótesis
1,35	01. Peso propio
1,50	02. Uso
0,80	03. Tesado

Añadir hipótesis

Eliminar hipótesis

Imagen 4.25 Combinación ELU 03

#### 4.4.2 | COMBINACIONES ESTADO LÍMITE DE SERVICIO (ELS)

Se establecen 4 combinaciones para analizar los Estados Límite de Servicio (criterios de desplazamiento y deformación):

##### A | PESO PROPIO + SOBRECARGA DE USO

Información de combinación

Nombre: Permanentes + Uso

$(1,00 \times \text{HIP01}) + (1,00 \times \text{HIP02})$

Factor	Hipótesis
1,00	01. Peso propio
1,00	02. Uso

Añadir hipótesis  
Eliminar hipótesis

Imagen 4.26 Combinación ELS 01

##### B | PESO PROPIO + TESADO

Información de combinación

Nombre: Permanentes + Tesado

$(1,00 \times \text{HIP01}) + (1,00 \times \text{HIP03})$

Factor	Hipótesis
1,00	01. Peso propio
1,00	03. Tesado

Añadir hipótesis  
Eliminar hipótesis

Imagen 4.27 Combinación ELS 02

##### C | PESO PROPIO + TESADO + SOBRECARGA DE USO

Información de combinación

Nombre: Permanentes + Tesado + Uso

$(1,00 \times \text{HIP01}) + (1,00 \times \text{HIP03}) + (1,00 \times \text{HIP02})$

Factor	Hipótesis
1,00	01. Peso propio
1,00	02. Uso
1,00	03. Tesado

Añadir hipótesis  
Eliminar hipótesis

Imagen 4.28 Combinación ELS 03

##### D | ÚNICAMENTE TESADO

Información de combinación

Nombre: Solo tesado

$(1,00 \times \text{HIP03})$

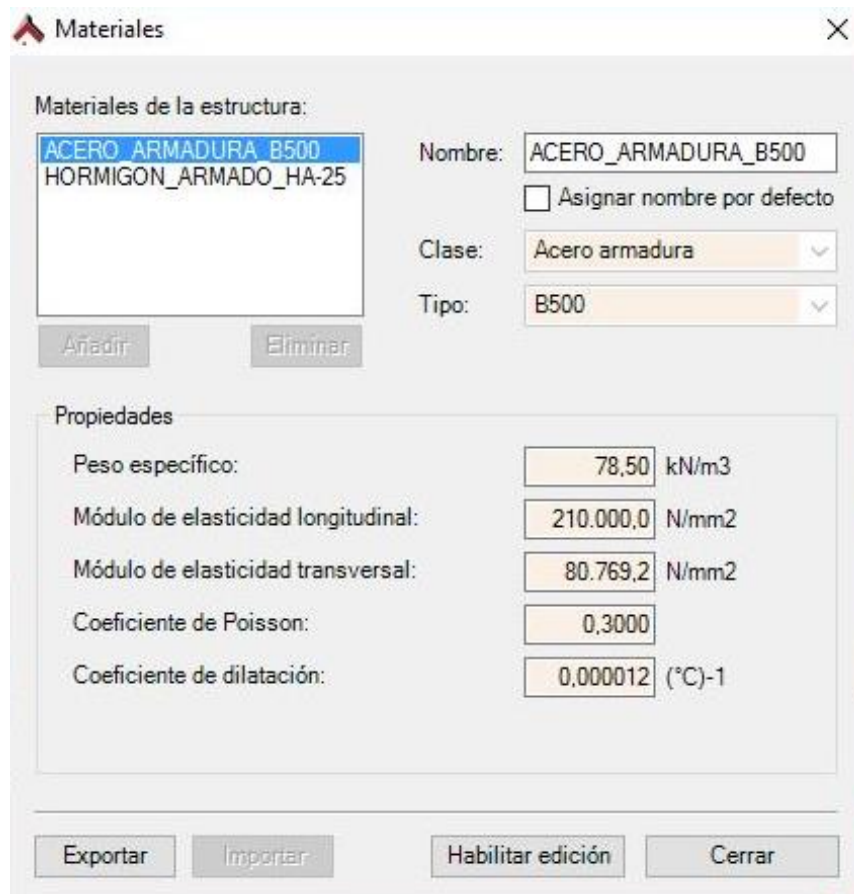
Factor	Hipótesis
1,00	03. Tesado

Añadir hipótesis  
Eliminar hipótesis

Imagen 4.29 Combinación ELS 04

## 4.5 | CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Se establecen las siguientes características para el acero y el hormigón estructural empleados en el modelo del Pabellón. Cabe resaltar que las características del acero de los cables sólo se tienen en cuenta a efectos del módulo de elasticidad, y no para el dimensionado.



**Materiales**

Materiales de la estructura:

- ACERO\_ARMADURA\_B500
- HORMIGON\_ARMADO\_HA-25

Nombre: ACERO\_ARMADURA\_B500

Asignar nombre por defecto

Clase: Acero armadura

Tipo: B500

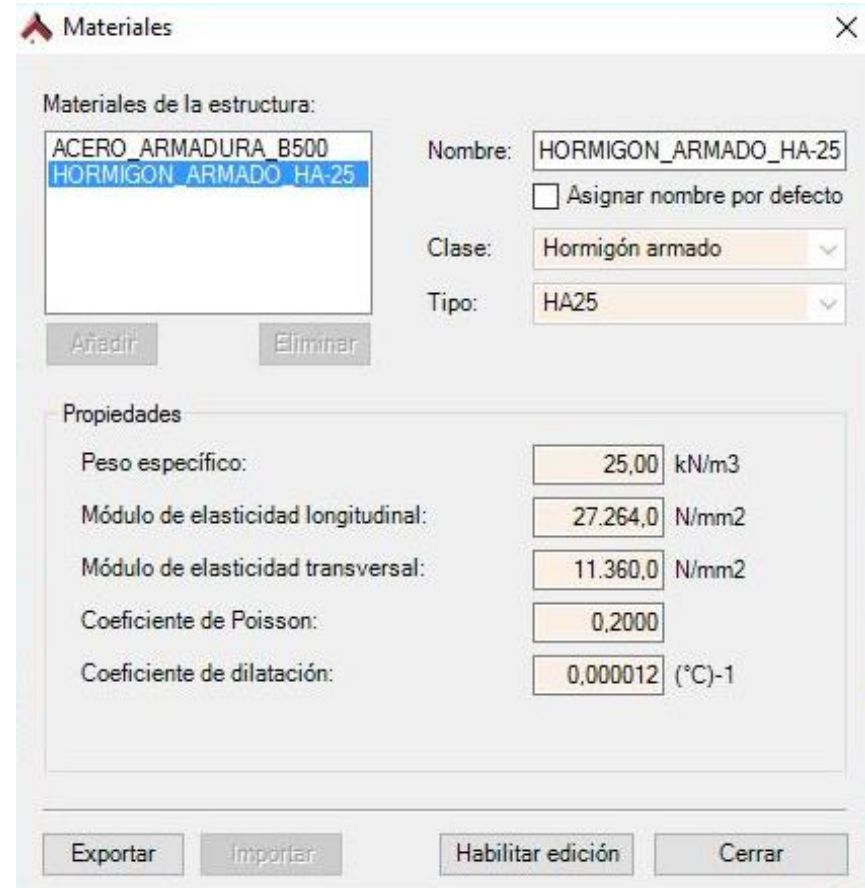
Añadir Eliminar

Propiedades

Peso específico:	78,50	kN/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad longitudinal:	210.000,0	N/mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad transversal:	80.769,2	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson:	0,3000	
Coefficiente de dilatación:	0,000012	(°C) <sup>-1</sup>

Exportar Importar Habilitar edición Cerrar

Imagen 4.30 Características acero



**Materiales**

Materiales de la estructura:

- ACERO\_ARMADURA\_B500
- HORMIGON\_ARMADO\_HA-25

Nombre: HORMIGON\_ARMADO\_HA-25

Asignar nombre por defecto

Clase: Hormigón armado

Tipo: HA25

Añadir Eliminar

Propiedades

Peso específico:	25,00	kN/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad longitudinal:	27.264,0	N/mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad transversal:	11.360,0	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson:	0,2000	
Coefficiente de dilatación:	0,000012	(°C) <sup>-1</sup>

Exportar Importar Habilitar edición Cerrar

Imagen 4.31 Características hormigón armado

## 5 | ANÁLISIS DE RESULTADOS

La última parte del trabajo consiste en analizar los resultados obtenidos mediante el programa informático Architrave<sup>®</sup> tras la puesta en carga del modelo. A través de esta aplicación obtenemos los valores de las tensiones, los axiles, cortantes y momentos flectores y las deformaciones producidas en la estructura.

Para entender cómo se comporta la estructura, primero estudiaremos su comportamiento global según las distintas combinaciones planteadas para Estados Límite de Servicio; y, posteriormente, se realizará un estudio detallado de cada uno de los elementos que la componen según las combinaciones planteadas para Estados Límite Últimos (tensiones) y Estados Límite de Servicio (deformaciones).

## 5.1 | COMPORTAMIENTO GENERAL DE LA ESTRUCTURA

Para estudiar el comportamiento global de la estructura del Pabellón nos centraremos en analizar las deformaciones que sufre la misma según las 3 combinaciones planteadas para Estados Límite de Servicio. Se realiza el análisis global de deformaciones a través del mapa de colores de la deformada Dz en las siguientes combinaciones:

### COMBINACIÓN A | PESO PROPIO + SOBRECARGA DE USO

ELS A 1 \* HIP01 + 1 \* HIP02

### COMBINACIÓN B | PESO PROPIO + TESADO

ELS B 1 \* HIP01 + 1 \* HIP03

### COMBINACIÓN C | PESO PROPIO + TESADO + S. USO

ELS C 1 \* HIP01 + 1 \* HIP03 + 1 \* HIP02

HIP01 \_ PERMANENTES (PESO PROPIO)

HIP02 \_ VARIABLES (SOBRECARGA DE USO)

HIP03 \_ PERMANENTES (TESADO)

### 5.1.1 | ELS A \_ PESO PROPIO + SOBRECARGA DE USO

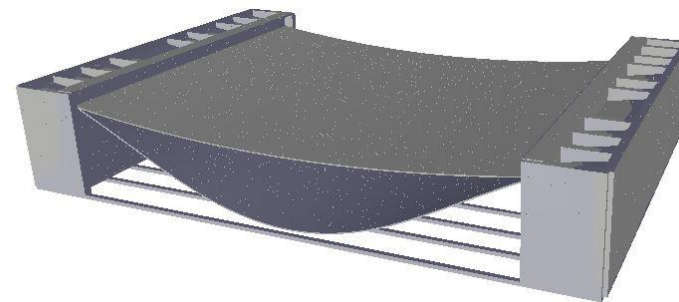
En primer lugar, analizamos la deformación de la estructura del Pabellón tomando como cargas constantes el peso propio y la sobrecarga de uso, siendo éstas las únicas cargas gravitatorias aplicadas sobre la estructura.

En la *Imagen 5.1* podemos observar el modo de deformación de la estructura, deformación que ya se intuía por la magnitud de la luz en cubierta (75 metros) y el porte de los muros laterales. Como vemos, la deformación máxima se produce en la banda central (centro de vano) de la lámina de hormigón.

Si analizamos cada uno de los puntos que componen esta banda central, podemos observar que los valores de la flecha varían entre los **-19,799 cm** y los **-21,797 cm** (*Imagen 5.2*). Además, como era de esperar, la deformación máxima se alcanza en aquellos lugares donde la lámina no tiene continuidad (extremos laterales), alcanzando un valor máximo de flecha que ronda los **-21 cm** en centro de vano.

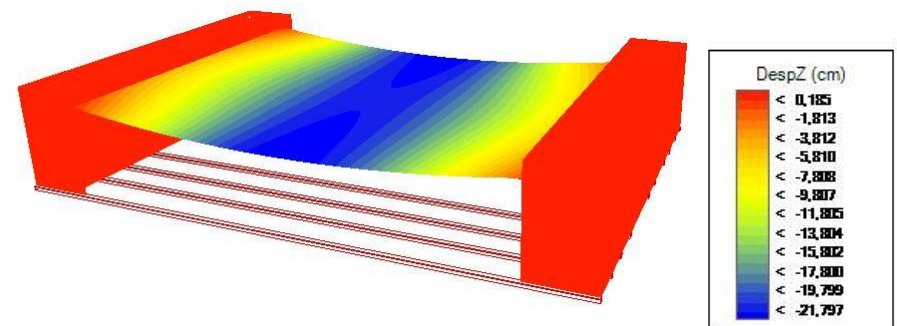
Por otro lado, como podemos observar en los isovalores de la *Imagen 5.2*, los muros laterales de la estructura sufren un desplazamiento vertical ascendente, del orden de los **0,10 cm** aproximadamente, debido al empuje que provoca la lámina de hormigón en la cabeza de los mismos.

De este modo comprobamos que se trata de un modelo estable ya que obtenemos deformaciones Z de magnitudes moderadas dadas las características estructurales del edificio, aunque como ahora veremos, no es éste el comportamiento real de la estructura del Pabellón.



z  
x

*Imagen 5.1 Deformada sólida ELS A*



z  
x

*Imagen 5.2 Isovalores de los desplazamientos Dz ELS A*

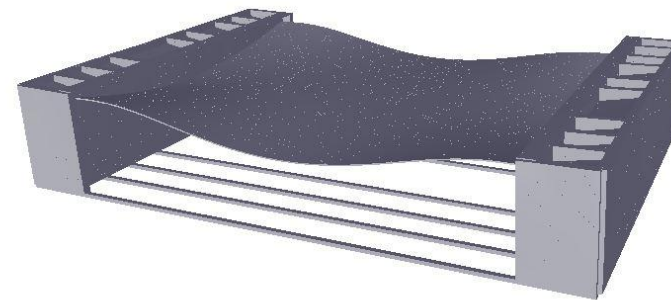
### 5.1.2 | ELS B \_ PESO PROPIO + TESADO

Como se ha comentado en el capítulo 4.3.2 | *CARGA PERMANENTE: TESADO*, existen una serie de cargas puntuales en los tirantes del modelo encargadas de levantar la lámina de hormigón del encofrado, consiguiendo así reproducir el proceso constructivo real del edificio. Ahora analizamos el efecto de la aplicación de esta carga de tesado, junto al peso propio, sobre el comportamiento global de la estructura del Pabellón.

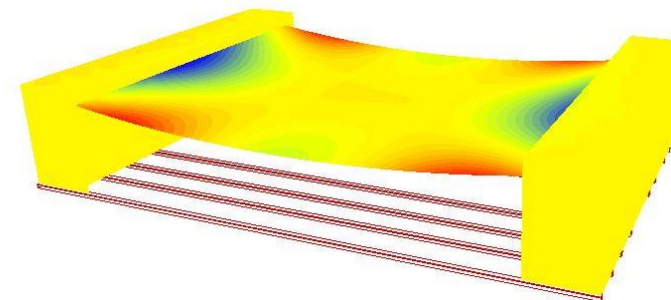
Como podemos observar en la *Imagen 5.3*, en este caso la estructura sufre deformaciones de muy poca magnitud, y la gran mayoría de ellas se concentran en la lámina de hormigón.

En este caso, se han conseguido desplazamientos nulos en el punto central de la lámina, que era el objetivo de la aplicación de la carga de tesado. En la *Imagen 5.4* observamos que ahora las flechas máximas (tanto positivas como negativas) se obtienen en el perímetro de la cubierta. Ahora bien, estas flechas se encuentran entre los **2,110 cm** (desplazamientos ascendentes) y los **-3,327 cm** (desplazamientos descendentes), valores de muy poca magnitud teniendo en cuenta la luz de la cubierta (75 metros). La causa de estos pequeños desplazamientos localizados, ascendentes o descendentes según el caso se explicará en el siguiente apartado cuando abordemos el estudio de la lámina de hormigón de forma detallada.

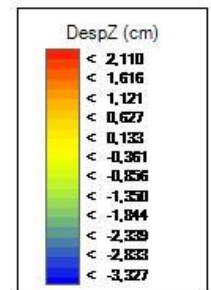
Por último, cabe destacar que ahora los desplazamientos verticales que sufren ambos soportes laterales rondan los **0,02 cm**, magnitud casi despreciable teniendo en cuenta la dimensión del muro.



*Imagen 5.3 Deformada sólida ELS B*



*Imagen 5.4 Isovalores desplazamientos Dz ELS B*



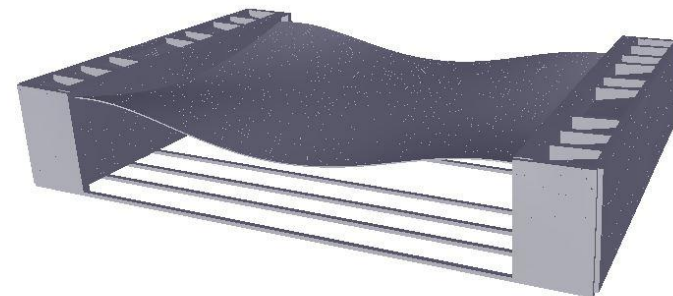
### 5.1.3 | ELS C \_ PESO PROPIO + TESADO + S. USO

En tercer lugar, procedemos a analizar el comportamiento global de la estructura del Pabellón en el caso en que se le aplican las 3 cargas: peso propio, carga de tesado y sobrecarga de uso. Este será el planteamiento más parecido al comportamiento real del Pabellón, con la excepción que en nuestro caso acero y hormigón trabajan de forma conjunta, como se ha comentado en capítulos anteriores.

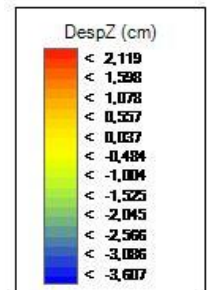
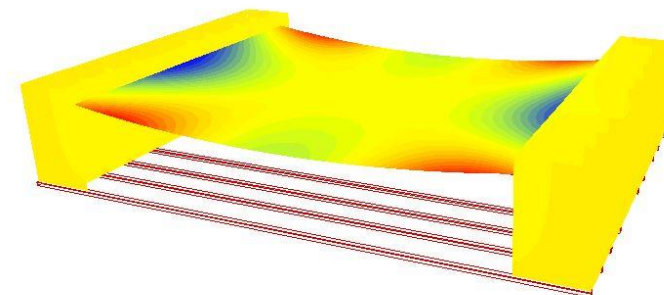
Como podemos observar en la deformada sólida de la *Imagen 5.5*, el comportamiento de la estructura no difiere mucho del caso anterior (ELS B), en el que no existía la sobrecarga de uso.

Lo que diferencia este caso del anterior es la magnitud de las deformaciones. En el caso anterior, excluyendo el perímetro de la cubierta, las deformaciones eran nulas o casi nulas. Ahora bien, en el caso que nos ocupa, al aplicar la sobrecarga de uso de 0,4 kN/m, como se ha explicado en el capítulo 4.3.3 | *CARGA VARIABLE: SOBRECARGA DE USO*, los desplazamientos Z ya no son completamente nulos en ningún caso.

Ahora, los valores de los desplazamientos Z son de alrededor de **0,1 cm** en la mayor parte de la cubierta, excluyendo los puntos singulares que comentaremos más adelante, y de aproximadamente **1 cm** en el caso de los muros laterales, como podemos observar en los isovalores de la *Imagen 5.6*. Se trata de valores de muy poca dimensión, pero que demuestran que la sobrecarga de uso influye en el valor de las deformaciones de la estructura.



*Imagen 5.5 Deformada sólida ELS C*



*Imagen 5.6 Isovalores desplazamientos Dz ELS C*



## 5.2 | ANÁLISIS DETALLADO POR ELEMENTOS

Una vez analizados los resultados obtenidos y estudiado el comportamiento global de la estructura del Pabellón según las diferentes combinaciones, se decide estudiar de forma detallada las tensiones (ELU) y deformaciones (ELS) de los diferentes elementos que la componen.

En este apartado se tendrán en cuenta las combinaciones de cargas en las que actúan peso propio, carga de tesado y sobrecarga de uso con sus correspondientes coeficientes. Esta decisión se toma ya que los valores de las tensiones y deformaciones no varían en gran medida entre dichas combinaciones y en las que no se tiene en cuenta la carga de tesado.

El estudio se va a realizar teniendo en cuenta las tensiones  $S_x$  o  $S_y$  según convenga para los diferentes elementos finitos y, además, se analizarán los valores de los axiles en las barras que conforman los tirantes de cubierta.

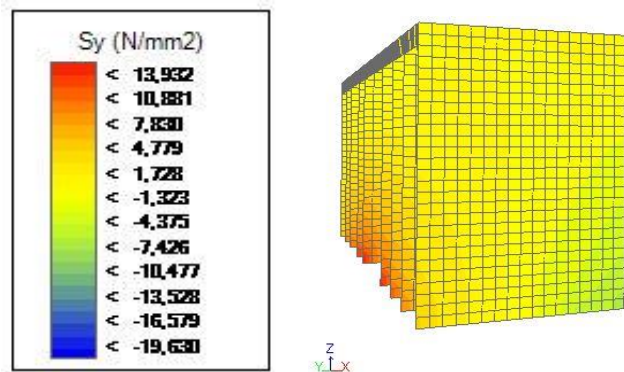


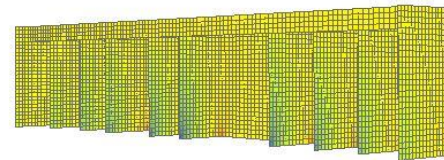
Imagen 5.7 Tensiones  $S_y$  global en los muros laterales

## 5.2.1 | ANÁLISIS DE LOS MUROS LATERALES

### A | TENSIONES

En primer lugar, se van a analizar las tensiones producidas en los muros laterales del Pabellón. En este caso la tensión principal corresponde con la que tiene la dirección de la gravedad, siendo ésta  $S_y$  en coordenadas globales. Los resultados mostrados se obtienen en Estados Límite Últimos. Como podemos observar en la *Imagen 5.7*, las tensiones son prácticamente uniformes en los diferentes planos que componen los soportes, apareciendo puntos singulares en las esquinas inferiores de los mismos.

Si analizamos globalmente el muro, vemos como destacan las tensiones  $S_y$ , de valores  $\pm 1 N/mm^2$ , pero si seleccionamos cada uno de los elementos finitos, estos valores están en torno a los **-0,5  $N/mm^2$** . Esto nos indica que los muros trabajan mayoritariamente a compresión, por tratarse de valores negativos de tensión y que, además, estos valores son admisibles teniendo en cuenta la resistencia característica a compresión del hormigón.



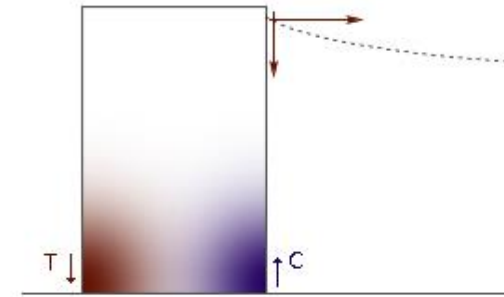
Ahora vamos a centrarnos en los puntos singulares de los planos, siendo éstos las dos esquinas inferiores de los mismos y tomando como referencia de interior el lado en que se sitúa la cubierta (*Imágenes 5.8 y 5.9*).

Si realizamos un esquema de la forma de trabajo de cada uno de los muros (*Imagen 5.8*), podemos observar como la cubierta provoca un empuje hacia el centro de vano en la coronación de los mismos.

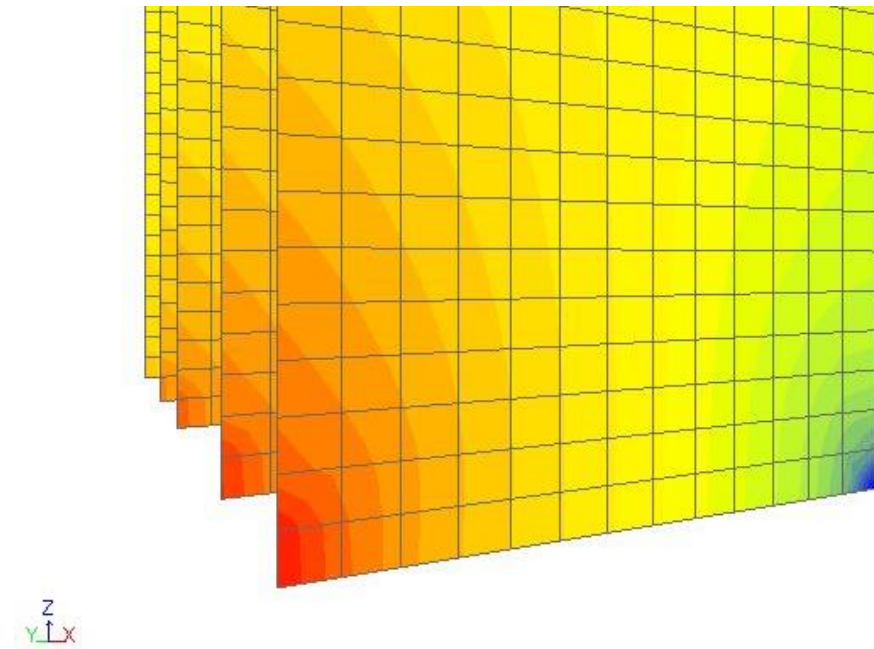
Este empuje provoca que el muro tienda a volcar en la dirección del mismo, apareciendo 2 tipos de tensiones en sus esquinas inferiores. Por tanto, como observamos en las *Imágenes 5.8 y 5.9*, cada uno de los muros sufre tracciones en su esquina inferior exterior y compresiones en la esquina inferior interior, considerando el interior el lado en que produce el empuje la cubierta.

En este caso, el eje de las tensiones  $S_y$  globales corresponde con el eje Y local de cada uno de los elementos finitos que componen los muros. Si analizamos individualmente los elementos finitos de las esquinas, podemos ver que se alcanzan valores entre los **10,042 y 13,932 N/mm<sup>2</sup>** en el caso de las esquinas exteriores, trabajando a tracción; y valores entre los **-19,630 y - 9,265 N/mm<sup>2</sup>** en las esquinas interiores, trabajando a compresión.

Por tanto, la sección comprimida de hormigón se encuentra trabajando en valores admisibles por la resistencia característica del hormigón a compresión. No obstante, los valores positivos de tensión tendrán efecto en el cálculo de la cimentación del edificio, optándose por pilotaje en el caso real.



*Imagen 5.8 Esquema empuje muros laterales*



*Imagen 5.9 Detalle tensiones  $S_y$  global en las esquinas inferiores de los muros*

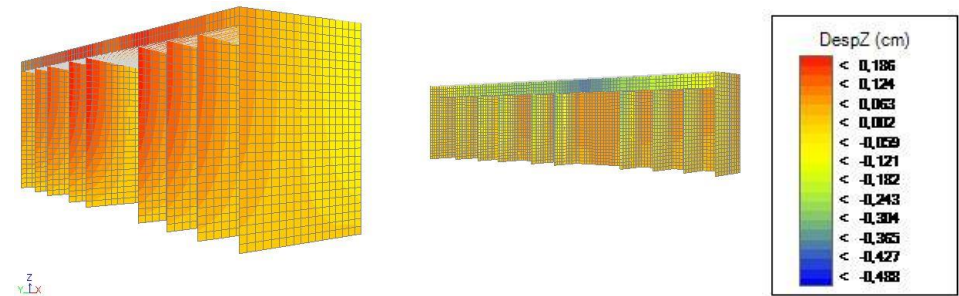
## B | DEFORMACIONES

Ahora analizaremos la forma en que deforman ambos muros mostrando los resultados obtenidos en Estados Límite de Servicio.

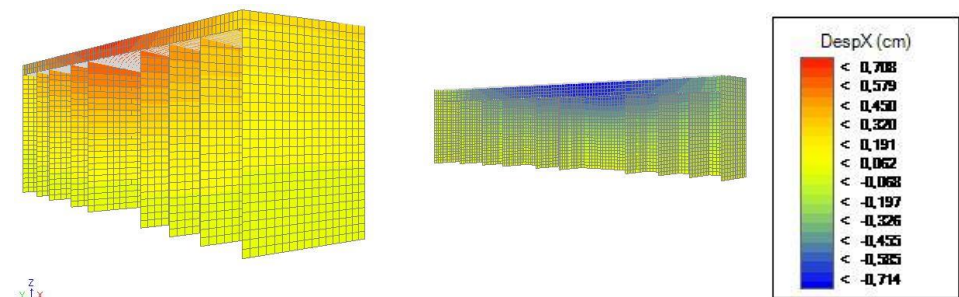
Como era de esperar tras analizar el efecto que tiene el empuje de la cubierta en la coronación del muro sobre éstos, ambos muros tenderán a volcar hacia el interior (*Imagen 5.12*).

Como podemos observar en la *Imagen 5.10*, los muros sufrirán un desplazamiento vertical ascendente del orden de los **0,2 cm** en los bordes exteriores. En los bordes interiores, este desplazamiento vertical será descendente y de aproximadamente **-0,25 cm**. Ambos desplazamientos justifican su aparición por el efecto de vuelco hacia el interior.

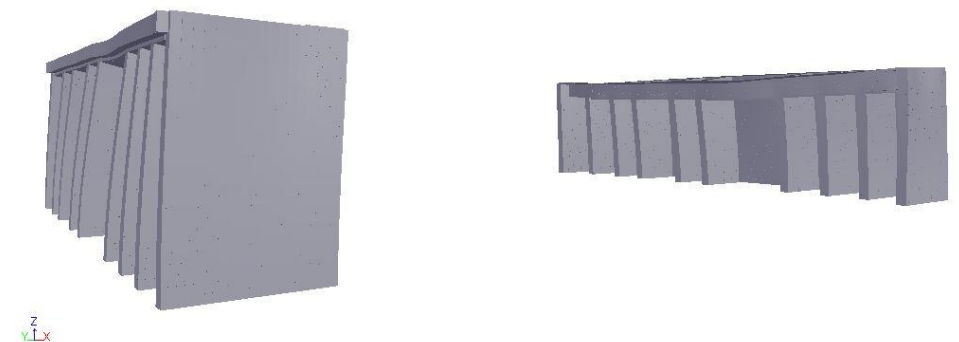
Además, la diferente separación existente entre los muros del plano XZ provocará que los desplazamientos horizontales en dirección X varíen según el caso. Como podemos ver en la *Imagen 5.11*, estos desplazamientos X alcanzan valores de hasta **0,71 cm** hacia el interior del Pabellón en las esquinas superiores donde la separación entre muros XZ es mayor (del orden de los 13,80 m).



*Imagen 5.10 Desplazamiento Z muros laterales*



*Imagen 5.11 Desplazamiento X muros laterales*



*Imagen 5.12 Deformada sólida muros laterales*

## 5.2.2 | ANÁLISIS DE LAS LOSAS INCLINADAS

### A | TENSIONES

Como se ha explicado en el apartado 4.2.3 | *CUBIERTA CURVA*, en el modelo aparecen 2 planos en ambos extremos de los cables y siguiendo la dirección de éstos para transmitir los esfuerzos a los muros laterales (Imagen 5.13). Vamos a continuación a comparar las tensiones obtenidas en ELU en las losas inclinadas con las que se producen en una viga biapoyada sometida a cargas gravitatorias.

Observando la *Imagen 5.14* y centrándonos en la losa inclinada derecha (el comportamiento de la losa izquierda será análogo), vemos como aparecen tensiones  $S_x$  (ejes globales) positivas, del orden de  $2 \text{ N/mm}^2$  en su borde interior; y tensiones  $S_x$  negativas, de unos  $-0,9 \text{ N/mm}^2$ , en el borde exterior. Esto nos indica que, debido al esfuerzo que producen los cables, a lo largo del borde interior se producirán tracciones y las compresiones aparecerán en el borde exterior (*Imagen 5.15*).

Este comportamiento podemos compararlo al de una viga biapoyada sometida a cargas gravitatorias, como vemos en el esquema de la *Imagen 5.15*. En el caso del Pabellón, el plano inclinado funcionaría como viga y los muros laterales trabajarían como apoyos.

Además, observamos que tanto las tensiones positivas como las negativas, son mayores allí donde la distancia entre los muros es mayor, como ahora comentaremos detalladamente.

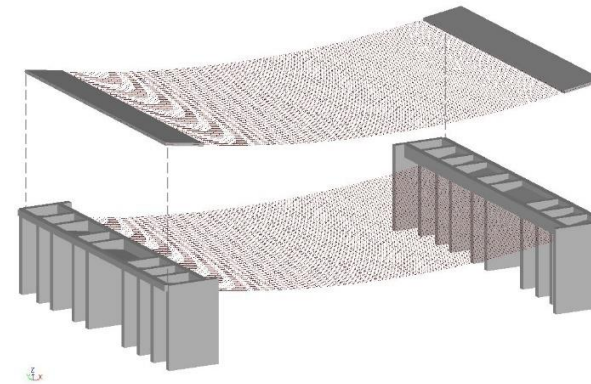


Imagen 5.13 Despiece estructura vigas inclinadas

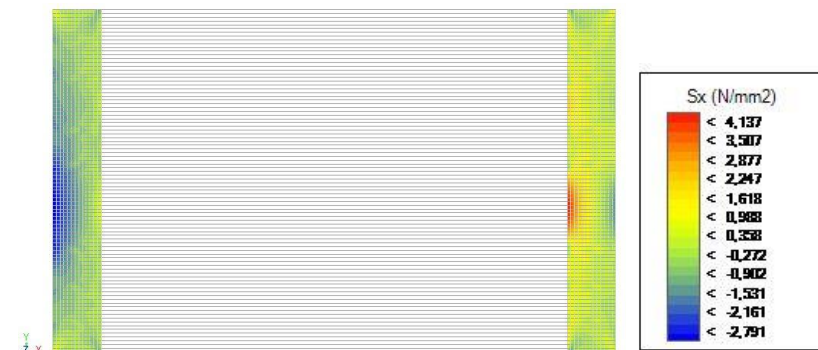


Imagen 5.14 Tensiones  $S_x$  global en vigas inclinadas

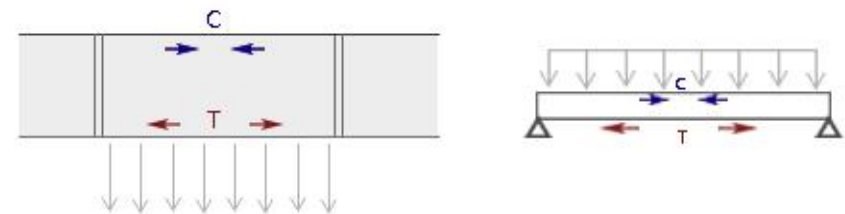


Imagen 5.15 Esquema comparación con viga biapoyada

Ahora vamos a analizar en detalle las tensiones  $S_x$  locales de los elementos finitos para comprobar en qué áreas de la losa inclinada haría falta o no colocar armadura de refuerzo. Para ello se han seleccionado los elementos finitos extremos del plano ZX con mayores niveles tensionales, que coincide con el punto medio entre los dos muros transversales más separados de la estructura (13,80 m).

Como podemos observar en la *Imagen 5.16*, el elemento finito sometido al mayor nivel tensional  $S_x$  de tracción está situado en el extremo interior del plano seleccionado. Si volvemos a la analogía de la viga biapoyada con carga repartida, coincidiría con la fibra inferior de centro de vano. En este punto, se alcanza un nivel de tensión  $S_x$  de aproximadamente **4,00 N/mm<sup>2</sup>**, valor muy superior a la resistencia a tracción del hormigón. Por tanto, sería necesario colocar armadura longitudinal de tracción a lo largo del borde interior de la losa inclinada. Esta armadura sería necesaria en un ancho de aproximadamente 3 metros (dirección x), donde las tensiones  $S_x$  de tracción alcanzan valores no superiores a los 1,50 N/mm<sup>2</sup> y, por tanto, inferiores a la resistencia a tracción del hormigón.

Por último, en la *Imagen 5.17* observamos que los valores máximos de tensión  $S_x$  negativa se alcanzan en el elemento finito del extremo exterior, que coincidiría con la fibra superior en centro de vano en la analogía de la viga biapoyada. Aquí se alcanzan tensiones  $S_x$  negativas de aproximadamente **-1,5 N/mm<sup>2</sup>**, valor muy inferior a la resistencia a compresión del hormigón. Por tanto, no sería necesario colocar armadura de negativos.

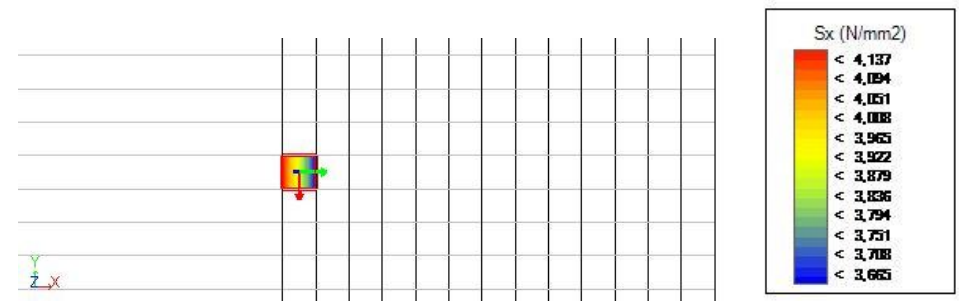


Imagen 5.16 Tensiones  $S_x$  locales de tracción

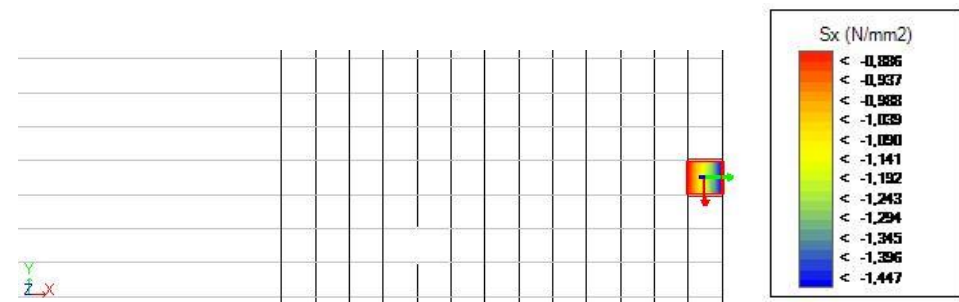


Imagen 5.17 Tensiones  $S_x$  locales de compresión

## B | DEFORMACIONES

Retomando la analogía de la viga biapoyada con carga uniformemente repartida, en la *Imagen 5.18* vemos como ambas losas inclinadas deforman como elementos biapoyados con carga uniforme (en su plano), mostrando los resultados obtenidos en Estados Límite de Servicio.

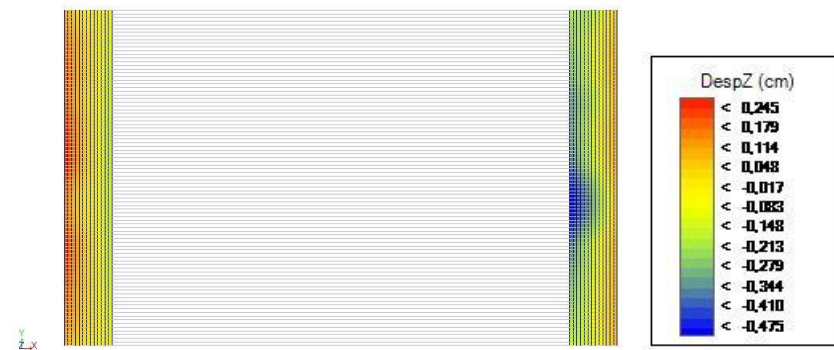
Como podemos observar en la *Imagen 5.18*, los desplazamientos X de mayor magnitud se producen donde las luces entre muros transversales son mayores, como era de esperar. En estos puntos, se producen desplazamientos X del orden de **0,60 cm**, lo que significa que la viga trabaja de forma correcta teniendo en cuenta la distancia entre muros transversales (13,80 m). Además, colocando la armadura longitudinal de tracción, como se ha comentado en el apartado anterior, este desplazamiento se reduciría, mejorando así el comportamiento del plano.

Si nos centramos en los desplazamientos Z de ambos planos (*Imagen 5.19*), vemos como estos sufren desplazamientos verticales ascendentes en el borde exterior y descendentes en el interior. Además, podemos observar que, como ya se ha comentado, las áreas con peor comportamiento son aquellas en las que los muros transversales se encuentran más separados, alcanzando desplazamientos Z del orden de los **-0,5 cm**.

Por tanto, ambos planos inclinados sufren las deformaciones esperadas teniendo en cuenta las luces entre muros laterales y el empuje que provoca la cubierta en ellos.



*Imagen 5.18 Vista aérea deformada sólida vigas inclinadas*



*Imagen 5.19 Desplazamiento Z vigas inclinadas*

### 5.2.3 | ANÁLISIS DE LA CUBIERTA CURVA

Por último, analizaremos el comportamiento de los 2 elementos que componen la cubierta del Pabellón: lámina de hormigón y cables de acero. Cabe recordar que, como se ha comentado anteriormente, en nuestro caso hormigón y acero se han modelado de forma que trabajan conjuntamente, siendo sus comportamientos independientes en el caso de la estructura real de Pabellón.

#### A | TENSIONES LÁMINA DE HORMIGÓN

Analizando los resultados obtenidos para Estados Límite Últimos en la lámina de hormigón, vemos como ésta trabaja casi en su totalidad a tracción, existiendo puntos singulares en sus 4 esquinas que después comentaremos.

Como podemos observar en la *Imagen 5.20*, las tensiones ( $S_x$ ) en la dirección del cable son prácticamente uniformes en todo el ámbito de la cubierta, siendo mayores en el centro de vano de la misma. En este sentido, las tensiones alcanzan valores de aproximadamente **2 N/mm<sup>2</sup>** y, por tanto, la lámina de hormigón se encontraría trabajando a tracción en valores muy próximos a la resistencia a tracción del hormigón. Ahora bien, si nos centramos en las tensiones ( $S_y$ ) perpendiculares al cable (*Imagen 5.21*), vemos como los valores son superiores, del orden de los **10 N/mm<sup>2</sup>**, siendo este valor muy superior a la resistencia a tracción del hormigón.

Pero esto no corresponde con el comportamiento real de cada elemento finito, debemos analizarlos individualmente, teniendo en cuenta sus ejes locales, para conocer sus estados tensionales.

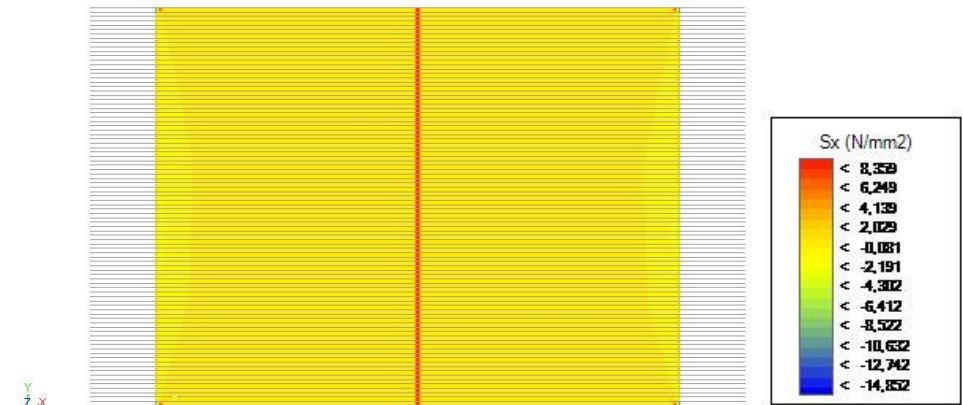


Imagen 5.20 Tensiones  $S_x$  global lámina de hormigón

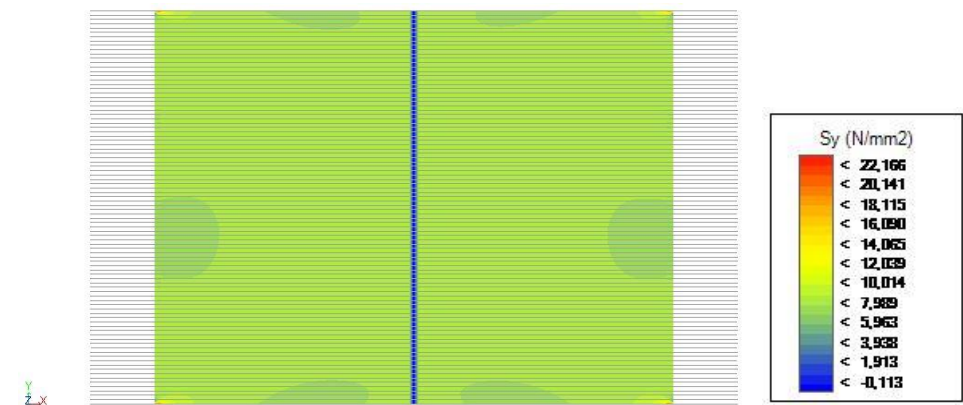


Imagen 5.21 Tensiones  $S_y$  global lámina de hormigón

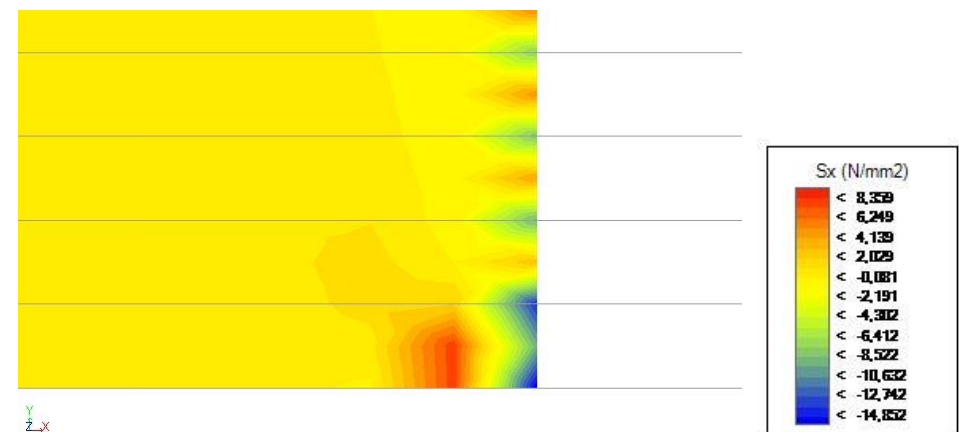
Si analizamos uno a uno los elementos finitos que componen la cubierta observamos que, exceptuando las 4 esquinas de la cubierta, su estado tensional es el esperado.

Las tensiones en el sentido de los cables (eje Y local) para cada elemento finito son del orden de los **8 N/mm<sup>2</sup>**, por lo que, como ya se intuía, sería necesario colocar armadura longitudinal de tracción en la sección de hormigón. Esto ocurre en nuestro modelo por ser solidarios hormigón y acero, explicando así que en el caso real ambos se independicen para que estas tracciones no produzcan fisuración en el hormigón de la losa.

Por otro lado, las tensiones en sentido perpendicular a los cables (eje X local), varían entre los **0,15 y 0,35 N/mm<sup>2</sup>** y, por tanto, no es necesaria la colocación de armadura transversal ya que el hormigón es capaz de resistir los esfuerzos por sí mismo.

Cabe destacar que en los extremos laterales de la lámina de hormigón (paralelos a los soportes), se producen compresiones o tracciones según exista o no cable de acero, respectivamente. Como vemos en la *Imagen 5.22*, se producen tensiones  $S_x$  positivas de valores próximos a los **4 N/mm<sup>2</sup>** en el punto medio entre cables; y tensiones  $S_x$  negativas de unos **-10 N/mm<sup>2</sup>** donde existe cable de acero. Por tanto, seguirá siendo necesaria la colocación de la armadura longitudinal de tracción en las bandas laterales de la cubierta.

Por último, como hemos comentado, en las esquinas se producen estados tensionales diferentes al resto. Esto se debe a la no continuidad de la lámina de hormigón, pudiéndose mejorar el comportamiento del hormigón con refuerzos en la armadura en estos puntos localizados.



*Imagen 5.22 Detalle tensiones  $S_x$  global en lateral y esquina*



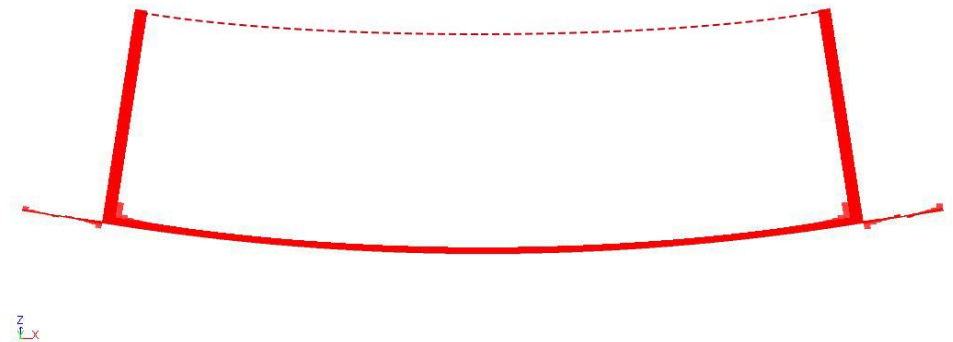
## B | SOLICITACIONES CABLES DE ACERO

Los cables de acero serán los encargados de transmitir los esfuerzos axiales generados en la cubierta a las losas inclinadas, como se ha comentado en capítulos anteriores. Como se trata de barras, los diagramas obtenidos serán lineales y no superficiales como el resto de elementos que componen la estructura del Pabellón. El estudio se realiza en Estados Límite Últimos.

La curva del cable sigue la ecuación de la catenaria, como se ha explicado en el capítulo 4.1.1 | *CUBIERTA CURVA*, por lo que sólo aparecerán esfuerzos axiales en ellos. Vamos a analizar 2 casos: el primero muestra el comportamiento real de la estructura, y en el segundo se refleja el resultado obtenido mediante el modelo realizado.

En el primero de los casos (*Imagen 5.23*), vemos que el diagrama alcanza dos picos en los extremos donde desaparece el hormigón, alcanzando valores del orden de los **3.500 kN**. En el resto de la curva, los valores que se obtienen son mucho menores ya que en nuestro caso, hormigón y acero trabajan de forma conjunta, por lo que el axial se reparte entre ellos donde existen ambos. Por tanto, en el caso real en que acero y hormigón trabajan de forma independiente, el diagrama correspondería a la línea de trazos, absorbiendo los cables el esfuerzo axial en su totalidad.

En el segundo caso (*Imagen 5.24*) vemos el diagrama obtenido al hacer trabajar de forma conjunta acero y hormigón, obteniendo axiales de valores mucho más moderados ya que el esfuerzo se reparte entre ambos.



*Imagen 5.23 Vista XZ axiales cables de acero caso real*



*Imagen 5.24 Vista XZ axiales cables de acero modelo*

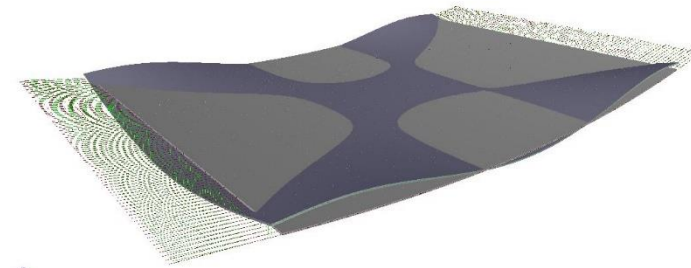
### C | DEFORMACIÓN CABLES DE ACERO + HORMIGÓN

Por último, analizamos la forma en que deforma la cubierta mostrando los resultados obtenidos para Estados Límite de Servicio. Para estudiar la deformación, compararemos dos casos: en el primero, solo actúan el peso propio y la carga de tesado (ELS B); y en el segundo, se añade el efecto de la sobrecarga de uso (ELS C). Además, centramos el estudio en la banda central de la cubierta, ya que el perímetro no muestra resultados reales debido a la no continuidad del hormigón.

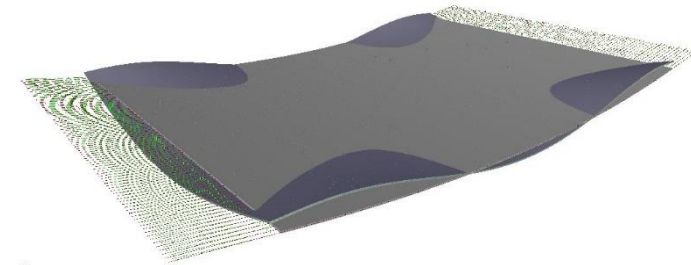
Como vemos en la *Imagen 5.25*, la cubierta sufre deformaciones nulas en el centro en el caso de solo actuar peso propio y carga de tesado. En el mapa de color de la *Imagen 5.27* vemos como domina el color amarillo, correspondiente a desplazamientos **nulos**, corroborando así que hemos conseguido contrarrestar la acción del peso propio por medio de la aplicación de la carga de tesado.

Si analizamos el caso real (ELS C) en que también actúa la sobrecarga de uso, podemos observar como las deformaciones ya no son nulas (*Imagen 5.26*). Ahora, casi en la totalidad de la banda central de la cubierta, los desplazamientos Z son descendentes del orden de los **-0,5 cm**.

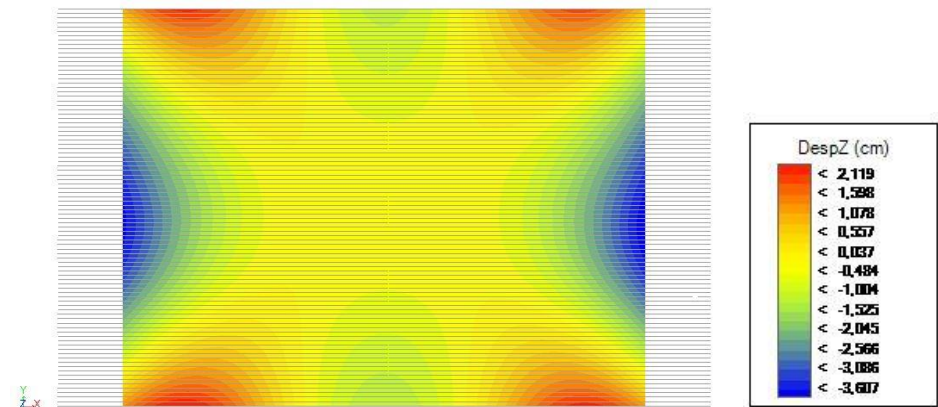
Por tanto, podemos decir que se trata de desplazamientos de poca magnitud teniendo en cuenta la luz alcanzada en cubierta, 75 m, y el espesor de la lámina de hormigón, de sólo 20 cm.



*Imagen 5.25 Deformada sólida ELS B*



*Imagen 5.26 Deformada sólida ELS C*



*Imagen 5.27 Desplazamientos Z ELS B*

## 6 | CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha explicado el funcionamiento estructural del Pabellón de Portugal para la Expo de 1998 de Lisboa y se ha comprobado cómo se adecúa al proyecto y a las intenciones buscadas por su arquitecto, Álvaro Siza.

Haciendo referencia a los objetivos del trabajo, podemos dividirlos en cuatro bloques: en primer lugar, el estudio del contexto histórico, social y político de Lisboa y de Álvaro Siza; en segundo lugar, el análisis del edificio desde el punto de vista funcional, espacial y de su materialidad y ejecución; el tercer bloque engloba el estudio detallado de la estructura del sector exterior del edificio, así como el análisis funcional de sus elementos estructurales y su modelización mediante el programa informático Architrave; y, por último, el análisis de los resultados obtenidos del cálculo estructural.



*Imagen 6.1 Espacio exterior Pabellón de Portugal*

## 6.1 | PROYECTO

Se ha estudiado cómo la realización de la Exposición Universal en Lisboa en 1998 realzó internacionalmente a Portugal y supuso un importante proyecto de regeneración urbana, con logros perceptibles hasta la actualidad. Se ha visto cómo, tras finalizar la Expo, se remodeló el espacio urbano dando lugar a un amplio espacio público en el que hoy en día se desarrollan actividades culturales y de ocio, proponiendo nuevos usos para los edificios de la Expo, entre los que se encuentra el Pabellón Portugués.

Se ha estudiado la trayectoria profesional de su arquitecto, Álvaro Siza. Realizando un paseo por sus obras más celebradas se ha comprobado cómo el lugar juega un papel crucial en todas ellas, tratándose siempre de una arquitectura humana preocupada por satisfacer las necesidades de sus usuarios. Además, se ha visto cómo esta forma de ser y proyectar le ha llevado a ser uno de los arquitectos más respetados de la época, llegando a ganar premios entre los que se encuentra el prestigioso Premio Pritzker en 1992.

Se ha puesto en valor el Pabellón de Portugal para la Expo de Lisboa de 1992, encargado por Portugal a Siza sin necesidad de concursos. Se ha visto cómo se trata de un edificio polivalente, proyectado con la idea de permanecer en el tiempo más allá de la Expo, que consigue una interacción sensible con el puerto y satisface así las premisas exigidas por la Expo y los requisitos del lugar. Aquí, se ha destacado la importancia de su espacio exterior cubierto, objeto de los siguientes capítulos del trabajo realizado.

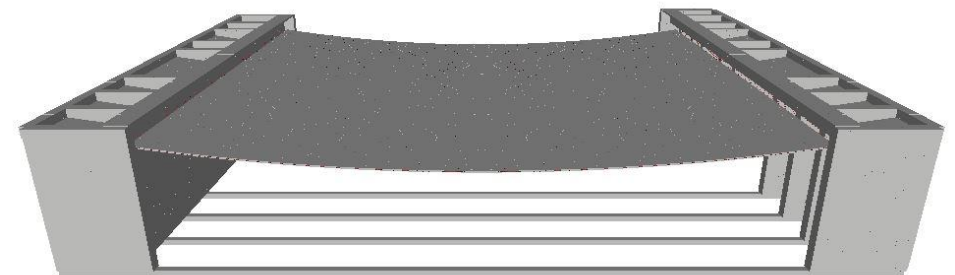
## 6.2 | ESTRUCTURA

Se ha visto cómo el Pabellón está compuesto por dos sectores claramente diferenciados, compartiendo ambos la materialidad de la estructura, compuesta de acero de alta resistencia y hormigón armado, pero con soluciones constructivas y estructurales distintas.

Se ha centrado el estudio en la estructura de la plaza pública cubierta, viendo como ésta se compone básicamente de 3 elementos: cubierta curva, dos soportes y cimentación.

Se ha realizado un estudio detallado de la cubierta viendo cómo, con el uso de la curva de la catenaria, se ha logrado alcanzar una luz de 75 metros con una lámina de hormigón de 20 cm de espesor y una serie de cables de acero de alta resistencia pretensados. Se trata de una gran hazaña, que además se enriquece con mecanismos como la desaparición del hormigón en el encuentro entre la cubierta y los soportes, dejando al descubierto la red de cables. Se ha comprobado cómo ambos soportes, compuestos por una serie de planos de gran porte dispuestos según una modulación variable, son los encargados de transmitir los esfuerzos generados en su coronación a la cimentación. Y, más tarde, se ha visto cómo la cimentación del edificio, compuesta por pilotes y vigas centradoras, consigue absorber el momento flector y los esfuerzos cortantes existentes en la base de los soportes.

Por último, se ha modelizado la estructura de la forma más fiel posible a la realidad, realizando una serie de simplificaciones, y se le han aplicado las cargas correspondientes para proceder a su análisis estructural.



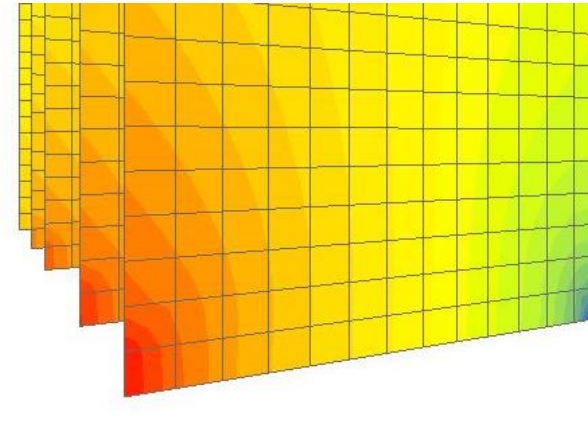
*Imagen 6.2 Perspectiva modelo sólido*

### 6.3 | ANÁLISIS

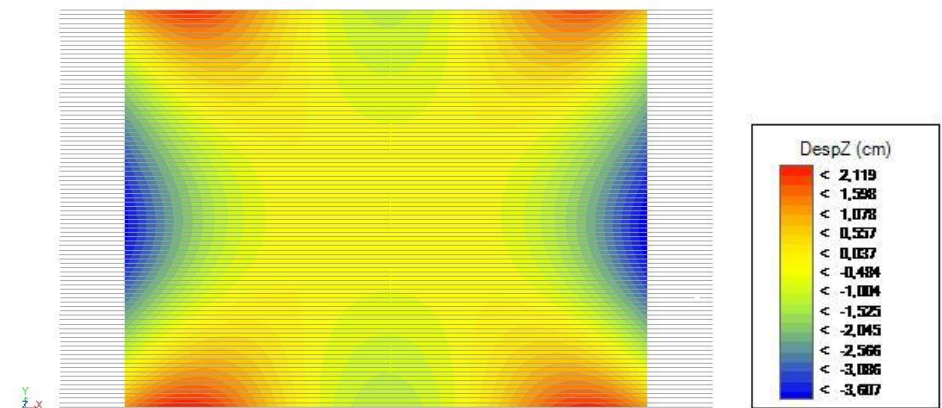
Tras realizar el cálculo estructural y a través de los diferentes diagramas obtenidos mediante el programa de cálculo Architrave, se ha demostrado cómo la solución estructural utilizada en el modelo se comporta de manera correcta. Esta conclusión se ha obtenido mediante el estudio de las tensiones y deformaciones verticales y horizontales de las diferentes hipótesis y combinaciones de cargas, y conociendo las sollicitaciones a las que están sometidas las barras de la estructura.

En cuanto a las tensiones a las que están sometidos los muros laterales, se ha comprobado que éstos trabajan mayoritariamente a compresión y con valores reducidos, lo que indica que se comportan de forma adecuada. Sin embargo, se ha comprobado cómo el empuje que produce la cubierta en la coronación de ambos soportes provoca que éstos tiendan a volcar hacia el interior, apareciendo tensiones positivas en sus esquinas exteriores inferiores (*Imagen 6.3*). Esto se ha solucionado con el uso de pilotaje en la cimentación del modelo real, aunque éste no se ha tenido en cuenta en el modelado realizado.

Por otra parte, se han analizado los elementos que componen la cubierta curva en diferentes hipótesis y combinaciones de carga. En los diagramas de deformaciones se ha podido comprobar que la aplicación de la carga de tesado sobre los cables ha permitido reproducir el proceso constructivo real de la estructura. Además, se ha comprobado cómo la sobrecarga de uso produce desplazamientos Z de poca magnitud en la lámina de hormigón, estando éstos siempre dentro de intervalos adecuados teniendo en cuenta las características de la cubierta.



*Imagen 6.3 Detalle tensiones Sy global en las esquinas inferiores de los muros*



*Imagen 6.4 Desplazamientos Z ELS B*

Tras finalizar el trabajo se puede concluir que, gracias al empeño de Álvaro Siza por hacer de una cubierta de tal envergadura algo liviano, y a la colaboración y sabiduría del ingeniero Cecil Balmond, la estructura del Pabellón se adecúa a las necesidades, con un diseño que propicia el buen comportamiento estructural. Así, se ha comprobado que el uso de la línea misma como estructura es la solución idónea, tal como defendía el arquitecto. De este modo podemos entender por qué Álvaro Siza es uno de los arquitectos más celebrados de su época.

Quedan abiertas como posibles ampliaciones del presente trabajo el estudio de la acción del viento sobre la estructura, la influencia del pilotaje en la cimentación del edificio y el estudio del comportamiento de la cubierta en el caso en que hormigón y acero trabajen de forma independiente.



*Imagen 6.5 Pabellón de Portugal*

## 7 | BIBLIOGRAFÍA



## 7.1 | BIBLIOGRAFÍA DOCUMENTAL

### PÁGINAS WEB

LISBOA

<<https://es.wikipedia.org/wiki/Lisboa>>

HISTORIA DE LISBOA

<<https://www.disfrutalisboa.com/historia>>

ÁLVARO SIZA Y LA EXPO 1998 EN LISBOA

<<http://moleskinearquitectonico.blogspot.com.es/2009/05/alvaro-siza-y-la-expo-2000-en-lisboa.html>>

ÁLVARO SIZA

<[https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81lvaro\\_Siza](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81lvaro_Siza)>

EN PERSPECTIVA: ÁLVARO SIZA

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-271022/feliz-cumpleanos-antoni-gaudi-alvaro-siza-y-robert-venturi>>

PREMIOS PRITZKER: ÁLVARO SIZA

<<http://catalogo.artium.org/dossieres/exposiciones/premios-pritzker-viaje-por-la-arquitectura-contemporanea/biografia-y-obra-15>>

PABELLÓN DE PORTUGAL EXPO '98

<<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/pabellon-de-portugal-expo-98/>>

CLÁSICOS DE ARQUITECTURA: PABELLÓN DE PORTUGAL EXPO '98

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/759986/clasicos-de-arquitectura-pabellon-de-portugal-expo98-alvaro-siza>>

PABELLÓN DE PORTUGAL EXPO LISBOA

<<https://proyectos4etsa.wordpress.com/2015/02/17/pabellon-de-portugal-expolisboa-1995-98-alvaro-siza-viera/>>

MATERIALES: PABELLÓN DE PORTUGAL EXPO '98

<<http://www.arqred.mx/blog/2009/11/08/materiales-pabellon-de-portugal-expo-98/>>

ESTRUCTURA: PABELLÓN DE PORTUGAL

<<http://www.arqred.mx/blog/2009/11/01/estructura-pabellon-de-portugal-expo-98/>>

### LIBROS Y REVISTAS

ARQUIA / TEMAS 38 \_ SIZA X SIZA \_ Carlos Seoane y Juan Rodríguez

EL CROQUIS, editorial 2007 / ÁLVARO SIZA 1958 – 2000, MADRID \_ Márquez Cecilia, Fernando y Levene, Richard

LOFT PUBLICATIONS, año 2009 / ÁLVARO SIZA: APUNTES DE UNA ARQUITECTURA SENSIBLE \_ Sánchez Vidiella, Álex

GRAFÍAS DISCIPLINARES DE LA UCP, Pereira (Colombia) N°16: 75-79, Enero - Marzo de 2012 / PABELLÓN DE PORTUGAL EN LA EXPO DEL 98

PRESTEL USA, año 2002 / INFORMAL \_ Cecil Balmond y Januzzi Smith

## **NORMATIVA**

CTE DB SEGURIDAD ESTRUCTURAL, abril 2009 / Ministerio de fomento \_ Gobierno de España

CTE DB SEGURIDAD ESTRUCTURAL – ACCIONES EN LA EDIFICACIÓN, abril 2009 / Ministerio de fomento \_ Gobierno de España

EHE – 08

## **PROGRAMAS INFORMÁTICOS**

AUTOCAD 2016<sup>©</sup>

ARCHITRAVE<sup>©</sup> / Programa informático de cálculo y análisis estructural \_ Universitat Politècnica de València \_ [www.architrave.es](http://www.architrave.es)

## **7.2 | BIBLIOGRAFÍA FOTOGRÁFICA**

### **0 | PORTADA**

0.1 Espacio exterior Pabellón de Portugal

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/759986/clasicos-de-arquitectura-pabellon-de-portugal-expo98-alvaro-siza/543ca8c3c07a80762d000197>>

0.2 Álvaro Siza Vierira

<<https://www.dezeen.com/2012/06/27/alvaro-siza-awarded-golden-lion-for-venice-architecture-biennale/>>

### **1 | INTRODUCCIÓN**

1.1 Lisboa desde el mar

<<https://greensavers.sapo.pt/files/lisboa-ideal.jpg>>

1.2 Vista aérea proyecto Expo '98

<[http://1.bp.blogspot.com/\\_J0XsQeUu1tE/Sg4P9o8CJrI/AAAAAAAAANs8/DkYKaF5FeRM/s1600-h/28\\_01.jpg](http://1.bp.blogspot.com/_J0XsQeUu1tE/Sg4P9o8CJrI/AAAAAAAAANs8/DkYKaF5FeRM/s1600-h/28_01.jpg)>

1.3 Parque de las Naciones

<[http://4.bp.blogspot.com/\\_J0XsQeUu1tE/Sg0JL-Q1fXI/AAAAAAAAANq8/r\\_pKNaw\\_Co4/s1600-h/P9020863+copy.jpg](http://4.bp.blogspot.com/_J0XsQeUu1tE/Sg0JL-Q1fXI/AAAAAAAAANq8/r_pKNaw_Co4/s1600-h/P9020863+copy.jpg)>

## 2 | EL ARQUITECTO

### 2.1 Álvaro Siza por Fernando Guerra

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/790264/retratos-de-alvaro-siza-por-fernando-guerra/576d4e61e58ece0d54000069-portraits-of-alvaro-siza-by-fernando-guerra-photo>>

### 2.2 Restaurante Da Boa Nova

<<http://www.ojodigital.com/foro/attachments/urbanas-arquitectura-interiores-y-escultura/170279d1333542033-restaurante-boa-nova-boa.jpg>>

### 2.3 Piscinas de Leça de Palmeira

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/623022/52-obras-de-alvaro-siza-en-el-dia-de-su-cumpleanos/53a9a4f4c07a80b48b0001eb>>

### 2.4 Sucursal del banco Borges & Irmao, premio Mies van der Rohe

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/623022/52-obras-de-alvaro-siza-en-el-dia-de-su-cumpleanos/53a9a4e0c07a80c112000219>>

### 2.5 Fundación Serralves

<[https://www.serralves.pt/fotos/gca/novo\\_horarios\\_71546582350edb6277d693.jpg](https://www.serralves.pt/fotos/gca/novo_horarios_71546582350edb6277d693.jpg)>

### 2.6 Museo Mimesis

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/623022/52-obras-de-alvaro-siza-en-el-dia-de-su-cumpleanos/53a9a30cc07a80c11200020b>>

## 3 | EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

### 3.1 Esquema para el pabellón de la Expo

<PABELLÓN DE PORTUGAL EN LA EXPO DEL 98 /Grafías Disciplinadas de la UCP, Pereira (Colombia) N° 16: 75-79 / Enero-Marzo de 2012>

### 3.2 Encuentro de la cubierta y el muro

<<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/pabellon-de-portugal-expo-98/#lg=1&slide=21>>

### 3.3 Galería Este del Pabellón

<<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/pabellon-de-portugal-expo-98/#lg=1&slide=1>>

### 3.4 Relación del edificio con el agua

<<https://www.google.es/maps/@38.7660876,9.0941715,415m/data=!3m1!1e3>>

### 3.5 Esquema funcional del Pabellón

<<https://proyectos4etsa.files.wordpress.com/2015/02/esquema-22.jpg?w=450&h=375>>

### 3.6 Alzado Oeste

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/759986/clasicos-de-arquitectura-pabellon-de-portugal-expo98-alvaro-siza/543b689ac07a80762d0000ee>>

### 3.7 Sección Longitudinal

<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/759986/clasicos-de-arquitectura-pabellon-de-portugal-expo98-alvaro-siza/543b6892c07a802a690000f6>>

### 3.8 Planta baja

<<https://proyectos4etsa.files.wordpress.com/2015/02/pb.jpg?w=450&h=291>>

### 3.9 Planta primera

<<https://proyectos4etsa.files.wordpress.com/2015/02/p1.jpg?w=450&h=308>>

### 3.10 Detalle materialidad interior de los pórticos

<[3.bp.blogspot.com/sU4kfYdk0/UoFghLrs8VI/AAAAAAAAxig/SjqY3TwE8K4/s1600/%C3%81lvaro+Siza+.+Expo+%2798+Portugal+Pavilion+.+Lisbon+\(1\).jpg](http://3.bp.blogspot.com/sU4kfYdk0/UoFghLrs8VI/AAAAAAAAxig/SjqY3TwE8K4/s1600/%C3%81lvaro+Siza+.+Expo+%2798+Portugal+Pavilion+.+Lisbon+(1).jpg)>

### 3.11 La catenaria como elemento estructural y su anclaje

*PRESTEL USA, año 2002 / INFORMAL \_ Cecil Balmond y Januzzi Smith*

### 3.12 Proceso constructivo

*PRESTEL USA, año 2002 / INFORMAL \_ Cecil Balmond y Januzzi Smith*

## 4 | DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y SU MODELIZACIÓN

### 4.1 Planta estructural del pabellón

<<http://www.arqred.mx/blog/wp-content/uploads/2009/11/esestructura.jpg>>

### 4.2 Estructura de pilares del edificio de pabellón

<<http://www.arqred.mx/blog/wp-content/uploads/2009/11/columnas1.jpg>>

### 4.3 Esquema estructural plaza pública cubierta

<<http://www.arqred.mx/blog/wp-content/uploads/2009/10/corte-estructura.jpg>>

### 4.4 La catenaria como cubierta del espacio público

<<http://www.galinsky.com/buildings/portugalpavilion/portugalpavilion1l.jpg>>

### 4.5 Encuentro de la cubierta y los soportes

<[http://www.block.arch.ethz.ch/eq/img/cache/a1.2\\_ansicht-wandscheibe-pavilhao-de-portugal\\_640x0.jpg](http://www.block.arch.ethz.ch/eq/img/cache/a1.2_ansicht-wandscheibe-pavilhao-de-portugal_640x0.jpg)>

### 4.6 Función matemática de la catenaria

<*PRESTEL USA, año 2002 / INFORMAL \_ Cecil Balmond y Januzzi Smith*>

### 4.7 La tensión en la catenaria, esfuerzo axil

<*PRESTEL USA, año 2002 / INFORMAL \_ Cecil Balmond y Januzzi Smith*>

### 4.8 Modulación de los soportes

<[http://i.vimeocdn.com/video/117606685\\_640.jpg](http://i.vimeocdn.com/video/117606685_640.jpg)>

### 4.9 Solicitaciones en la cimentación

<*PRESTEL USA, año 2002 / INFORMAL \_ Cecil Balmond y Januzzi Smith*>

4.10 Esquema cimentación 2 muros separados 75 m

<PRESTEL USA, año 2002 / INFORMAL \_ Cecil Balmond y Januzzi Smith>

4.11 Logo AutoCAD 2016<sup>©</sup>

<[https://www.aplicit.com/wp-content/uploads/logo\\_AUtoCAD\\_2016.png](https://www.aplicit.com/wp-content/uploads/logo_AUtoCAD_2016.png)>

4.12 Logo Architrave<sup>©</sup>

<<http://www.architrave.es/img/logo.png>>

4.13 Modelo del Pabellón por medio de barras y elementos finitos

4.14 Modelado de los soportes mediante elementos finitos

4.15 Modelado de la cubierta curva mediante barras y elementos finitos

4.16 Desplazamiento Z hipótesis peso propio

4.17 Cargas de tesado

4.18 Desplazamiento Z hipótesis tesado

<Fuente \_ Elaboración propia mediante Architrave<sup>©</sup>>

4.19 Valores característicos de las sobrecargas de uso

< CTE \_ DB SE Acciones en la Edificación \_ Tabla 3.1 Valores característicos de la sobrecarga de uso >

4.20 Combinación de acciones

< CTE \_ DB Seguridad estructural \_ 4.2.2 Combinación de acciones >

4.21 Coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones

< CTE \_ DB Seguridad estructural \_ Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones >

4.22 Coeficientes de simultaneidad ( $\Psi$ )

< CTE \_ DB Seguridad estructural \_ Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad ( $\Psi$ ) >

4.23 Combinación ELU 01

<Fuente \_ Captura combinación ELU 01 Architrave<sup>©</sup>>

4.24 Combinación ELU 02

<Fuente \_ Captura combinación ELU 02 Architrave<sup>©</sup>>

4.25 Combinación ELU 03

<Fuente \_ Captura combinación ELU 03 Architrave<sup>©</sup>>

4.26 Combinación ELS 01

<Fuente \_ Captura combinación ELS 01 Architrave<sup>©</sup>>

4.27 Combinación ELS 02

<Fuente \_ Captura combinación ELS 02 Architrave<sup>©</sup>>

4.28 Combinación ELS 03

<Fuente \_ Captura combinación ELS 03 Architrave<sup>©</sup>>

4.29 Combinación ELS 03

<Fuente \_ Captura combinación ELS 03 Architrave<sup>©</sup>>

4.30 Características acero

4.31 Características hormigón armado

<Fuente \_ Captura Architrave<sup>©</sup>>

## 5 | ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Deformada sólida ELS A

5.2 Isovalores desplazamientos Dz ELS A

5.3 Deformada sólida ELS B

5.4 Isovalores desplazamientos Dz ELS B

5.5 Deformada sólida ELS C

5.6 Isovalores desplazamientos Dz ELS C

5.7 Tensiones Sy global en los muros laterales

*<Fuente \_ Captura Architrave®>*

5.8 Esquema empuje muros laterales

*<Fuente \_ Elaboración propia mediante Photoshop®>*

5.9 Detalle tensiones Sy global en las esquinas inferiores de los muros

5.10 Desplazamiento Z muros laterales

5.11 Desplazamiento X muros laterales

5.12 Deformada sólida muros laterales

5.13 Despiece estructura vigas inclinadas

5.14 Tensiones Sx global en vigas inclinadas

*<Fuente \_ Captura Architrave®>*

5.15 Esquema comparación con viga biapoyada

*<Fuente \_ Elaboración propia mediante Photoshop®>*

5.16 Tensiones Sx locales de tracción

5.17 Tensiones Sx locales de compresión

5.18 Vista aérea deformada sólida vigas inclinadas

5.19 Desplazamiento Z vigas inclinadas

5.20 Tensiones Sx global lámina de hormigón

5.21 Tensiones Sy global lámina de hormigón

5.22 Detalle tensiones Sx global en lateral y esquina

5.23 Vista XZ axiles cables de acero real

5.24 Vista XZ axiles cables de acero modelo

5.25 Deformada sólida ELS B

5.26 Deformada sólida ELS C

5.27 Desplazamientos Z ELS B

*<Fuente \_ Captura Architrave®>*

## 6 | CONCLUSIONES

### 6.1 Espacio exterior Pabellón de Portugal

*<[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c3/Pabell%C3%B3n\\_de\\_Portugal\\_Expo\\_98\\_%286086924424%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c3/Pabell%C3%B3n_de_Portugal_Expo_98_%286086924424%29.jpg)>*

### 6.2 Perspectiva modelo sólido

### 6.3 Detalle tensiones $S_y$ global en las esquinas inferiores de los muros

### 6.4 Desplazamientos Z ELS B

*<Fuente \_ Captura Architrave<sup>©</sup>>*

### 6.5 Pabellón de Portugal

*<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/759986/clasicos-de-arquitectura-pabellon-de-portugal-expo98-alvaro-siza/543ca8c3c07a80762d000197>>*

