

CENTRO BOTÍN

Aproximación arquitectónica y análisis estructural
del Centro Cultural Botín proyectado por Renzo Piano.

Trabajo Final de Grado, curso 2017-2018
Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Autor Miguel José Colina Marco
Tutor Ernesto Jesús Fenollosa Forner



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA



This page intentionally left blank.

Agradecimientos y motivación personal

Me gustaría comenzar el trabajo explicando los motivos por los que decidí realizar un análisis estructural del Centro Botín y agradecer a todas las personas que lo hicieron posible.

Este trabajo no se habría realizado sin la pasión y el entusiasmo por el diseño de las estructuras que inculcaron en mí los profesores Ernesto Fenolosa y Eugenio Abdilla. Desde que asistiera a sus clases, he visto la arquitectura siempre desde el punto de vista de las estructuras y, conforme terminaba la carrera, vi claro que mi TFG seguiría por el mismo camino.

El verano pasado estuve realizando prácticas en un estudio de Nueva York y vivía en la calle Broadway con la 125th, a dos manzanas de dos edificios de Renzo Piano que estaban en su fase final de construcción. Eran un centro de arte y un centro de ciencias para el campus de Columbia University. No les había prestado atención hasta que una noche de bares, volviendo a casa en metro, me pasé de parada y tuve que volver caminando y pasar por delante del Jerome L. Greene Science Center. Entonces me fijé en un detalle de la estructura de la fachada. En planta baja, los esbeltísimos pilares metálicos hechos con perfiles UPN que soportaban un muro cortina de unos 9 metros no tocaban el suelo, sino que flotaban a un palmo del pavimento y podías pasar el pie bajo ellos (y eso hice). Evidentemente, la estructura colgaba desde arriba y estaba arriostrada en diferentes puntos de su longitud desde potentes zunchos metálicos. Pero ese pequeño detalle —que se pudiera ver la sombra de los perfiles cuando más bien se espera que toquen el suelo— daba una cierta sensación de ligereza a un edificio que en otros aspectos era muy masivo. Desde aquel momento he estado buscando la oportunidad de aprender más sobre la obra del arquitecto italiano.

Un mes más tarde, cuando Ernesto propuso en clase una lista de edificios sobre la que realizar un posible TFG, recomendó el Centro Botín de Renzo Piano «*para quien le guste sufrir*» por la poca información disponible acerca de su estructura y por su complejidad. Pero por el gusto que le había cogido al arquitecto y por querer entender cómo funcionaban las estructuras de sus edificios, terminé por embarcarme en esta aventura.

Casi un año después, puedo decir que ha merecido la pena. Este trabajo me ha aportado muchas cosas. He analizado a fondo el comportamiento estructural de un edificio. He aprendido a valorar la arquitectura desde una nueva perspectiva. He estudiado y empezado a admirar la obra de Renzo Piano. He aprendido a realizar un trabajo académico. Y finalmente, he viajado a Santander y allí he podido disfrutar de otra de mis pasiones, la fotografía. Las instantáneas que aparecen en este trabajo fueron fruto de ese viaje.

Por tanto, quisiera agradecer su ayuda a mi tutor Ernesto, por su indispensable asistencia desde los comienzos de este TFG. A Eugenio y al resto de profesores de la escuela que tanto se esfuerzan en hacer de sus alumnos arquitectos competentes. A todos los compañeros y amigos que he encontrado en esta escuela, que indudablemente me han hecho mejor persona. A Valentina Modano y a Miguel Ángel López por ser un apoyo constante durante este año —dentro y fuera de la escuela—. Y a mis padres, Rafaela y Miguel, porque me han ayudado siempre que lo he necesitado y también cuando no.

Espero que disfruten de esta lectura como yo he disfrutado durante su realización.

RESUMEN

A orillas de la bahía de Santander descansa desde el verano de 2017 el Centro Botín, un edificio que pretende otorgar a su ciudad un programa de arte y cultura y a la vez formar un nuevo espacio urbano de referencia. Pese a sus dimensiones, el arquitecto Renzo Piano buscó crear un volumen ligero, sutil, amable con los santanderinos y fuertemente relacionado con su entorno. Todo esto conllevaría una serie de exigencias estructurales que harían del centro un auténtico reto constructivo. A la búsqueda de cierta ingravidez formal se le sumarían grandes luces de 20 metros, voladizos de hasta 22, complejas curvaturas en su envolvente y todo ello realizado con perfiles metálicos de gran esbeltez. El presente trabajo analizará las cualidades arquitectónicas del edificio, así como su estructura, a fin de comprender cómo los valores funcionales y estéticos del edificio afectaron al diseño de esta. Se realizará un modelo informático para conocer a fondo el funcionamiento de su complejo entramado metálico y proponer soluciones a los problemas que de él deriven con el objetivo de interiorizar su lógica estructural y así poder aplicar lo aprendido a futuros proyectos.

PALABRAS CLAVE

Estructura metálica, cerchas, análisis arquitectónico, RPBW, Fundación Botín

ABSTRACT

Built by the sea, the Botín Centre in Santander completed in 2017 aims to promote new cultural and art programs for its city and to create a quality urban space to provide its citizens. Although big in size, Renzo Piano wished to create a light, subtle building, kind with the people of Santander and strongly related to its surroundings. Therefore, the building's design had to incorporate a series of structural requirements and was poised to become a constructive challenge. The centre, which had to emit a sense of ingravity, included 20-meter spans and even longer cantilevers. Its structure had to be light, and thus be composed of slim metal trusses. This thesis will analyze both the architecture and engineering qualities of the building so as to comprehend how the aesthetic and functional goals of the Botin Centre helped shape and define its structure. A computer model will be made to fully comprehend the nature of the complex metal structure. Moreover, this study will propose solutions to any structural challenges that may arise with the intent of internalizing the behavior of these type of constructions and to gain the ability of using this knowledge in future projects.

KEYWORDS

Metal structure, trusses, architectural analysis, RPBW, Botín Foundation

RESUM

A la vora de la badia de Santander descansa des de l'estiu de 2017 el Centre Botí, un edifici que pretén atorgar a la seua ciutat un programa d'art i cultura i alhora formar un nou espai urbà de referencia. Malgrat les seues dimensions, l'arquitecte Renzo Piano va buscar crear un volum lleuger, subtil, amable amb els santanderins i fortament relacionat amb el seu entorn. Tot açò comportaria una sèrie d'exigències estructurals que farien del centre un autèntic repte constructiu. A la cerca de certa ingravitació formal se li sumarien grans llums de 20 metres, volades de fins 22, complexes curvatures en la seua envoltent i tot això realitzat amb perfils metàl·lics de gran esveltesa. El present treball analitzarà les qualitats arquitectòniques de l'edifici, així com la seua estructura, a fi de comprendre com els valors funcionals i estètics de l'edifici van afectar al seu disseny. Es realitzarà un model informàtic per a conèixer a fons el funcionament del seu complex entramat metàl·lic i proposar solucions als problemes que d'ell deriven amb l'objectiu d'interioritzar la seua lògica estructural i així poder aplicar allò que s'ha après a projectes futurs.

PARAULES CLAU

Estructura metàl·lica, encavallada, anàlisi arquitectònic, RPBW, Fundació Botí

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Agradecimientos y motivación personal	3	4. Modelo estructural	46
Resumen y palabras clave	4	4.1. Simplificaciones adoptadas	47
Índice de contenidos	6	4.2. Modelización del edificio	48
1. Introducción	8	4.3. Modelización de las cargas	54
1.1. Objetivos y metodología	9	4.4. Combinaciones de cargas	56
1.2. El arquitecto	10	5. Análisis estructural	58
1.3. Santander y la Fundación Botín	13	5.1. Consideraciones iniciales	59
2. Proyecto	16	5.2. Comportamiento global.....	64
2.1. Concepción del proyecto	17	5.3. Comprobación de la flecha.	66
2.2. Idea y programa	22	5.4. Esfuerzos y dimensionado: pilares.....	70
2.3. Materialidad	30	5.5. Esfuerzos y dimensionado: vigas principales.....	77
3. Estructura y construcción	34	5.6. Esfuerzos y dimensionado: vigas secundarias.....	84
3.1. Descripción general.....	35	6. Conclusiones	92
3.2. Descripción por elementos.....	38	7. Bibliografía y fuentes	104
3.3. Construcción.....	42	7.1. Bibliografía.....	105
		7.2. Referencias bibliográficas	108
		7.3. Referencia de imágenes	111

1. INTRODUCCIÓN

Objetivos y contexto arquitectónico e histórico.



1.1. Objetivos y metodología

Hace poco más de un año se inauguró en Santander el Centro Botín, proyectado por Renzo Piano para revitalizar la programación cultural de la ciudad y crear un nuevo espacio urbano de calidad. En su proyecto, el arquitecto genovés habló de ligereza, flotabilidad y atención con el lugar. Para ello, a pesar de su considerable tamaño, el centro se apoya sobre esbeltos pilares y vuela varios metros sobre la bahía de Santander. Un complejo entramado metálico se encarga de resolver estos aspectos, pero por lo reciente de su construcción, todavía no ha sido objeto de estudio en el ámbito académico.

El objetivo de este trabajo consiste en sintetizar las cualidades arquitectónicas del Centro Botín, así como reconstruir, comprender y analizar la estructura de este. Con ello se pretende discernir cómo los valores funcionales y estéticos del edificio afectaron al diseño de su sistema estructural y qué estrategias se eligieron para solventar sus grandes vuelos.

Para tal fin se propone la siguiente metodología. En primer lugar, se realizará un análisis del Centro Botín —apoyado en una visita en persona al edificio— que determine los valores arquitectónicos con los que fue proyectado. En segundo lugar, se recopilará toda la información pertinente a la estructura del centro y se creará un modelo tridimensional lo más cercano posible a la realidad usando AutoCAD y el software de cálculo Architrave. A este modelo le serán aplicadas unas cargas y secciones de barra orientativas para su posterior cálculo. Seguidamente, los resultados de la simulación se analizarán y contrastarán con las exigencias de seguridad del Código Técnico de la Edificación para verificar su cumplimiento y proponer unas soluciones factibles que satisfagan las necesidades estructurales del conjunto. Finalmente se extraerán unas conclusiones que permitan adaptar los conocimientos adquiridos al diseño de estructuras de similares condiciones.

1.2. El arquitecto

Nacido en una familia de contratistas, Renzo Piano (Génova, 1937) es sin duda uno de los arquitectos más prestigiosos del pasado y presente siglo [Figura 1]. Cuenta Piano que, cuando con diecisiete años compartió con su familia la idea de estudiar arquitectura, su padre le respondió: «¿Por qué quieres ser simplemente un arquitecto, cuando puedes ser un constructor?»^[1]. La respuesta marcaría su trayectoria profesional y su obra, en la cual tecnología, construcción y diseño han formado siempre un intenso diálogo.

Estudió arquitectura en el Politécnico de Milán para graduarse en 1964 y, tras unos años de enseñanza en la universidad, consiguió el encargo que le lanzaría a la fama. En colaboración con su compañero Richard Rogers, consiguió ganar el concurso público para un centro de arte en el antiguo barrio Le Marais de París [Figura 2].

Figura 1: El arquitecto italiano Renzo Piano.



Tan admirado como criticado desde su concepción, el Centro Pompidou (1971-79) ha sido definido en varias ocasiones por el arquitecto como una «provocación»^[2]. La polémica giró en torno a la radicalidad de la propuesta, la masividad del conjunto en una zona residencial tan histórica, la indiferencia con el entorno y la decisión de dejar la estructura y sus coloridas instalaciones completamente vistas en fachada. El edificio, sin embargo, le valió reconocimiento global y sigue hoy recordándose como una de sus obras más icónicas.

Al año siguiente de completar el centro, se fundó Renzo Piano Building Workshop (RPBW), el estudio genovés a través del cual desarrollaría el resto de sus obras. En ellas pronto se empezaría a ver los elementos que acabarían caracterizando a Piano: la importancia y claridad estructural, la ligereza, el uso de la luz natural, y su elección de materiales, entre otros.

Figura 2: Centro Georges Pompidou en París.



Durante su carrera, el arquitecto genovés ha diseñado obras de todo tipo de escalas, incluyendo un aeropuerto internacional en Osaka, un estadio de fútbol en Italia, un puente en Kumamoto de casi un kilómetro de longitud o el rascacielos *The Shard* en Londres [Figura 3]. Apareciendo con más frecuencia en su obra los proyectos de gran dimensión, Piano también ha sabido proyectar a una escala más íntima con gran sensibilidad. Muestra de ello es el *Cy Twombly Pavilion* en Houston^[3], una pequeña galería cuya cubierta —formada por varias capas que filtran sucesivamente los rayos solares— permite la entrada de una tenue y difusa iluminación cenital. El sistema de capas dispone de elementos motorizados para regular la cantidad de luz que entra a lo largo del día.

Cinco años antes, también en Houston, Piano ya experimentó con la luz natural en el que sería uno de sus proyectos más aclamados, la galería para la Menil Collection. En este caso, la cubierta estaba formada por grandes pero finísimas

piezas de hormigón armado —apodadas *hojas*^[2]— integradas en unas ligeras celosías de acero [Figura 4]. Estas piezas, además de filtrar la luz haciéndola rebotar entre sus caras para llegar al interior, servían de elemento de cobertura del edificio. A pesar de su aspecto más sobrio y sencillo, se trata de un edificio altamente tecnológico. La Menil Collection demuestra cómo el objetivo de Piano es el de humanizar la tecnología, alejándose de interpretaciones industriales y frívolas de esta. Busca en cambio utilizarla para beneficio de la arquitectura, para enriquecer sus espacios. En palabras del arquitecto:

«Paradójicamente, la Menil Collection con su gran serenidad, calma y atenuación, es mucho más moderna, científicamente hablando, que [el Centro Pompidou]. La apariencia tecnológica del [Pompidou] es una parodia. La tecnología usada para la Menil Collection es mucho más avanzada (en sus estructuras, materiales, instalaciones de control climático), pero no es ostentosa»^[2].

Figura 3: RPBW también diseñan rascacielos como *The Shard*.



Figura 4: Menil Collection en Houston, Texas.



Efectivamente, su obra es altamente tecnológica, pero el estudio genovés está siempre persiguiendo nuevas formas de poner esa tecnología al servicio del hombre.

El Museo de la Fundación Beyeler en Suiza es un ejemplo más de sus galerías de arte con luz cenital, en esta ocasión gracias a una cubierta formada por paneles de vidrio sujetos por una ligera estructura metálica. En este proyecto, a diferencia de sus anteriores galerías, entra en juego una puntual pero potente relación con el exterior. Si bien durante sus inicios Piano prestaba poca atención al lugar, en los sucesivos proyectos que desarrolla va ganando fuerza un regionalismo que busca caracterizar la arquitectura con su contexto. Ejemplos de esta tendencia son el Centro Cultural Jean-Marie Tjibaou en Nueva Caledonia, el Pabellón IBM, la Exposición Internacional Cristóbal Colón en Génova, o las propias oficinas de RPBW^[4] también en Génova [Figura 5]. En ellos, ya sea por la relación directa entre espacios, por las visuales generadas, o por la referencia que hacen los elementos arquitectónicos a formas propias del lugar, los edificios consiguen formar un estrecho vínculo con su entorno.

Su continuo uso de estructuras metálicas responde a la voluntad de crear edificios ligeros. No se trata meramente de una cuestión estética, sino que, para Piano —con su naturaleza de constructor—, aprovechar al máximo los materiales de los que dispone implica comprender su naturaleza y eliminar lo superfluo, manteniendo únicamente lo esencial.

Todos estos rasgos del arquitecto: el uso humanista de la tecnología, la liviandad, la transparencia, la elección de los materiales, de la luz, la relación con el lugar, etc. le han ido acompañando durante sus años de profesión, y son necesarios para entender sus obras.

En 1998 se convirtió en el segundo arquitecto italiano en ganar el premio Pritzker de arquitectura^[5], ocho años después de que Aldo Rossi fuera galardonado. En la ceremonia, que tuvo lugar en la Casa Blanca, el presidente Bill Clinton, citando a Frank Lloyd Wright, aplaudió a Piano diciendo que «*todo gran arquitecto es necesariamente un gran poeta. Debe ser un gran intérprete de su edad, de su tiempo. Renzo Piano ha demostrado serlo categóricamente, y le felicitamos y damos gracias por los regalos que ha hecho a nuestra época*»^[6].

Y es cierto que Renzo Piano es un gran poeta-arquitecto. Es un poeta de la luz, con la que juega para dotar calidez y ligereza a sus espacios. Es un poeta de la tecnología^[7], cuando a través de la sofisticación en sus edificios busca el punto de encuentro entre confort y estética. Pero, sobre todo, es un poeta humanista, porque entiende la arquitectura como un servicio que ofrecer a las personas, para mejorar sus ciudades y enriquecer sus vidas.

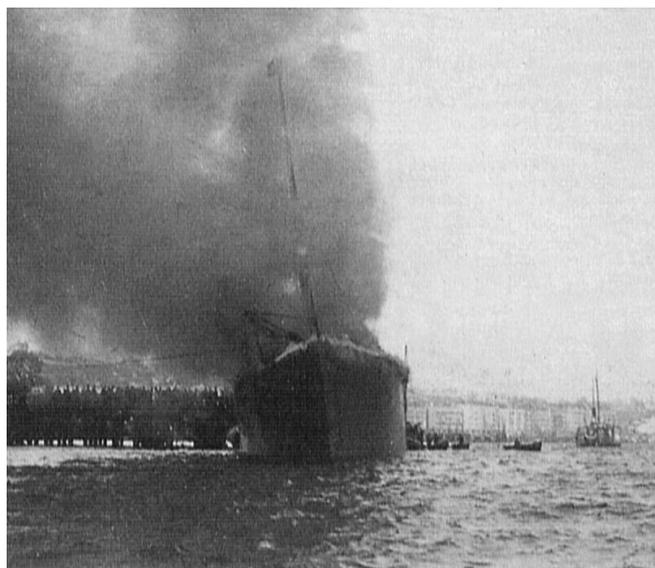
Figura 5: El estudio de RPBW en Génova.



1.3. Santander y la Fundación Botín

Santander es, ante todo, una ciudad marítima. Su debatido origen sugiere que fue fundada por el emperador Augusto como puerto romano *Portus Victoriae*^[8] durante las guerras cántabras (29-19 a.C.)^[9]. Pasaría a ser establecida como el Fuero de Santander por el rey Alfonso VIII el año 1187^[10] y le sería otorgado el título de ciudad en 1755 por Fernando VI^[11]. Desde su fundación, su principal característica ha sido estar situada alrededor de una gran bahía —el mayor estuario del norte de España—. Gracias a ella, Santander pudo construir su puerto a resguardo del fuerte oleaje del mar Cantábrico y así convertirse en un importante punto de comercio marítimo. La expansión de la ciudad se ha realizado en parte ganando terreno al mar, habiéndose reducido a lo largo de los dos últimos siglos la superficie total de la bahía en un 46% y su línea de costa en un 83%^[12].

Figura 6: *Cabo Machichaco, en llamas antes de la explosión.*



A finales del siglo XIX, Santander quedaría marcada por la explosión del vapor *Cabo Machichaco* en 1893, atracado en los muelles de Maliaño con medio centenar de toneladas de dinamita en su bodega [Figura 6]. El accidente, que dejaría 590 fallecidos incluyendo la mayoría de las autoridades de la ciudad^[13], supondría el desplazamiento hacia el sur del puerto, por el miedo de la población a que algo similar se repitiese^[14].

Medio siglo después tendría lugar el segundo de los dos grandes desastres que condicionarían el desarrollo urbano de la ciudad. En 1941 el centro histórico de la ciudad quedó destruido a raíz de un incendio que fue propiciado por los fuertes vientos provenientes de la bahía^[15]. De los cuatrocientos edificios afectados, sólo la catedral y una iglesia fueron reconstruidos, permitiendo la creación de un nuevo trazado para el centro de Santander [Figura 7].

Figura 7: *Daños del incendio tras cinco años (1946).*





Figura 8: Cartel de la Exposición de Artes e Industrias, 1905.

LOS JARDINES DE PEREDA

En 1905 se inauguran los jardines de Pereda coincidiendo con la Exposición de las Artes e Industrias de Santander [Figura 8]. Los terrenos donde se situaron habían sido utilizados durante el anterior siglo como muelle portuario^[16]. A pesar de su proximidad, ni los jardines ni los edificios cercanos fueron afectados por el incendio de 1941. Al soplar el viento propagador desde el sur, desde la bahía, y estando el origen del incendio unas pocas manzanas al norte y al oeste, el área que rodeaba los jardines se salvó de las llamas [Figura 9].

Conectando los jardines con el resto del frente marino se encuentra el paseo de Pereda, también llamado así en recuerdo del novelista cántabro José María de Pereda. En el recorrido se pueden encontrar muchos de los edificios y monumentos históricos de la ciudad como el Palacete del Embarcadero, el Edificio Banco Santander, la Grúa de Piedra o el famoso monumento a los raqueros [Figura 10].

Figura 9: Los jardines de Pereda y la grúa de piedra, en 1957.

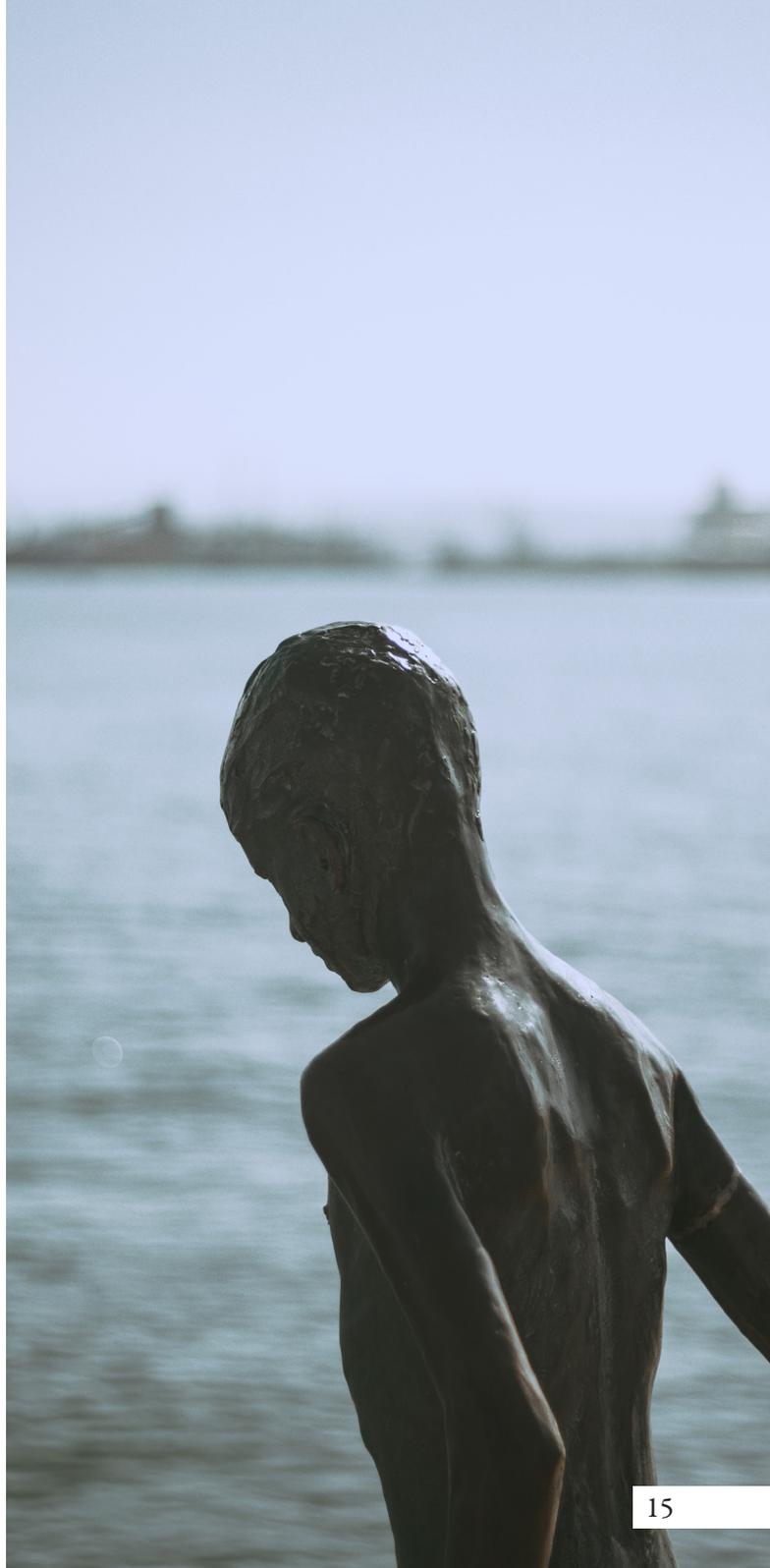


LA FUNDACIÓN BOTÍN

También ligado a la historia de la ciudad está el Banco Santander. En 1857, por medio de un real decreto la reina Isabel II autoriza la creación de la entidad bancaria, cuya principal función estuvo inicialmente ligada al comercio marítimo entre el puerto de Santander e Iberoamérica. Desde que Emilio Botín y López fuera nombrado en 1920 primer presidente fijo del banco, la entidad estuvo fuertemente ligada a la familia Botín y, durante más de un siglo de actividad, se convirtió en uno de las mayores grupos financieros del mundo^[17].

En 1964 Marcelino Botín, consejero del Banco Santander y su esposa Carmen Yilera crearon la Fundación Botín, independiente del banco cántabro, con el objetivo de «*paliar las necesidades y promover el desarrollo social*» de Cantabria y de «*contribuir al bienestar social*» de la sociedad española^[18]. En sus inicios las obras de beneficencia y auxilio junto con la promoción de becas para el estudio eran sus principales actividades. Desde entonces la fundación fue expandiendo su campo de actuación, incluyendo en el presente siglo programas de arte, cultura, educación, ciencia, acción social y desarrollo rural^[19].

Figura 10: Monumento a los raqueros de José Cobo Calderón.



2. PROYECTO

Concepción, idea y materialización



2.1. Concepción del proyecto

En junio de 2010, la Fundación Botín anunció la creación de un centro cultural a orillas de la bahía de Santander con la intención de transformar la zona portuaria en una nueva área de uso público y de formar una plataforma que impulsase el programa social de arte y cultura de la fundación. Emilio Botín, por aquel entonces presidente de la fundación, había ofrecido a Renzo Piano el encargo del centro. Ambos amaban el mar. Ávido marinero^[20], el arquitecto ya había demostrado una gran preferencia por proyectos situados junto al océano y, el banquero, cuenta Piano, era pescador «*Emilio era un pescador, y yo un marinero*»^[21]. Botín no era ajeno a la arquitectura de renombre ya que, en la década anterior, el irlandés Kevin Roche (Premio Pritzker, 1982) había proyectado la Ciudad Grupo Santander para su entidad financiera^[22]. Así nace el proyecto del Centro Botín, para el cual Piano debía diseñar también la actuación urbanística que acompañara al edificio^[23]. A partir del anuncio del proyecto, se acelera la

fase de diseño, que llevaba en desarrollo varios meses, incluyendo una visita del arquitecto a la ciudad en septiembre del mismo año^[24].

El proyecto fue concebido en colaboración con el Ayuntamiento de Santander y la Autoridad Portuaria y diseñado por RPBW en conjunto con Luis Vidal + Arquitectos^[25]. La Fundación Botín invirtió 50 millones de euros pese a que el terreno y el centro serían propiedad del Estado^[23]. El Centro Botín, además, pasaría a formar parte de la candidatura de Santander para Capital Europea de la Cultura 2016.

En palabras de Emilio Botín durante la presentación del edificio, «*[el proyecto] conseguirá tres objetivos: generar un nuevo espacio urbano en el centro de Santander, dotar a nuestra región de un centro de arte de primer nivel, y ser un centro de formación de la creatividad pionero en el mundo*»^[26].



Figura 11: *Diseño original del centro y la pasarela.*

El proyecto original presentado en septiembre de 2011, todavía en fase prematura, ya mostraba la pareja de edificios que terminarían componiendo el complejo, aunque con una geometría formada por planos ortogonales [Figura 11]. La posición de los edificios era también distinta. Inicialmente se pensó en una simbólica implantación frente al histórico edificio del Banco Santander [Figura 12], que pasó a ser la sede central de la entidad financiera en 1923 y que ahora es su sede social^[27]. Esta implantación situaba el edificio de Renzo Piano alineado con el trazado regular de la ciudad, mientras que la dimensión del centro coincidía con el volumen del Edificio Banco Santander.

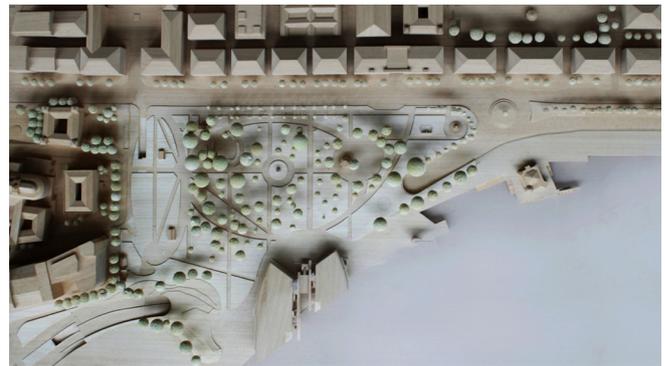
Figura 13: *Posición original, alineado con la sede social.*



Figura 12: *Sede social del Banco Santander.*

La pasarela situada entre los dos volúmenes del conjunto, elemento fundamental del proyecto, tenía en su origen una función muy distinta. Originalmente, la Calle del Muelle de Calderón —una vía de elevado tráfico que forma parte del cordón de tránsito que recorre la bahía— separaba la ciudad y los jardines de Pereda del mar. El edificio de Piano, que iba a estar situado a orillas de la bahía, iba a quedar separado de los jardines por el paso de los vehículos. Por tanto, la pasarela, inicialmente de mucha mayor longitud, tenía la función de conducir a los peatones al Centro Botín sobrevolando el tráfico de forma segura. El eje de la pasarela coincidía con el portentoso arco del Edificio Banco Santander, empezando

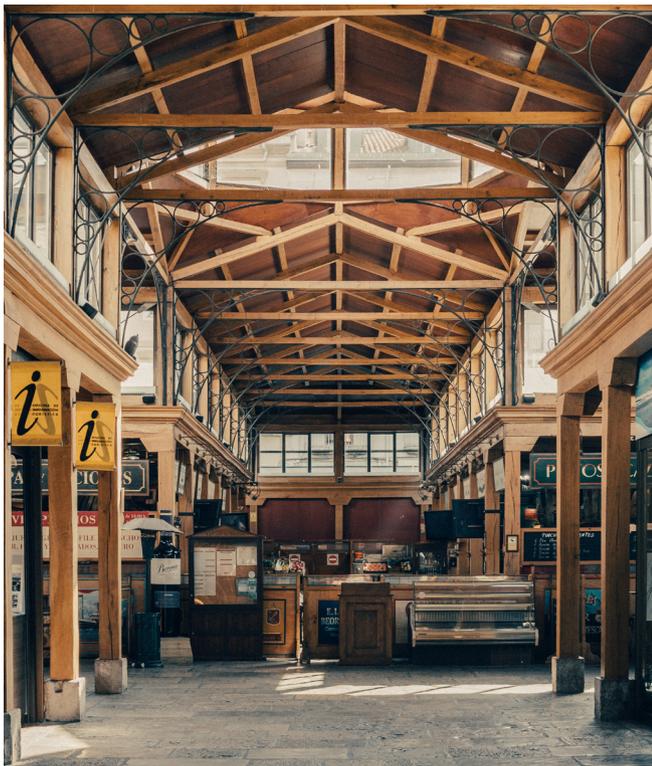
Figura 14: *Siguiente versión, alineada al Mercado del Este*



a pocos metros de éste al otro lado del Paseo de Pereda. De esta manera se potenciaba todavía más la relación entre ambos edificios [Figura 13]. La vía era una suerte de cordón que unía las dos entidades: la Fundación Botín y el Banco Santander.

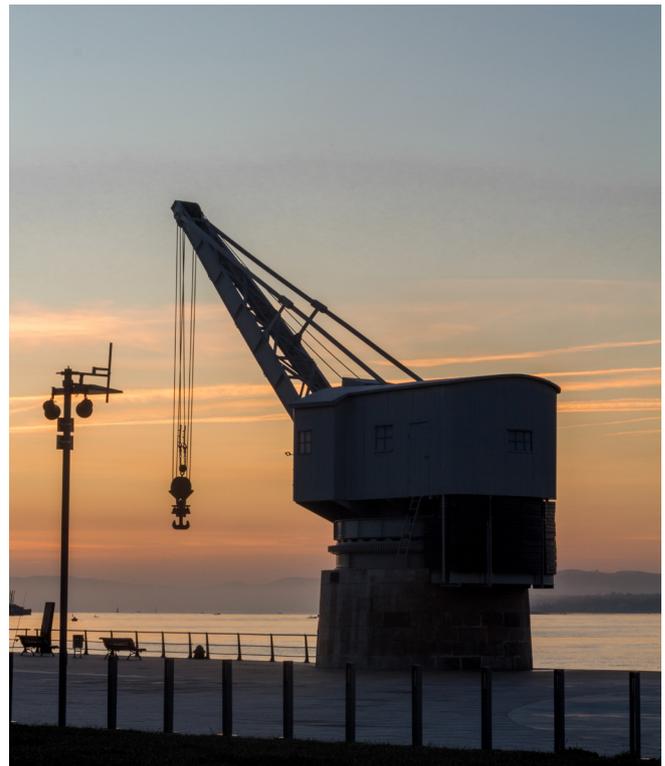
Sin embargo, tras la primera presentación del proyecto, tras haberlo sometido a debate público, y tras escuchar las sugerencias de los santanderinos, se empieza a llevar a cabo un rediseño que cambiaría la forma, posición y tratamiento urbano de la propuesta. En diciembre de 2011 se presenta la segunda propuesta del Centro Botín^[28]. El primer gran cambio fue la posición de los dos volúmenes del edificio respecto del parque y de la trama urbana [Figura 14].

Figura 15: El Mercado del Este, ahora alineado con el centro.



En lugar de su colocación en frente de la sede social de Banco Santander, el centro se desplaza 100 metros al suroeste. El Centro Botín pasa entonces de compartir un eje formal y comunicativo con el edificio de la entidad financiera, a hacerlo con el también histórico Mercado del Este [Figura 15]. Con este gesto, Piano señala la intención de ofrecer a los santanderinos el centro cultural, evidenciando que no se trata de un centro de la Fundación Botín, sino más bien de un centro para la ciudad de Santander. Este cambio también evitó el desplazamiento de la histórica Grúa de Piedra —una de las críticas que había recibido la propuesta original— que iba a ser desmontada y trasladada a otro emplazamiento [Figuras 9 y 16].

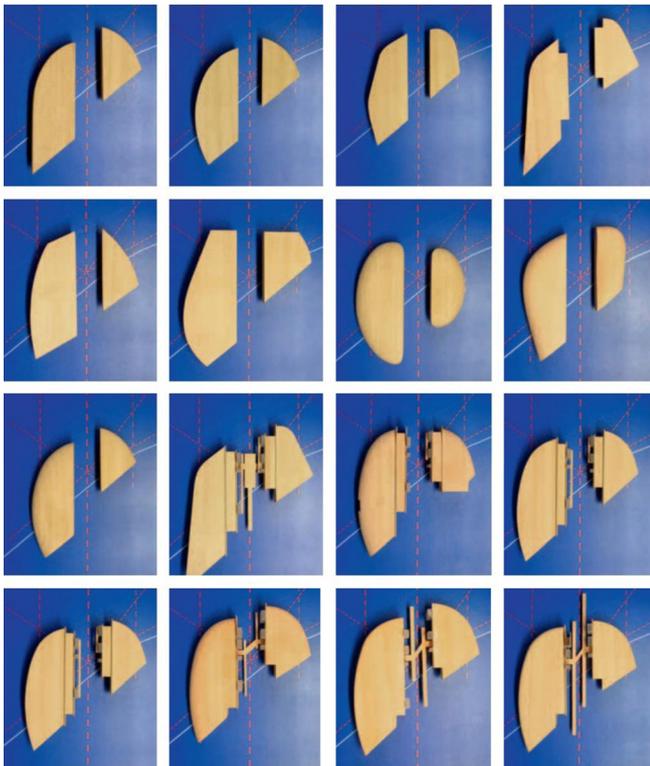
Figura 16: La Grúa de Piedra, en su posición original.



En segundo lugar, el rediseño afectó a la forma de los volúmenes que, tras un profundo estudio volumétrico por medio de maquetas^[29], pasaron de estar formados por planos ortogonales a una composición más orgánica, curva y suave [Figura 17].

El tercer cambio, y sin duda el más significativo, fue la decisión de soterrar el viario de la Calle del Muelle de Calderón. Respondiendo a la preocupación de que el tráfico fuera a separar el edificio cultural del parque que lo acompañaba y de la ciudad, la Fundación Botín se comprometió a financiar la creación de un túnel que redirigiera el paso de vehículos. Así, con una inversión adicional de 15 millones de euros, el presupuesto del proyecto ascendía a 77 millones incluyendo

Figura 17: Iteraciones sobre el volumen mediante maquetas.



el Centro Botín, el soterramiento del viario y la actuación paisajística sobre los jardines. Esta actuación la llevaría a cabo el paisajista madrileño Fernando Caruncho [Figura 18] en colaboración con RPBW^[30], y se centraría principalmente en la plantación de 141 nuevos árboles y la pavimentación de nuevos recorridos que condujeran hasta el edificio [Figura 19]. La estrategia sirvió para extender los jardines hasta el muelle, doblando su superficie. También colaboró en la propuesta sobre el parque con la realización de cuatro obras la escultora vasca Cristina Iglesias, quien ya había trabajado en numerosos espacios públicos y en museos como el mismo Centro Pompidou. Finalmente, las obras del Centro Botín comenzarían el 19 de junio de 2012^[31].

Figura 18: Caruncho y Piano en la inauguración del centro.



LA IMPORTANCIA DEL PROCESO ITERATIVO

El proyecto del Centro Botín se ha convertido en un claro ejemplo de los beneficios de someter a prueba las ideas y de cuestionar los diseños. La búsqueda de soluciones a través un proceso iterativo que compare y cualifique alternativas garantiza, en muchas ocasiones, la calidad de producto final. El edificio de Piano es también ejemplo de una propuesta destinada a cambiar el espacio público de una ciudad que fue mejorada gracias a la opinión de sus ciudadanos. Cuando un proyecto se somete a debate público recibe, además de las inevitables críticas, nuevas ideas. Y es cierto que originalmente la creación del centro atrajo polémica por su proximidad al mar. Sin embargo, los cambios efectuados desde la idea

original del centro hasta el edificio que se encuentra hoy en Santander son los que han otorgado al proyecto muchas de sus principales fortalezas. Sin la creación del espacio público que supuso el nuevo diseño, hubiese sido difícil que el edificio captase la atención y cantidad de visitantes que recibe. El éxito del centro cultural se debe, en gran medida, al diseño circular de RPBW y a la participación de los santanderinos.

«Diseñar no es una experiencia lineal en la cual tienes una idea, la escribes en un papel, continúa el proceso y así se queda. Más bien es un proceso circular: piensas una idea, la pones a prueba, la reconsideras y la modificas, volviendo una y otra vez al punto de partida». — Renzo Piano^[2].

Figura 19: Relación con el mercado y actuación paisajística sobre los Jardines de Pereda.



2.2. Idea y programa

«... esa luz que es una luz santanderina, típica de esa agua... va a ser el contenido poético del edificio. Todos los edificios tienen cierta magia, pero en este caso, la magia proviene del agua» — Renzo Piano, septiembre de 2011^[26].

Situado en la bahía de Santander, el Centro Botín tuvo, desde sus primeros bocetos, la relación con el mar Cantábrico como fortaleza principal. A diferencia de los edificios que lo rodean, el proyecto de Renzo Piano no considera la bahía únicamente como vistas de las que disfrutar desde la arquitectura. El arquitecto utiliza el mar Cantábrico como inspiración y como herramienta proyectual que determina la mayoría de las decisiones tomadas sobre el edificio.

La intención es clara: devolver el mar a la ciudad. La arquitectura preexistente en la zona se implanta formando una barrera de edificios de entre cuatro y cinco alturas que, de manera casi egoísta, trazan una clara línea separadora entre Santander y su bahía. Limitan así la relación entre la ciudad y el mar e impiden las visuales con la bahía más allá de sus fachadas. Piano, por otro lado, plantea devolver el ambiente marítimo a Santander, para lo cual realiza una serie de estrategias tanto en la forma de los edificios como en la actuación urbanística que los precede.

FORMA

El proyecto está formado por dos edificios: un volumen mayor con una dimensión en planta de 30x85 metros y otro menor de 30x50 metros. Ya desde su forma participan de la relación con el océano, apoyándose en una temática marina para justificar su diseño.

Le Corbusier en *Hacia una arquitectura*, utilizaba la construcción de paquebotes o transatlánticos como ejemplo de diseño funcional, que escapa de los estilos y de las costumbres. «Los constructores de los paquebotes, audaces y sabios, crean palacios junto a los cuales las catedrales son muy pequeñas: ¡y los echan al agua!»^[32].

Renzo Piano levanta con el Centro Botín, su particular paquebote en tierra firme. Los dos cuerpos flotantes elevados sobre el suelo aluden a los barcos sacados del mar y situados sobre la dársena para su mantenimiento. Con su piel metálica continua desde la cubierta a la base y con escasas aperturas recuerda al casco de un navío que, descansando sobre el muelle, está esperando volver al océano.

También evocan, con sus escamas cerámicas y particular geometría, a la fauna marina. Como si dos grandes peces hubieran salido del agua y se hubieran asentado a orillas de la bahía para contemplar, desde una nueva perspectiva, la bahía de Santander.

Dos antecedentes merecen, por sus diferencias y similitudes, especial mención. Vecinos del Centro Botín en el mar Cantábrico, el museo Guggenheim Bilbao de Frank Gehry y el auditorio Kursaal de Rafael Moneo en San Sebastián representan dos ejemplos de edificios culturales situados al borde de cuerpos de agua, que buscaron con su proyección la regeneración urbana^[33].

Las similitudes con el edificio de Gehry empiezan y terminan con la búsqueda de referencias marítimas en sus formas y materiales. Los múltiples pliegues del museo en Bilbao

evocan simultáneamente las velas de un navío, el casco de una embarcación y la anatomía de un grupo de grandes peces de escamas de titanio, haciendo referencia al pasado industrial y metalúrgico de la ciudad [Figura 20]^[34].

Sin embargo, el tratamiento con respecto a la ciudad es fundamentalmente distinto al de la obra de Piano. Mientras que en el proyecto de Santander se habla de sutileza en su implantación, la obra de Frank Gehry se implanta de forma firme y brusca a orillas de la ría del Nervión. Su enorme dimensión y escultórica figura anuncian la intención de ser admirado y de hacerse notar, en contraposición con la actitud discreta que toma Piano. Donde el Guggenheim impone su ego, el Centro Botín procura ser amable.

«El objetivo de este edificio, no es el de ser grande, ni arrogante, sino todo lo contrario, ser muy silencioso, casi tímido de algún modo» — Renzo Piano, diciembre de 2011^[28].

Quizás resulta más acertada la comparación con el Kursaal de Moneo [Figura 21]. La obra del arquitecto navarro está situada junto a la desembocadura del río Urumea en el mar y a escasos metros de uno de sus primeros proyectos, el Edificio

Figura 20: Museo Guggenheim Bilbao.



Urumea. El Kursaal se aleja de la trama urbana donostiarra sin dejar de referenciarla, de una forma muy similar a la que utiliza el Centro Botín para escapar de la ciudad y situarse al borde del mar.

Las similitudes son claras. Ambos proyectos están formados por dos volúmenes de diferente dimensión, con una gran sensibilidad formal y simbólica que, con orientaciones ligeramente distintas entre ellos, parecen estar mirando al mar. El auditorio de San Sebastián intenta hacerse pasar por dos rocas con marcadas aristas, dos minerales cristalinos parcialmente enterrados en la playa, que parecen asomar para recibir en ellos el romper de las olas del siempre bravo mar Cantábrico. Las más suaves formas del centro cultural santanderino buscan participar de esa misma geología, acercándose quizás más a la figura de dos cantos rodados, o dos claras perlas que descansan al borde de la bahía.

«La arquitectura nace en el lugar, se engendra en él y, como consecuencia, los atributos del lugar —lo más profundo de su ser— se convierten en algo íntimamente ligado a ella. Una obra de arquitectura no puede estar donde quiera que sea».
Rafael Moneo sobre el Kursaal^[35].

Figura 21: Palacio de Congresos y Auditorio Kursaal.



ELEVACIÓN SOBRE EL SUELO

Con respecto a su posición, los dos volúmenes que componen el centro cultural están elevados cinco metros sobre el suelo, apoyados sobre delgados pilares metálicos, y separados dieciocho metros entre sí. La elevación sobre el suelo tiene un doble objetivo. Principalmente, busca permitir que los peatones puedan disfrutar de las vistas del mar. Por otra parte, al elevarse, el centro permite liberar su planta baja reduciendo al mínimo el impacto sobre el suelo urbano que genera, y devolviendo de alguna manera el espacio de tránsito a la ciudad. De esta forma se permite a los visitantes acercarse a la orilla sin tener que rodear los edificios y llamándoles a atravesarlos por debajo. Así, mostrando el movimiento de las olas en segundo plano bajo su cuerpo, y ofreciendo el espacio inferior para caminar por él, el Centro Botín invita a esa interacción con el océano que tanto ha buscado Piano [Figura 22].

También merece especial atención el soporte gracias al cual se efectúa esta elevación. Los pilares metálicos de sección cilíndrica, muy ligeros visualmente gracias a su moderada dimensión que oscila entre los treinta y cincuenta centímetros de diámetro según cada elemento, emulan los troncos

de los árboles del parque anexo al proyecto. Consigue así el proyecto extender todavía más la superficie de los jardines hasta llegar a la propia base del edificio, como si los volúmenes del centro formaran parte de la vegetación próxima a ellos.

Con todo ello, el centro consigue su objetivo de pasar desapercibido y de no impedir las vistas del mar. Desde el Paseo de Pereda, un viandante tendría dificultad en localizar la situación del edificio. La masa arbórea de los jardines de Pereda oculta, casi en su totalidad, los dos volúmenes. Estos, con una altura máxima igual a la de la más alta copa de los árboles cercanos, no consiguen asomar sobre el parque. Los soportes se confunden con los troncos de los árboles y finalmente, la bahía y la línea de horizonte visibles bajo el cuerpo arquitectónico terminan de crear el efecto [Figura 23].

Además de estar elevados, ambos volúmenes presentan grandes voladizos tanto en la orientación norte como —en mucho mayor medida— en la orientación sur, sobre la bahía. Así, el centro vuela sobre el mar como si se asomara por el muelle para acercarse todavía más al agua.

Figura 22: *Elevándose sobre el muelle, el Centro Botín permite ver la bahía y reduce su propia presencia.*



ESPACIOS EXTERIORES

Al igual que la implantación del edificio apoyándose ligeramente sobre el suelo busca ser lo menos intrusiva posible y generar un nuevo espacio público, la actuación urbanística sobre los jardines de Pereda es también, cuanto menos, amable con el peatón y la ciudad. Gracias al soterramiento de las vías de tráfico en un túnel de doscientos metros de longitud que discurre bajo los jardines, la actuación permite al parque extenderse hacia el mar incrementando en más del doble su superficie. El nuevo espacio creado significa, además, un nuevo paso peatonal junto al mar que permite a los santanderinos caminar bordeando la bahía donde antes sólo había una zona de aparcamiento.

La relación del edificio con los jardines de Pereda es clara. Ya se ha hablado de los pilares blancos que parecen imitar a los árboles del parque. También existe cierta una relación entre los volúmenes que éstos sostienen con las copas de los árboles. Con el objetivo de hacer al Centro Botín invisible desde la ciudad, para no cortar su relación con el mar, la cota más alta que tiene el edificio de Piano coincide con el árbol más alto de los jardines. Con ello se consigue que la vegetación tape

al edificio y en conjunto con los pilares que permiten ver tras ellos la línea del horizonte, lo hacen desvanecerse [Figura 23].

La actuación en los jardines genera una serie de caminos que, de forma radial, se concentran todos en una gran plaza semicircular que sirve de punto de reunión y de acceso al centro. Lo hacen sobre un pavimento de hormigón azulado que imita los tonos del lugar. Según el propio Caruncho: «*Todo proyecto en su conjunto tiene que tener sentido poético. Por eso el azul del suelo del jardín debe conectarse al blanco del edificio de Renzo Piano, al azul de la bahía y al fondo verdiazul de las montañas de Santander*»^[36].

Una serie de esculturas diseñadas por Cristina Iglesias ornamentan el espacio exterior de acogida y los jardines. La obra, llamada *Desde lo subterráneo*, consiste en cuatro pozos y un estanque construidos de piedra y acero fundido que evocan el agua subterránea, el fondo marino y las capas freáticas^[37]. El estanque, coincidente con la escalera de acceso, recibe a los visitantes y con su nivel de agua cambiante durante el día, en ocasiones toma la forma de una lámina de agua y en otras deja ver su particular fondo marino [Figura 24].

Figura 23: Es apenas visible desde el Paseo de Pereda, por su elevación sobre pilares y reducida altura.





Figura 24: Estanque de «Desde lo subterráneo» dejando ver su ‘fondo marino.’

PROGRAMA

El programa del Centro Botín se divide entre los dos edificios de distintas dimensiones, unidos por la pasarela central. El menor, situado al este, contiene el auditorio principal, las oficinas del centro, y cuatro aulas para la realización de diversas actividades y talleres. A este edificio de planta baja completamente libre, se accede desde la pasarela metálica tanto en primera como segunda planta. Su espacio principal, el auditorio, se sitúa en primera planta con una doble altura orientada hacia la bahía, quedando el océano como telón de fondo de las actuaciones que allí se desarrollen. El auditorio está precedido por un hall, con una partición plegable que separa ambos espacios. El auditorio es cambiante. En ocasiones se trata de una sala completamente vacía y en otras aparecen unas pequeñas plataformas para situar en ellas sillas a modo de gradas y para crear un escenario para actuaciones sobre una tarima. En la segunda planta, sobre las oficinas y el hall, aparecen las aulas orientadas hacia la ciudad.

Por su parte el volumen oeste, de mayor dimensión, contiene las salas de exposición. También se compone de dos plantas, pero, además, dispone de un espacio protegido situado en una porción de su planta baja. Este espacio, llamado el Muelle, se limita con un cerramiento continuo de vidrio que forma su perímetro. En él se sitúan el restaurante-cafetería, la tienda, espacios de estancia y las entradas principales de visitantes.

Debajo del volumen oeste se dispone un espacio cerrado que contiene la cafetería, la tienda del museo, un punto de información y un pequeño espacio de estancia. La zona ocupa únicamente una cuarta parte de la superficie en planta del edificio. Intentando no romper con la idea de planta libre, la envolvente está completamente acristalada, permitiendo ver el mar a través de este espacio. En él se desarrolla una agradable atmósfera gracias a la presencia del océano a escasos metros de distancia y de la potente relación con el espacio público exterior. Además, cuando el tiempo lo permite, el



Figura 25: Gradas exteriores de la actuación paisajística y pantalla gigante colgada del volumen oeste.

exterior de la cafetería se utiliza como terraza al aire libre, a cubierto bajo el resguardo del centro de arte. Originalmente, en esta zona el proyecto iba a incluir en la fachada sur y este unos paños móviles de vidrio como cerramiento que se abrirían y retraerían completamente. Finalmente se terminó por colocar paneles fijos, posiblemente para evitar las complicaciones que pudieran surgir de usar un sistema de piezas móviles tan cerca del mar.

El programa de arte y cultura también se extiende al espacio exterior gracias a la plaza con gradas orientada situada en el parque que mira hacia el volumen oeste. En la fachada del mismo cuelga una gran pantalla de 12x6 metros, similar a la del proyecto del *Auditorio Parco della Musica* de RPBW en Roma^[38], formando así un anfiteatro al aire libre con capacidad para dos mil personas^[39] [Figura 25]. El anfiteatro está ideado como una extensión del pavimento de hormigón azul de la actuación paisajística de Caruncho.

Ambos edificios disponen de una crujía de instalaciones en su costado interior, conectado con la pasarela. En él se resuelven los aseos, los camerinos, salas VIP y el control audiovisual del auditorio, zonas de guardarropa, información y venta de entradas.

Bajo el Centro Botín queda enterrado un sótano donde se encuentra el almacén de las obras de arte y otros suministros del centro, los vestuarios y aseos para empleados, la cocina del restaurante y los espacios de instalaciones. A este espacio se accede desde los ascensores o desde la escalera encerrada en el costado del edificio oeste. También existe una conexión directa con la cocina a través de unas escaleras de caracol situadas en la cafetería. La zona de carga y descarga de suministros está también en el subsuelo, y a ella pueden acceder los vehículos desde el túnel que genera la propuesta.

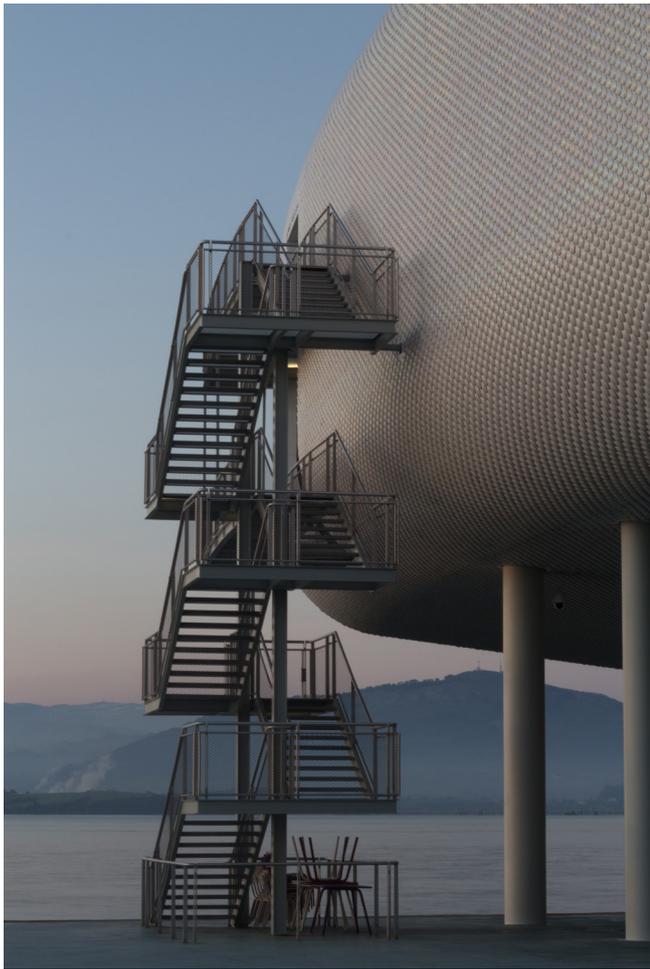


Figura 26: Escalera exterior de emergencia del volumen este.

Los accesos a los volúmenes se resuelven desde la pasarela central, cuyas escaleras exteriores sirven de comunicación vertical. El volumen oeste, a diferencia de su hermano, tiene una escalera interior inserta en una caja acristalada que permite desplazarse entre las plantas del edificio sin necesidad de salir al exterior. Las escaleras dispuestas en las fachadas de cada edificio más alejadas del centro son únicamente para su uso en caso de emergencia [Figura 26].

LUZ

La luz, como decía Piano, tiene un importante papel en el proyecto. Las dos piezas tienen una orientación norte-sur con las respectivas fachadas completamente acristaladas, mientras que las fachadas orientadas a este y a oeste son totalmente opacas. De esta forma, las grandes fachadas acristaladas permiten la entrada de luz natural en los extremos de las galerías, en el auditorio y en las oficinas. Todas las fachadas disponen de estores que permiten regular la iluminación. En planta segunda, un gran lucernario compuesto por 264 paneles de vidrio con protección solar permite la entrada de una uniforme luz cenital que baña de forma indirecta los espacios expositivos. Dispone, además, de un sistema de lamas motorizadas que regulan la cantidad de luz que entra en la sala de forma automática según la hora del día y también de manera manual, para dividir la sala en sectores con mayor o menor iluminación.

Lejos del ejemplo de otras galerías de Piano, sin embargo, el gran juego de luz del Centro Botín no se realiza en el interior del edificio sino en su exterior. Viendo las grandes cualidades lumínicas del lugar, propiciadas por la gran masa de agua a sus pies, el arquitecto decidió utilizar la luz de la bahía como material con el que trabajar. Para ello, convierte la piel de los volúmenes en un receptor de luz que hace que los edificios se fundan con el paisaje. El efecto que consigue es el color cambiante del edificio durante el día. Por las mañanas se tiñe de una luz rosada, durante el día cambia entre gris y blanco y al atardecer recibe tonos naranjas. También, como se detallará en el siguiente apartado, la luz consigue hacer vibrar la fachada del edificio, en conjunto con el oleaje marino. Las pasarelas debían ser de vidrio, la estructura de estas lo más ligera posible y, sus barandillas, hechas de un fino entramado metálico, todo con el objetivo de dejar pasar la luz.

PACHINKO

Los caminos pavimentados dirigen a los visitantes del parque hacia una plaza a nivel de suelo a los pies del Centro Botín. Este lugar sirve de punto de reunión para los visitantes. Sin embargo, quizás más importante resulta dentro del conjunto lo que el arquitecto llama la *piazza de arriba* [Figura 27].

Elevado siete metros sobre el suelo y situado en primera planta, se encuentran un forjado flotante y un sistema de pasarelas que sirve de plaza superior, análoga a la situada a nivel de suelo, un lugar de acceso público que actúa como distribuidor. A él se accede por la ceremonial escalera principal, o por una de las escaleras de doble tramo anexas a cada uno de los edificios. Este conjunto de plataformas es reminiscente del ya empleado por Renzo Piano Building Workshop en el Museo Whitney de Arte Estadounidense en Nueva York, pero siendo las que aparecen en el Centro Botín más ligeras y translúcidas. [Figuras 28 y 29].

Bautizado como Pachinko por Piano, este sistema de pasarelas busca convertirse en un centro de reunión y de paseo elevado desde el que poder comunicarse a través del edificio. *Pachinko* es un adictivo^[40] juego de azar japonés, una suerte de mezcla entre los pinballs y las máquinas tragaperras, que consiste en conseguir conducir unas bolitas de acero hacia un orificio controlando la fuerza con la que son lanzadas al tablero de juego. Las bolitas caen por gravedad y van chocando con centenares de pequeños clavos que les hacen modificar su trayectoria, surgiendo así infinidad de recorridos distintos para cada canica^[41]. De la misma forma que el juego japonés en un mismo tablero genera multitud de rutas distintas para los centenares de bolitas que lo recorren, la pasarela del Centro Botín recoge a las personas y las distribuye en una serie de itinerarios diferentes.

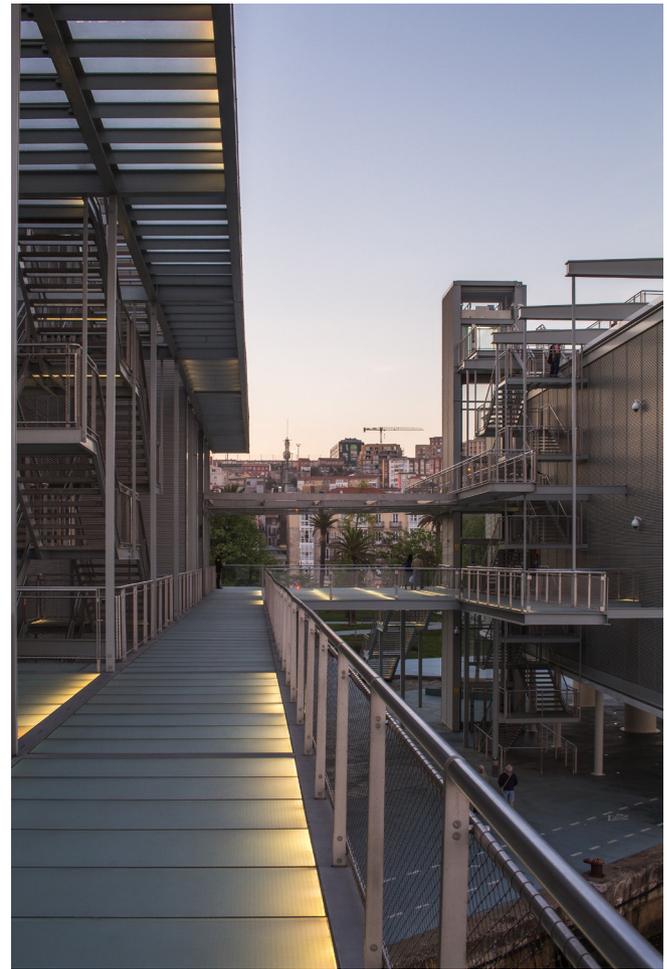


Figura 27: El Pachinko, sistema de plataformas y pasarelas.

Desde el Pachinko se accede a las dos plantas de galerías de arte, al auditorio, a la cubierta del volumen menor, o a las aulas educativas. Más interesante todavía es la pasarela que se acerca al mar, volando varios metros sobre éste, como si de un gran trampolín se tratase y que por sí sola, actúa como principal atracción para cualquier viandante para subir al sistema de pasarelas, aunque éste no desee visitar el edificio.

2.3. Materialidad

Bastan unos minutos contemplando las diferentes obras de *Renzo Piano Building Workshop* para darse cuenta de los dos materiales preferidos por el estudio: el acero y el vidrio. Abundan los ejemplos de proyectos en los que Piano combina estructuras vistas de acero con amplios paños acristalados como en el Centro Pompidou, el Museo Whitney [Figura 28], el aeropuerto internacional de Kansai o incluso en el sistema de fachada para el equipo de Luna Rosa en Valencia. También en edificios donde por cuestiones estructurales el soporte principal es de hormigón armado, como el rascacielos The Shard en Londres o el edificio del New York Times en Manhattan, la fachada está compuesta por atractivos entramados metálicos o cerámicos que conforman los muros cortina y que les dotan de un carácter único. El uso de estos no es siempre inexcusable —en muchos de sus edificios quedan en segundo plano ante otros materiales— pero su ausencia o

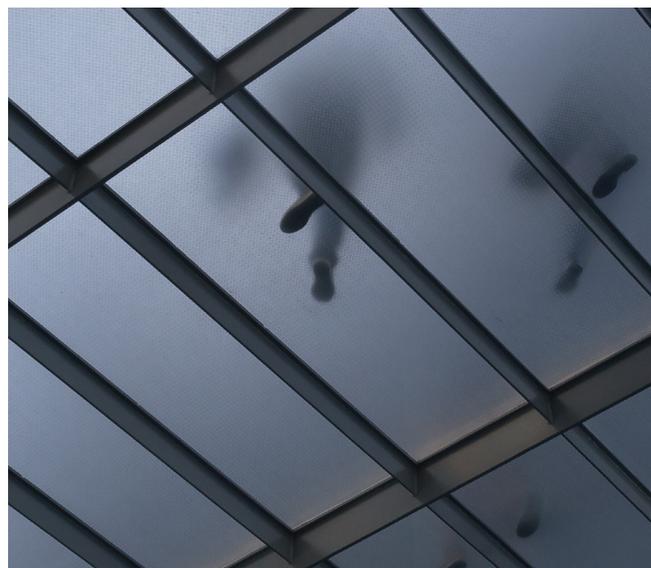
Figura 28: Pasarelas del Museo Whitney en Nueva York.



falta de protagonismo suele estar justificada por el entorno y el contexto. En el Museo de Arte Moderno Astrup Fearnley en Oslo o el Centro Cultural Jean-Marie en Tjibaou, por ejemplo, la madera es la principal protagonista. El estudio de Piano ve en el acero y el vidrio ligereza, sutileza y eficiencia. Es por ello que, por las necesidades del proyecto, para el Centro Botín se decide usar estos materiales.

Además de la estructura portante oculta del edificio, son de acero las superficies, soportes y barandillas de las pasarelas flotantes, creando un atractivo entramado metálico. También están hechas de acero las numerosas escaleras del edificio y los pilares vistos en planta baja. El pavimento de las pasarelas, así como las huellas de las escaleras, están resueltos con paneles de vidrio con un tratamiento superficial para evitar el deslizamiento cuando la superficie esté mojada. Este acabado crea

Figura 29: Vista inferior del Pachinko.

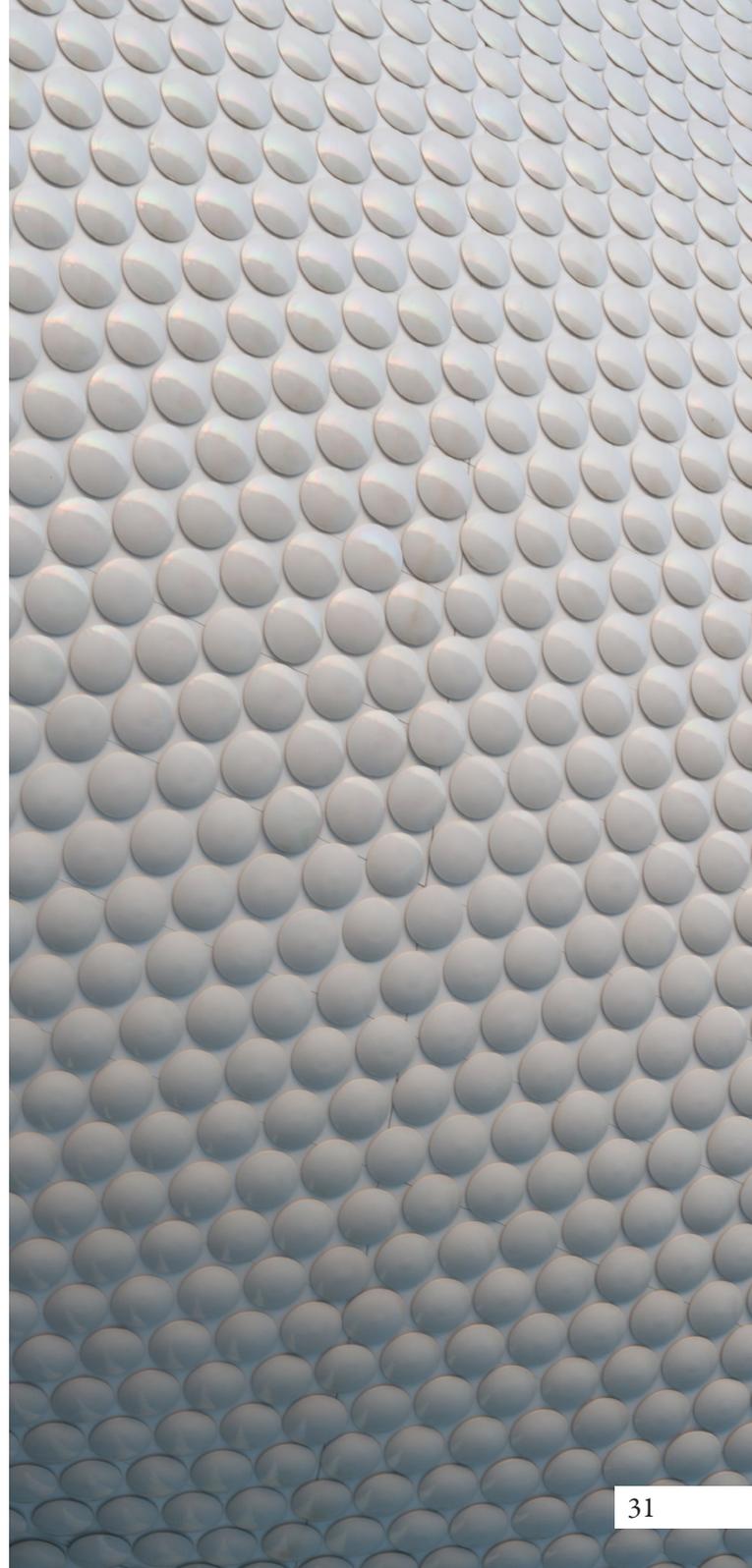


un efecto translúcido que difumina la luz y crea una atractiva imagen. Cuando se mira desde el piso inferior, son visibles las suelas de los zapatos de los visitantes, acompañadas de una sombra de sus dueños, y éstas «*hormiguean*» de un lado a otro del Pachinko en grupos o en solitario [Figura 29]. La barrera protectora en las barandillas del Pachinko y las escaleras se compone principalmente de un tejido metálico que parece evocar las redes de pescadores, aunque en ocasiones puntuales se resuelven con un panel de vidrio.

Junto a esta combinación de dos materiales, el verdadero carácter de los edificios aparece en la piel que los envuelve con la colocación de 280.000 pequeños discos cerámicos, de entre 137 y 156 mm de diámetro, adaptados a la curvatura del edificio, y dispuestos aproximadamente cada 15 cm [Figura 30]. Quedan roscados a unas bandejas de aluminio que recubren la cubierta. Las piezas fueron fabricadas por el ceramista Toni Cumella^[42] cuyos trabajos incluyen colaboraciones con Enric Miralles o Jean Nouvel, y quien ha trabajado en proyectos como el Mercat de Santa Caterina, la construcción de La Sagrada Familia o la restauración del Parc Güell^[43]. El sistema de fachada fue desarrollado por la empresa Disset, que posteriormente realizó un estudio de viabilidad en colaboración con la *Universitat Internacional de Catalunya* y la *Universitat Politècnica de Catalunya*^[44].

De color nacarado, esmaltadas, con un acabado irisado reflectante^[45] y forma ondulada, las piezas reciben y reflejan la luz del sol, el movimiento de las olas y el brillo del mar^[46]. Al volar los volúmenes sobre el agua y al estar orientados al sur, los rayos de luz rebotan sobre la superficie marina y se dirigen a la base del edificio, donde se encuentran con las perlas

Figura 30: Piel cerámica recubriendo el edificio oeste.



cerámicas que tiñen así de luz el espacio bajo la cáscara metálica. Dicha luz es cambiante y transformadora gracias al oleaje de la bahía, que proyecta unos reflejos y destellos lumínicos ondulantes, otorgando a la fachada un carácter vibratorio y haciendo parecer que el edificio tenga vida propia [Figura 31].

Previamente a determinar esta solución de fachada, en la que todos los fragmentos circulares tienen la misma geometría salvando pequeñas diferencias que los adaptan a la curvatura del centro, el estudio de Renzo Piano valoró distintos modelos de la pieza cerámica. Originalmente, se ideó la entrada de luz del norte a través de las figuras ovaladas. En lugar de un solo modelo, se fabricarían varios diseños de pieza con

Figura 31: La bahía provoca reflejos iridiscentes y cambiantes.



unas aperturas de distintos tamaños que, posicionadas en la fachada, dejarían pasar la iluminación natural al interior de las galerías, mientras que, en zonas del edificio como la base, las piezas serían totalmente herméticas y de menor protuberancia [Figura 34]. Algo similar ya proyectó el estudio genovés en el Nasher Sculpture Center en Dallas^[47] o la ampliación el High Museum of Art en Atlanta [Figura 32].

Visualmente, en comparación con el resultado final, semejante sistema habría contrastado con la suavidad de la fachada, creando una cierta aspereza con unas escamas levantadas, que más se asemejarían a pequeñas branquias a través de las cuales los cuerpos respirarían luz, inspirándola durante el día

Figura 32: Captadores de luz en el High Museum of Art.

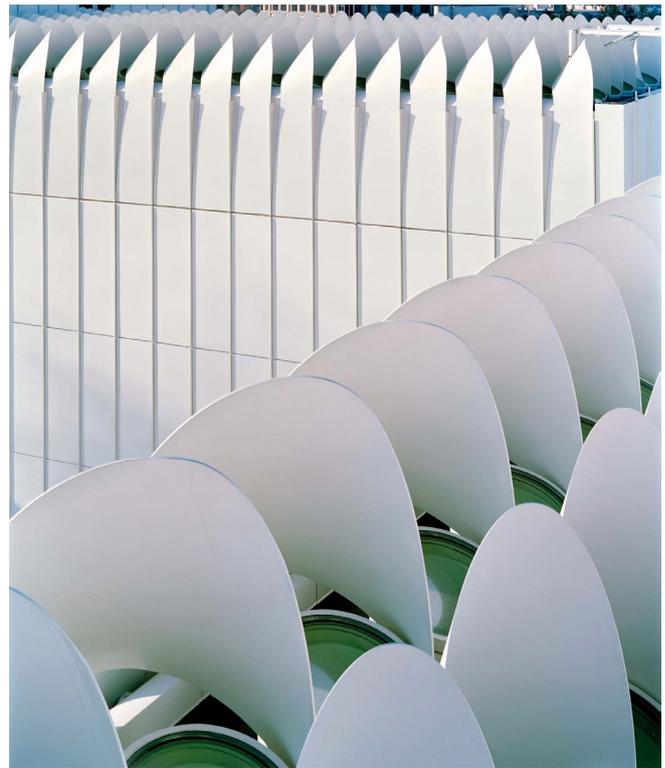


Figura 33: *El auditorio: madera, vidrio, acero y el mar.*

y expiriéndola por la noche. El diseño se descartó, presumiblemente porque sería una opción mucho más costosa tanto en su fabricación como en su puesta en obra y mantenimiento^[48].

En cuanto a los interiores, los paramentos verticales y falsos techos se resuelven mediante sistemas de placa de yeso laminado, mientras que el pavimento se resuelve en madera. Las paredes del auditorio están formadas por paneles acústicos de madera [Figura 33] con una geometría similar a la fachada exterior metálica encarada al Pachinko. La iridiscencia de las piezas cerámicas de la fachada se repite como detalle en los azulejos del interior de los aseos [Figura 35].

Figura 34: *Prototipos de las piezas cerámicas del Centro Botín.*

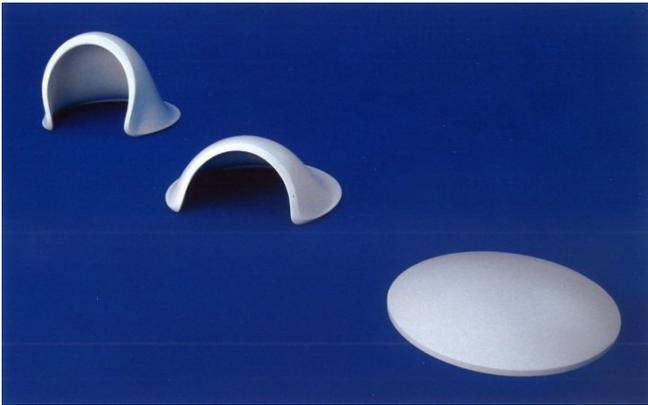
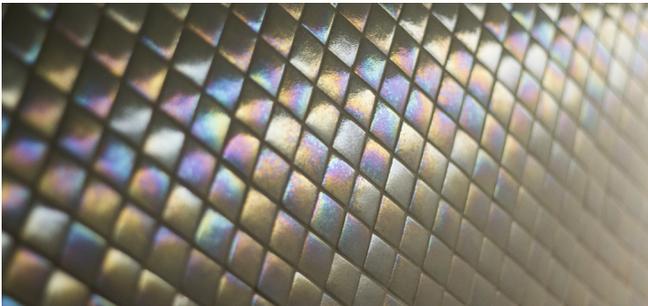


Figura 35: *Los aseos emulan la iridiscencia del exterior.*



3. ESTRUCTURA Y CONSTRUCCIÓN

Comportamiento, elementos y proceso constructivo



3.1. Descripción general

Si en los aspectos funcionales y estéticos del Centro Botín se puede apreciar la búsqueda de una cierta ligereza y flotabilidad por parte de Piano —como se ha visto en el anterior análisis arquitectónico—, estos valores deben verse también reflejados en la estructura portante del edificio, que debe responder a la necesidad de sustentar un edificio de gran volumen y largos vuelos escondiendo sus entrañas e instalaciones y apoyándose sobre esbeltos pilares.

De acuerdo con estos valores, es de esperar que el edificio disponga de un sistema estructural de gran ligereza, pero que le permita tener suficiente inercia en la dirección larga del centro para proporcionar respuesta a los voladizos. La estructura se resuelve así, casi en su totalidad, con acero —exceptuando forjados y cimientos—. Los dos volúmenes del centro tienen una estructura independiente entre sí, aunque con una configuración muy similar. Las escaleras y pasarelas,

por otra parte, se apoyan tanto en los edificios que las rodean como en sus propios soportes independientes. A continuación, se propone una explicación del comportamiento general de la estructura y de sus grandes vuelos.

EDIFICIOS PRINCIPALES

Visto desde la sección transversal, de partida, el esquema funcional de la estructura del Centro Botín parece sencillo [Figura 36]. Forjados de chapa colaborante descansan sobre correas metálicas que, a su vez, se apoyan en unas potentes vigas de acero. Estas, configuradas a modo de cerchas, midiendo más de un metro de canto y discurriendo transversalmente al edificio, resuelven una luz de hasta 20 metros para acabar apoyándose en soportes verticales. Este esquema se repetiría cada 6 metros por toda la longitud del edificio, formando así una estructura de carácter unidireccional.

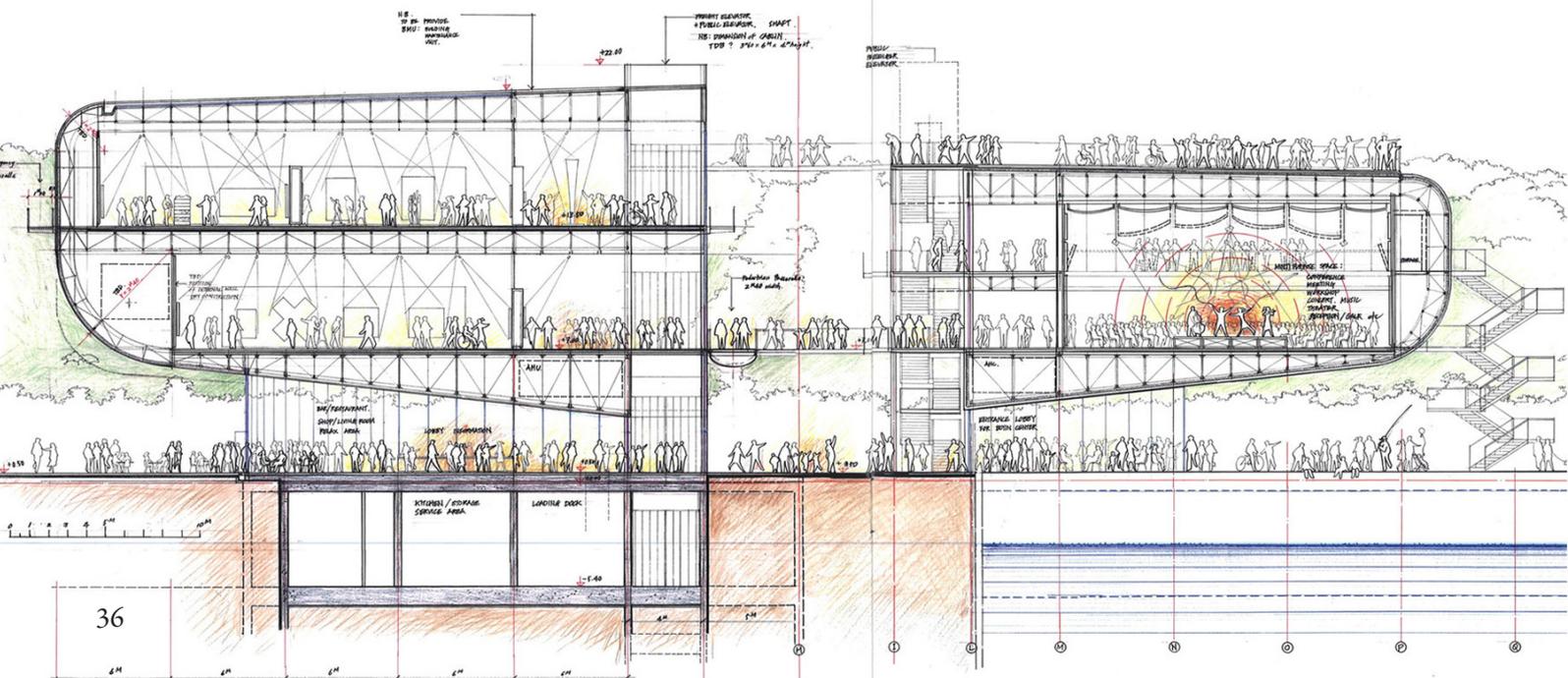
Si bien esta presunción aclara de manera más o menos acertada el comportamiento estructural en la dirección corta del edificio, lo cierto es que no puede explicar por qué existen voladizos de más de diez y veinte metros en los frentes norte y sur. En estos voladizos siguen apareciendo las vigas de forjado vistas en la sección, pero evidentemente sin pilares, lo que implicaría que existen vigas que no se apoyan en nada. Además, también se puede detectar una elevada ausencia de pilares donde se espera que deberían situarse, ya que, si las vigas aparecen cada 6 metros, los pilares en muchos casos lo hacen cada 12. Lo anterior implica que la estructura de edificio no es un simple sistema en el que cada viga de forjado se apoya en pilares.

Intentar entender el edificio desde su sección transversal es engañoso y, aunque pudiera parecer que las vigas de veinte metros están descansando sobre pilares que llegan hasta el plano del suelo, en realidad se apoyan en enormes entramados

de hasta dos pisos de altura, que recorren el edificio en su dimensión más larga. Estos entramados están escondidos en la piel del edificio, encargada de ocultar su armazón interno.

La dirección en la que funciona la estructura es, por tanto, la longitudinal. En ésta se encuentran las mencionadas celosías —a modo de pantallas de dos pisos de altura— que en este trabajo serán llamadas vigas o celosías principales. Estas vigas, con su gran inercia, son capaces de resolver los potentes vuelos del edificio, para lo cual están fuertemente trianguladas [Figura 38]. Las vigas de forjado vistas anteriormente en la sección —de aquí en adelante denominadas vigas secundarias— les transmiten las cargas que gravitan en cada planta del centro. A su vez, los esfuerzos que generan y reciben las celosías principales son transmitidos a los pilares de planta baja, que soportan las celosías y forman la única parte vista de la estructura del edificio, a excepción de una parte de la cubierta.

Figura 36: Sección transversal del Centro Botín en una fase de diseño casi final.



PACHINKO

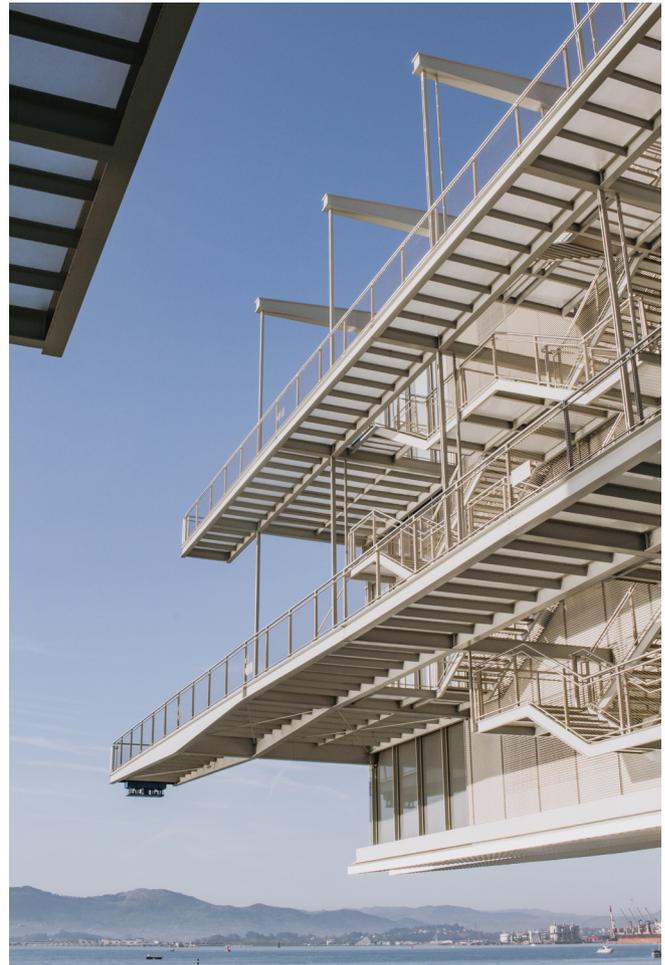
Las pasarelas que conforman el Pachinko y las escaleras, se sustentan tanto mediante apoyos propios, como ayudándose de la estructura de los edificios. En el caso de las escaleras principales y de emergencia, los pilares dedicados son el principal apoyo. Sólo descansan en la estructura en su contacto con ella, al llegar las escaleras al último tramo. Las pasarelas y escaleras situadas junto al Pachinko, están principalmente sujetas por los volúmenes este y oeste mediante dos sistemas. El primero y el más directo, se materializa con la ayuda de perfiles metálicos dispuestos en voladizo, extensiones de la estructura interior de los edificios, y que sobresalen de sus fachadas para servir de apoyo a los perfiles que conforman el Pachinko. El segundo método, y definitivamente el más interesante, consiste en unos esbeltos perfiles metálicos que, a modo de tirantes, sujetan desde arriba a las pasarelas, colgando de unas potentes vigas que asoman desde la cubierta del Centro Botín [Figura 37].

La condición de estructura volada del Pachinko hace que, en sus puntos más alejados de un apoyo —principalmente en el gran «trampolín» del sur, la estructura vibre con el movimiento de la gente. Debido a la potente inercia de las vigas, no es probable que exista un problema estructural. Estas vibraciones, sin embargo, pueden producir *oscilaciones simpáticas* con la frecuencia natural del sistema mecánico lo que implica un aumento de la amplitud de la onda y con ello causar una pérdida de confort en las personas. Para resolverlo, se situó en el borde del trampolín un equipo que, aunque no se ha podido encontrar información al respecto, es de suponer se trata de un amortiguador con resortes, probablemente un amortiguador viscoso por medio de un aceite [Figura 37].

Figura 37: Sistema de cables sujetando las pasarelas.



Figura 38: Vigas principales resolviendo el voladizo sur.



3.2. Descripción por elementos

En las siguientes líneas están descritas las diferentes partes del edificio, desde su cimentación a su sistema de fachada, o de abajo a arriba, según el orden lógico de su función estructural. El apoyo de la estructura del Centro Botín se sitúa tanto en el sótano como fuera de éste, debido a que sólo una parte de los soportes de cada edificio coincide con este espacio. Para su creación se tuvieron que formar unos potentes muros de contención.

CONTENCIÓN DEL TERRENO

Situado a escasos metros del mar, el Centro Botín tiene el problema de situarse en un terreno ganado al mar construido dos siglos atrás. La resistencia de este es por tanto insuficiente para aguantar las cargas del edificio y, junto con la presencia de aguas subterráneas, hace necesario buscar una alternativa a las cimentaciones de baja profundidad. El centro requiere de unos grandes muros pantalla de hasta 29 metros de profundidad y 1 metro de espesor [Figura 39]. Estos muros también impiden la entrada de agua al sótano y entre ellos se resuelve la cimentación de muchos de los soportes del centro.

Figura 39: Ferralla de uno de los segmentos del muro pantalla.

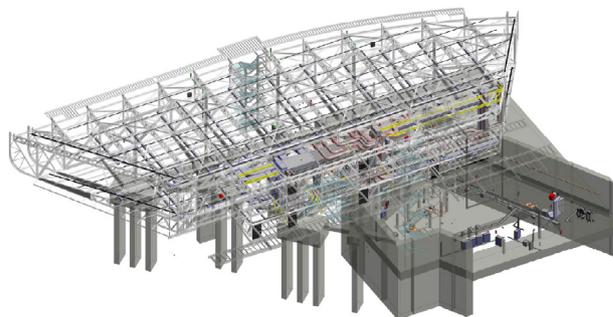


CIMENTACIÓN

La cimentación del Centro Botín se resuelve de dos maneras distintas, dependiendo de la posición de sus soportes verticales [Figura 40]. En ambos edificios, solo algunos de los pilares coinciden en su posición en planta con el espacio inferior del sótano. En estos casos, el contacto con el terreno se resuelve mediante una gran losa de cimentación que sirve también de base para este espacio subterráneo. Dicha losa se encarga de repartir las cargas que transmiten los pilares y transmitir las al estrato inferior que, protegido por los muros de contención que se extienden hasta una mayor profundidad, está al resguardo del agua.

En cuanto al resto de soportes, el problema reside en la mala calidad del terreno, la presencia del agua y la profundidad a la que se encuentra el lecho de roca. Para solucionarlo, cada uno de los pilares se cimenta sobre un encepado que a su vez se apoya en tres pilotes, parecidos a las pantallas de contención del terreno, que con una altura similar a la de éstas consiguen llegar hasta el estrato resistente.

Figura 40: La cimentación se resuelve dentro del sótano con una losa de cimentación y mediante pilotes fuera.



APOYOS

Para elevar el edificio sobre el suelo en planta baja, los volúmenes disponen de una serie de pilares blancos de acero y de sección circular hueca [Figura 41]. Buscando aportar al conjunto una condición de liviandad, muchos de estos soportes son muy esbeltos, con secciones variantes entre 32 y 82 cm de diámetro y alturas de 5 a 7 metros. Esta variabilidad en su dimensión responde a necesidades estructurales, siendo de mayor calibre cuanto mayores esfuerzos se calculen, consiguiendo también el efecto secundario de recordar a los troncos de los árboles del parque cercano.

En combinación con los mencionados pilares se encuentran unas columnas de mucha mayor dimensión que, con un diámetro de 150 cm, contrastan sensiblemente con el resto de delgados soportes. Estos elementos en un principio se interpretaron en la realización de este trabajo como grandes pilares de hormigón armado que recibirían las principales cargas del edificio. Sin embargo, como se verá más adelante, esta aserción poco tiene que ver con la realidad del edificio. El volumen oeste cuenta con 11 de los delgados pilares y 4 grandes columnas. El situado al este, por su parte, se apoya en 9 de los primeros y 2 de las segundas.

Figura 41: Apoyos de sección circular bajo el volumen oeste.



VIGAS PRINCIPALES

Las mencionadas vigas principales se encuentran directamente apoyadas en los pilares de planta baja. Estos elementos son en realidad grandes celosías trianguladas formadas por perfiles metálicos HEB de sección variante en función del conjunto al que pertenecen. Su objetivo es doble: transmitir los esfuerzos provenientes del resto de elementos estructurales a los pilares sobre los que descansan y formar los voladizos del edificio [Figura 42]. Estos objetivos se cumplen, especialmente el segundo, gracias a la gran inercia del sistema, obtenida por la triangulación de sus barras y por el hecho de que las celosías abarcan dos alturas.

La división interior de las celosías se resuelve generalmente mediante módulos de 6 metros subdivididos en 2, 3 ó 4 partes. La triangulación se interrumpe o se modifica en ocasiones para crear grandes huecos en las vigas por motivos funcionales. Por ejemplo, en una de las celosías del volumen oeste aparecen tres huecos consecutivos de hasta 6x6 metros cada uno, que se corresponden con la conexión con el Pachinko, el ascensor y las escaleras interiores. En el siguiente capítulo se puede ver una vista detallada de la geometría de estas vigas [Figura 55 en la página 40].

Figura 42: Las vigas principales resuelven los voladizos.



VIGAS SECUNDARIAS

Para soportar los forjados, techos y cubiertas, el edificio dispone de una serie de vigas cada seis metros que se apoyan en las celosías principales. Como las anteriores, también están formadas por perfiles metálicos HEB y trianguladas, pero su altura es mucho menor. Las vigas tienen una geometría distinta dependiendo del nivel en el que se encuentran. El motivo de ello reside en la curvatura de la figura exterior del Centro Botín. Para crear su forma orgánica, tanto la base y la cubierta del edificio como la fachada lateral tienen que participar de esa curvatura. Las vigas secundarias son las encargadas de generar dicha forma en un primer momento. Lo consiguen con su forma triangular (se van acortando conforme se alejan del Pachinko) creando el soporte necesario para que el sistema de fachada, al anclarse en ellas, pueda generar la curvatura deseada.

Mientras que el forjado de segunda planta está formado por vigas trianguladas completamente rectangulares, el forjado del primer piso se apoya sobre vigas trianguladas, todas ellas distintas, generando una doble curvatura en la piel exterior. La cubierta, por otra parte, está formada por vigas trapezoidales, en este caso todas de igual inclinación, de modo que forman una única y ligera pendiente en la cubierta.

CORREAS

Entre las vigas secundarias y dispuestas cada 2 metros, una serie de correas de acero se encargan de formar una base de soporte horizontal para el forjado. Al trabajar principalmente a flexión y en una sola dirección, a diferencia del resto de la estructura, las correas no se forman mediante perfiles HEB sino mediante secciones de tipo IPE que aseguran una gran inercia en la dirección su alma [Figura 43].



Figura 43: Correas IPE entre las vigas secundarias apoyadas en la celosía de borde.

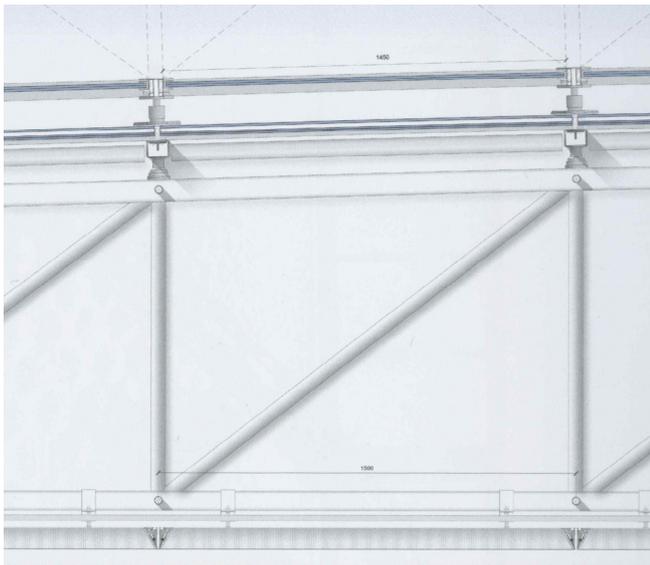
FORJADOS

El soporte horizontal del Centro Botín se resuelve mediante forjados de chapa colaborante. A pesar de no haberse podido obtener suficiente información sobre los mismos, por lo general estos sistemas están compuestos por tres capas. Primero, por una chapa grecada inferior de acero que actúa como armadura de positivos. Esta chapa va anclada a la estructura portante, en este caso las correas IPE. Segundo, una malla de reparto de acero corrugado. Y finalmente un relleno de hormigón que inunda los valles de la chapa y suele tener de 10 a 15 cm de espesor.

CUBIERTA ACRISTALADA

En el edificio oeste, gran parte de la cubierta está acristalada para que haya iluminación cenital en la segunda planta. La cubierta pasa a ser allí de perfiles de mucha menor presencia, aunque su funcionamiento es similar. Al recibir una carga mucho menor en comparación con el resto de la cubierta — de acero y cerámica — y al necesitar obstruir la luz lo menos posible, la estructura está formada por ligeros perfiles tubulares blancos de hasta 80 mm de diámetro. Al igual que en resto de la cubierta, este sistema resuelve su dirección principal con cerchas trapezoidales. Los cordones superiores e inferiores son tubos de acero de 12mm de espesor y de sección cuadrada 80x80 para los primeros y 70x70 para los segundos. Las barras que triangulan cada viga son de sección circular de 50 mm de diámetro [Figura 44]. Dotando al conjunto de estabilidad en su dirección perpendicular se disponen perfiles de acero colocados entre las anteriores cerchas tanto diagonalmente como perpendicularmente.

Figura 44: Sección constructiva de la cubierta acristalada.

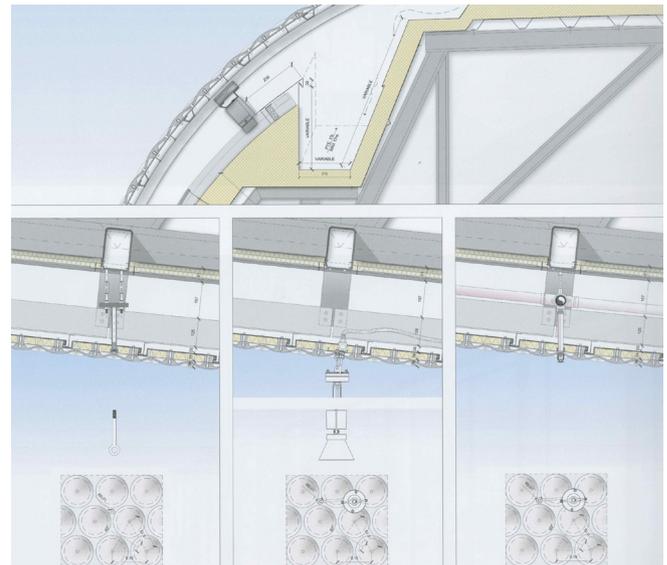


SISTEMA DE FACHADA

La fachada está anclada a una subestructura de perfiles metálicos tubulares dispuestos cada 2 metros y a su vez unidos a la estructura primaria. Estos tubos generan inicialmente la curvatura de la fachada. A ellos se ancla una chapa metálica base sobre la que se sitúa un sistema de clips tipo Kalzip que dan soporte a la siguiente chapa metálica. Entre ambas capas, 16 mm de lana de roca forman el aislamiento. Sobre la segunda chapa se atornilla una subestructura de tubos y perfiles metálicos de ajuste a la cual queda anclado un engastado de bandejas de aluminio que termina la fachada. Esta es la última capa, y sobre ella están atornilladas las piezas cerámicas decorativas.

La fachada de los edificios que no muestra piezas cerámicas se cubre mediante un panel sándwich con una última chapa corrugada de metal que además sirve para ocultar las salidas de las instalaciones de aire [Figura 45].

Figura 45: Detalle del sistema de fachada.



3.3. Construcción

A continuación, se describe el proceso constructivo del Centro Botín, el cual debía adaptarse a las características de su ligera estructura y a las exigencias de edificar al borde del mar.

La primera fase del proyecto tuvo lugar entre junio y diciembre de 2012^[31], y consistía en la realización del sótano y la contención del terreno. Los muros pantalla se ejecutaron durante los primeros cuatro meses. El sistema de construcción estaba limitado por la presencia de agua y la gran profundidad a la que se encontraba el estrato resistente. Las zanjas de 29 metros de profundidad fueron excavadas con un equipo de hidrofresa [Figura 46]. Durante el proceso, se utilizaron para rellenar la zanja lodos bentoníticos (mezcla de bentonita con agua) que impiden el derrumbe de la excavación mediante empuje hidrostático^[49]. Tras la excavación el material excavado fue extraído y acopiado para su posterior retirada por

Figura 46: Hidrofresa excavando y ferralla siendo insertada.



medio de una cuchara bivalva. Una vez limpia de tierra la zanja, se insertaron las jaulas de ferralla, con pesos de hasta 14 toneladas, montadas en obra y elevadas mediante grúas, tras lo cual se vertió el hormigón por medio de una tubería tremie. Este sistema deposita el hormigón en el punto más bajo de la excavación, a partir del cual va subiendo y sustituyendo la presencia de lodos bentoníticos. Para formar el sótano se llegaron a realizar medio centenar de muros pantalla.

Ejecutados los muros pantalla, se pudo proceder a la excavación de terreno para formar el sótano. Simultáneamente a ésta se realizó el apuntalamiento de los muros pantalla con cerchas metálicas, que se encargan de contenerlos ante el empuje del terreno [Figura 47]. El siguiente paso fue la ejecución de la losa inferior de sótano^[50], que también sirve de losa de cimentación para muchos de los pilares del centro [Figura 47]. Tras

Figura 47: Ejecución de la losa y apuntalamiento de muros.



el posicionamiento y montaje de la ferralla y dejando preparados los arranques de los pilares, tuvieron lugar los trabajos de hormigonado que se prolongaron dos días. Se llegaron a utilizar 2.200 m³ de hormigón y 300.000 kg de acero para la losa de cimentación. La losa superior del sótano se construyó con 1.320 m³ de hormigón y 200.000 kg de acero. Los trabajos de cimentación terminaron con la realización de los pilotes y encepados que transmiten al terreno las cargas de los pilares situados fuera del sótano, y fueron realizados por la empresa de geotecnia Rodio Kronsa^[51].

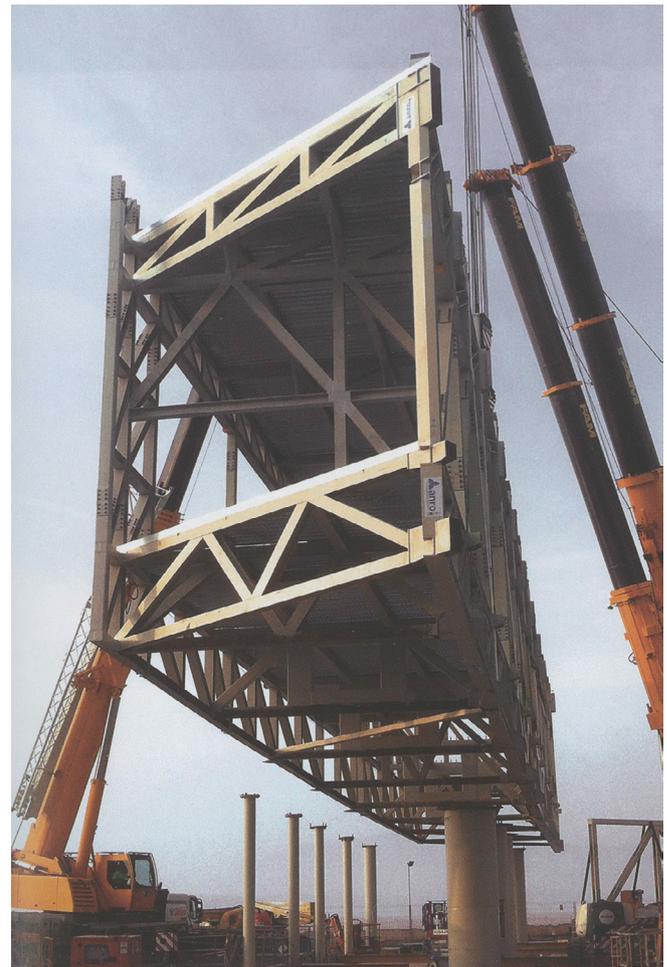
Realizado todo el hormigonado del sótano, el resto de la construcción consistió principalmente en el montaje en obra de piezas traídas de fábrica, pues el nivel de prefabricación de la estructura, fachada e interiores es casi total. Este proceso comenzó con la colocación de pilares, elevados por grúas, sobre sus respectivas placas de anclaje con hasta 12 pernos de fijación. Simultáneamente, la estructura metálica del edificio fue siendo montada a pie de obra. Fue fabricada en la planta de Industrias Metálicas Anro en Tomelloso, Ciudad Real [Figura 48] y para su realización se utilizaron hasta 1.300 toneladas de acero^[52]. Las labores de montaje y soldadura se prolongarían durante varios meses. Las primeras piezas

Figura 48: La estructura siendo fabricada en Tomelloso.



en izarse de cada volumen fueron sus cuerpos estructurales principales, es decir, el núcleo rigidizador donde más tarde se situarían los espacios servidores del centro. Estas piezas se montaron enteramente antes de ser levantadas. En el caso del edificio oeste, el núcleo principal tiene un peso de 195 toneladas y fue colocado por tres grúas sobre los ocho pilares que lo soportan [Figura 49], mientras que el del auditorio pesa 130 toneladas y apoya su peso sobre siete pilares.

Figura 49: El núcleo principal del volumen oeste siendo izado.

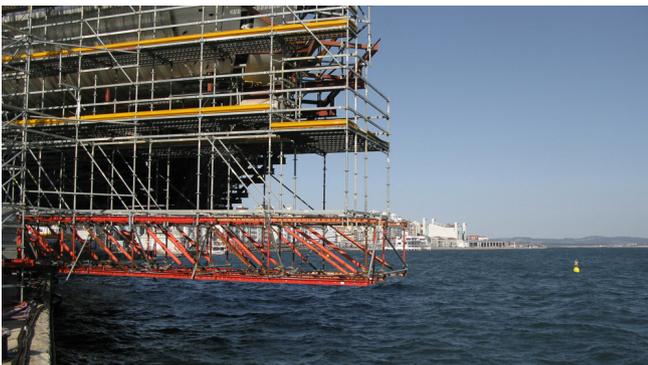


Estos núcleos están formados por dos de las llamadas vigas principales arriostradas entre sí mediante perfiles metálicos subdivididos en triangulaciones. Fijados los núcleos en su posición, el siguiente paso fue la colocación de las celosías de borde. La del cuerpo oeste, el edificio en que se centrará este trabajo, mide 77 metros de longitud y 6 de altura. Asentadas ambas piezas, se llevó a cabo la inserción de las vigas secundarias en la estructura, comprendidas entre la celosía de borde y el núcleo principal, que al igual que el resto de los elementos fueron ensambladas en obra, alzadas por grúas y soldadas a sus respectivos apoyos. Tras la fijación de correas a la estructura, se ejecutaron los forjados de chapa colaborante y, más tarde, la estructura de la cubierta en la sección del volumen

Figura 50: Forjados, con canales para los conductos de aire.



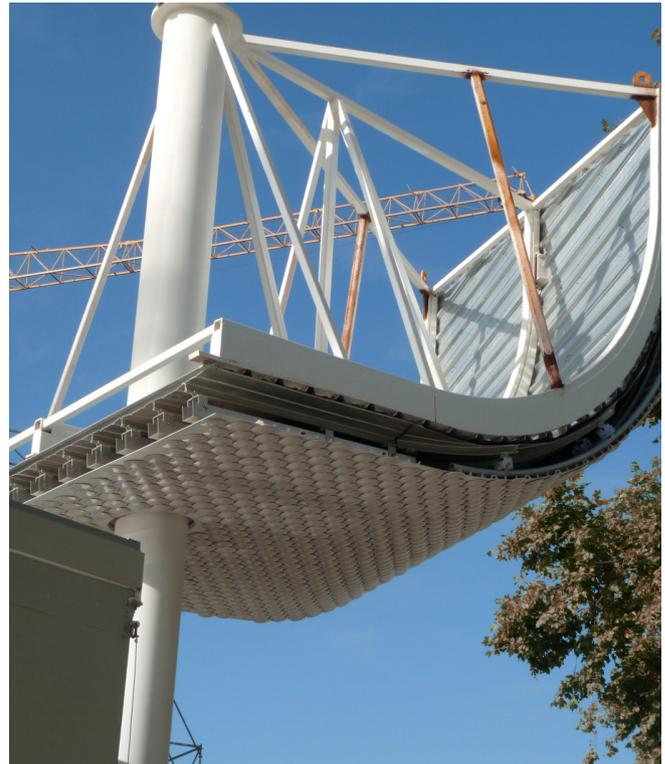
Figura 51: Andamios volando sobre el mar, volumen oeste.



oeste donde se dispone de luz cenital. Esta parte de la estructura llegó a la obra ya montada en largas vigas, sin la necesidad de un montaje previo en obra y, con un peso total de 45.000 kg, se elevó hasta su posición final a 20,5 metros del suelo^[53].

Como muchos otros edificios de Piano, el control climático se hace a través de rejillas en el suelo, cuyos canales tuvieron que ser colocados durante el hormigonado [Figura 50]. Completada la estructura metálica y los forjados, se colocaría el andamiaje necesario para permitir las labores de recubrimiento del edificio. Esto incluye andamios en voladizo sobre el mar para así poder acceder a las fachadas correspondientes [Figura 51]. Las bandejas de aluminio que forman la fachada

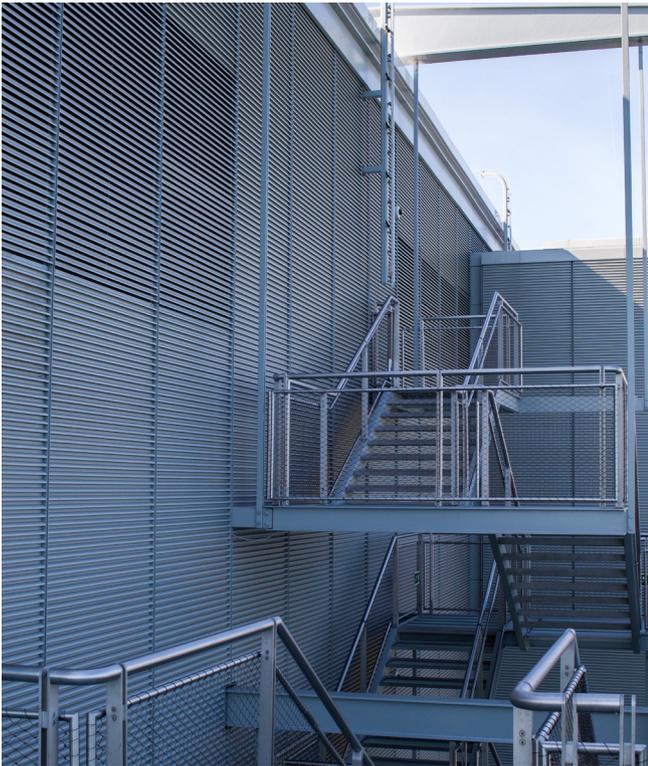
Figura 52: Modelo escala 1:1 en obra del sistema de fachada.



principal [Figura 52] llevaban inscrita la posición de cada pieza cerámica y el tipo de pieza que se requiere entre los 5 modelos fabricados, aunque al colocarse, los paneles ya llevan preinstaladas la mayoría de las piezas cerámicas para facilitar los trabajos. También se terminan las fachadas que miran al Pachinko, que además ocultan en ellas las entradas y salidas de la instalación de aire [Figura 53].

A continuación, se procedió al montaje de los muros cortina [Figura 54] con paneles de 1,8 x 5 metros y de 500 kg de peso^[54]. En el caso de la fachada sur se colocaron desde el interior mediante maquinaria especializada, un brazo robótico. En esta fachada, además, el muro cortina es en realidad

Figura 53: Fachada que oculta los sistemas de instalaciones.



un sistema de doble piel, donde la primera capa cuenta con un vidrio simple y la cara interior está compuesta por un vidrio doble. En la fachada opuesta, que es de una sola capa, fueron montados desde el exterior. Así mismo, los interiores, también industrializados, se construyeron con sistemas de placa de yeso laminados tanto en particiones como en techos. En el exterior del edificio se colocaron con grúas las estructuras exteriores que soportaran los ascensores y escaleras exteriores del conjunto. En los meses restantes se llevarían a cabo las labores de ejecución de acabados y pavimentos tanto en el interior como en las pasarelas exteriores hasta que, finalmente, las obras terminaron en junio de 2017, con la inauguración del Centro Botín el 23 de ese mismo mes^[55].

Figura 54: Muro cortina en el frente sur del edificio oeste.



4. MODELO ESTRUCTURAL

El edificio, simplificaciones y cargas



4.1. Simplificaciones adoptadas

Explicado el funcionamiento de sus elementos, el paso previo al análisis del comportamiento de la estructura consiste en la recreación de la misma en un entorno digital. Sin embargo, es necesario puntualizar la existencia de ciertas simplificaciones que se han tomado deliberadamente durante la producción de esta representación tridimensional.

La primera y más evidente, es la recreación de únicamente uno de los edificios. Como menciona la empresa encargada de la construcción del esqueleto del proyecto, «*La estructura metálica del Centro de Arte Botín [...] se organiza en tres unidades bien diferenciadas, cada una de ellas independiente y estable por sí misma [...]»*. Estas unidades a las que hace mención Anro son el centro de arte, el auditorio, y el Pachinko. Para evitar caer en la redundancia, puesto que los volúmenes este y oeste tienen un comportamiento estructural prácticamente idéntico, y por la menor relevancia que

tiene el sistema de pasarelas, incluyendo escaleras y ascensores, se ha optado por reproducir solamente la unidad de mayor tamaño, el edificio que contiene las galerías de arte.

La segunda simplificación consiste en la omisión del sótano por la ya elevada complejidad del entramado metálico que se va a analizar, por la independencia existente entre ambos sistemas y por considerarse reducida su importancia de cara al estudio y comprensión de la estructura del Centro Botín.

Finalmente, se ha optado por ignorar la sección de la cubierta que, con perfiles tubulares, sostenía la superficie acristalada y, en su lugar, se ha continuado usando los perfiles metálicos HEB del resto de la cubierta.

Con todo ello, el modelo terminaría siendo formado por más de 4.200 barras metálicas y 43.000 elementos finitos.

4.2. Modelización del edificio

Quedando definidas las simplificaciones que el modelo estructural iba a contener, la labor de producción del dibujo comenzó con la búsqueda de imágenes, ya fueran planos o fotografías, que aportaran la información necesaria para una reproducción fidedigna y precisa. Desafortunadamente, las plantas, alzados y secciones disponibles del edificio no proporcionaban los datos suficientes para replicar el centro, especialmente en su dirección longitudinal, aunque sí permitieron determinar cuestiones como la posición en planta de pilares, la geometría de las vigas secundarias, y otras dimensiones genéricas. Sin embargo, lo que no pudieron facilitar los planos de RPBW sí se pudo extraer de las muchas fotografías de la construcción encontradas. De esta manera, el proceso de modelización se apoyó, principalmente, en una cuidadosa inspección de imágenes aéreas obtenidas en revistas impresas^[46] [Figura 56] que, a falta de medidas, requirió de ciertas decisiones intuitivas basadas en el módulo de 6 metros con el que se proyectó el edificio.

La modelización constó de dos fases. La primera, se realizó en el entorno tridimensional del software Autodesk® AutoCAD® 2018^[56], en el cual fueron dibujados los ejes de todas las barras metálicas del edificio en su posición correcta mediante la orden *Línea*, separando por capas las diferentes tipologías de elementos (vigas, vigas secundarias, pilares, etc.), diferenciando también por capas según la altura a la que pertenecían (planta baja, primera y segunda) y comprobando que todos los vértices en uniones de barras coincidieran. También se diferenciaron por colores las barras exteriores de cada viga-pantalla y sus triangulaciones interiores para conseguir mayor claridad visual del dibujo, siendo las barras interiores más oscuras.

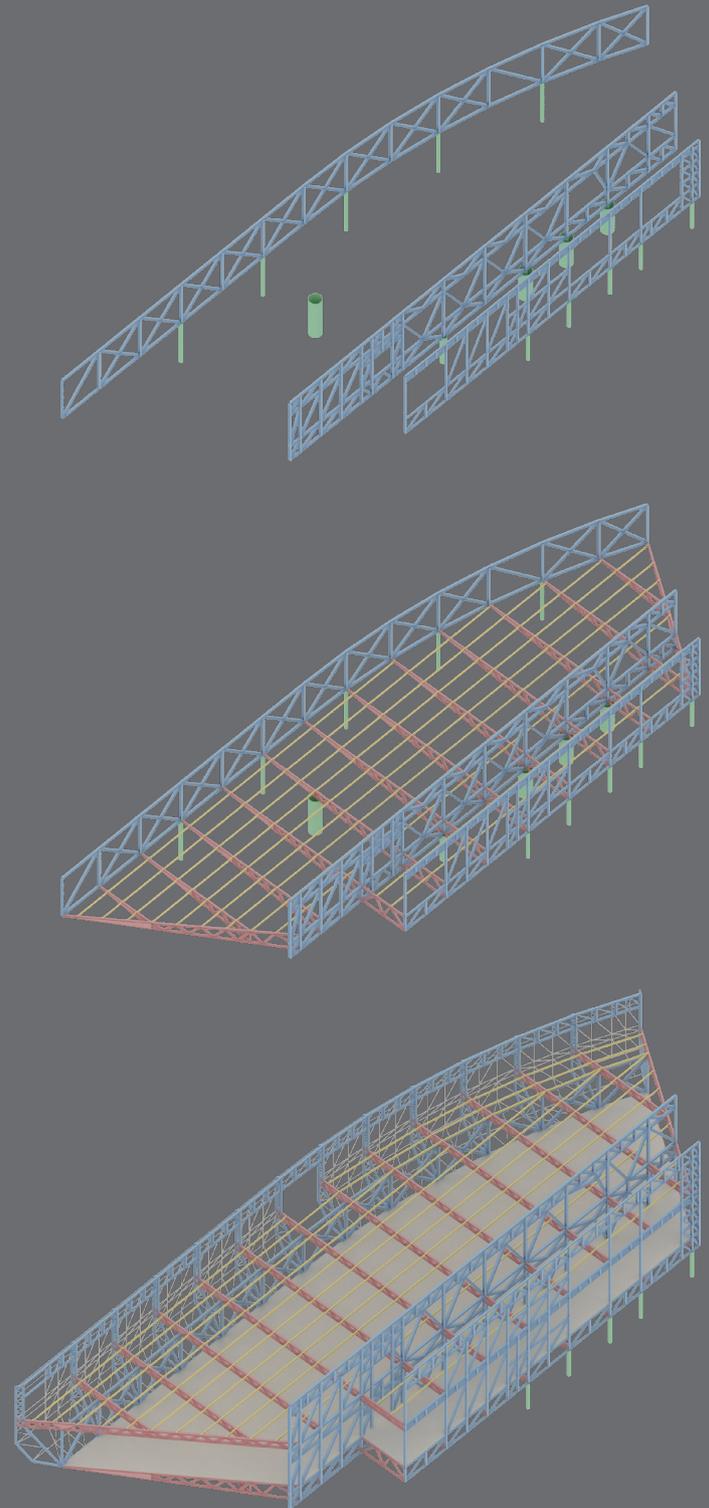
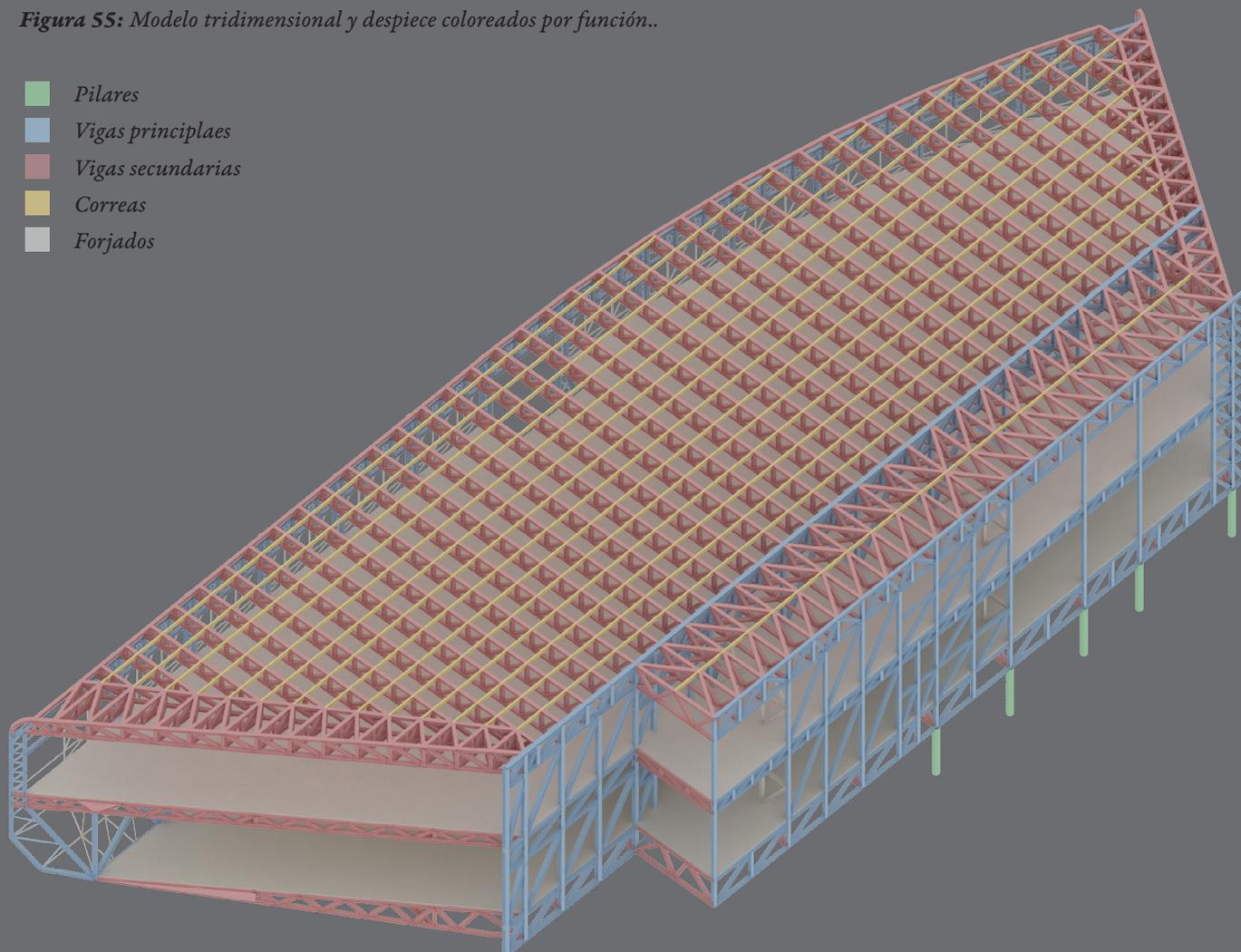


Figura 55: Modelo tridimensional y despiece coloreados por función..

- Pilares*
- Vigas principales*
- Vigas secundarias*
- Correas*
- Forjados*



La segunda fase consistió en asignar secciones metálicas a las barras ya dibujadas. Para ello las líneas conectadas debían coincidir con precisión unas con otras formando nudos. Esta fase también incluyó la creación de superficies 2D en forma de mallas para el cálculo de elementos finitos, que representarían forjados y placas metálicas. Para ello se utilizó el complemento para AutoCAD del software Architrave 2015^[57].

Para el modelado y predimensionado del edificio, fue necesario primero entender el funcionamiento de este. Explicar el complejo entramado metálico, y los imposibles voladizos que resuelve, requería de un despiece y categorización esquemática de sus elementos *[Figura 55]*. Recordando lo visto en el capítulo anterior, la clave de la estructura se esconde en las grandes celosías, actuando como vigas principales, que se apoyan en los pilares y vuelan en sus extremos y que, con su potente inercia, permiten el volado de la estructura. En ellas, se apoyan las vigas secundarias sobre las que se desarrollan los forjados colaborantes. El modelo tridimensional explicativo que figura en estas páginas fue realizado con el software Autodesk® 3ds Max® 2018^[58] y el motor de renderizado V-Ray 3.60^[59] a partir de la geometría trazada en AutoCAD y Architrave.

El modelo está formado principalmente por perfiles metálicos HEB de distintas secciones que, tomados de manera orientativa, son mayores cuanto más importante la función de la barra y más resistencia se intuye necesaria. También se han usado perfiles IPE, perfiles tubulares rectangulares, y perfiles cilíndricos en cuanto a los soportes. El dimensionado de elementos es el que sigue:

Figura 56: *Imágenes aéreas del volumen oeste en construcción.*



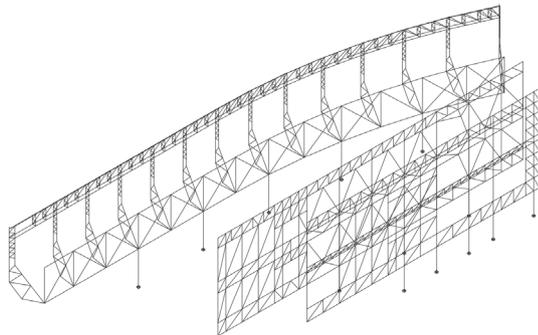
PILARES

Durante la modelización y cálculo del edificio, se supuso que los soportes de 150 cm de diámetro debían ser soportes de hormigón armado —recubiertos de acero— que, con su gran resistencia, recibirían los mayores esfuerzos del edificio. Esto acabó no siendo cierto, pero se decidió mantener su configuración como pilares de hormigón para explicar más adelante el error, así como una patología detectada en el modelo. El resto de pilares, de dimensiones variadas, han sido modelados con una sección circular hueca, teniendo los de menor presencia 406 mm de diámetro y 25 mm de espesor, mientras que, el más grueso, mide 508 mm en su diámetro y 40 mm de espesor. La diferencia de sección aparece cuando se esperan mayores esfuerzos, como en los soportes que preceden a los voladizos.

VIGAS PRINCIPALES

Siendo el principal elemento estructural y, por tanto, el que mayor sección resistente requiere, las celosías principales han sido modeladas con perfiles HEB 280. En el núcleo principal del edificio, los dos pórticos formados por estas vigas, separados 6 metros entre sí, gracias a unas celosías que los conectan, forman una suerte de caja rigidizadora que aporta

Figura 57: Vigas principales y pilares en AutoCAD.



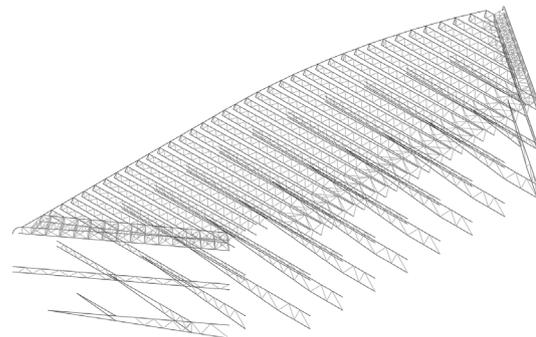
inercia en el eje corto del edificio y que ayuda al conjunto a soportar esfuerzos horizontales provenientes de esa dirección [Figura 57].

Quizás más interesante es la modelización de la celosía de borde, ya que en primera planta está alineada verticalmente con sus respectivos pilares, y en segunda planta ha sido desplazada para responder a la curvatura del centro y aumentar la superficie útil en las galerías de dicha altura. Además, las vigas secundarias que en ella se apoyan tienen la función adicional, actuando a tracción, de evitar que el elemento vuelque.

VIGAS SECUNDARIAS

También resueltas con el mismo formato de perfil, pero de menor calibre que las celosías principales, están formadas por secciones HEB-220. Como quedó mencionado en el capítulo anterior, las vigas inferiores son triangulares, las centrales rectangulares, y las de cubierta trapezoidales. Las triangulaciones dentro de cada viga están situadas de manera que proporcionen soporte cada 2 metros a las correas metálicas del forjado y cada 1.5 m en la cubierta. Por tanto, los nudos están alineados viga a viga para que las correas puedan discorrir de forma continua por todo el edificio [Figura 58].

Figura 58: Vigas secundarias de cada planta en AutoCAD



CORREAS

Modeladas con perfiles IPE-200 se apoyan en la parte superior las vigas secundarias en los puntos de mayor resistencia, es decir, los que coinciden con los nudos de la triangulación de la cercha.

FORJADO

Una superficie de elementos finitos, formada por subdivisiones cuadradas de 20x20 cm, representa el forjado de chapa colaborante [Figura 59]. Se le ha asignado un espesor de 15cm, y hormigón armado HA-25 como material.

RELLENOS METÁLICOS.

Pese a ser una estructura triangulada, en algunos casos ha sido necesario el uso de «rellenos» de acero, en zonas puntuales, para mejorar la transmisión de esfuerzos. El caso más destacado aparece en todas las vigas secundarias que soportan el forjado de primera planta. Teniendo una longitud de 20 metros, forma triangular y un muy agudo ángulo de 6 grados, la terminación de la viga en su vértice tiene una sección mucho menor que en su inicio y, por tanto, una menor inercia. Además, disponer en esa pequeña sección de barras trianguladas, siguiendo el formato de cercha, habría resultado en una opción constructivamente compleja. Por ese motivo se optó por el relleno del tramo final de cada viga triangular, incrementando así su resistencia [Figura 60]. Se pueden observar los mismos rellenos cuando las vigas que soportan el segundo forjado se unen a las vigas principales, en este caso, no por haberse visto reducida su sección, sino para asegurar una mejor transmisión de esfuerzos y para contrarrestar la diferente rigidez entre estos elementos [Figura 61].

Figura 59: Forjado de segunda planta, formado por caras 3D representando elementos finitos, en AutoCAD.

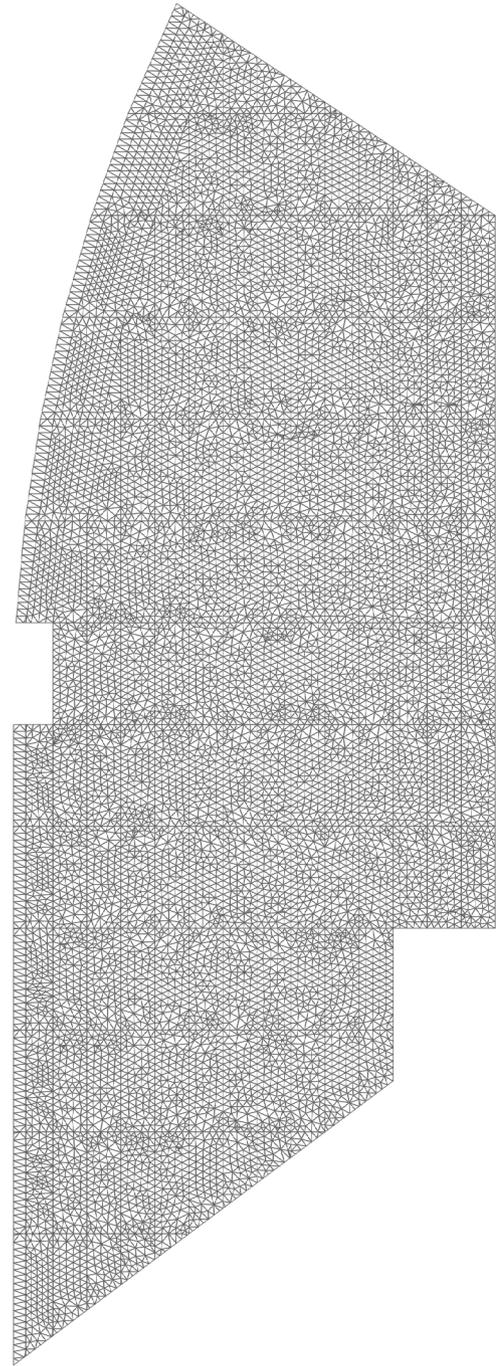
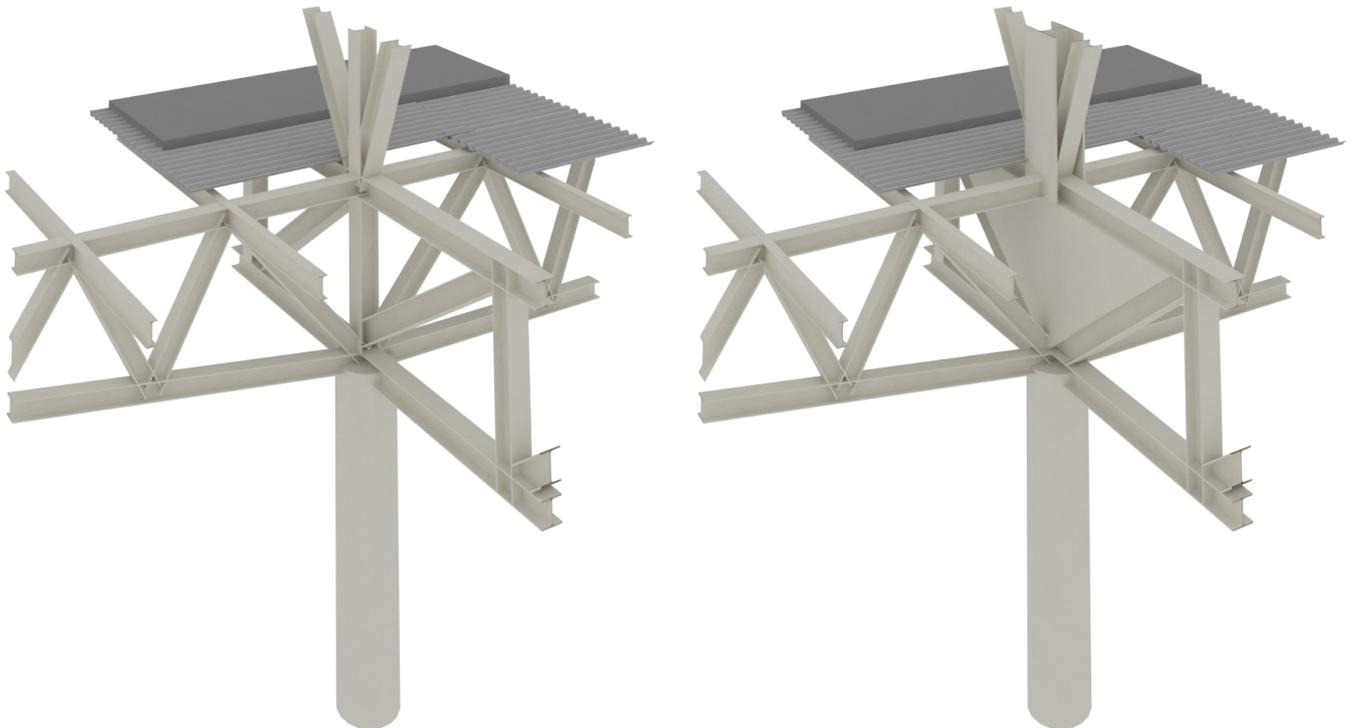




Figura 60: Viga triangular, rellena en su sección más delgada, y rellenos en vigas rectangulares.

Figura 61: El modelo, antes y después de aplicarle rellenos metálicos y pilares de mayor sección, en 3ds Max.



4.3. Modelización de las cargas

Para completar el modelo estructural, se han de determinar las acciones que intervienen sobre el edificio y aplicarlas en los correspondientes elementos del sistema. En el caso de los edificios proyectados en España, el reglamento vigente es el *Documento Básico de Seguridad Estructural: Acciones en la Edificación*^[60] (DBSE-AE) dentro del *Código Técnico de la Edificación* (CTE). Dicho documento categoriza las posibles cargas actuantes sobre una estructura en tres grupos: permanentes, variables y accidentales. No todos los tipos de acciones han sido tomados en cuenta en el modelo.

ACCIONES PERMANENTES

Como su nombre indica, son las cargas que actúan de forma continua sobre la estructura y con posición constante. Incluyen el peso propio del edificio, la acción producida por el pretensado de elementos constructivos y las acciones del terreno. Por carecer de elementos pretensados y de sótano, el modelo requiere únicamente las cargas permanentes provenientes del peso propio. En el caso del peso de la estructura, el propio software Architrave se encarga de asignar las acciones correspondientes y, por tanto, han sido ignoradas para evitar redundancias. El resto de las cargas de peso propio —causadas por cerramientos, pavimentos y falsos techos— sí han sido incluidas en el cálculo.

El valor del peso propio del pavimento, que es de parqué, ha sido tomado de la tabla C.3 del DBSE-AE y es de $0,4 \text{ kN/m}^2$. El falso techo en las galerías de arte, compuesto por una subestructura de perfiles de aluminio y placas de yeso laminado, produce una carga de $0,3 \text{ kN/m}^2$.

El edificio tiene cuatro tipos de fachadas: la fachada acristalada

simple orientada a norte, la fachada acristalada doble en el frente sur, la envolvente recubierta por piezas cerámicas, y el cerramiento del lateral que da al Pachinko, recubierto por rejillas metálicas. A la fachada acristalada simple se le asigna una carga de $0,5 \text{ kN/m}^2$. El muro cortina de doble piel está compuesto por un paño interior de vidrio doble con cámara de aire y uno exterior con vidrio laminado y la carga otorgada vuelve a ser de $0,5 \text{ kN/m}^2$ por paño, sumando un total de 1 kN/m^2 . En ambos casos, las cargas se modelizan colgando de la cubierta y como cargas lineales, tomando en cuenta la altura de cada fachada. Para la envolvente recubierta por piezas cerámicas se estima una carga de $0,5 \text{ kN/m}^2$, y al cerramiento de perfiles de aluminio se ha asignado $0,4 \text{ kN/m}^2$. Estas cargas han sido modelizadas como acciones gravitatorias uniformes, situadas sobre las correas que soportan la fachada en cada una de sus caras.

ACCIONES VARIABLES

Este grupo contiene las sobrecargas de uso, causadas por *«todo lo que puede gravitar sobre el edificio por razón de su uso»*^[60], las acciones sobre barandillas y elementos divisorios, las cargas de viento, las cargas de nieve y las acciones térmicas. Su presencia no es constante, es decir, no están en efecto permanentemente. Por considerarse fuera del ámbito de este trabajo, las acciones térmicas no serán aplicadas. La ausencia de barandillas en el modelo —pues no se ha incluido el Pachinko— excluye también estas cargas del cálculo.

Según la tabla 3.1 del DBSE-AE, se puede simplificar la sobrecarga de uso en salas de exposición como una carga uniforme de 5 kN/m^2 . Las cargas en cubiertas transitables accesibles únicamente para conservación con inclinación inferior a 20°

tienen un valor característico de 1 kN/m²

La acción del viento q_e se calcula mediante la fórmula

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

Donde q_b es la presión dinámica del viento e iguala a 0,5 kN/m²; c_e es el coeficiente de exposición que, para un edificio de menos de 24 metros de altura situado al borde del mar, es de 3,5; y c_p es el coeficiente eólico de presión, que para el Centro Botín será 0,7 en vientos de presión y 0,3 en los casos de succión. Las cargas en ambos casos resultan de la siguiente manera

$$0,5 \cdot 3,5 \cdot 0,7 = 1,225 \text{ kN/m}^2 \text{ en vientos de presión}$$

$$0,5 \cdot 3,5 \cdot 0,3 = 0,525 \text{ kN/m}^2 \text{ en vientos de succión}$$

De acuerdo con el CTE, los edificios de cubiertas planas ubicados en una localidad situada a una altitud inferior a 1.000 m, la carga de nieve se puede considerar 1 kN/m².

ACCIONES ACCIDENTALES

Comprenden las cargas por sismo, incendio e impacto de cuerpos en movimiento como pueden ser vehículos. En el caso de las dos últimas, no han sido añadidas al modelo de cálculo para no extender excesivamente el análisis estructural. Las cargas por sismo, por otro lado, serán obviadas en base a lo escrito en la *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación*^[61] (NCSE-02) mencionada en el CTE.

Según la NCSE-02, «*La aplicación de esta Norma es obligatoria en las construcciones recogidas en el artículo 1.2.1, excepto [...] en las edificaciones de importancia normal o especial cuando la aceleración básica a_b sea inferior a 0,04g, siendo g la aceleración de la gravedad*».

El Centro Botín, de acuerdo con lo establecido en el artículo 1.2.1 de la normativa, es una construcción de importancia normal, categoría definida como «*Aquellas cuya destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio para la colectividad, o producir importantes pérdidas económicas, sin que en ningún caso se trate de un servicio imprescindible ni pueda dar lugar a efectos catastróficos*».

En cuanto a la zona sísmica, en Santander, así como en el resto de la provincia cantábrica, la aceleración a_b es inferior a 0,04g, tanto en la figura 2.1 de la NCSE-02 como en el más reciente Mapa de peligrosidad sísmica de España 2015^[62] publicado por el Instituto Geográfico Nacional. Por tanto, la normativa permite obviar el efecto de carga sísmica en el cálculo estructural del edificio.

4.4. Combinaciones de cargas

Existen dos requisitos que se deben exigir a una estructura para garantizar su buen comportamiento. El primero y más importante, es el de garantizar la seguridad de los usuarios, que puede ponerse en peligro en caso de roturas de elementos estructurales, inestabilidad de los mismos, movimientos o pronunciadas deformaciones. Con el fin de evitar que se produzcan estas circunstancias, se calcula el estado límite último (E.L.U.) de los edificios, es decir, la situación extrema antes de que se produzca el fallo.

Cuando se producen excesivas deformaciones, vibraciones o daños en elementos de menor importancia estructural, se ven comprometidos «*el confort y bienestar de los usuarios o terceras personas, el correcto funcionamiento del edificio o la apariencia de la construcción*». El segundo requisito es, por tanto, el cumplimiento del estado límite de servicio (E.L.S.), que marca el punto en el que el comportamiento de la estructura empieza a afectar notablemente estos aspectos. Los dos estados se utilizan para comprobar el funcionamiento del edificio, y el incumplimiento de cualquiera de ellos acarrea la invalidez del conjunto.

La naturaleza de las acciones variables —que ni actúan constantemente, ni actúan simultáneamente— implica que, para realizar un cálculo con mayor precisión del comportamiento real del edificio y para evitar sobredimensionamientos innecesarios, se ha de contabilizar en el cálculo la probabilidad de coexistencia de cargas. De tal manera, los estados límite último y límite de servicio se pueden calcular con ciertas combinaciones en función de qué cargas se consideran en pleno funcionamiento y qué cargas ven reducidas su actuación. Esta permutación genera distintos resultados, entre los

cuales se ha de determinar cuál es el más desfavorable para su posterior uso.

Aunque el software Architrave se encarga de determinar cuáles son estos estados —con un análisis del comportamiento global de la estructura que sería imposible hacer manualmente— a continuación, sigue una explicación y ejemplo de cómo manualmente se hallan las peores condiciones.

CÁLCULO DEL ESTADO LÍMITE ÚLTIMO

El valor del E.L.U. se obtiene a partir de la expresión:

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

Donde:

- G son los valores de las cargas permanentes
- P es el valor de la carga de pretensado, que se ignora
- $Q_{k,1}$ es la acción variable característica
- $Q_{k,i}$ son el resto de acciones variables
- γ es el coeficiente de seguridad, de la tabla 4.1
- Ψ es el coeficiente de simultaneidad, de la tabla 4.2

Dependiendo de qué carga variable se asigna como principal, la expresión genera una serie de resultados distintos. Estas cargas son las de uso, viento y nieve. Sin embargo, en la mayoría de las superficies del edificio, estas cargas no entran en juego simultáneamente. En las fachadas sólo afecta el viento, mientras que, en los forjados de primera y segunda planta, únicamente actúan las cargas de uso. En estos casos es evidente que la combinación desfavorable sólo puede ser aquella en la que su acción variable característica sea la única existente. La cubierta, por otra parte, recibe cargas de uso de

mantenimiento y de nieve, de modo que se usará de ejemplo. No se han contabilizado, en cambio, las cargas de viento, de acuerdo con el DBSE-AE «*En edificios con cubierta plana la acción del viento sobre la misma, generalmente de succión, opera habitualmente del lado de la seguridad, y se puede despreciar*».

En los cálculos de resistencia, las cargas permanentes en situación desfavorable tienen un coeficiente de seguridad $\gamma=1,35$, mientras que las acciones variables son de $\gamma=1,50$. Los coeficientes de simultaneidad para cálculos de E.L.S en situaciones persistentes o transitorias es de 0,7 para sobrecargas de uso, 0,5 para sobrecargas de nieve en altitudes inferiores a 1000 m, y 0,6 para la acción del viento de acuerdo con las tablas 4.1 y 4.2 del DBSE-AE.

El cálculo del estado límite último para la cubierta con carga de uso como acción característica es:

$$\begin{aligned} \gamma_{ppropio} \cdot G_{ppropio} + \gamma_{uso} \cdot Q_{uso} + \gamma_{nieve} \cdot \Psi_{nieve} \cdot Q_{nieve} \\ 1,35 \cdot 0,9 + 1,5 \cdot 1 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 1 \\ 3,465 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

El cálculo del estado límite último para la cubierta con carga de nieve como acción característica es:

$$\begin{aligned} \gamma_{ppropio} \cdot G_{ppropio} + \gamma_{nieve} \cdot Q_{nieve} + \gamma_{uso} \cdot \Psi_{uso} \cdot Q_{uso} \\ 1,35 \cdot 0,9 + 1,5 \cdot 1 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 1 \\ 3,765 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Por tanto, para el análisis aislado de la cubierta, el caso más desfavorable es el de la nieve como carga principal.

CÁLCULO DEL ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

El valor del E.L.S. se obtiene a partir de la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Donde:

- G son los valores de las cargas permanentes
- P es el valor de la carga de pretensado, que se ignora
- $Q_{k,1}$ es la acción variable característica
- $Q_{k,i}$ son el resto de acciones variables
- Ψ es el coeficiente de simultaneidad, de la tabla 4.2

En esta ocasión desaparece el coeficiente de seguridad, pero la expresión es en lo demás idéntica, por lo que se espera que la nieve siga siendo la variable característica más desfavorable.

El cálculo del estado límite de servicio para la cubierta con carga de uso como acción característica es:

$$\begin{aligned} G_{ppropio} + Q_{uso} + \Psi_{nieve} \cdot Q_{nieve} \\ 0,9 + 1 + 0,5 \cdot 1 \\ 2,4 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

El cálculo del estado límite de servicio para la cubierta con carga de nieve como acción característica es:

$$\begin{aligned} G_{ppropio} + Q_{nieve} + \Psi_{uso} \cdot Q_{uso} \\ 0,9 + 1 + 0,7 \cdot 1 \\ 2,6 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Confirmando que la peor combinación es la que toma la nieve como variable principal.

5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Cálculo, dimensionado e interpretación



5.1. Consideraciones iniciales

En las siguientes páginas están detallados los resultados de la simulación obtenida en Architrave, que incluyen diagramas de esfuerzos, diagramas de tensiones y una simulación tridimensional de la deformada que adopta el edificio. A partir de dicha información se ha realizado una interpretación del comportamiento global de la estructura, así como de los elementos individuales que la componen. No obstante, previo a dicho análisis, es conveniente puntualizar una serie de observaciones.

ANÁLISIS PRELIMINAR DE RESULTADOS

Una primera revisión de la deformada tridimensional, generada en el software informático, revela un posible problema en el modelado. En la primera planta, uno de los pilares de 150 cm de diámetro provoca un pliegue en el forjado, como si intentara atravesarlo [*Figura 62*]. Lo que sucede, es que el edificio, en su apoyo con el soporte, carece de la conexión

estructural necesaria. Es decir, el pilar está conectado a una viga secundaria —cuya única función es soportar la losa de hormigón— en lugar de a una viga principal que pueda transmitirle las cargas del conjunto. Como resultado, en las proximidades, el forjado flexa como era esperar, desplazándose negativamente en el eje vertical mientras que, en su contacto con el soporte (donde la deformación está impedida) aparece un importante punzonamiento.

De esta manera, el apoyo en cuestión está haciendo más mal que bien a la estructura, sugiriendo que su función es otra distinta. Originalmente se había considerado como un soporte estructural, y dada su dimensión, tan distinta del resto de pilares metálicos, se creyó que podría tratarse de un pilar de hormigón. En realidad, se trata de un paso de instalaciones —principalmente, como se descubrirá más adelante, de aire— oculto dentro de un cilindro de acero que carece de

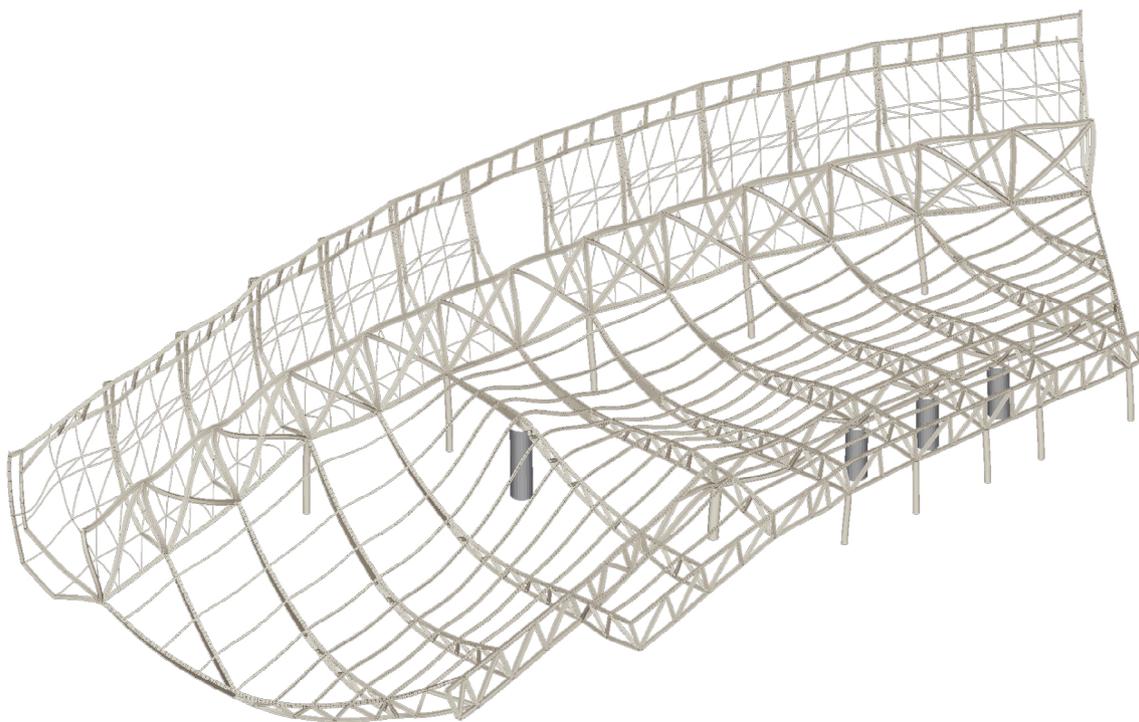


Figura 62: Deformada del primer modelo estructural, mostrando un importante punzonamiento..

función estructural alguna. El perfil metálico no es más que una máscara, que visualmente aparenta soportar el edificio. El modelo, por tanto, fue corregido y recalculado con dicho elemento suprimido.

SOPORTES FALSOS

Al determinar la verdadera función del falso soporte, entraron en cuestión la veracidad del resto de columnas de 150 cm de diámetro. Supuestos en las fases iniciales de este trabajo como elementos de hormigón, los pilares de tan desmesurada sección dejaron de parecer factibles. Sirviendo el caso anterior como antecedente, resultó evidente que debían existir más pasos de instalaciones —además de aquel— tanto por la

dimensión del edificio como por la situación de ciertas áreas como los lavabos, cuyas bajantes no aparecían por ninguna parte. Además, al consultar los resultados de la simulación de cargas, quedó patente el excesivo sobredimensionado que suponía un tan masivo pilar de hormigón.

Sin embargo, estaba claro que en estos puntos del edificio sí debía existir un soporte estructural ya que, a diferencia del caso en el que la columna metálica estaba en contacto con una parte débil de la estructura, sobre estos tres elementos descansa la celosía principal del edificio, encargada de recibir la mayoría de las cargas y de sujetar los voladizos. Los cilindros debían ser una combinación de pasos de instalaciones y

soporte del edificio. Lo más plausible era pensar que dentro de cada uno de estos tubos se escondía el verdadero pilar, de perfil y dimensiones similares a los del resto del proyecto, acompañado de bajantes y cableado. Una inspección de videos del proceso constructivo del Centro Botín [Figura 63] confirmó la teoría de los pilares dentro de pilares. Los verdaderos soportes son efectivamente de secciones similares a las de sus compañeros, pero su altura es mucho mayor. En lugar de estar conectados a pilares o muros del sótano —estos sí, de hormigón— quedando la unión entre ambos aproximadamente a nivel del terreno, como ocurre con el resto de los soportes, los pilares ocultos en cilindros apoyan una altura más abajo, a nivel de la solera de sótano.

PILAR DESFAVORABLE

Con el primer soporte eliminado, y el resto de las columnas de hormigón convertidas en los verdaderos perfiles metálicos, el modelo ya representaba con razonable fidelidad la estructura

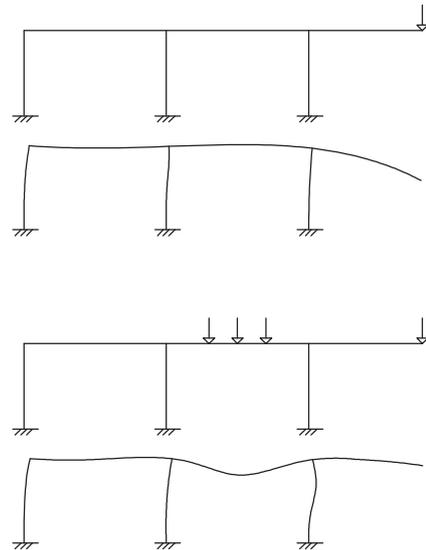
Figura 63: Instantánea del video, con el pilar siendo insertado.



del Centro, teniendo en cuenta la información disponible sobre ella. No obstante, se decidió una última modificación apoyada más bien en la intuición. Se había supuesto que cada una de las tres columnas anchas contenía un soporte metálico. Pero también era viable pensar que una de ellas estaba completamente hueca, puesto que su existencia, aunque no tan fatal como el caso de punzonamiento, podía interpretarse como contraproducente para resolver los voladizos.

De los tres, el pilar central, si bien ayuda a soportar cargas, también causa que los voladizos aumenten su flecha todavía más. Poniendo de ejemplo un pórtico teórico [Figura 64], una de las maneras de reducir la deformación de un extremo en voladizo sería la de aumentar la luz o las cargas en el vano contiguo. En el caso del Centro Botín, eliminar el pilar en cuestión reduce el desplazamiento vertical del voladizo sur —el más pronunciado— entre 1 y 2 milímetros.

Figura 64: Reducción de flecha en voladizo en un pórtico teórico.



Ninguna de las grabaciones disponibles de la construcción del centro ha podido confirmar o desmentir la ausencia de dicho soporte. Sin embargo, un corto vídeo que muestra de manera esquemática un modelado 3D del proceso constructivo^[63] parece representar la estructura sin este pilar [Figura 65]. En el vídeo, además, se aprecia claramente como la distancia entre dos de los cilindros metálicos es demasiado corta como para que actúen ambos como pilares. A pesar de que esta información no es definitiva, la verificación de que globalmente la estructura se comporta ligeramente mejor, junto con el hecho de que el pilar en cuestión rompe sin justificación el módulo de 12 metros entre pilares, son motivos suficientes para afirmar que en ese punto no se encuentra ningún apoyo.

Figura 65: Instantánea del video, donde no existe pilar central.



ORIENTACIÓN DE LA CARGA DE VIENTO

Finalmente, conocido cuál era el punto crítico del edificio —el centro de crujía en la fachada sur— la orientación del viento fue modificada por considerarse así más desfavorable. Originalmente, el viento se había situado en dirección este a oeste. La fachada del este recibía una carga de presión, mientras que la del oeste recibía una de succión.

La deformación que sufre el edificio por su propio peso y por las cargas gravitatorias que recibe mueve la estructura en dirección sur y ligeramente en dirección este. El viento de este a oeste que se había definido en un principio, por tanto, parece que juega a favor de la estructura. Invirtiendo las acciones de viento, se debería conseguir el efecto opuesto, para que las cargas de presión y de succión actúen en combinación de forma desfavorable para el conjunto.

Utilizando las funciones de Architrave, se puede aislar las acciones que provocan cada tipo de carga para comprobar los efectos que causan sobre la estructura independientemente del resto de acciones. Antes del cambio, la acción de viento en solitario creaba desplazamientos verticales principalmente positivos en los forjados, especialmente en la fachada sur. Con la orientación de las cargas modificada, mayoritariamente los desplazamientos son negativos, y principalmente aparecen en la fachada sur [Figura 66].

La prueba definitiva consiste en verificar, con una combinación de acciones que tenga en cuenta el resto de las cargas, que el nuevo modelo resulta en una mayor deformación del voladizo sur. Utilizando la combinación *ELU Resistencia. Persistente, Viento* los resultados obtenidos son un desplazamiento de -12.676 cm en la situación original y de -12.995 cm después de reorientar el viento, confirmando que la nueva orientación es la desfavorable.

Todas estas cuestiones fueron surgiendo de forma progresiva conforme se realizaba el análisis estructural, que fue evolucionando de forma iterativa. Sin embargo, se ha considerado más oportuno explicarlas de manera conjunta y previamente a entrar en detalle en dicho análisis.

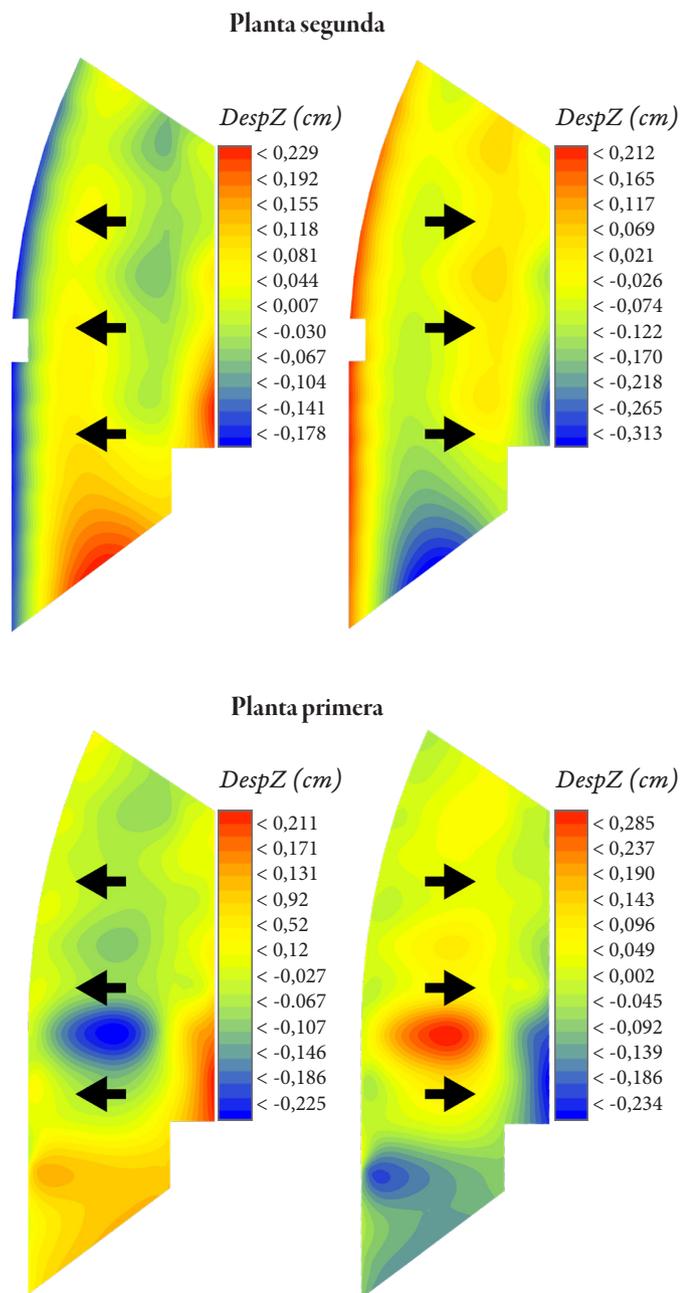


Figura 66: Dz (cm) en hipótesis de viento, según su dirección.

LA IMPORTANCIA DEL PROCESO ITERATIVO (PARTE 2)

Es conveniente mencionar la importancia que ha tenido el proceso de prueba y error en el presente trabajo. A medida que se iban realizando cálculos en el software Architrave, se detectaban comportamientos no esperados en la estructura que indicaban una posible malinterpretación de su configuración. Desde el momento del primer cálculo hasta la finalización de estas líneas —un proceso que se ha extendido durante varios meses— se fue actualizando el modelo sucesivamente para responder a estas inquietudes.

De la misma manera en la que el diseño arquitectónico se beneficia de someter a prueba una serie de iteraciones [Pág. 21], el diseño de las estructuras también requiere un proceso similar, especialmente cuando los problemas a resolver tienen un alto grado de dificultad.

En una estructura compleja como la del Centro Botín, con esbeltos soportes, multitud de barras, triangulaciones y potentes vuelos, difícilmente se podría diseñar bien a la primera —especialmente si se busca la eficiencia de sus materiales—. En su lugar, el diseño consiste en someter a prueba las diferentes versiones que se van realizando para ver por dónde fallan y aplicar las correcciones necesarias. La triangulación de las vigas-pantalla del edificio, por ejemplo, muestra una complejidad probablemente fruto de este proceso. En ellas aparecen más subdivisiones y diagonales donde mayores tensiones se han detectado. Otro gran ejemplo es el refuerzo de barras mediante placas de metal que se realizó en fábrica [Figura 48 en la página 43]. Es de suponer que las barras que recibieron este tratamiento fueron las que mostraron recibir más esfuerzos en los sucesivos modelos de cálculo que realizaron los estructuristas.

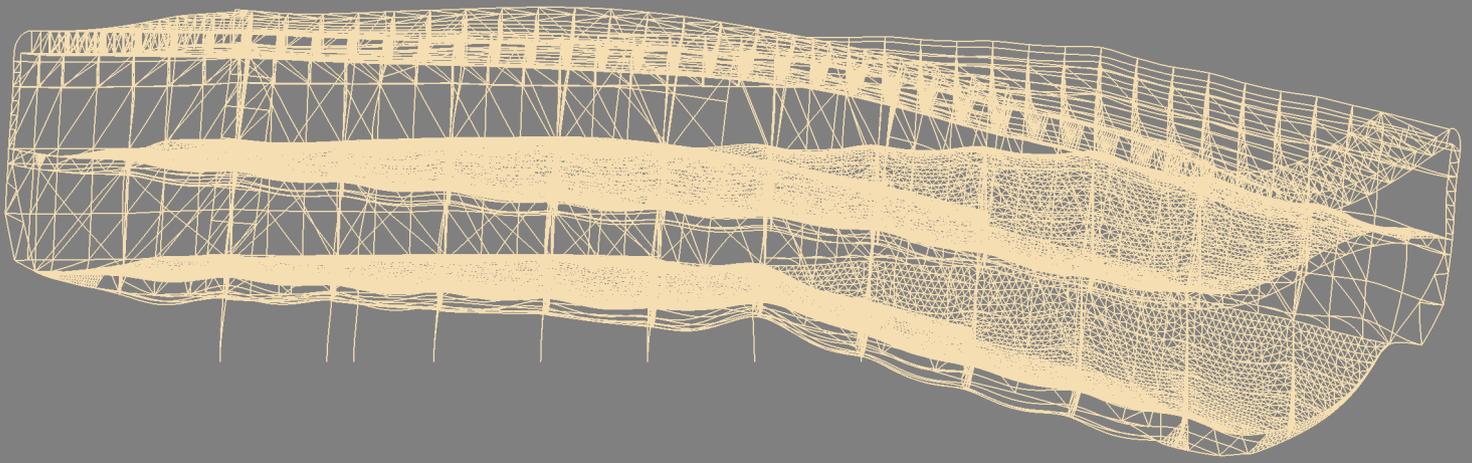


Figura 67: Deformada de la estructura vista desde el oeste. ELU 01 gravitatoria uso al 70% de escala.

5.2. Comportamiento global.

Elevado sobre el mar, el frente sur del Centro Botín se distancia un máximo de 20 metros del soporte vertical más cercano, mientras que, en la orientación norte, el vuelo más largo es de 12,5 metros. Tan importantes vuelos, especialmente el primero, son los principales problemas que debe resolver la estructura del centro. Los vanos del edificio están dimensionados de manera idéntica —con los mismos perfiles metálicos y diseño— independientemente de si están situados en el interior de este o si se presentan en los extremos, formando los vuelos. Por ese motivo, siendo los esfuerzos mucho mayores en estos últimos, es de suponer que la adecuación de la estructura en los frentes norte y sur garantiza el resto del conjunto.

Gracias a la deformada generada a través de software, es posible comprender la respuesta del edificio y sus elementos a las cargas presentadas. En ella, queda patente la importancia de

los vuelos, pero principalmente la del de mayor dimensión [Figura 67]. El extremo sur del Centro Botín ha sufrido un importante desplazamiento vertical respecto al resto del edificio. Por otra parte, en cada planta aparece una deformación de las vigas secundarias en su parte central —un comportamiento típico en elementos biapoyados— e idénticamente una deformación de las correas.

Las vigas principales que vuelan 22,5 m y 18 m respectivamente en el frente sur son los elementos que hacen posible este voladizo. Sobre ellas descansan los elementos de forjado y, con su gran inercia, reciben sus esfuerzos y los transmiten a los soportes verticales. El voladizo norte, en cambio, no sufre ninguna deformación significativa, permaneciendo casi estático en su posición original. Esto no se debe a la falta de importancia del elemento, sino al efecto que el resto de

la estructura está produciendo. Los esfuerzos que genera el vuelo sur son tan importantes que se transmiten significativamente al resto de vanos, llegando a anular las deformaciones que el segundo voladizo causaría. De hecho, la existencia del voladizo norte más bien sirve estructuralmente para contrarrestar parte de los efectos del voladizo principal, y su ausencia implicaría todavía mayores deformaciones en el sur.

No se ha podido encontrar información al respecto y por tanto no ha sido modelado pero, es posible que en la obra, las vigas y celosías —especialmente estas últimas— se configuraran con una flecha positiva a modo de «*pretensado*» para que, al asentarse, se redujera la flecha total.

La estructura también presenta un importante desplazamiento horizontal en su dirección longitudinal. El fenómeno no ocurre por acciones horizontales, como podrían ser las de viento. De hecho, las cargas de viento están situadas en perpendicular al movimiento. El causante es, una vez más, el voladizo sur, que con su deformación tira de la estructura en su dirección. Finalmente, las cargas de viento han generado un menor desplazamiento horizontal que empuja a la estructura en dirección este.

A pesar de que no se ha modelado en este trabajo, es de esperar que el volumen situado al este se comporte de una manera muy similar al de las galerías. Ambos presentan grandes vuelos y su estructura tiene los mismos elementos que serán discutidos en las próximas páginas, como las celosías y «*costillas*» que resuelven las fachadas curvas [Figura 68]. La mayor diferencia, no obstante, es el espacio de doble altura que conforma el auditorio.

Figura 68: Detalle de la estructura del edificio del auditorio.



5.3. Comprobación de la flecha.

Comprobar que el edificio cumple con las condiciones de seguridad y confort estructurales, requiere analizar el funcionamiento de los voladizos, y comprobar que la flecha que generan no exceda unos límites establecidos.

En el CTE DBSE, está especificado que *Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones característica, considerando sólo las deformaciones que se producen después de la puesta en obra del elemento, la flecha relativa es menor que:*

- a) *1/500 en pisos con tabiques frágiles (como los de gran formato, rasillones, o placas) o pavimentos rígidos sin juntas;*
- b) *1/400 en pisos con tabiques ordinarios o pavimentos rígidos con juntas;*
- c) *1/300 en el resto de los casos*

[...] Las condiciones anteriores deben verificarse entre dos puntos cualesquiera de la planta, tomando como luz el doble de la distancia entre ellos. En general, será suficiente realizar dicha comprobación en dos direcciones ortogonales.

En el caso del Centro Botín, la flecha máxima es de 1/300. Para comprobar que los resultados del modelo se encuentran dentro de los límites admisibles, se han elegido dos puntos para cada planta. Estos son los que aparentan ser más desfavorables, es decir, los que han sufrido un mayor desplazamiento vertical respecto a sus puntos de comparación.

PLANTA PRIMERA

El voladizo sur, como era de esperar, presenta los mayores desplazamientos en el eje Z con un valor máximo de -10,338 cm en la combinación ELS característica más desfavorable. El mapa de desplazamientos verticales muestra como desde el voladizo al interior del centro, los valores se van reduciendo progresivamente. Además, se puede apreciar los valles en el centro del edificio, donde la luz del espacio diáfano llega a ser de 20 metros. Estos valles aparecen entre vigas de forjado, cuya posición se intuye en el diagrama viendo los puntos que menos han sido desplazados.

Para comprobar la flecha, se han escogido los puntos del forjado que coinciden con los dos apoyos más cercanos [Figura 69]. Aunque el CTE considera suficiente elegir dos puntos cualesquiera en dos direcciones ortogonales, el criterio usado para escoger estos elementos ha sido el de adversidad, ya que, por la rigidez en las zonas escogidas, la diferencia de cota con el voladizo —la flecha relativa— es máxima.

En el primer punto a analizar, A, el desplazamiento vertical ha sido de 10,302 cm. Para empezar, se ha comparado el punto de la celosía interior que coincide verticalmente con el pilar más cercano. Su desplazamiento es de -0,652 cm, la flecha relativa por tanto es de 9,65 cm, y la distancia entre puntos d es 28,16 m.

$$\text{Flecha máxima admisible} = 2 \cdot d \cdot 1/300 = 18,77 \text{ cm.}$$

Se cumple que la flecha relativa obtenida es menor que la máxima admisible.

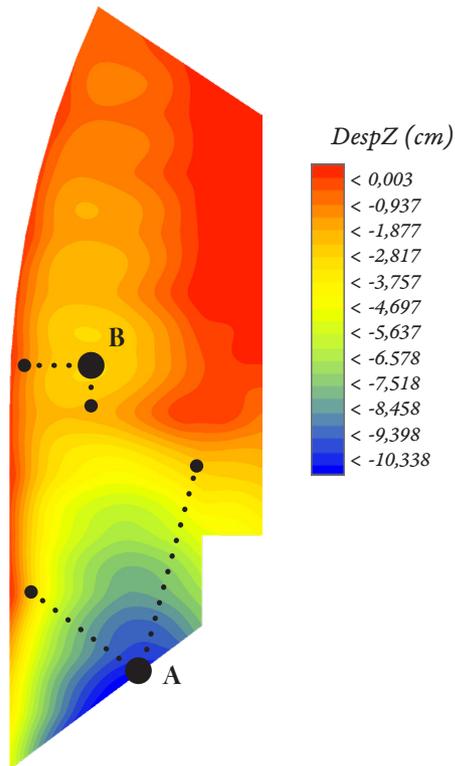
El segundo punto con el que se ha comparado A está situado en la celosía oeste, coincidiendo también con el último pilar que la soporta. Esta región se ha desplazado -0,413 en el eje Z, siendo la flecha relativa de 9,89 cm, y la distancia entre los puntos analizados de 14,37 m.

$$\text{Flecha máxima admisible} = 2 \cdot d \cdot 1/300 = 9,58 \text{ cm.}$$

$$\text{Flecha de } 9,89 \text{ cm} < 9,59 \text{ cm Flecha máxima admisible.}$$

Por tres milímetros, la flecha sobrepasa el límite admisible y, en lugar de 1/300, se sitúa en 1/290. Si bien es cierto que este punto en concreto no cumple, es comprensible que un

Figura 69: Puntos elegidos del forjado de primera planta.



voladizo tan grande flecte bastante y, de diez centímetros que se desplaza, el fallo por 3 mm es casi despreciable. Dicho esto, es probable que durante el modelado algunas cargas fueran exageradas. Por ejemplo, la cubierta está formada por perfiles HEB-220 en lugar de los ligeros tubos que el auténtico edificio tiene. No sería extraño pensar, por tanto, que con un adecuado refinamiento esos tres milímetros podrían llegar a solventarse.

Si damos por hecho que en el punto anteriormente escogido del voladizo, con una deformación tan acusada, la flecha máxima cumple, con toda seguridad el resto del voladizo también lo hace. El segundo punto elegido, B, está situado entre los pórticos centrales del edificio, donde el desplazamiento es de -3.13 cm, para así abarcar una zona distinta de la planta. Para comprobar la flecha, se ha escogido el recorrido más corto hasta una viga secundaria y hasta una viga principal.

En el primer caso, la viga secundaria se ha movido en el eje z -3,01 cm, por lo que la flecha relativa es de 0,12 centímetros. Ambos puntos se separan una distancia d de 1,6 metros.

$$\text{Flecha máxima admisible} = 2 \cdot d \cdot 1/300 = 1,07 \text{ cm.}$$

Hasta la viga principal más próxima hay 8,08 metros. Está desplazada -0,55 verticalmente, formando una flecha relativa de 2,46 centímetros.

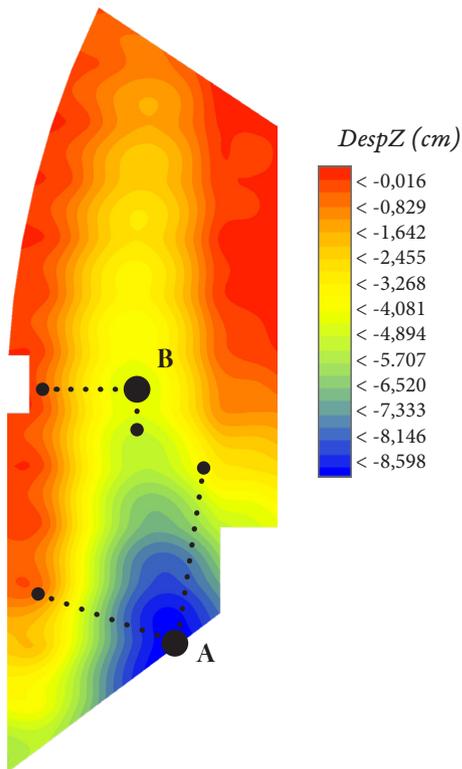
$$\text{Flecha máxima admisible} = 2 \cdot d \cdot 1/300 = 5,39 \text{ cm.}$$

Con ello se comprueba que ambas situaciones son válidas.

PLANTA SEGUNDA

Igual que ocurre en el primer forjado, el punto de mayor desplazamiento está situado en el borde del forjado del voladizo sur. En el punto más afectado, ha bajado 8,8 cm verticalmente. En esta ocasión el forjado sufre menores desplazamientos verticales que la planta baja, debido en parte a las menores cargas que recibe. Si bien el forjado de chapa es el mismo, la planta baja también recibía la «fachada inferior» que recubre el centro. En cuanto al voladizo norte no se ha analizado por la aparente falta de desplazamientos; el motivo vuelve a ser el mismo que en el punto anterior. Esta planta, sin embargo, no sufre desplazamientos positivos en el eje Z en ningún punto.

Figura 70: Puntos elegidos del forjado de segunda planta.



Los dos puntos escogidos para medir la flecha se corresponden también con los de la planta inferior, ya que vuelven a ser los de la comparación más desfavorable [Figura 70]. Coinciden verticalmente con los pilares de planta baja. El punto que se compara con A ha bajado 1,576 cm, por lo que la flecha relativa es 7,23 cm. La distancia d es 24,33 metros.

$$\text{Flecha máxima admisible} = 2 \cdot d \cdot 1/300 = 16,22 \text{ cm.}$$

El segundo ha bajado 1,414 cm, por lo que la flecha relativa es 7,39 cm. La distancia d es 15,23 metros.

$$\text{Flecha máxima admisible} = 2 \cdot d \cdot 1/300 = 10,15 \text{ cm}$$

En ambos casos, el punto más desfavorable cumple con las condiciones de flecha establecidas.

Seguidamente se ha comprobado un punto interior del edificio, B, entre vigas secundarias, que se ha desplazado -4,47 cm en vertical, utilizando para la comparación dos puntos en direcciones ortogonales que coinciden con una viga secundaria y una viga principal. El primer punto de comparación ha sufrido un desplazamiento de -4,03 cm, creando una flecha relativa de 0,44 cm. La distancia d es de 3,5 metros.

$$\text{Flecha máxima admisible} = 2 \cdot d \cdot 1/300 = 2,34 \text{ cm.}$$

El segundo punto ha bajado 0,42 cm siguiendo el eje z. La flecha relativa resulta 4,06 cm y la distancia entre puntos es de 10 metros.

$$\text{Flecha máxima admisible} = 2 \cdot d \cdot 1/300 = 6,67 \text{ cm.}$$

La flecha en segunda planta cumple sin problemas.

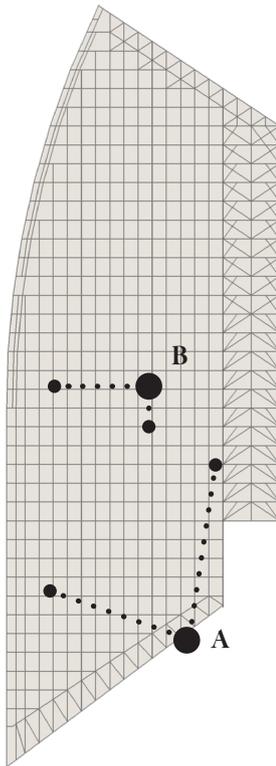
CUBIERTA

La cubierta recibe cargas mucho menores que los anteriores forjados y sería extraño que fallara las comprobaciones. Una vez más, el punto con mayor desplazamiento vertical aparece en el voladizo principal, cuyo extremo ha bajado 10,14 centímetros. Los puntos de comparación A y B vuelven a coincidir verticalmente con los apoyos en planta baja [Figura 71].

La primera comparación, con un desplazamiento de -1,46 cm y flecha relativa de 8,68 cm, se distancia 15,8 cm del extremo del voladizo.

$$\text{Flecha máxima admisible} = 2 \cdot d \cdot 1/300 = 10,5 \text{ cm}$$

Figura 71: Puntos elegidos del forjado de cubierta



El segundo punto ha descendido 1,74 cm, creando una flecha relativa de 8,4 con el voladizo y una distancia en planta de 30,7 cm.

$$\text{Flecha máxima admisible} = 2 \cdot d \cdot 1/300 = 20,47 \text{ cm.}$$

Para terminar la comprobación, se ha elegido un segundo punto en la cubierta, coincidente con los escogidos en el resto de las plantas, aunque, visualmente, la deformada del edificio no presenta ningún indicio de que en el resto de la cubierta puedan existir problemas de flecha. El punto de la cubierta en cuestión se ha desplazado -2,2 cm en la dirección vertical. A diferencia de las plantas anteriores, los puntos se toman en la cara inferior del forjado, puesto que la superior presenta una inclinación para formar la cáscara curva del edificio. El punto A tiene un desplazamiento de -0,73 respecto a su posición original, formando 0,3 cm de flecha relativa. La distancia d es de 4 metros.

$$\text{Flecha máxima admisible} = 2 \cdot d \cdot 1/300 = 2,67 \text{ cm.}$$

El punto B ha bajado 0,65 cm en el eje z, siendo la flecha relativa 1,55 cm, y la distancia d 11,8 metros.

$$\text{Flecha máxima admisible} = 2 \cdot d \cdot 1/300 = 7,87 \text{ cm.}$$

Como cabía esperar, ambas flechas cumplen sin problema. No está de más recordar que la cubierta en el modelo está sobredimensionada, ya que el edificio de Piano resuelve su estructura con ligeros perfiles tubulares y una cobertura de vidrio, mientras que en este trabajo se ha modelado con perfiles metálicos HEB-220. Es de esperar que, si en un futuro trabajo se modelizara el auténtico techo del Centro Botín, la cubierta no cumpliría tan sobradamente.

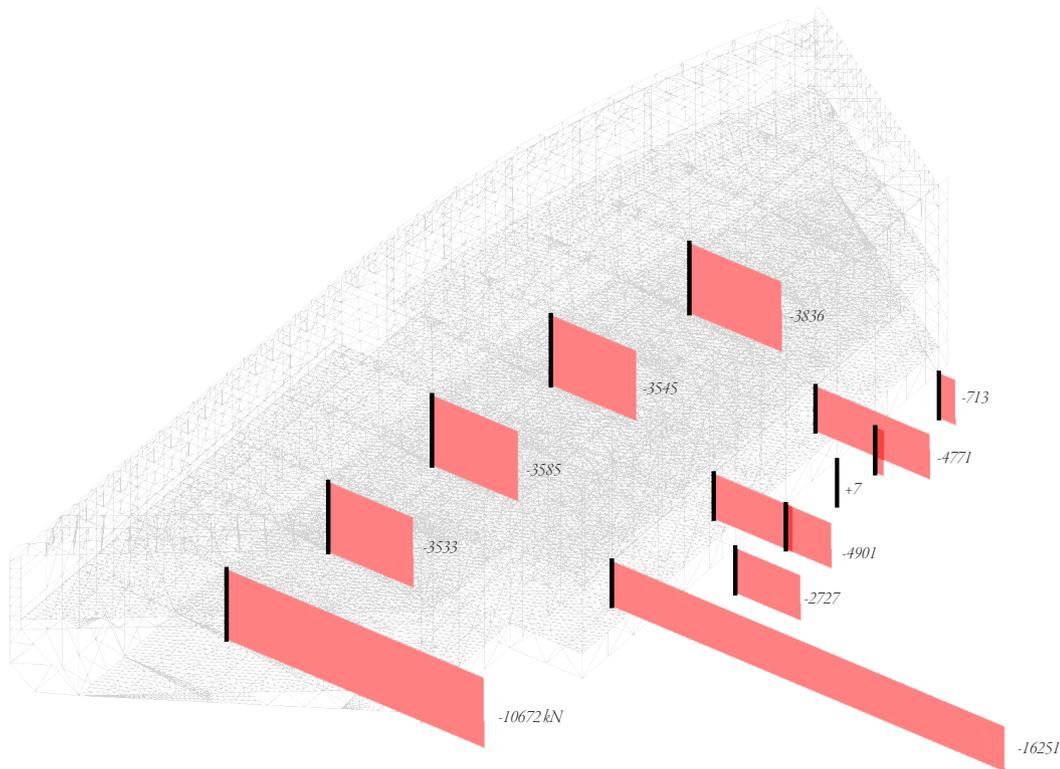
5.4. Esfuerzos y dimensionado: pilares

Analizado el comportamiento global de la estructura y comprobado el cumplimiento de sus flechas, se pasa a estudiar los elementos individuales de la estructura y comprobar que su dimensión es la suficiente para garantizar su resistencia.

Empezando por los soportes del edificio, es de esperar que mayoritariamente trabajen a compresión, con algunas excepciones que se tratarán a continuación. Dejando de lado los situados en el voladizo sur, los esfuerzos de axiles que surgen en los pilares tienen unos valores cercanos a -3.500 kN bajo la fachada oeste, rodean los -4.800 kN bajo el pórtico central,

y toman unos pequeños valores de menos de 1.000 kN en el vano Pachinko [Figura 72]. Los grandes axiles de los dos primeros casos se deben a que dichos pilares reciben las cargas provenientes de la crujía de 20 metros, donde se sitúan los forjados que soportan las galerías. Los axiles positivos en varios de los pilares próximos al Pachinko indican tracciones —algo poco usual e indeseado en estos casos— que surgen por dos motivos. El primero es la gran luz de la crujía contigua en comparación con los 6 metros de la que conforma el núcleo rígido del edificio. Las vigas de forjado, podemos suponer, sufren una gran deformación en la zona de galerías que,

Figura 72: Esfuerzos de axiles recibidos por los pilares en planta baja, ELU: viento.

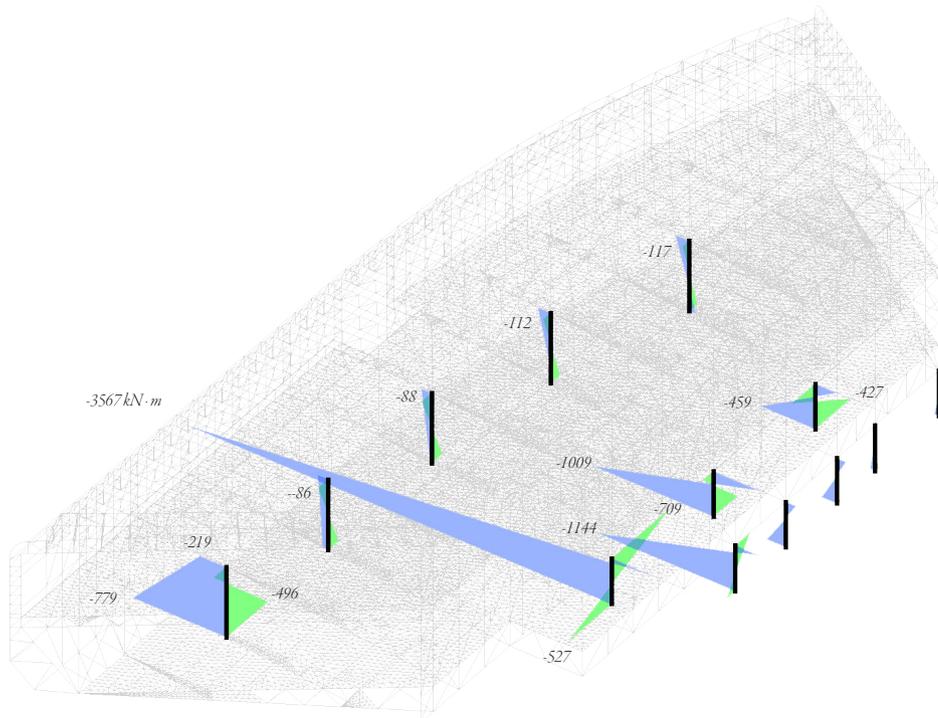


al transmitirse al siguiente vano, propicia un desplazamiento vertical positivo. Los pilares del Pachinko están tan juntos a los del pórtico central, que acaban traccionados. Para evitar este fenómeno, lo ideal sería o separar los soportes o bien aumentar las cargas que reciben los traccionados.

El segundo motivo es precisamente este último punto: la ausencia de cargas. En el edificio real, la celosía-pantalla de la fachada este está recibiendo el peso del Pachinko y de las escaleras exteriores, que no han sido modeladas en este trabajo. Lo anterior implica una falta de esfuerzos que seguramente equilibrarían las deformaciones y harían que los pilares traccionados trabajen en realidad a compresión.

Por otra parte, los tres pilares situados más al sur presentan los mayores esfuerzos axiales de sus respectivos pórticos, con valores de -10.672 kN , -16.251 kN y -2.727 kN . La causa viene dada por los cortantes provenientes del enorme voladizo, que origina los mayores esfuerzos de la estructura. El caso más marcado es el del pórtico central, pues es el que mayor vuelo presenta y por tanto el pilar correspondiente sufre enormes esfuerzos de compresión. En realidad, los esfuerzos analizados son los de la combinación más desfavorable para los pilares —ELU con carga persistente de viento— que no coincide sin embargo con la de mayores axiles. En el caso del ELU con carga persistente de uso, el axil máximo llega a -18.690 kN en el pilar de mayor sección del proyecto [Figura 73].

Figura 73: Esfuerzos de momentos flectores M_z (azul) y M_y (verde) de los pilares, ELU: viento.



También es conveniente revisar los esfuerzos de momentos, que por la presencia del voladizo sur pueden llegar a ser significativos [Figura 74]. Además, en este caso es importante examinar los momentos tanto en el eje Y como en el eje Z. En el Estado Límite Último con carga persistente de uso, aparecen momentos M_z de $150 \text{ kN} \cdot \text{m}$ de valor máximo absoluto en los pilares «normales» del edificio. Estos momentos aparecen por la larga luz de 20 metros que separa los soportes de las galerías del edificio. Sin embargo, la combinación más desfavorable ha resultado ser la de viento, apareciendo esfuerzos mucho mayores, de hasta $3600 \text{ kN} \cdot \text{m}$ en el peor de los casos. Siendo la carga de viento no muy importante, la causa de semejantes esfuerzos —es de suponer— es de diseño de la estructura, ya que la configuración de esta carece del suficiente arriostamiento como para absorber los momentos provocados por el viento. En cambio, en la dirección del norte-sur la potente triangulación de las celosías minimiza los momentos en pilares.

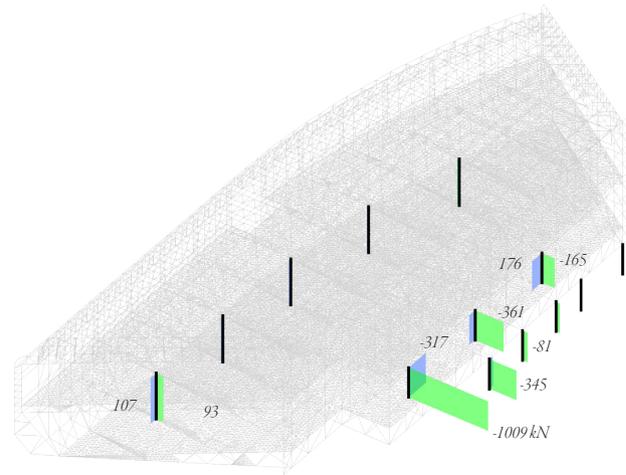
Figura 74: Pilar de 82 cm de diámetro, en la terraza del bar.



Es de especial interés puntualizar que también aparecen notables momentos en el eje Y. Ocurre en los tres pilares del pórtico interior, especialmente en el que precede al voladizo sur, y son causados por los esfuerzos que ambos voladizos, norte y sur, causan en el pórtico y que se transmiten a los soportes. En el pilar sur, el valor máximo absoluto llega hasta los $700 \text{ kN} \cdot \text{m}$. Estos pilares están trabajando inevitablemente a flexocompresión esviada, ya que simultáneamente reciben momentos en una dirección, la del vano de las galerías y en su perpendicular, la de los voladizos.

Finalmente, como ya se ha comentado, el voladizo sur con sus cargas y deformaciones «estira» de la estructura en su dirección [Figura 67 en la página 64]. Eso genera grandes cortantes. Todavía más grandes son los causados por el viento en ELU-05 porque, como ha sido mencionado, la estructura tiene un mucho menor arriostamiento en esa dirección. El de mayor medida alcanza los 1000 kN [Figura 75].

Figura 75: V_y (verde) y V_z (azul) en pilares, ELU: viento.

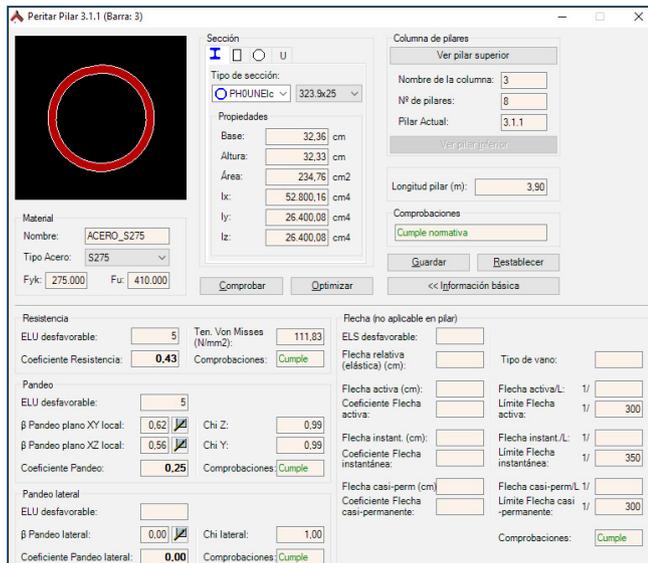


DIMENSIONADO

En la modelización de la estructura, se utilizó una serie de perfiles metálicos de sección PH0 de acero S275 UNE LC de diversos tamaños intentando replicar aproximadamente las vistas en fotografías. Una posterior visita al edificio realizada entre el 17 y 19 de abril de 2018 permitió medir con precisión la dimensión de estos soportes, que tienen diámetros de 32 cm, 52 cm y 82 cm en la realidad. En el modelo, las secciones aplicadas son PH0 323.9 para los perfiles más esbeltos, PH0 508 para los medianos y PH0 813 para los de mayor calibre. Aunque no forman parte de este trabajo, los pilares del edificio auditorio son de diámetro 32 cm, 52 cm y 75 cm, mientras que los del Pachinko y las escaleras exteriores son de secciones abiertas cuya envolvente es de 20x20 cm.

Empezando por la fachada este, los cuatro pilares PH0 323.9x25 cumplen perfectamente con la normativa. De hecho, cumplen holgadamente, teniendo bajos coeficientes

Figura 76: Pilar del pórtico Pachinko de perfil PH0 323.0x25.

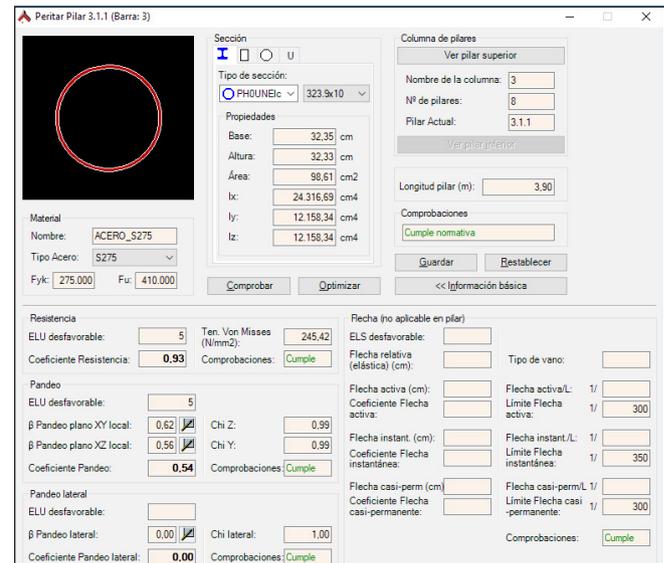


Resistencia		Flеча (no aplicable en pilar)	
ELU desfavorable:	5	ELS desfavorable:	111,83
Coefficiente Resistencia:	0,43	Flеча relativa (elástica) (cm):	
Pandeo		Flеча activa (cm):	
ELU desfavorable:	5	Flеча activa/L:	1/ 300
β Pandeo plano XY local:	0,62	Flеча instant. (cm):	
β Pandeo plano XZ local:	0,56	Flеча instant./L:	1/ 350
Coefficiente Pandeo:	0,25	Coefficiente Flеча instantánea:	
Pandeo lateral		Flеча casi-perm (cm):	
ELU desfavorable:		Flеча casi-perm/L:	1/ 300
β Pandeo lateral:	0,00	Coefficiente Flеча casi-permanente:	
Coefficiente Pandeo lateral:	0,00	Comprobaciones:	Cumple

de aprovechamiento de resistencia de entre 0,20 y 0,40, a pesar de que el diámetro es el adecuado conforme al verdadero edificio. La explicación más sencilla vuelve a ser la misma que en el caso de los pilares traccionados. Al no haber modelado el Pachinko, la caja del ascensor y la escalera exterior, en el modelo hay una menor carga aplicada sobre estos pilares en comparación con el edificio de RBPW.

Aun así, también es bastante posible que el espesor del perfil haya sido exagerado en el modelo. Durante la realización de este, partiendo del diámetro exterior de cada pilar se seleccionó el perfil de mayor resistencia en cada caso. Viendo los resultados [Figura 76], en lugar de una pared de 25 mm se podría haber escogido hasta una de 10 mm y los perfiles seguirían valiendo. Con un PH0 323.9x10, el pilar más desfavorable tiene un coeficiente de resistencia de 0,93 y de pandeo de 0,54 [Figura 77].

Figura 77: Pilar del pórtico Pachinko de perfil PH0 323.0x10.



Resistencia		Flеча (no aplicable en pilar)	
ELU desfavorable:	5	ELS desfavorable:	245,42
Coefficiente Resistencia:	0,93	Flеча relativa (elástica) (cm):	
Pandeo		Flеча activa (cm):	
ELU desfavorable:	5	Flеча activa/L:	1/ 300
β Pandeo plano XY local:	0,62	Flеча instant. (cm):	
β Pandeo plano XZ local:	0,56	Flеча instant./L:	1/ 350
Coefficiente Pandeo:	0,54	Coefficiente Flеча instantánea:	
Pandeo lateral		Flеча casi-perm (cm):	
ELU desfavorable:		Flеча casi-perm/L:	1/ 300
β Pandeo lateral:	0,00	Coefficiente Flеча casi-permanente:	
Coefficiente Pandeo lateral:	0,00	Comprobaciones:	Cumple

El último de los pilares de esta fachada, el que precede al voladizo sur, tiene asignado un PH0 508x40, que cumple satisfactoriamente su función, con un coeficiente de resistencia de 0,86.

En el pórtico de la fachada oeste, cuatro esbeltos pilares de sección PH0 323.9x25 acompañan a un PH0 508x40 situado en el extremo sur. Los cuatro primeros, fallan todos a resistencia, aunque cumplen a pandeo. Sus coeficientes de aprovechamiento de resistencia están en torno a 1,10 y 1,20. Para que cumplan, una solución sería aumentar al siguiente perfil en cuanto a diámetro de sección, el PH0 355.6x25. Pero los pilares en cuestión tienen un diámetro de 320 centímetros en el edificio real. Otra solución pasaría por conseguir un perfil que mantuviera el diámetro original, pero aumentara el espesor, ya que de haber sido de 30 o 35 mm en lugar de 25 mm, los pilares habrían funcionado correctamente, pero el software no dispone de espesores mayores para esta sección.

Figura 78: El pilar 508x40 falla formado por acero S275.

Software interface showing the configuration and checks for a PH0 508x40 column with S275 steel. The column is 6.00 m long. The checks section shows the following results:

Check	Value	Status
Resistencia	1.24	Falla
Resistencia ELS desfavorable	5	Falla
Resistencia ELS desfavorable (Chi Z)	1.00	Falla
Resistencia ELS desfavorable (Chi Y)	1.00	Falla
Pandeo lateral ELS desfavorable	0.00	Cumple
Pandeo lateral ELS desfavorable (Chi lateral)	1.00	Cumple

El pilar de PH0 508x40, donde comienza el voladizo, no cumple [Figura 78] con un coeficiente de 1.24 y, escogiendo la siguiente sección, PH0 508x50, también falla —pero por muy poco— con un coeficiente de aprovechamiento de 1,03. Architrave no dispone de grosores mayores para este perfil, pero con un espesor de 55 o 60 milímetros cumpliría sin problema. También se podría saltar a un PH0 619x40, pero eso aumentaría considerablemente el diámetro del pilar. Finalmente, usando un acero S355 se puede mantener la sección original [Figura 79].

Hay tres apoyos en el último pórtico a analizar, el situado en el interior. Dos de ellos son los que han sido recubiertos por columnas falsas, y se han supuesto de perfiles PH0 508x40. Ambos cumplen correctamente, siendo el pilar más externo, situado al inicio del voladizo norte, el que menores esfuerzos recibe, con un coeficiente de resistencia de 0,68. El otro pilar tiene un coeficiente más ajustado de 0,95.

Figura 79: El pilar 508x40 cumple cuando es de acero S355.

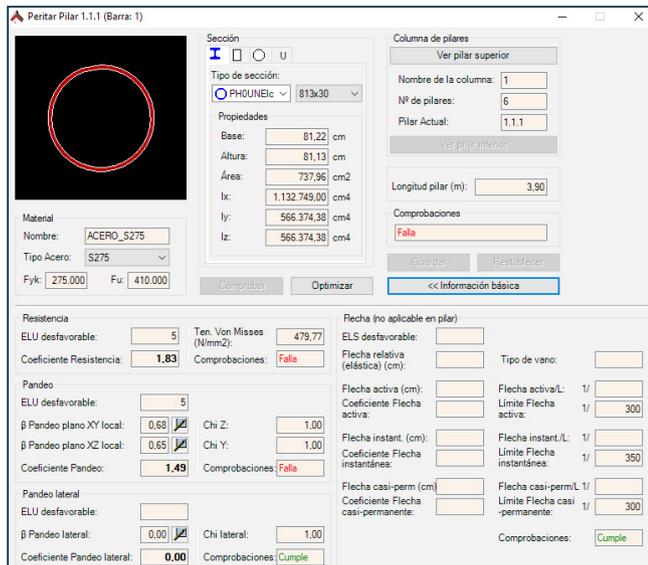
Software interface showing the configuration and checks for a PH0 508x40 column with S355 steel. The column is 6.00 m long. The checks section shows the following results:

Check	Value	Status
Resistencia	0.96	Cumple normativa
Resistencia ELS desfavorable	5	Cumple
Resistencia ELS desfavorable (Chi Z)	0.99	Cumple
Resistencia ELS desfavorable (Chi Y)	0.99	Cumple
Pandeo lateral ELS desfavorable	0.00	Cumple
Pandeo lateral ELS desfavorable (Chi lateral)	1.00	Cumple

El tercer pilar del pórtico —el más importante de la estructura, pues recibe la mayoría de las cargas del voladizo— tiene el perfil más generoso: un PH0 813x30. Sin embargo, el perfil falla tanto a resistencia (coeficiente de 1,83) como a pandeo (coeficiente de 1,49) [Figura 80]. Ninguno de los perfiles PH0 de los que dispone Architrave logra cumplir con la normativa. El de mayor tamaño, PH0 1219x25, alcanza un coeficiente de pandeo de 0,99 pero uno de resistencia de 1,16.

Lo cierto es que este pilar recibe unos esfuerzos muchas veces mayores que el resto de los soportes. Su axil es de -16.251 kN, mientras que el resto de los pilares exhiben axiles menores de -4.000 kN, a excepción del otro pilar del voladizo sur que recibe una compresión de 10.600 kN. Y en cuanto a momentos flectores, recibe un momento en el eje Y de -709 kN · m —cuando en la mayoría de pilares el valor máximo de los momentos no pasa de 100 kN · m—. Todo ello genera unas tensiones que hacen fallar a las secciones perfiles seleccionadas.

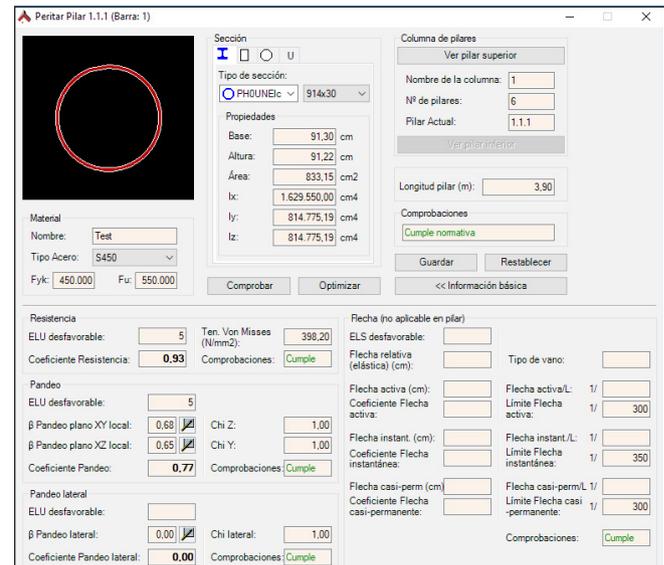
Figura 80: Pilar del pórtico central PH0 813x30.



Para proponer una solución, se podría recurrir a estas tres opciones. La primera sería realizar un relleno de hormigón armado en el pilar metálico creando una sección compuesta. El hormigón ayudaría así a absorber la enorme compresión que está afectando al pilar, mientras que los momentos los absorbería el acero. Sin embargo, este remedio posiblemente aumentaría en exceso el área de la sección, utilizando una gran cantidad de material que no estaría siendo bien aprovechada.

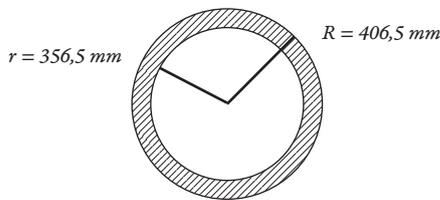
Una segunda alternativa podría ser la de utilizar un acero de mayor resistencia en lugar del S275. Modificando la sección para que utilice un acero laminado S450, los coeficientes de resistencia y pandeo pasan de 1,77 y 1,42 respectivamente a 1,08 y 0,87. Por muy poco sigue fallando a resistencia. Saltando a una sección PH0 914x30 el pilar cumple a la perfección, con coeficientes de 0,90 en resistencia y 0,73 en pandeo [Figura 81].

Figura 81: Pilar del pórtico central PH0 914x30 de acero S450.



Finalmente, sería posible también mantener la dimensión de un PH0 813, pero aumentar el espesor de su pared. Eso podría aportar la inercia y sección resistente necesarias para hacer cumplir el soporte, e incluso se podría usar en combinación con un acero de mayor resistencia. Para el tamaño que tiene semejante pilar, 30 mm de espesor de pared son claramente insuficientes, y aumentarlo a 50 o incluso 60 mm no parece muy descabellado. De esta manera, se conseguiría mantener el diámetro de sección que tiene el edificio real.

Para probar esta hipótesis, se ha realizado el cálculo de las tensiones máximas en el pilar imaginario PH0 813x50. El primer paso es hallar la superficie de la sección, que se calcula restando el área del círculo interior (el hueco) al área de la envolvente o círculo exterior.



$$\Omega = \pi R^2 - \pi r^2 = \pi(R^2 - r^2)$$

$$\Omega = \pi(406,5^2 - 356,5^2) = 119851 \text{ mm}^2$$

Hallada el área se calcula la inercia I, que al ser una sección simétrica y de acero debe ser idéntica en el eje Z y en el eje Y (y además en todas las posibles direcciones, al tratarse de un círculo).

$$I_z = I_y = \frac{\pi}{4}(R^4 - r^4)$$

$$I_z = \frac{\pi}{4}(406,5^4 - 356,5^4) = 8759 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Con la inercia se encuentra el módulo resistente W, que por consecuencia es también idéntico en ambos ejes.

$$W_z = W_y = \frac{I_z}{R} = 21547 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

La tensión máxima que sufre el perfil se encuentra en su punto más bajo, donde colaboran los mayores axiles (-16251 kN) y momentos en z (-3567 kN · m), así como un fuerte momento en y (-527 kN · m). Con esos valores se calcula la tensión máxima σ_{max} sumando las tensiones provocadas por axiles y por los momentos flectores de las dos direcciones.

$$\sigma_{max} = \left| \frac{N}{\Omega} \right| + \left| \frac{M_z}{W_z} \right| + \left| \frac{M_y}{W_y} \right| = \text{kN/m}^2$$

$$\sigma_{max} = \frac{16251 \cdot 10^3}{119851} + \frac{(3567 + 527) \cdot 10^6}{21547 \cdot 10^3}$$

$$\sigma_{max} = 136 \text{ N/mm}^2 + 190 \text{ N/mm}^2 = 326 \text{ N/mm}^2$$

El último paso es comprobar que la tensión máxima no supere el límite elástico del acero una vez aplicados los coeficientes de seguridad.

$$\sigma_{max} \leq f_{yd}$$

$$f_{yd} = \frac{355}{1,05} = 338 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{max}d = 326 \text{ N/mm}^2 < 338 \text{ N/mm}^2$$

Como conclusión, aumentar el espesor del perfil ha permitido que, sin incrementar el diámetro total de la sección, el pilar cumpla en su Estado Límite Último más desfavorable. Ha sido necesario además usar un acero de mayor límite elástico, el S355.

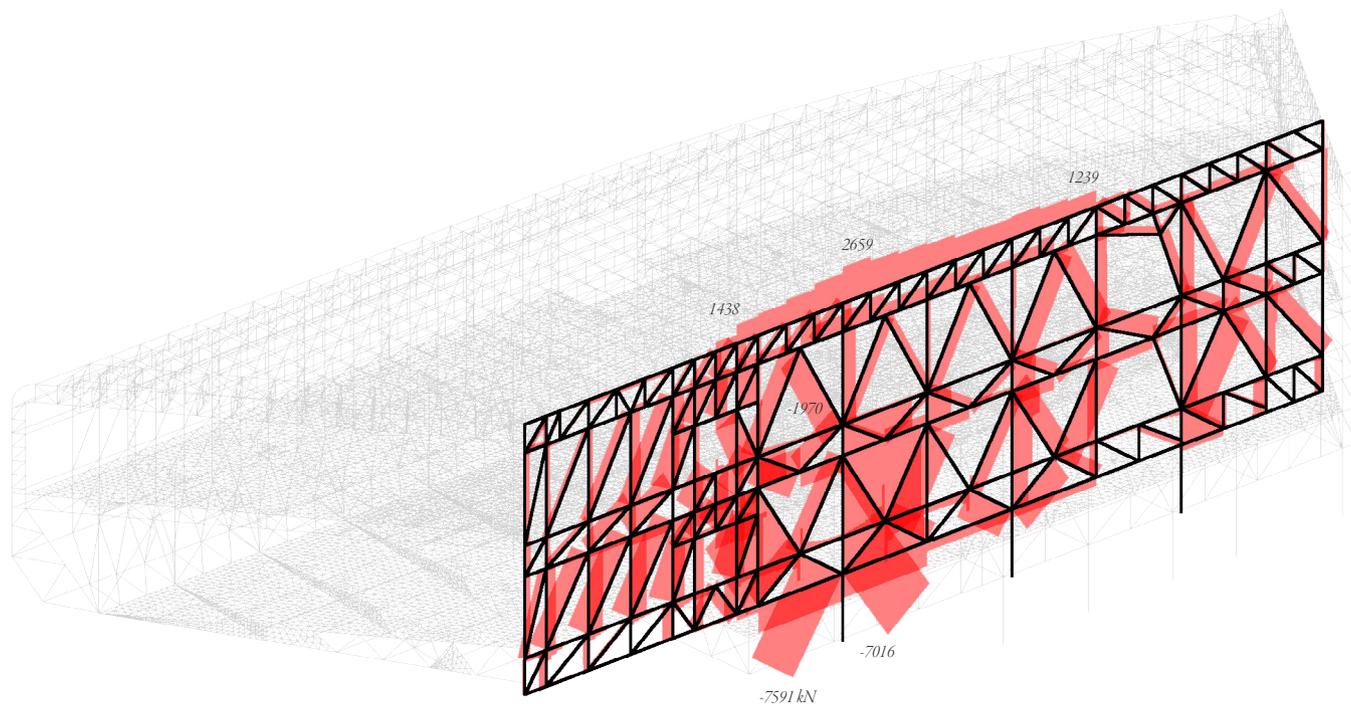
5.5. Esfuerzos y dimensionado: vigas principales

Tres grandes vigas se encargan de resolver los principales retos estructurales del Centro Botín. La más importante, la del interior, junto con la situada al oeste resuelven el espacio de galerías y los voladizos norte y sur. Se espera por tanto que reciban esfuerzos significativamente mayores que los del pórtico Pachinko. Este último recibe principalmente las cargas provenientes de media crujía de seis metros, y por tanto estará muy poco afectado. A continuación, se analizará el comportamiento de cada una, pues pese a ser similares, actúan de forma distinta.

PÓRTICO INTERIOR

En primer lugar, la celosía interior funciona como una gran viga pared, de dos pisos de altura, con tres apoyos y vuelos en ambos extremos. Por la dimensión de estos extremos, se podría simplificar su comportamiento al de una estructura en T. Esto es, un soporte central (en esta ocasión, tres pilares) sostiene una viga que vuela en ambos lados del sistema y que por tanto deformaría de forma convexa. Con esto en mente podrían esperarse tracciones en la parte superior de la celosía y compresiones en la parte inferior. Los diagramas de axiles [Figura 82] confirman tracciones de hasta 2660 kN

Figura 82: Esfuerzos axiales de la celosía interior, mostrando el comportamiento de sus barras, ELU 03: uso.



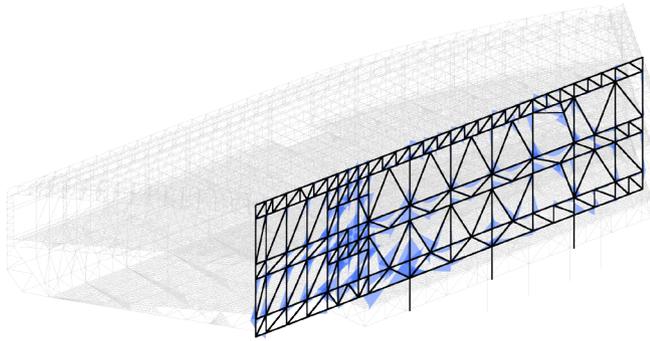


Figura 83: Momentos en la celosía interior, ELU 03: uso.

en el cordón superior del sistema y compresiones de hasta 2010 kN el cordón más inferior. El voladizo sur presenta una fuerte triangulación para absorber los esfuerzos, y la posición de sus barras indica que las diagonales deben estar fuertemente traccionadas. El modelo presenta tracciones en esas barras en torno a los 2000 kN, con un máximo de 2500 kN. Finalmente cabe destacar las fuertes compresiones de las dos barras diagonales y la vertical que preceden al pilar, ya que le transmiten las cargas de gran parte del edificio. Las tres reciben una compresión en torno a los 7000 kN.

En cuanto a momentos flectores [Figura 83], las barras diagonales del voladizo presentan valores de hasta $120 \text{ kN} \cdot \text{m}$ y nuevamente aparecen importantes esfuerzos en el contacto con el pilar de sección 82 cm. En ese nudo, los momentos de algunas barras llegan a los $300 \text{ kN} \cdot \text{m}$. Los resultados también

Figura 85: Indeformada de la celosía interior.

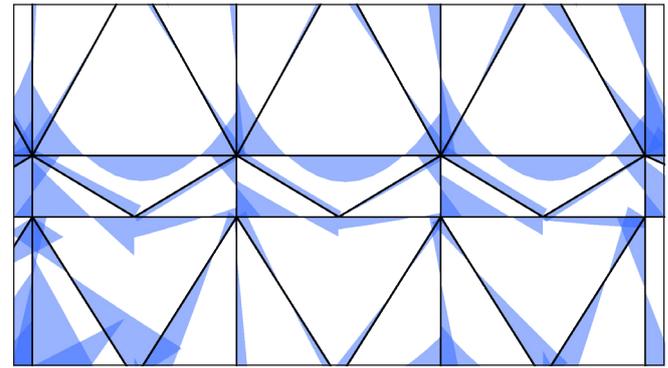
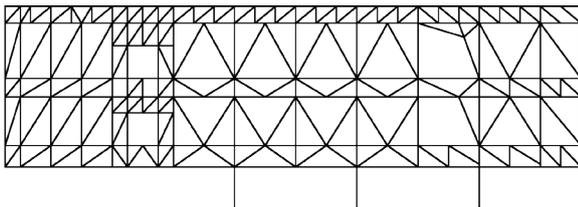
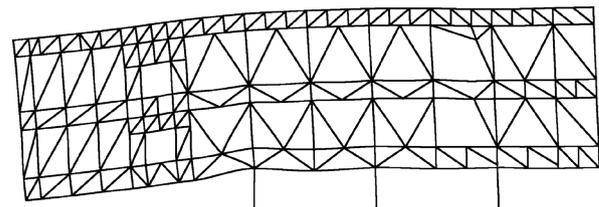


Figura 84: Detalle de momentos flectores en las barras.

permiten apreciar cómo las barras que reciben cargas en su longitud —en las que descansa el forjado— presentan diagramas típicos de las vigas, con momentos positivos en el centro de vano y negativos en los extremos. Por otra parte, las vigas inferiores a éstas, donde ya no hay carga vertical actuando sobre ellas, se limitan a transmitir los momentos que reciben en sus nudos [Figura 84].

La celosía deforma, como es de esperar, con un gran desplazamiento en el voladizo sur, que llega a bajar 10,8 cm respecto a su posición original. Más interesante es que, pese a su caída, el voladizo es prácticamente indeformable en su longitud. Son los grandes «cortantes» en el contacto con el pilar los que producen el quiebro y caída (realmente es el equivalente a cortantes si la viga fuera una sola barra; en realidad se trata de axiles transmitidos a través de la celosía) [Figuras 85 y 86].

Figura 86: Deformada de la celosía interior, ELU 03.



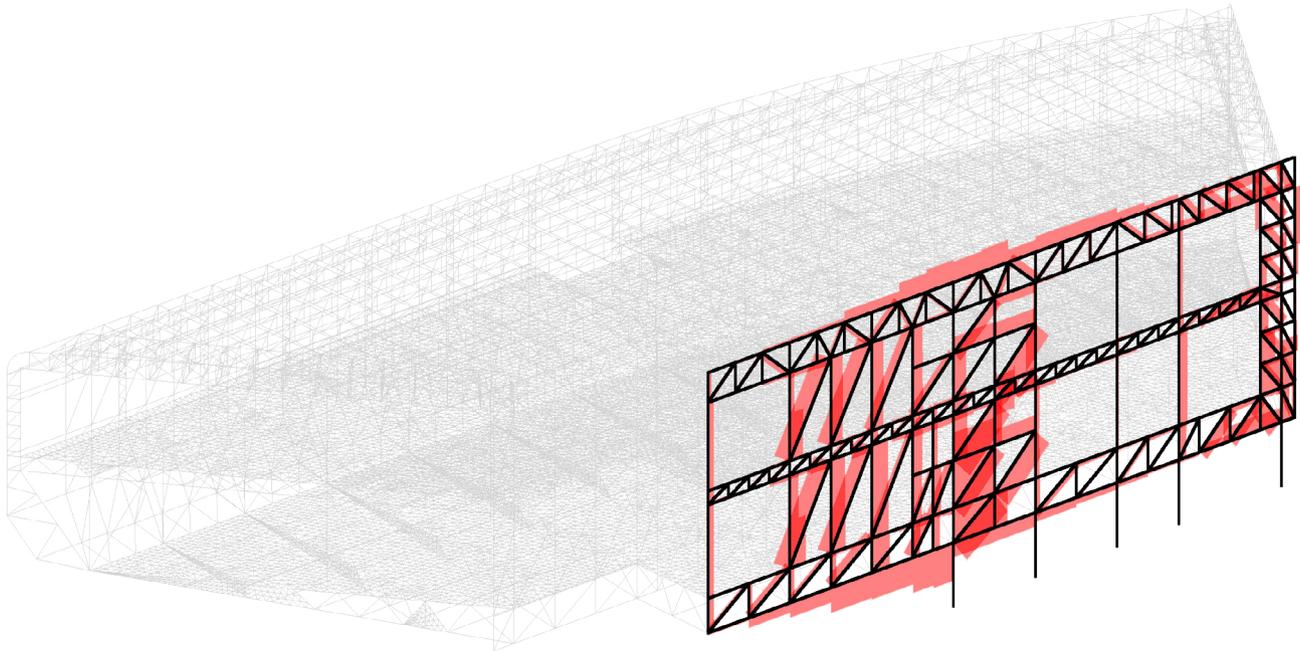
PÓRTICO PACHINKO

A pesar de tener menores cargas, la viga situada junto al Pachinko no deja de ser interesante por su diferente configuración, si se la compara con la viga interior. Por cuestiones programáticas, la celosía en cuestión debía tener grandes aperturas de hasta 6x6 metros en cada planta. Estos huecos se utilizan para fenestración, acceso al centro y conexión con escaleras y ascensores. Su presencia implica, en cambio, la ausencia de triangulación en tales puntos, de forma que el conjunto pierde parte de la condición de viga-pantalla que abarcaba dos plantas. Dicho eso, cabe puntualizar que el vuelo de la estructura en el sur genera grandes esfuerzos, y que, para resolverlos, sí se ha tenido que triangular insistentemente

el tramo de inicio del voladizo. El resultado es un sistema híbrido que en cuatro vanos se asemeja más bien a un esquema de pórtico tradicional, con pilares y vigas; y en otros puntos toma la forma de viga-pantalla característica de este proyecto. En la zona triangulada también aparecen algunas celdas que carecen de barra diagonal. Esto se debe a que a través de ellas se produce el intercambio de aire con el exterior [Figura 53 en la página 45].

En los diagramas de axiles [Figura 87] se encuentran tracciones en la parte superior del conjunto, causadas por el vuelo del extremo sur, así como también en las barras diagonales que lo resuelven. La base del voladizo está en cambio comprimida.

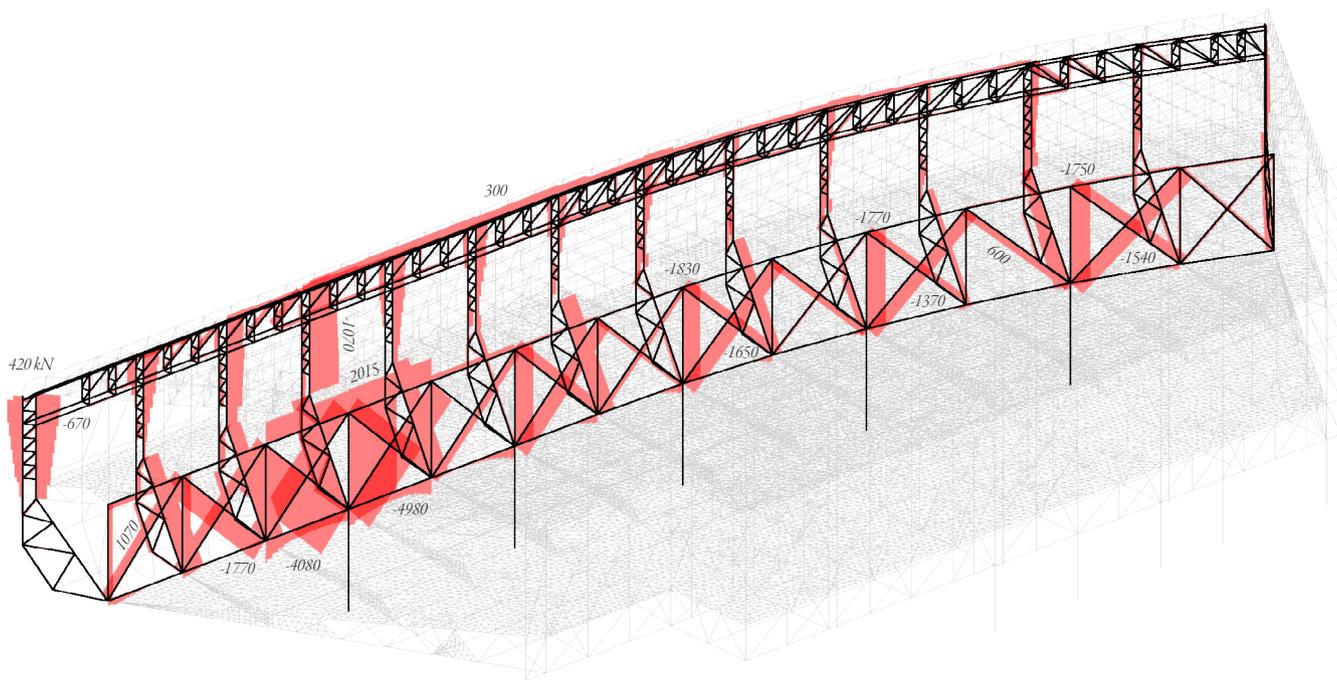
Figura 87: Esfuerzos axiles el pórtico Pachinko, con sus grandes huecos, ELU 03: uso.



PÓRTICO OESTE: CELOSÍA

Ocultada en la fachada oeste, esta «*viga principal*» se comporta de una forma totalmente distinta a las anteriores. Se divide en dos partes: la que se encarga de soportar el forjado de planta baja y primera planta y la que se encarga de sostener la cubierta. En el primer caso, la celosía toma una forma más similar a la del resto de pórticos, con un sistema de viga triangulada—ahora ocupando una sola altura— que con su gran inercia resuelve los voladizos. Como es de esperar, las barras verticales situadas sobre los pilares están comprimidas, con valores de 2000 kN y, en el caso del pilar cercano al voladizo, con casi 5000 kN. Las diagonales, al estar dispuestas en cruz, alternan compresiones y tracciones [Figura 85].

Figura 88: Esfuerzos axiales del pórtico oeste, con sus dos sistemas solapados, ELU 03: uso.



PÓRTICO OESTE: NERVIOS

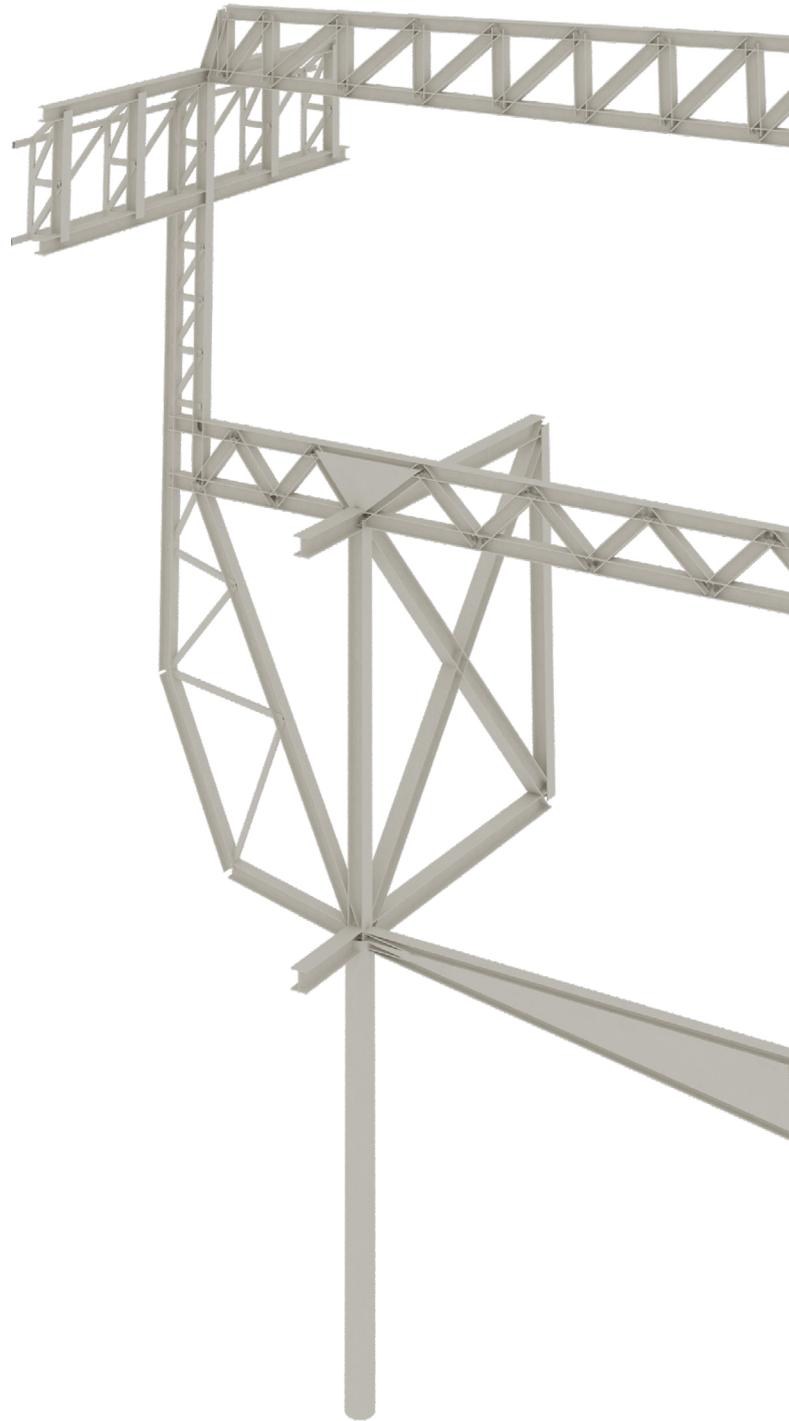
Más interesante sin embargo es el sistema que soporta la cubierta. Su origen tiene dos motivos. El primero, es la curvatura de la fachada, que impide que la celosía vista anteriormente ocupe el perímetro del edificio, de modo que se separa de éste 4 metros, y con ella los pilares. El segundo, es la voluntad de ganar espacio en segunda planta. Aprovechando que en esta altura la fachada ya es completamente vertical, se decidió desplazar la estructura al borde del edificio para así ganar esos cuatro metros, ya que, de haber continuado la celosía de la planta inferior hasta la cubierta, habría quedado una gran cantidad de espacio muerto en la galería.

Para resolver la transmisión de cargas, se decidió situar una viga perimetral de dos metros de altura, situada a la altura de la cubierta, sobre la que apoyan las «vigas secundarias» de cubierta. Dicha viga se soporta por unos nervios en forma de palo de hockey que la conectan a la celosía inferior. Esta suerte de costillas se adaptan a la curvatura del edificio, pero también implican una gran excentricidad de las cargas verticales respecto al pilar que las recibe. Viendo el diagrama de la *figura 88*, parecería que los nervios, aguantados solamente en un punto en su base, fueran a volcar hacia atrás.

En realidad, el sistema se ayuda de los propios forjados que soporta para ganar estabilidad en la dirección de vuelque [*Figura 89*]. Tanto las vigas de cubierta como las de segunda planta se encargan de evitar el giro. Atendiendo a los resultados, efectivamente la viga del segundo forjado se comporta como un voladizo en el tramo que va desde la celosía de primera planta y la «costilla», con tracciones en el cordón superior y compresiones en el inferior. En el tramo contiguo de la viga, el de las galerías, ya se comporta como viga con estos esfuerzos invertidos. Además, la celosía y la viga de forjado forman con el nervio una triangulación que le aporta rigidez. El nervio en sí ya contiene en su interior barras de menor sección que lo triangulan.

En la cubierta la situación es más complicada, ya que simultáneamente el forjado impide que el nervio vuelque y a su vez el nervio soporta completamente al forjado. De esta manera se equilibran hasta cierto punto la deformación del forjado en su centro —que tira del nervio hacia el interior— y la excentricidad de la carga sobre la base del nervio, que lo intenta volcar en dirección contraria.

Figura 89: Detalle del sistema de costillas o nervios.



DIMENSIONADO

Originalmente, a todas las barras de las celosías principales se les aplicó un perfil de sección HEB 280 de acero S275. Evidentemente, las tres vigas no tienen la misma importancia, y es de esperar que el perfil pueda no ser suficiente en algunas o ser excesivo en otras. Dividiendo el estudio de estos elementos en las tres vigas principales —la próxima al Pachinko, la interior, y la orientada al oeste— se debería poder observar una diferencia en la obtención del perfil adecuado. Es decir, sería conveniente usar un perfil distinto según las necesidades de cada pódico.

Comenzando por la viga más próxima al Pachinko, el peritaje realizado en Architrave revela que todas las barras cumplen sobradamente cuando se suponen de sección HEB-280. Presentan un rango de coeficiente de resistencia de entre 0,20 y 0,60 [Figura 90]. Esto es de esperar, ya que la celosía en cuestión es la que menos esfuerzos recibe de las tres. A ella

Figura 90: Barra de la celosía Pachinko, con un HEB-280.

The screenshot shows the 'Peritar Pilar 2.3 (Barra: 250)' window. The 'Sección' dropdown is set to 'HEB 280'. The 'Columna de pilares' section shows 'Nombre de la columna: 2', 'Nº de pilares: 8', and 'Pilar Actual: 2.3'. The 'Propiedades' section lists: Base: 28,00 cm, Altura: 28,00 cm, Área: 132,99 cm², Ix: 141,21 cm⁴, Iy: 6.596,29 cm⁴, Iz: 19.383,48 cm⁴. The 'Material' section shows 'Nombre: ACERO_S275' and 'Tipo Acero: S275'. The 'Resistencia' section shows 'ELU desfavorable: 5', 'Ten. Von Mises (N/mm²): 155,77', and 'Coeficiente Resistencia: 0,59'. The 'Pandeo' section shows 'Pandeo ELU desfavorable: 3', 'β Pandeo plano XY local: 0,53', 'β Pandeo plano XZ local: 0,57', and 'Coeficiente Pandeo: 0,51'. The 'Comprobaciones' section shows 'Cumple normativa' and 'Cumple'. The 'Resistencia' section also shows 'Flèche (no aplicable en pilar)', 'ELS desfavorable', 'Flèche relativa (elástica) (cm)', 'Flèche activa (cm)', 'Flèche instant. (cm)', and 'Flèche casi-perm (cm)'. The 'Pandeo lateral' section shows 'ELU desfavorable', 'β Pandeo lateral: 0,00', and 'Coeficiente Pandeo lateral: 0,00'. The 'Comprobaciones' section shows 'Cumple'.

solamente está conectada una crujía de 6 metros —la correspondiente a la zona de instalaciones— y por tanto recibe únicamente la carga de 3 de ellos.

Redimensionar a un perfil menor es quizás la mejor opción en este caso, evitando así el uso excesivo de material. Utilizando una sección HEB-220 se consigue que todas las barras de la viga sigan cumpliendo [Figura 91], pero con un rango de cumplimiento más razonable, de entre 0,30 y 0,95. A pesar de que varias barras siguen sobredimensionadas, es preferible mantener en toda la celosía el mismo perfil a variarlo barra por barra. Además, el perfil HEB-220 coincide con el ya usado en las vigas secundarias y la diferencia de sección entre las barras de esta viga principal y las barras de las otras dos es consistente con lo visto en las fotografías de la obra.

La viga central, también de dos pisos de altura y que recibe los mayores esfuerzos del edificio, contiene varias barras que

Figura 91: Barra de la celosía Pachinko, con un HEB-220.

The screenshot shows the 'Peritar Pilar 2.3 (Barra: 250)' window. The 'Sección' dropdown is set to 'HEB 220'. The 'Columna de pilares' section shows 'Nombre de la columna: 2', 'Nº de pilares: 8', and 'Pilar Actual: 2.3'. The 'Propiedades' section lists: Base: 22,00 cm, Altura: 22,00 cm, Área: 91,30 cm², Ix: 73,53 cm⁴, Iy: 2.843,68 cm⁴, Iz: 8.110,78 cm⁴. The 'Material' section shows 'Nombre: ACERO_S275' and 'Tipo Acero: S275'. The 'Resistencia' section shows 'ELU desfavorable: 5', 'Ten. Von Mises (N/mm²): 246,38', and 'Coeficiente Resistencia: 0,94'. The 'Pandeo' section shows 'Pandeo ELU desfavorable: 3', 'β Pandeo plano XY local: 0,53', 'β Pandeo plano XZ local: 0,57', and 'Coeficiente Pandeo: 0,79'. The 'Comprobaciones' section shows 'Cumple normativa' and 'Cumple'. The 'Resistencia' section also shows 'Flèche (no aplicable en pilar)', 'ELS desfavorable', 'Flèche relativa (elástica) (cm)', 'Flèche activa (cm)', 'Flèche instant. (cm)', and 'Flèche casi-perm (cm)'. The 'Pandeo lateral' section shows 'ELU desfavorable', 'β Pandeo lateral: 0,00', and 'Coeficiente Pandeo lateral: 0,00'. The 'Comprobaciones' section shows 'Cumple'.

fallan a resistencia [Figura 92]. Por ello se ha optado por aumentar el perfil en toda la celosía a un HEB-320 [Figura 93], aunque ello implique exceder lo requerido en muchas de las otras barras. Con ello, todavía quedan algunas barras puntuales que siguen fallando en el cálculo. En estos casos, la mejor solución sería reforzar las barras mediante pletinas metálicas, especialmente en los tramos de su longitud que más tensiones generen. El edificio real también utiliza este método, como puede observarse en las fotografías de la obra y de la fabricación de la estructura [Figura 48 en la página 43].

La última celosía muestra un rendimiento similar a la anterior, siendo conveniente aumentar la sección de todas las barras a un HEB-320 o incluso a una sección mayor, y reforzar las barras que así lo requieran. Es importante mencionar que otra opción perfectamente válida sería la de utilizar un acero de mayor resistencia para las barras afectadas. Usando un S355 o S450 en lugar del acero S275 se puede hacer cumplir los

elementos en cuestión sin necesidad de aumentar la sección. Finalmente, el sistema de nervios o «costillas» no necesita una sección tan resistente como un HEB-280, y es posible redimensionarlo a un HEB-220 o incluso a un perfil menor.

Figura 92: Viga del pórtico interior con sección HEB-280.

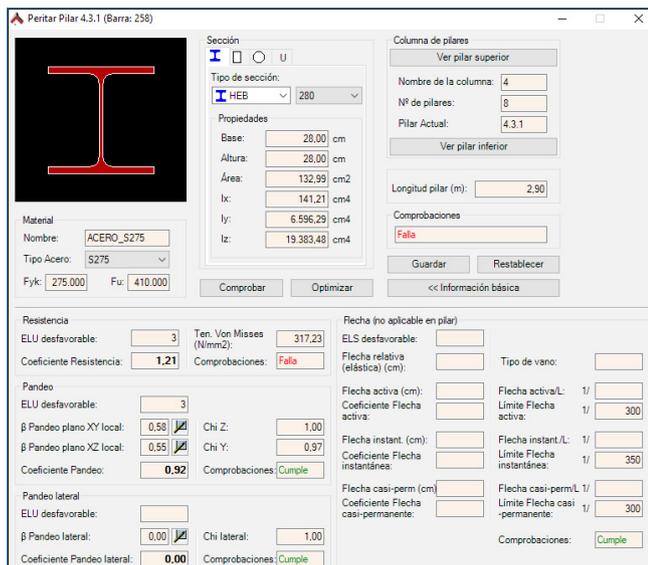
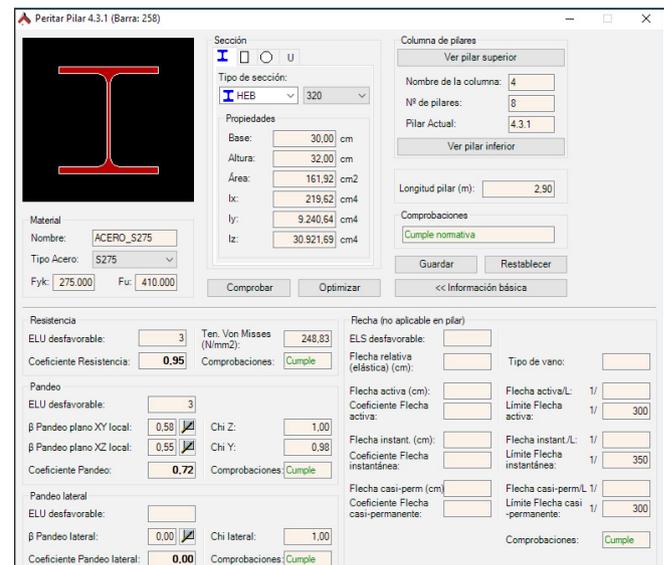


Figura 93: Viga del pórtico interior con sección HEB-320.



5.6. Esfuerzos y dimensionado: vigas secundarias

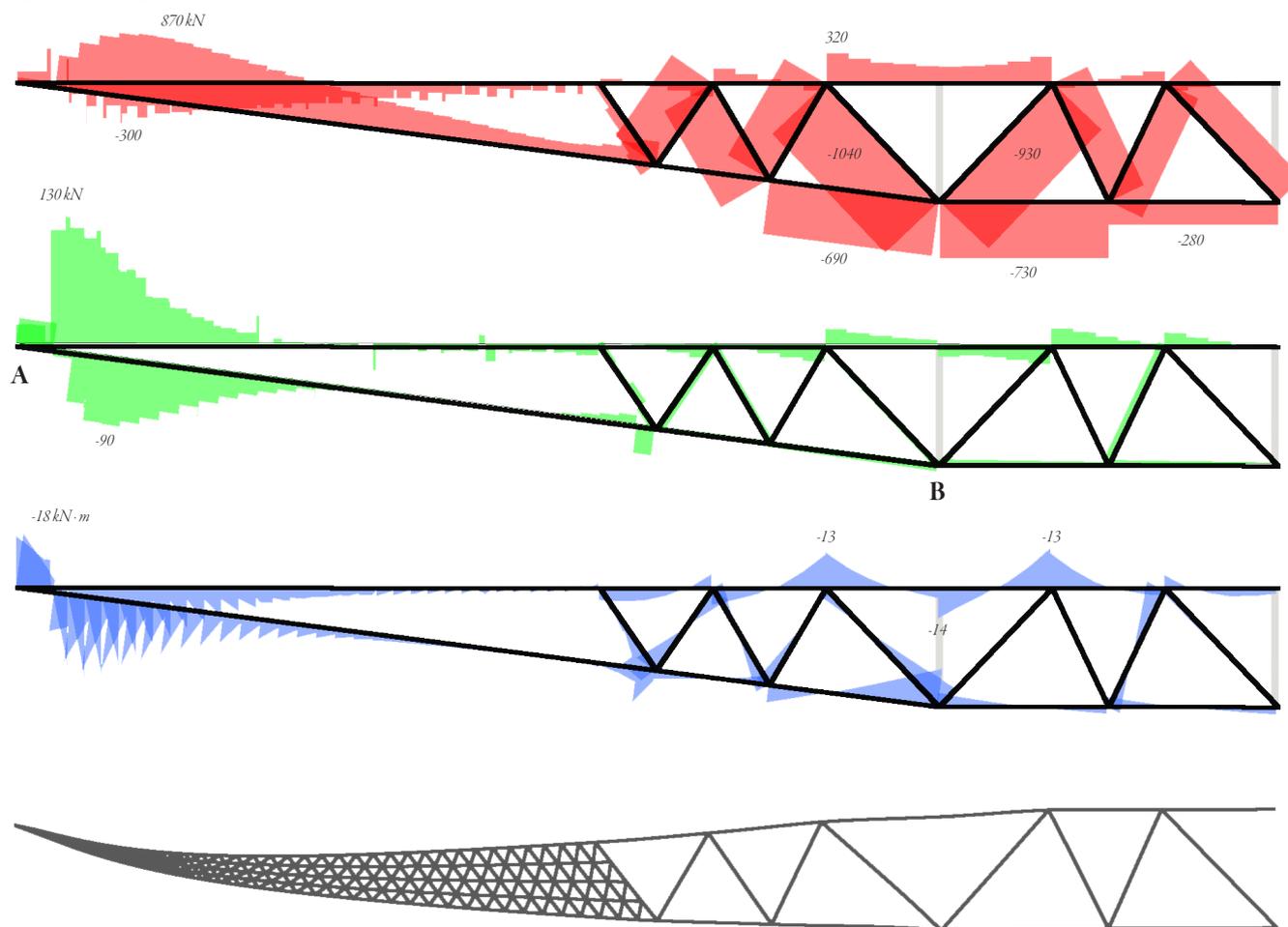
VIGAS DE PRIMERA PLANTA

Para analizar las celosías que forman los forjados, se ha tomado una de cada planta. Empezando por la planta baja, las vigas son triangulares y en una parte de su longitud presentan un relleno metálico. En su sección de mayor altura, llegan a medir 210 cm y en cuanto a su longitud, las vigas llegan a

medir 25 metros. La deformada que adopta la celosía indica un trabajo a flexión por las cargas que sobre ella gravitan.

La viga tiene en realidad dos tramos: uno comprendido entre los pórticos interior y oeste que adopta la forma triangular; y otro entre el interior y el Pachinko, de geometría rectangular.

Figura 94: Viga de primera planta: axiles, cortantes, momentos y deformada.



Esto, unido al hecho de que no se trata de una viga de sección regular —sino que va creciendo en inercia cuanto más se aleja del vértice del triángulo que forma— origina dos comportamientos distintos a un lado y otro de la viga. Intuitivamente, se puede adivinar en base a la deformación que adopta, que el cordón inferior de la cercha queda traccionado en la parte triangular de la viga y comprimido en la parte de la derecha. Lo contrario parece ocurrir en el cordón superior, comprimido a la izquierda y traccionado a la derecha.

El diagrama de axiles [Figura 94] confirma esta suposición y aporta valores numéricos. La tracción máxima, de 870 kN, aparece en la barra inferior del triángulo. El cordón superior está en cambio comprimido con un valor máximo de 300 kN. En la parte de mayor inercia de la celosía los papeles se invierten, y el cordón inferior muestra una compresión máxima de 730 kN mientras que el superior está traccionado hasta 320 kN. En la imagen se observa como los esfuerzos tanto de axiles como de cortantes y momentos van cambiando de valor de forma escalonada. Esto sólo ocurre en la parte triangulada y la causa es la modelización del relleno metálico. La malla de elementos finitos que representa el relleno transmite a la viga sus esfuerzos en los puntos de contacto con ésta.

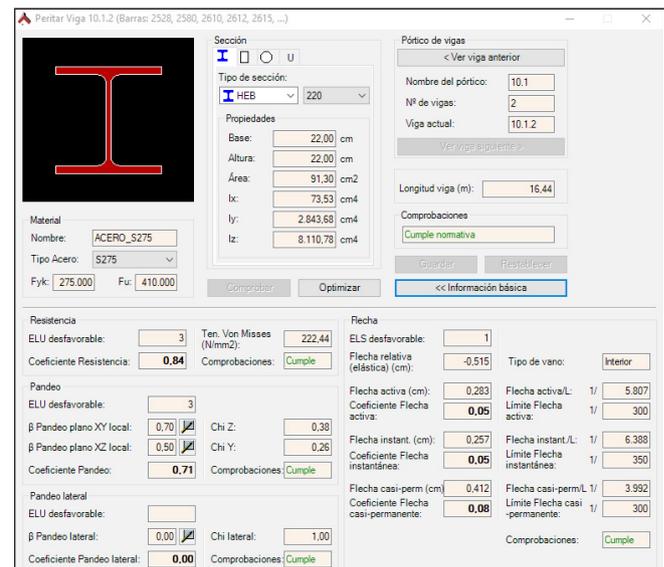
Los valores de cortantes deben representar la transmisión de cargas entre la viga y la estructura vertical portante, principalmente en el punto A, donde la celosía entra en contacto con la viga principal oeste y el punto B, donde se sitúa uno de los soportes del edificio. En el punto A efectivamente aparecen grandes cortantes, confirmando la relación con la celosía principal. El cordón superior sufre un cortante máximo de 113 kN y el inferior uno de -61 kN.

En cuanto al punto B, el contacto con el pilar, no se aprecia

ningún cortante significativo. Evidentemente, la transmisión vertical con el soporte la realizan las barras diagonales comprimiéndose 330 y 300 kN respectivamente. Las celosías siempre buscan incluir nudos que conecten a barras diagonales en su punto de contacto con elementos de soporte. La viga no presenta esfuerzos de momentos significativos.

Estudiados los diagramas, la comprobación del elemento a resistencia en el ELS y ELU más desfavorables revela que todas las barras de la viga cumplen satisfactoriamente con la normativa del CTE. En el cordón inferior las exigencias se cumplen con coeficientes de pandeo y resistencia alrededor de 0,70 [Figura 95]. El cordón inferior al estar mayormente traccionado no presenta problemas de pandeo, y su coeficiente a resistencia oscila entre 0,30 y 0,70 dependiendo del tramo. Las barras diagonales también cumplen todas, con coeficientes de entre 0,30 y 0,60 aunque en el caso de los elementos traccionados tampoco hay pandeo.

Figura 95: Cordón inferior, cumpliendo a pandeo y resistencia.

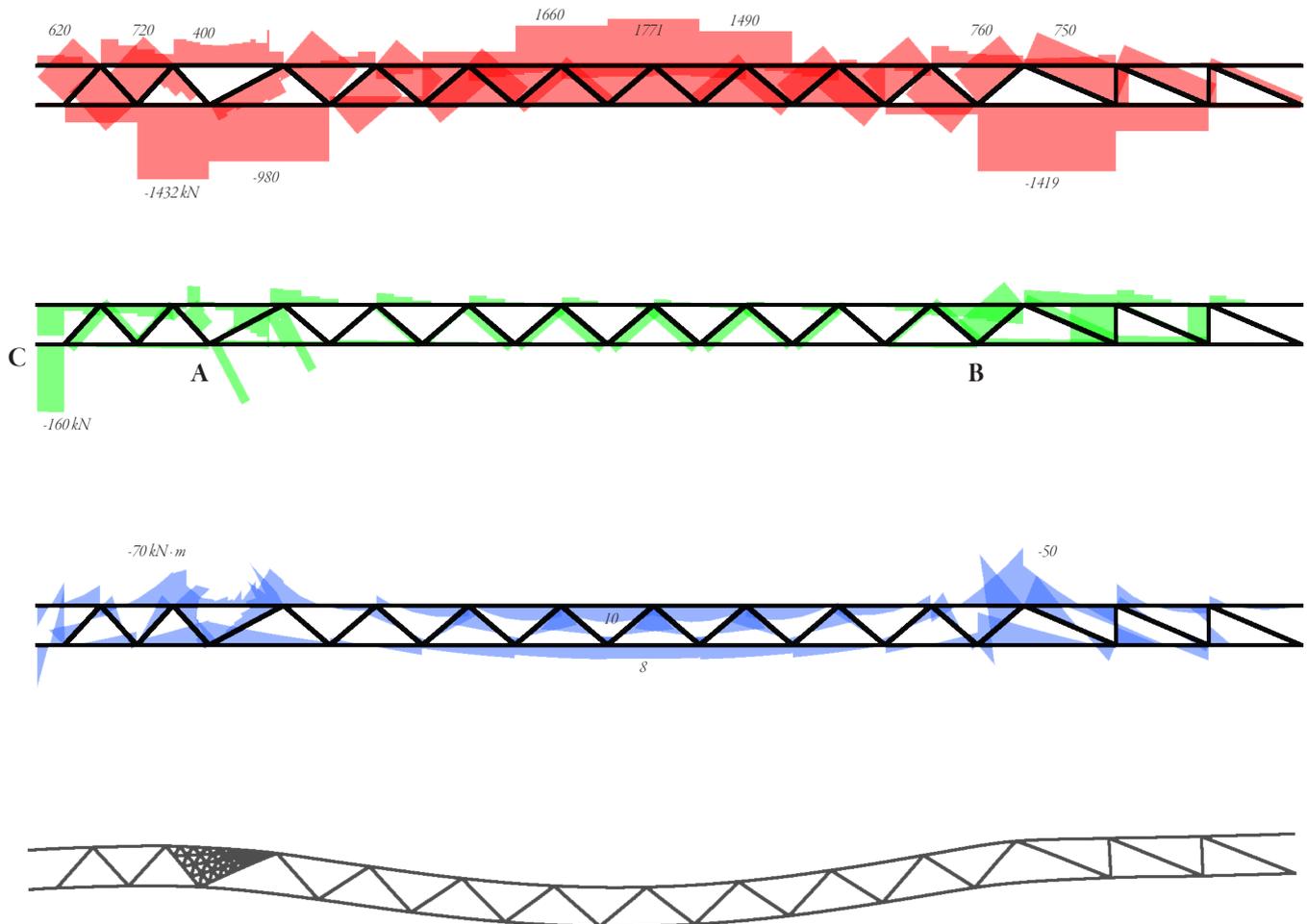


VIGAS DE SEGUNDA PLANTA

La celosía del forjado intermedio tiene una geometría rectangular. El comportamiento por tanto debería ser más simétrico que en el caso anterior y seguir un modelo de barra biapoyada funcionando a flexión. Así se muestra la deformada, donde la parte inferior de la celosía aparenta comportarse a tracción en el centro de vano y a compresión junto a los apoyos. El cordón superior por su parte presenta el comportamiento opuesto.

Observando el diagrama de axiles [Figura 96], las compresiones máximas aparecen efectivamente junto a las zonas de contacto con las celosías principales, los puntos A y B. Los valores máximos que toman estas regiones son de -1432 kN y -1420 kN y aparecen en el cordón inferior. La tracción máxima aparece en el centro de vano, con un valor de 1771 kN , también en el cordón inferior de la viga. Las barras diagonales están dispuestas en configuración de viga Warren

Figura 96: Viga de segunda planta: axiles, cortantes, momentos y deformada.

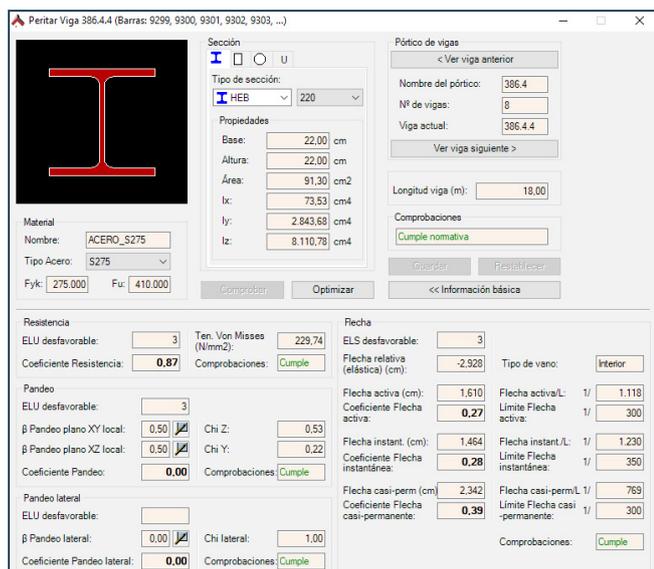


—triangulan sucesivamente en simetría sin presencia de montantes— por lo que presentan compresiones y tracciones alternándose, que van decreciendo conforme se acercan al centro de la celosía.

En el extremo de la izquierda, los grandes axiles de tracción que aparecen en las diagonales entre los puntos A y C corresponden al fenómeno previamente comentado de que las vigas de forjado sostienen a los nervios para evitar que vuelquen.

El único valor de esfuerzos de cortantes significativo aparece en el extremo oeste de la viga, el punto C, donde descansan la estructura que soporta la fachada y la cubierta, pero no hay barras diagonales que puedan transmitir las cargas verticales que se generan. Por tanto, el cordón inferior y superior reciben los esfuerzos.

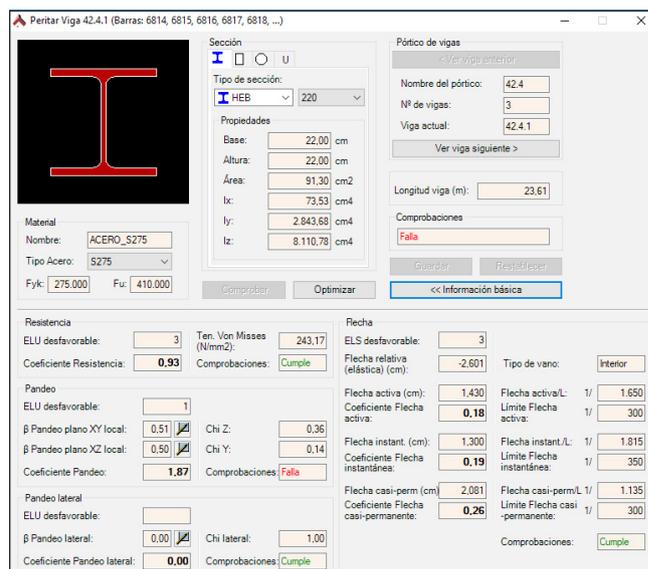
Figura 97: Cordón superior, cumpliendo sin problema tanto a resistencia como a pandeo.



Finalmente aparecen fuertes momentos negativos en los contactos con elementos de soporte de los puntos A y B y momentos positivos en el cordón superior e inferior de la viga por el peso que apoya directamente sobre ellos (el forjado de chapa colaborante y el falso techo).

La peritación de esta celosía muestra unos coeficientes de resistencia de 0,70 y 0,80 para los cordones superior e inferior respectivamente, mientras que en las barras diagonales es de 0,25 en las situadas en el centro de vano y de 0,90 en las que toman contacto con la estructura portante [Figura 97]. En cuanto a los coeficientes de pandeo en las barras comprimidas, todas cumplen menos la del cordón inferior [Figura 98]. Esto es más bien un problema del software, que interpreta erróneamente la barra inferior como un elemento continuo en lugar de los tres tramos que en realidad tiene.

Figura 98: Cordón inferior, cumpliendo a resistencia pero fallando en la comprobación a pandeo.

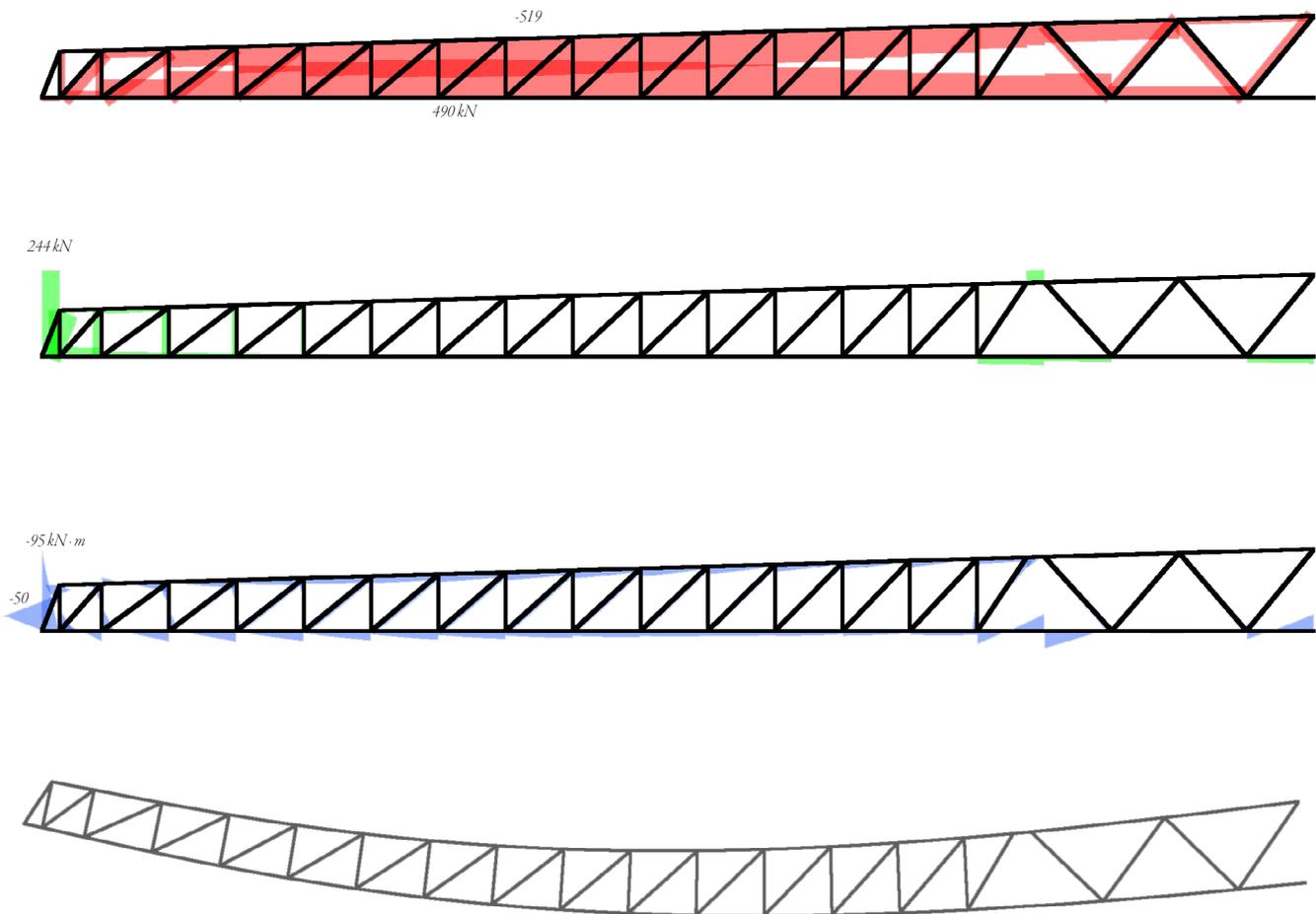


VIGAS DE CUBIERTA

La última celosía por analizar es la del forjado de cubierta. Recordando lo visto en anteriores capítulos, se trata de una viga en forma trapezoidal, para así crear la pendiente necesaria en cubierta tanto para facilitar la recogida de aguas —que se canalizan a través del interior de los pilares más delgados— como para darle un acabado curvo al «caparazón» del edificio.

Estas vigas muestran menores esfuerzos en sus diagramas [Figura 99], debido a que el peso de la cubierta —que tiene la misma composición que la fachada— es mucho menor que el forjado de hormigón del resto de plantas. Aun así, por su enorme luz de 22 m entre apoyos, la deformación a flexión genera compresiones y tracciones en los cordones superior e inferior respectivamente.

Figura 99: Viga del forjado de cubierta: axiles, cortantes, momentos y deformada.

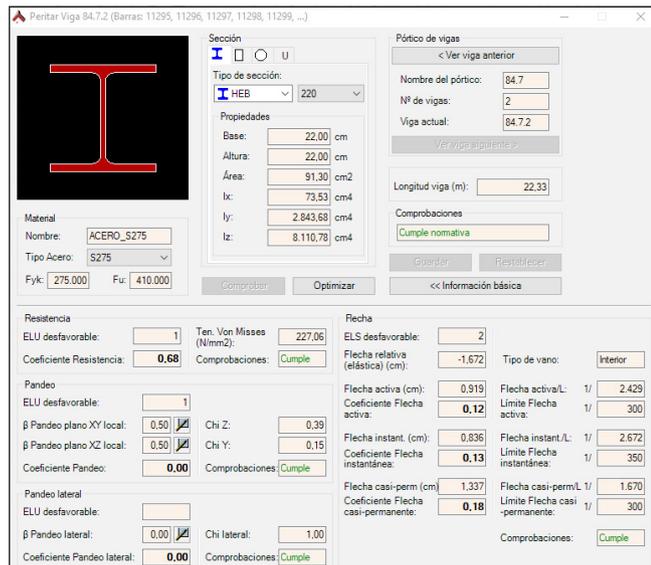


El valor máximo tanto de compresión como de tracción es de 500 kN, ambos presentes en el centro de vano en los cordones superior e inferior respectivamente. Las barras diagonales y las barras verticales presentan unos axiles muy reducidos en comparación. Rondan los 10 kN en el centro de vano y llegan hasta los 120 kN en los extremos.

En este caso, la subdivisión toma el modelo de una viga Pratt, que se caracteriza por sus montantes y diagonales, que no alternan su dirección cada nudo como sí hace la viga Warren. Las diagonales están traccionadas desde el centro de vano hacia la derecha, mientras que los montantes sufren las compresiones. Desde el centro de vano hacia la izquierda ocurre al revés.

De la misma manera que ocurre con los axiles, no hay esfuerzos destacables de cortantes ni momentos flectores, a excepción del cortante de 244 kN en el extremo oeste de la

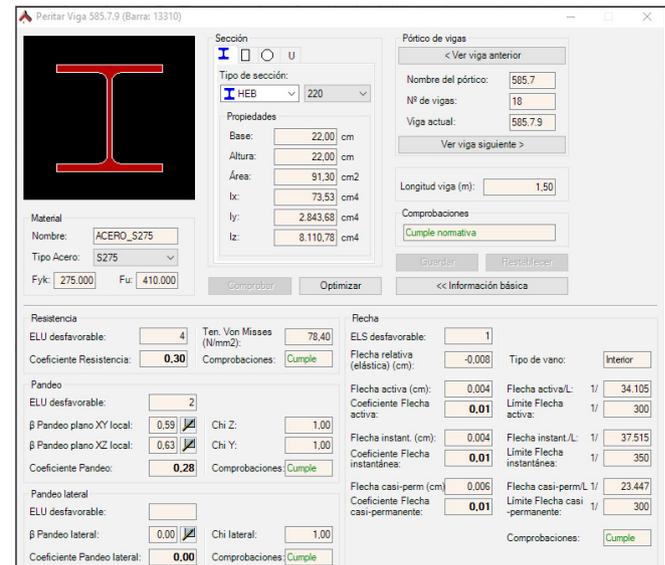
Figura 100: Cordón superior de la cubierta.



viga, por la conexión en este punto con la «costilla» correspondiente, y de los momentos con valor -95 kN · m y -50 kN · m que se encuentran en la esa zona por el mismo motivo.

Todas las barras de la viga cumplen satisfactoriamente a resistencia y pandeo. Los cordones superior e inferior tienen de media un coeficiente de resistencia de 0,60 y los superiores uno de pandeo de 0,50 [Figura 100]. Las barras interiores de la celosía presentan unos coeficientes muy bajos, en muchos casos inferiores a 0,10 debido a las bajas cargas. En la viga tipo que se ha escogido del forjado, el cordón inferior [Figura 101] tiene un coeficiente nulo de pandeo, ya que está traccionado. Cabe recordar que en realidad la cubierta del edificio es una estructura mucho más ligera, de delgados perfiles tubulares que sujetan un gran lucernario, mientras que el modelo realizado mantiene perfiles HEB y la piel metálica presente en las fachadas del centro.

Figura 101: Cordón inferior de la cubierta.



CORREAS

Formadas por perfiles IPE-240, las barras que soportan el forjado cumplen todas a resistencia, con coeficientes de entre 0,50 y 0,95, pero parecen fallar la mayoría a pandeo. Además, sus coeficientes de pandeo llegan hasta 12,00 en el peor de los casos [Figura 103]. Realmente vuelve a ser un problema de software, que interpreta todas las correas alineadas como una única tira que recorre el edificio, en lugar de barras individuales de 6 m de longitud conectadas a vigas [Figura 102]. El hecho de que las correas realmente sí que cumplen es fácilmente verificable, ya que las pocas que han sido correctamente individualizadas tienen coeficientes de pandeo de 0,15 a 0,30 más acordes a las compresiones que reciben, que nunca llegan a superar los 30 kN.

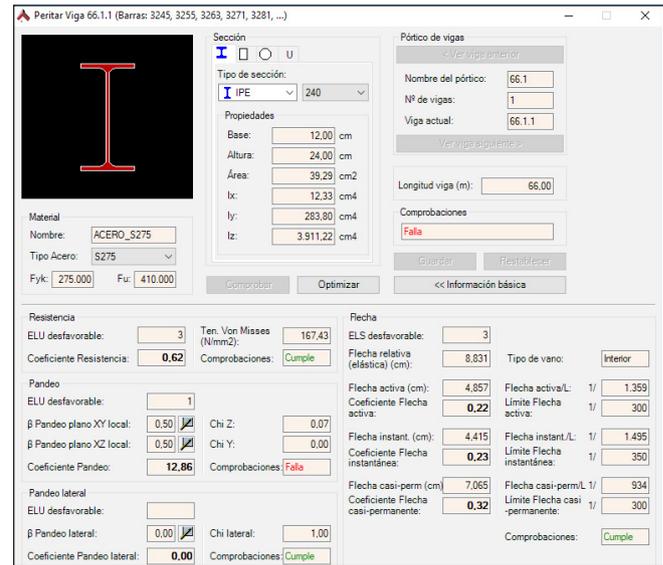
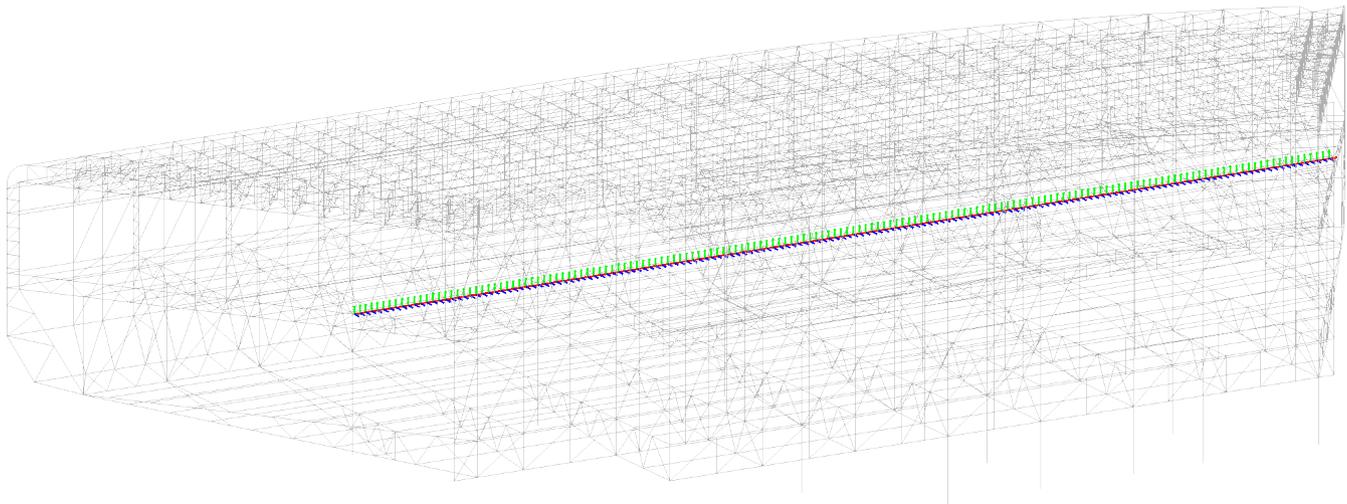
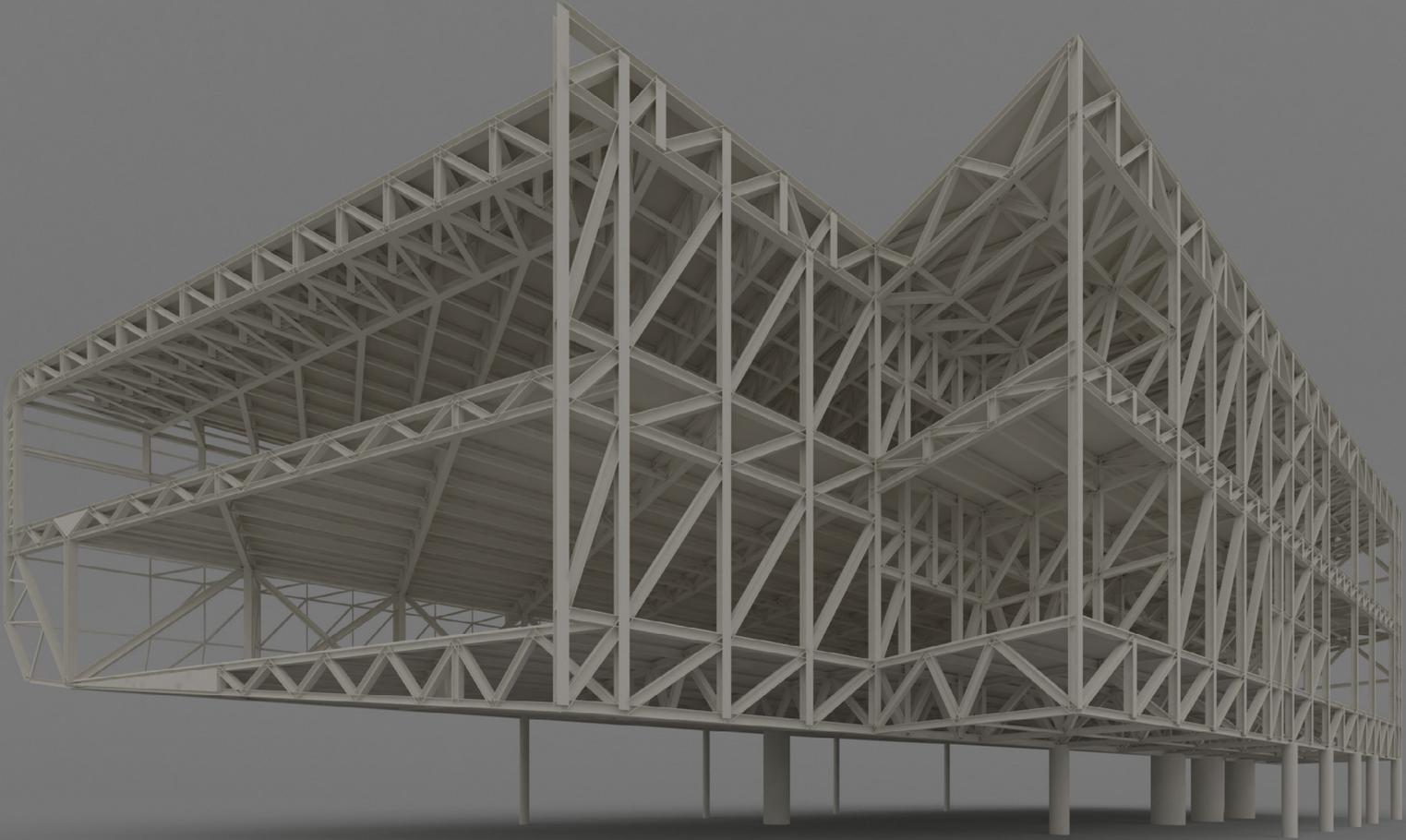


Figura 103: Correa IPE-240 cumpliendo a resistencia pero pareciendo fallar catastróficamente a pandeo..

Figura 102: Longitud de la correa interpretada por Architrave.





6. CONCLUSIONES

La arquitectura y estructura del Centro Botín



Renzo Piano buscaba en Santander proyectar una obra que fuera amable con su ciudad. Un cuerpo que se elevara del suelo para no entorpecer la conexión urbana con el océano. Un centro cultural fuertemente relacionado con su entorno —entendiendo principalmente el entorno como la bahía de Santander— y que para ello volara sobre sus aguas. Un volumen que absorbiera la luz del sol y el oleaje del mar y los reflejara a su alrededor para, junto a su forma y materialidad, crear una atmósfera marítima. Y un edificio que invitara a sus visitantes a recorrerlo no solo internamente, sino también por todo su exterior, como si se tratara de la cubierta de una embarcación, creando así un espacio urbano elevado.

Para lograrlo, la estructura del Centro Botín debía participar de los mismos valores de su arquitectura y, simultáneamente, resolver las grandes exigencias que se le presentaban. Luces de veinte metros, voladizos de hasta veintidós y cimentaciones al borde del océano constituían algunos de los retos a los que se enfrentaba Piano.

El objetivo principal de este trabajo ha sido el de analizar el comportamiento estructural del Centro Botín para comprender a fondo su comportamiento, entender cómo se relaciona con los aspectos arquitectónicos del edificio y, finalmente, interiorizar las conclusiones extraídas para poder adaptarlas a futuros proyectos.

El recorrido a seguir para alcanzar este propósito pasaba por analizar el edificio en sus valores formales y funcionales y determinar cómo encajaba dentro de la trayectoria de Piano. El arquitecto genovés había proyectado ya numerosas galerías, introduciendo siempre luz natural desde arriba. Ávido marinero, también había demostrado una gran preferencia por encargos situados junto al mar, atraído por las cualidades lumínicas que conllevaban. Y finalmente, llevaba experimentando con estructuras de acero desde sus inicios en la profesión, viendo en ellas una condición de liviandad que le atraía enormemente. El encargo en Santander fue por tanto un paso natural en la obra del arquitecto.

El centro debía incluir salas de exposición, un auditorio y una serie de aulas para satisfacer los programas de arte, cultura y formación que definían la misión de la Fundación Botín. Piano ideó separar el programa en dos grandes volúmenes, uno dedicado al arte y el otro a la cultura y la enseñanza. Los cuerpos se levantaron del suelo, dejando una planta libre que devolvía el espacio ocupado al suelo urbano y permitía a los santanderinos conservar las vistas de la bahía. Al mismo tiempo que liberaba espacio en planta, Piano creó un espacio urbano elevado mediante un sistema de pasarelas reminiscente del Museo Whitney de Nueva York al que llamaría Pachinko. Lo hizo separando sus dos edificios y colgando de ellos la plataforma que, formada por ligeros perfiles de acero y superficies de vidrio, dejaría pasar la luz a los espacios inferiores.

El arquitecto orientó los cuerpos al mar, situando en sus fachadas muros cortina de doble piel que inundarían los interiores de luz y enmarcarían una privilegiada vista de la bahía. Así el mar pasó a formar parte del edificio, haciendo de telón de fondo para el auditorio y las galerías situadas al sur. Pero aquello no era suficiente para Piano, el cuerpo debía sobrevolar por encima del agua si quería una auténtica relación con el mar. Para ello formó grandes voladizos tanto en los edificios como en sus pasarelas, que terminaron convirtiéndose en grandes trampolines de cristal. Al flotar sobre el agua también se conseguía que la luz que rebotaba a orillas de la bahía proyectara un juego de luces sobre la fachada de los volúmenes —especialmente en su cara inferior— provocado por el vibrar de las olas. La piel del edificio, formada

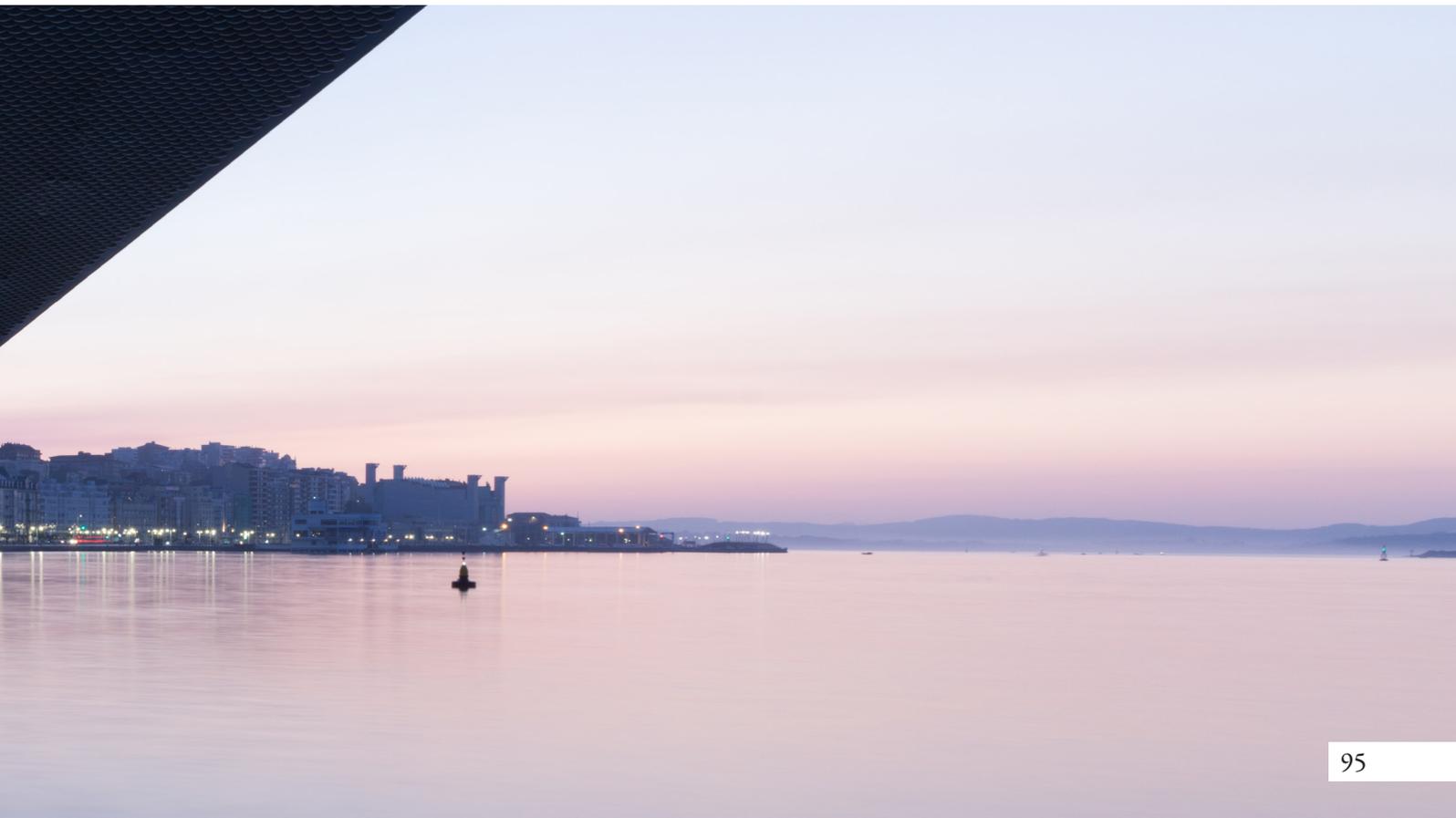


por brillantes piezas cerámicas nacaradas, crearía destellos iridiscentes y teñiría al Centro Botín de diferentes colores absorbiendo la luz según la hora del día.

Finalmente, el edificio se rodeó de espacio urbano, gracias a la creación de un túnel que permitió extender la superficie de los jardines de Pereda hasta el mar. La decisión fue fruto de la sugerencia de una de las personas que asistieron al debate ciudadano al que se sometió el proyecto y terminó constituyendo la piedra angular de la propuesta. Sin aquella estrategia, el Centro Botín difícilmente habría conseguido cautivar a los habitantes de Santander y habría estado en peligro de convertirse en un monumento más en lugar de un espacio público de referencia en la ciudad.

La cimentación del Centro Botín se resolvió mediante grandes pilotes y enormes muros pantalla de casi treinta metros de altura para conseguir llegar al estrato resistente. Los muros encerraban un espacio de sótano donde el centro situaría las instalaciones y las zonas más privadas. Separados del suelo, los edificios se apoyaron en columnas circulares en planta baja, que debían ser pocas y lo más esbeltas posible. Las de mayor dimensión ocultaban en su interior el paso de instalaciones y, en ocasiones, el auténtico pilar.

La estructura, que debía ser ligera y a la vez soportar grandes esfuerzos, se construyó mediante perfiles metálicos de acero casi en su totalidad. El trabajo principal lo realizaron potentes celosías de acero situadas en la dirección longitudinal del

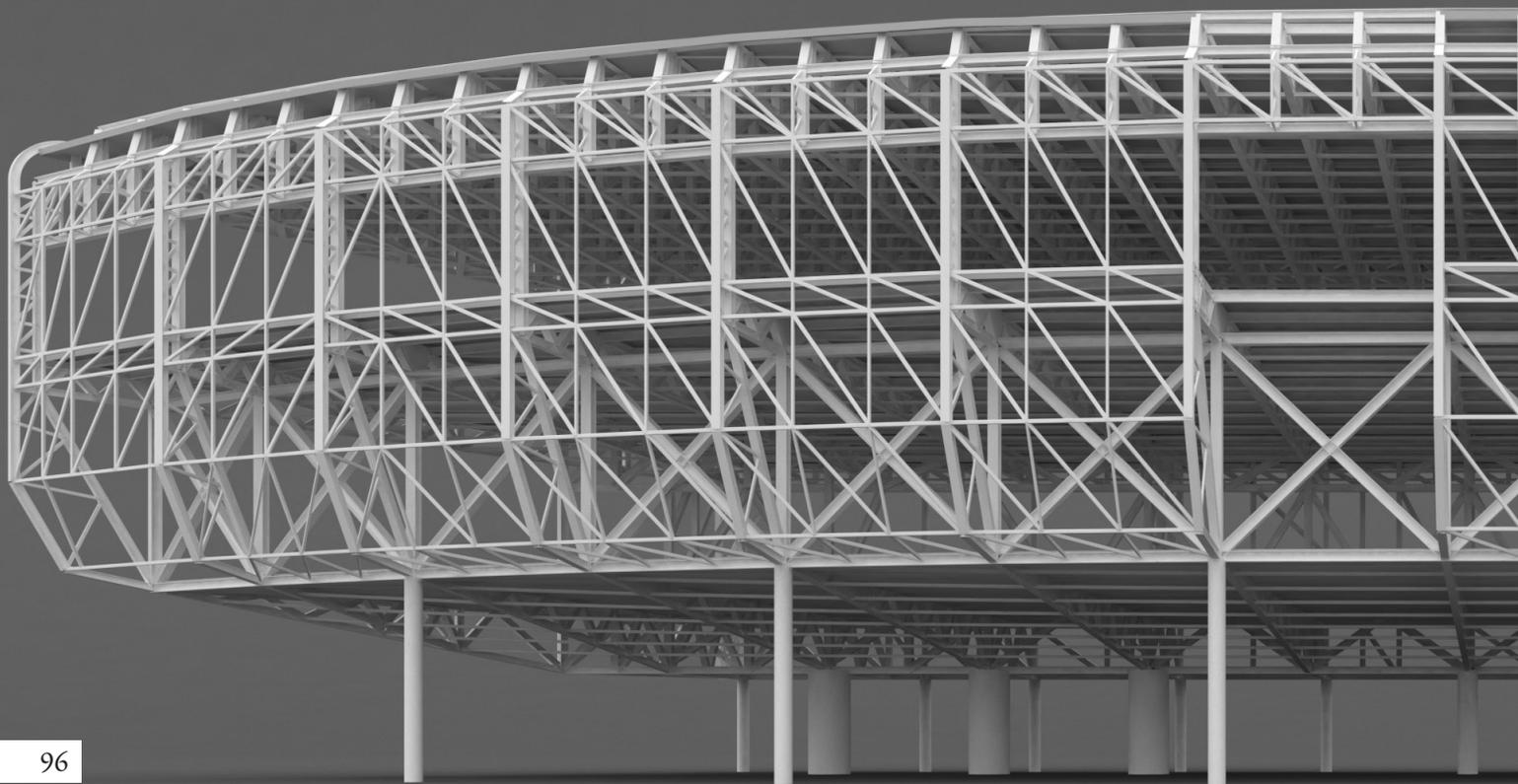


centro, que abarcaban un máximo de 16 metros de altura, obteniendo así la inercia necesaria para solucionar los voladizos. Estas vigas-pantalla debían adaptar su triangulación al programa del centro, creando grandes aperturas para permitir la conexión entre áreas funcionales.

Entre las grandes celosías se colocaron vigas trianguladas de entre ochenta centímetros y dos metros de altura que resolvieron las grandes luces de hasta veinte metros que formaban las salas expositivas. La geometría de estas vigas era triangular y trapezoidal en planta baja y cubierta respectivamente, para generar soporte a la curvatura que tomaría la piel exterior de los edificios.

Los forjados se resolvieron mediante un sistema de forjado de chapa colaborante apoyado en correas metálicas IPE comprendidas entre las vigas. El vertido de hormigón fue la única parte de los edificios que no habría sido prefabricada. Finalmente, la fachada se resolvió mediante una serie de capas de perfiles y chapas metálicas y aislamiento térmico que se rematarían con bandejas de aluminio a las que se enroscarían las piezas cerámicas.

En el presente trabajo, una vez recopilada toda la información pertinente a la estructura, se ha realizado un modelo tridimensional mediante software de diseño AutoCAD y Architrave, programa de cálculo desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia. La dimensión de los

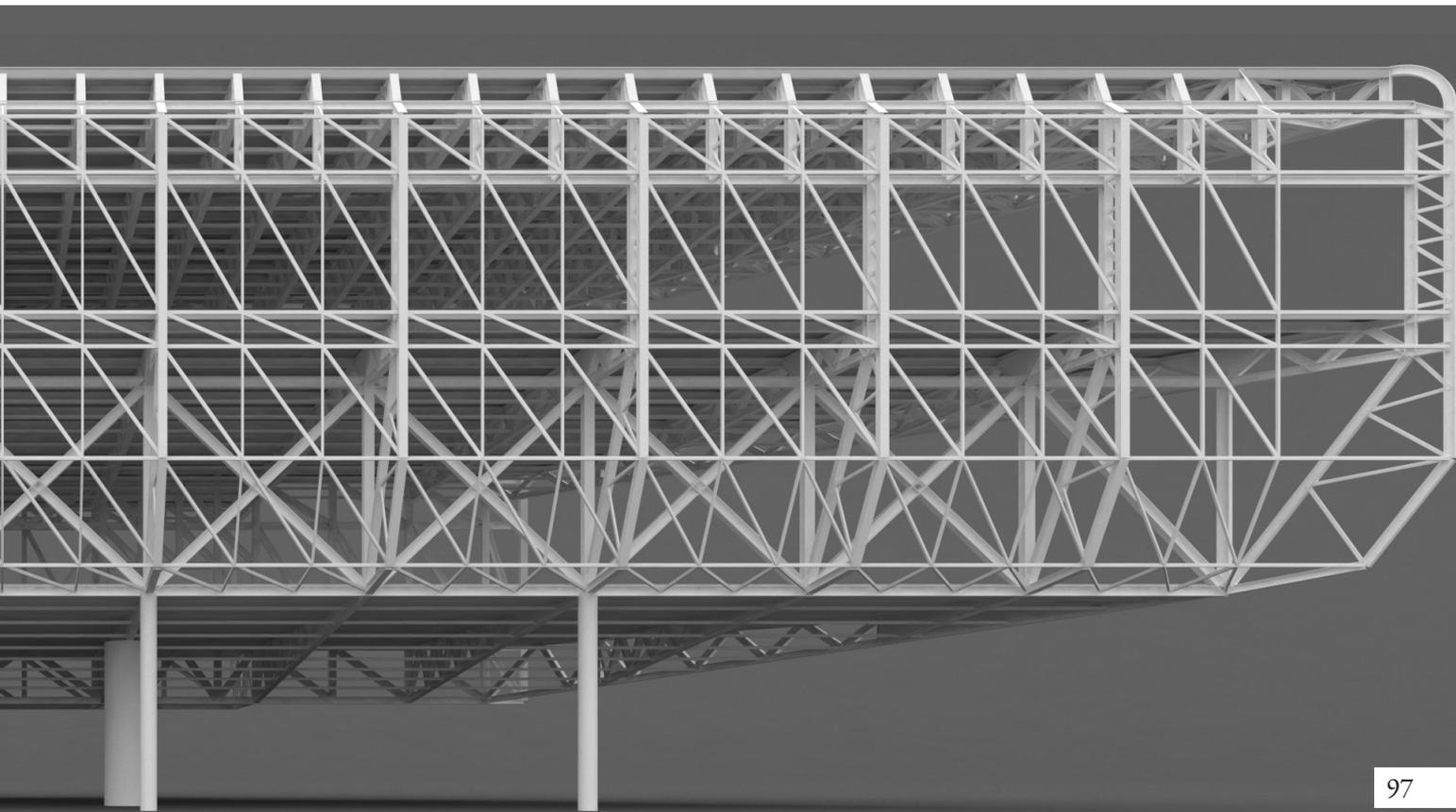


perfiles metálicos, así como la del forjado ha sido seleccionada de manera intuitiva en función de la importancia de cada elemento. Posteriormente, se han introducido en el modelo las acciones correspondientes en base al texto del CTE DBSE-AE para más adelante poder producir una simulación de cargas.

El modelo estructural resultante ha sido calculado con Architrave, obteniéndose simulaciones de la deformación del edificio y valores de esfuerzos recibidos por cada barra. En diversas ocasiones, el modelo ha tenido que ser reajustado y recalculado a medida que evolucionaba la comprensión de la estructura. Al igual que el diseño arquitectónico es circular, también lo es el del diseño estructural. La labor realizada

en este trabajo —con sus numerosas iteraciones— refleja el proceso que siguieron los ingenieros que diseñaron el esqueleto del Centro Botín, en el cual aparecen refuerzos y triangulaciones que solo podrían haber sido fruto de este diseño iterativo.

A partir de los resultados de cálculo, se ha llevado a cabo una comprobación del cumplimiento del modelo en base a los requisitos establecidos por el CTE. En primer lugar, se ha verificado que la flecha que presentaban los forjados no superara la medida de $L/300$. El voladizo sur en planta baja ha resultado ser el punto crítico, superando por solo tres milímetros la normativa. Los demás forjados entraban dentro del límite impuesto.





A continuación, se han analizado y dimensionado las diferentes partes del edificio. Partiendo de los Estados de Límite Últimos más desfavorables para cada elemento, se ha calculado mediante software cómo respondían sus secciones frente a los esfuerzos que se originaban. Los pilares han mostrado grandes tensiones y, en muchos casos, han requerido de un aumento de sección resistente. Los soportes más afectados han resultado ser los situados frente al voladizo sur. Para conseguir que cumplieran, se han planteado una serie de soluciones, incluyendo seleccionar el siguiente perfil de la serie en cuanto a su dimensión o utilizar un acero de mayor límite elástico. Al no disponer el software de cálculo de un perfil metálico equivalente, se ha realizado un cálculo manual para justificar que, aumentando el espesor de pared del pilar más desfavorable, se consigue aumentar su inercia y con ello garantizar su buen comportamiento sin necesidad de agrandar su diámetro.

Siendo los elementos encargados de sustentar los voladizos, las tres vigas principales han revelado ser de gran interés para el análisis. Tal y como se ha constatado en el análisis, cada una estaba configurada de forma distinta en función de sus necesidades estructurales y programáticas. La celosía interior, al recibir la mayor cantidad de esfuerzos, estaba fuertemente triangulada en toda su longitud, con especial hincapié en el extremo sur. La viga situada junto al Pachinko debía presentar grandes aperturas en su ordenación para permitir la fenestration y el acceso al centro desde escaleras, ascensores y las pasarelas. A causa de ello se había suprimido la triangulación en dichas zonas, mientras que en la conexión del voladizo con el soporte vertical se había subdividido y triangulado minuciosamente la estructura, aumentando así su resistencia.



Más curioso ha sido el caso de la viga oeste que, tanto por la curvatura presente en fachada como por la intención de ganar espacio en segunda planta, tuvo que ser dividida en dos partes. La parte inferior era tipo celosía, y la superior presentaba una configuración a modo de nervios –adaptados a la forma de la fachada– que transmitían excéntricamente la carga de la cubierta a los pilares y a la celosía inferior. De acuerdo con el cálculo de esfuerzos realizado en Architrave, se ha justificado que el vuelco de estas «costillas» estaba siendo impedido por los forjados de segunda planta y cubierta. Todo ello ha permitido concluir que, pese a sus diferencias, las tres vigas tenían en común su comportamiento a modo de ménsula, con fuertes tracciones en sus cordones superiores y compresiones en los inferiores.

De manera análoga, también las vigas de forjado variaban su geometría aun funcionando de forma similar. Si en planta baja eran vigas triangulares, en segunda planta se utilizaron vigas tipo Warren y la cubierta se resolvió con celosías trapezoidales en formato de viga Pratt. En este trabajo se ha justificado y comprobado el funcionamiento de los tres tipos de viga, y se han ofrecido explicaciones al tipo de esfuerzos que recibían. Finalmente, los resultados indicaron que las correas fallaban tremendamente a pandeo. Sin embargo, se ha podido demostrar que se trataba de un problema del software de cálculo, y que en realidad la dimensión de las barras era la adecuada. Con todo ello, gracias al análisis del edificio se ha conseguido comprender en profundidad el funcionamiento de las estructuras metálicas en celosía, así como el proceso del diseño y dimensionamiento de las estructuras para así poder aplicar estos conocimientos a futuros proyectos.



Para concluir, cabría cuestionarse hasta qué punto el proyecto de Piano logró sus propósitos y si las características estructurales del centro pudieron responder satisfactoriamente a las necesidades de su arquitectura. Suele ocurrir con los edificios emblemáticos que sus estructuras adquieren una gran complejidad, presentando importantes luces y vuelos que otorgan singularidad al conjunto. Estas decisiones pueden parecer en ocasiones caprichosas, o apoyadas en cuestiones meramente formales. La valoración de esto es a menudo una cuestión subjetiva, pero la estrecha relación entre arquitectura y estructura en el Centro Botín sugiere que, en este caso, la complejidad no fue en vano. El edificio debía minimizar su ocupación del espacio público y evitar obstruir las vistas; y la estructura lo elevó sobre pilares, dejando una planta libre y transitable. La relación con la bahía debía ser significativa; y potentes celosías metálicas formaron grandes vuelos que permitieron al centro situarse sobre el mar. La envolvente debía ser curva, para así favorecer la entrada de luz bajo los volúmenes; y la estructura se adaptó a su forma con un sistema de nervios.

Polémico desde su anuncio, el centro finalmente logró el objetivo de la Fundación Botín. En su primer año, atrajo a más de 230.000 visitantes y las actividades culturales de la ciudad pasaron de tres mil en 2014 a seis mil en 2017. Lejos de buscar un «*efecto Bilbao*», Renzo Piano deseaba que su edificio, ante todo, fuera querido por los habitantes de Santander.

Cuando la ciudad despierta, sus habitantes pasan junto al edificio cuando van a trabajar, o cuando salen a correr a orillas del mar. Varios pescadores se sientan junto al Centro Botín con los primeros rayos de sol. El edificio, por su parte, recibe esta primera luz del día y se baña en ella, vibrando con los reflejos y el mover de las olas. Por la mañana se acercan los



primeros visitantes al centro, mientras otros aprovechan para tomarse un café en *El Muelle*, con el voladizo a modo de toldo y la bahía de telón de fondo. A mediodía el centro se llena de vida y docenas de grupos escolares y de turistas van pasando de galería en galería y se toman una foto grupal en el trampolín de las pasarelas, mientras unos pocos se lo piensan dos veces. «*Yo ahí no me subo, ¡qué miedo!, ¿y si se cae?*». Conforme avanza el día, varios curiosos se suben al Pachinko a disfrutar de las vistas del mar; otros ascienden hasta el auditorio para ver desde la cubierta el frente urbano de Santander. Por la tarde se realizan actividades al aire libre en el anfiteatro exterior, o bajo el centro. Y con la puesta de sol, son muchos los que aprovechan para dar un paseo junto a la bahía, sacar al perro, la bicicleta, o hacer una última carrera antes de irse a dormir. Este flujo constante de gente y de vida indican que sí, que el Centro Botín —como quería su arquitecto— ha hecho mejor la vida de los santanderinos y que, el diseño estructural que se llevó a cabo para el edificio, fue sin duda indispensable en su triunfo. Y que ha valido la pena.





7. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES

7.1. Bibliografía

- 3ds Max* (versión 20.2.0). s. f. 2018. Autodesk. www.autodesk.es/products/3ds-max/overview.
- ABC*. 2017. «Abre sus puertas el Centro Botín, nueva joya de Cantabria», 22 de junio de 2017. https://www.abc.es/cultura/arte/abci-abre-puertas-centro-botin-nueva-joya-cantabria-201706222315_noticia.html.
- ANRO*. 2013. «ANRO empleará unas 1.300 toneladas de acero en las diferentes estructuras de los edificios», 17 de julio de 2013. <https://www.anro.es/noticias/item/189-la-empresa-tomellosera-empleara-unas-1-300-toneladas-de-acero-en-las-diferentes-estructuras-de-los-edificios>.
- Arcspace*. 2012. «Nasher Sculpture Center». Arcspace.Com (blog). 20 de agosto de 2012. <https://arcspace.com/feature/nasher-sculpture-center/>.
- Arquitectura y Empresa*. 2017. «Renzo Piano en colaboración con Luis Vidal + arquitectos: Centro Botín, Santander.», 24 de junio de 2017. <https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/renzo-piano-en-colaboracion-con-luis-vidal-arquitectos-centro-botin-santander>.
- AutoCAD* (versión 28.0.107). 2018. Autodesk. www.autodesk.es/products/autocad/overview.
- AV Proyectos*. 2017. «Centro Botín de Arte y Cultura, in Detail», septiembre de 2017.
- Bedoya, Juan G. 1981. «Santander se estremeció ayer con el recuerdo de la tragedia del “Cabo Machichaco”». *El País*, 3 de octubre de 1981, sec. España. https://elpais.com/diario/1981/10/03/espana/370911607_850215.html.
- Buchanan, Peter. 2015. «Renzo Piano: Poet of Technology». *Architectural Design* 85 (2): 88-93. <https://doi.org/10.1002/ad.1881>.
- Cendrero Uceda, A., y J. R. Díaz de Teran. 1977. «Caracterización cuantitativa del desarrollo histórico del relleno de la bahía de Santander; un proceso natural activado por el hombre», octubre.
- Centro Botín*. 2014. «El Centro Botín inicia su actividad con la inauguración de los Jardines de Pereda y del túnel que conecta el centro de Santander con la Bahía», 22 de julio de 2014. <https://www.centrobotin.org/el-centro-botin-inicia-su-actividad-con-la-inauguracion-de-los-jardines-de-pereda-y-del-tunel-que-conecta-el-centro-de-santander-con-la-bahia/>.
- . 2016. «Comienza el montaje de los muros cortina del Centro Botín», 28 de enero de 2016. <https://www.centrobotin.org/comienza-montaje-los-muros-cortina-del-centro-botin/>.
- Cerámica Cumella*. 2012. «Renzo Piano», 2012. <http://www.cumella.cat/portfolio/renzo-piano/>.
- . 2014. «Shaping Ideas», noviembre de 2014. <http://www.cumella.cat/ceramica-cumella-shaping-ideas/>.
- Cercha*. 2015. «Centro Botín en Santander, un proyecto en tres movimientos», 1 de mayo de 2015.
- Clinton, Bill. 1998. «Laureate Renzo Piano Ceremony Speech». https://www.pritzkerprize.com/sites/default/files/inline-files/Bill_Clinton_Ceremony_Speech_1998_Piano.pdf.
- Co, Francesco Dal. 2014. *Renzo Piano. Catalogo della mostra*. Milano: Mondadori Electa.
- «Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural. Acciones en la Edificación. (CTE-DBSE-AE)». 2009.
- Construpedia*, enciclopedia construcción. s. f. «Ejecución de Muros Pantalla». Consultado 11 de abril de 2018. http://www.construmatica.com/construpedia/Ejecuci%C3%B3n_de_Muros_Pantalla.
- Cuito, Aurora, y Renzo Piano. 2002. *Renzo Piano*. A. Asppan S.L.

- «Dan's Pachinko Data Page». s. f. Accedido 5 de abril de 2018. <http://faculty.ccp.edu/faculty/dreed/Campingart/pachinko/>.
- El Diario Montañés*. 2010a. «El Centro Cultural Botín generará un nuevo espacio ciudadano en el Frente Marítimo.», 31 de julio de 2010. <http://www.eldiariomontanes.es/v/20100731/cantabria/centro-cultural-botin-generara-20100731.html>.
- . 2010b. «Renzo Piano, arquitecto del futuro Centro Botín de Arte y Cultura, visita la ciudad.», 17 de septiembre de 2010. <http://www.eldiariomontanes.es/20100917/local/santander/renzo-piano-arquitecto-futuro-201009171316.html>.
- Fernando Caruncho. s. f. «Jardines de Pereda - Fernando Caruncho». Accedido 10 de julio de 2018. <http://web.fernando-caruncho.com/es/project/Jardines-de-Pereda>.
- Ferrández-Galiano, Luís. 2017. «Milagro en Santander». *Arquitectura Viva*, septiembre de 2017.
- «Fuero de Santander de 1187». s. f. Accedido 9 de julio de 2018. http://www.cervantesvirtual.com/obra-visor/costas-y-montanas-diario-de-un-caminante--0/html/dcba0c98-2dc6-11e2-b417-000475f5bda5_53.html#I_88_.
- Fundación Botín*. 2011. Evolución del proyecto Centro Botín. Rueda de prensa. <https://www.youtube.com/watch?v=6cr7a8HDMG8>.
- . 2012. «Arranca en Santander la construcción del Centro Botín», 19 de junio de 2012. //www.fundacionbotin.org/noticia/arranca-en-santander-la-construccion-del-centro-botin.html.
- . s. f. «Comienza el hormigonado de la losa inferior del sótano del Centro Botín». Accedido 29 de marzo de 2018a. //www.fundacionbotin.org/noticia/comienza-el-hormigonado-de-la-losa-inferior-del-sotano-del-centro-botin.html.
- . s. f. Comienza la colocación de las piezas cerámicas en el Centro Botín. Accedido 1 de abril de 2018b. <https://www.youtube.com/watch?v=jEtXEGZO1o>.
- . s. f. Construcción del Centro Botín. 19 Junio 2012. Accedido 1 de abril de 2018c. <https://www.youtube.com/watch?v=fxfaik1B-6M>.
- . s. f. Intervención escultórica de Cristina Iglesias | Centro Botín. Vol. Fundación Botín. Fundación Botín. Fundación Botín. Accedido 10 de julio de 2018d. <https://www.youtube.com/watch?v=2Xrt1Jdg6tc>.
- . s. f. «Memoria 2009». https://www.fundacionbotin.org/89d-guuytdfr276ed_uploads/FUNDACION/MEMORIAS%20ANUALES/Memoria%202009.pdf.
- . s. f. «Memoria 2010». https://www.fundacionbotin.org/89d-guuytdfr276ed_uploads/FUNDACION/MEMORIAS%20ANUALES/Memoria%202010.pdf.
- . s. f. Obras del Centro Botín. Santander, abril-junio de 2014. Accedido 1 de abril de 2018e. <https://www.youtube.com/watch?v=mL-sgH2Mopw>.
- . s. f. Presentación Centro Botín - Fundación Botín. Septiembre 2011. Accedido 1 de abril de 2018f. <https://www.youtube.com/watch?v=Bc1ZMQ0Wk5M>.
- Gara, Antoine. 2018. «Forbes Global 2000: The World's Largest Banks In 2018 And Why They Still Rule The World». *Forbes*. 6 de junio de 2018. <https://www.forbes.com/sites/antoinegara/2018/06/06/forbes-global-2000-the-worlds-largest-banks/>.
- Glancey, Jonathan. 2010. «Sense and Sustainability, Interview with Renzo Piano». *Architecture + Urbanism*, mayo de 2010.
- González Echeagaray, Joaquín. 1999. «Las guerras cántabras en las fuentes». <http://www.cervantesvirtual.com/obra/las-guerras-cantabras-en-las-fuentes-0/>.
- Le Corbusier. 2013. *Hacia una arquitectura*. España: Apóstrofe.
- Luis Vidal + Architects*. s. f. «Centro Botín». Accedido 11 de julio de 2018. <https://www.luisvidal.com/en/projects/cultural/centro-de-arte-botin>.

- «Mapa de peligrosidad sísmica de España 2015». s. f. Instituto Geográfico Nacional. http://www.ign.es/web/resources/sismologia/PGA_475_DINA1_Web_Espanol.pdf.
- Moneo, Rafael. 2010. Apuntes sobre 21 obras. Gustavo Gil.
- Muschamp, Herbert. 1998. «Renzo Piano Wins Architecture's Top Prize». The New York Times, 20 de abril de 1998, sec. Arts. <https://www.nytimes.com/1998/04/20/arts/renzo-piano-wins-architecture-s-top-prize.html>.
- «Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02)». 2002.
- «Paseo y Jardines de Pereda y calle Castelar». s. f. Accedido 9 de julio de 2018. <https://turismodecantabria.com/disfrutala/que-visitar/225-paseo-y-jardines-de-pereda-y-calle-castelar>.
- Pérez-García, Agustín, Adolfo Alonso Durá, Fernando Gómez-Martínez, José Miguel Alonso Ávalos, y Pau Lozano Lloret. 1015. Architrave® (versión 1.9.0). 2015 académica. Universitat Politècnica de València. <https://www.architrave.es/>.
- Piano, Renzo. 1997. The Renzo Piano Logbook. Thames and Hudson.
- . 2013. De Viaje Con Renzo Piano. New York: Phaidon.
- Pis San Juan, Gabriela. s. f. «Santander, una ciudad a través de su historia». eldiariocantabria.es. Accedido 9 de julio de 2018. <http://www.eldiariocantabria.es/articulo/cantabria/santander-ciudad-traves-historia/20160430202000012315.html>.
- Pritzker, Jay A. 1998. «Laureate Renzo Piano Ceremony Speech». https://www.pritzkerprize.com/sites/default/files/inline-files/Jay_Pritzker_Ceremony_Speech_1998_Piano.pdf.
- Renzo Piano. 2017. «Inauguración del Centro Botín». junio 23. <https://www.youtube.com/watch?v=MyFNV-DlmwU>.
- Roche, Kevin. s. f. «Ciudad Grupo Santander». Accedido 29 de junio de 2018. <http://www.krjda.com/Sites/SantanderInfo1.html>.
- Rodio Kronsa. 2013. «Centro Botín (Santander-Cantabria-España)», abril de 2013. <https://www.rodiokronsa.es/portfolio/centro-botin-santander-espana-rodio-kronsa/>.
- San Miguel, Marta. s. f. «75 aniversario del incendio de Santander». El Diario Montañés. Accedido 10 de julio de 2018. <http://especial-incendio.eldiariomontanes.es/>.
- Santander. s. f. «Historia del Banco Santander». https://www.santander.com/csgs/Satellite?pagename=CFWCSancomQP01/GSInformacion/CFQP01_GSInformacionDetalleImpresion_PT47&appID=santander.mc.CFWCSancomQP01&canal=CSCORP&empr=CFWCSancom-QP01&leng=es_ES&cid=1278677205483.
- Sarabia Rogina, Pedro, y Esteban Sainz Vidal. 2017. «Emergente ciudad de Santander en 1855». El Diario Montañés, 1 de octubre de 2017. <https://www.eldiariomontanes.es/santander/emergente-ciudad-santander-20171001195723-ntvo.html>.
- Sarrablo, V., J. Roviras, F. Sánchez, y Ll Gil. 2016. «Envolvente del Centro de Arte Botín en Santander. Estudio de viabilidad de la solución con discos cerámicos roscados sobre chapa de aluminio». Informes de la Construcción 68 (544): 165.
- Scott, Simon. 2014. «Ball and Chain: Gambling's Darker Side». The Japan Times Online, 24 de mayo de 2014. <https://www.japantimes.co.jp/life/2014/05/24/lifestyle/ball-chain-gamblings-darker-side/>.
- Soto, José Luis Casado, y Joaquín González Echegaray. 1995. El puerto de Santander en la Cantabria romana. Autoridad Portuaria de Santander.
- Tectónica. 2017. «Desarrollo y solución técnica de la envolvente del Centro Botín de Renzo Piano», 20 de marzo de 2017. <http://tectonicablog.com/?p=105416>.
- V-Ray for 3ds Max. s. f. 3.6. Chaos Group. www.chaosgroup.com/vray/3ds-max.
- vv.aa. 2006. Frank Gehry 1987-2003. Madrid: El Croquis.

7.2. Referencias bibliográficas

- [1] J. A. Pritzker, «Laureate Renzo Piano Ceremony Speech», 1998.
- [2] R. Piano, *The Renzo Piano Logbook*. Thames and Hudson, 1997.
- [3] R. Piano, *De Viaje Con Renzo Piano*. New York: Phaidon, 2013.
- [4] F. D. Co, *Renzo Piano. Catalogo della mostra*. Milano: Mondadori Electa, 2014.
- [5] H. Muschamp, «Renzo Piano Wins Architecture's Top Prize», *The New York Times*, 20-abr-1998.
- [6] B. Clinton, «Laureate Renzo Piano Ceremony Speech», 1998.
- [7] P. Buchanan, «Renzo Piano: Poet of Technology», *Archit. Des.*, vol. 85, n.º 2, pp. 88-93, mar. 2015.
- [8] J. L. C. Soto y J. G. Echegaray, *El puerto de Santander en la Cantabria romana*. Autoridad Portuaria de Santander, 1995.
- [9] J. González Echegaray, «Las guerras cántabras en las fuentes», 1999.
- [10] «Fuero de Santander de 1187». [En línea]. Disponible en: http://www.cervantesvirtual.com/obra-visor/costas-y-montanas-diario-de-un-caminante--0/html/dcba0c98-2dc6-11e2-b417-000475f5bda5_53.html#I_88_. [Accedido: 09-jul-2018].
- [11] P. Sarabia Rogina y E. Sainz Vidal, «Emergente ciudad de Santander en 1855», *El Diario Montañés*, 01-oct-2017.
- [12] A. Cendrero Uceda y J. R. Díaz de Teran, «Caracterización cuantitativa del desarrollo histórico del relleno de la bahía de Santander; un proceso natural actuado por el hombre», oct. 1977.
- [13] J. G. Bedoya, «Santander se estremeció ayer con el recuerdo de la tragedia del “Cabo Machichaco”», *El País*, Madrid, 03-oct-1981.
- [14] G. Pis San Juan, «Santander, una ciudad a través de su historia», *eldiariocantabria.es*.
- [15] M. San Miguel, «75 aniversario del incendio de Santander», *El Diario Montañés*.
- [16] «Paseo y Jardines de Pereda y calle Castelar». [En línea]. Disponible en: <https://turismodecantabria.com/disfrutala/que-visitar/225-paseo-y-jardines-de-pereda-y-calle-castelar>. [Accedido: 09-jul-2018].
- [17] A. Gara, «Forbes Global 2000: The World's Largest Banks In 2018 And Why They Still Rule The World», *Forbes*, 06-jun-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.forbes.com/sites/antoinegara/2018/06/06/forbes-global-2000-the-worlds-largest-banks/>. [Accedido: 09-jul-2018].
- [18] «Memoria 2009», *Fundación Botín*.
- [19] «Memoria 2010», *Fundación Botín*.
- [20] J. Glancey, «Sense and Sustainability, Interview with Renzo Piano», *Architecture + Urbanism*, vol. Renzo Piano Building Workshop 1989-2010, may-2010.
- [21] Renzo Piano, «Inauguración del Centro Botín», 23-jun-2017.
- [22] K. Roche, «Ciudad Grupo Santander». [En línea]. Disponible en: <http://www.krjda.com/Sites/SantanderInfo1.html>. [Accedido: 29-jun-2018].
- [23] «El Centro Cultural Botín generará un nuevo espacio ciudadano en el Frente Marítimo.», *El Diario Montañés*, 31-jul-2010.

- [24] «Renzo Piano, arquitecto del futuro Centro Botín de Arte y Cultura, visita la ciudad.», *El Diario Montañés*, 17-sep-2010.
- [25] «Centro Botín», *Luis Vidal + Architects*.
- [26] Fundación Botín, *Presentación Centro Botín - Fundación Botín. Septiembre 2011*.
- [27] «Historia del Banco Santander», *Santander.com*.
- [28] Fundación Botín, *Evolución del proyecto Centro Botín. Rueda de prensa*. 2011.
- [29] «Centro Botín en Santander, un proyecto en tres movimientos», *Cercha*, n.º 126, pp. 16-26, 01-may-2015.
- [30] «El Centro Botín inicia su actividad con la inauguración de los Jardines de Pereda y del túnel que conecta el centro de Santander con la Bahía», *Centro Botín*, 22-jul-2014.
- [31] «Arranca en Santander la construcción del Centro Botín», *Fundación Botín*, 19-jun-2012.
- [32] Le Corbusier, *Hacia una arquitectura*. España: Apóstrofe, 2013.
- [33] vv.aa, *Frank Gehry 1987-2003*. Madrid: El Croquis, 2006.
- [34] L. Ferrández-Galiano, «Milagro en Santander», *Arquitectura Viva*, n.º 197, pp. 40-53, sep-2017.
- [35] R. Moneo, *Apuntes sobre 21 obras*. Gustavo Gil, 2010.
- [36] «Jardines de Pereda - Fernando Caruncho», *Fernando Caruncho*.
- [37] Fundación Botín, *Intervención escultórica de Cristina Iglesias | Centro Botín*, vol. Fundación Botín. Fundación Botín.
- [38] A. Cuito y R. Piano, *Renzo Piano*. A. Asppan S.L., 2002.
- [39] «Renzo Piano en colaboración con Luis Vidal + arquitectos: Centro Botín, Santander.», *Arquitectura y Empresa*, 24-jun-2017.
- [40] S. Scott, «Ball and chain: gambling's darker side», *The Japan Times Online*, 24-may-2014.
- [41] «Dan's Pachinko Data Page». [En línea]. Disponible en: <http://faculty.ccp.edu/faculty/dreed/Campingart/pachinko/>. [Accedido: 05-abr-2018].
- [42] «Renzo Piano», *Ceràmica Cumella*, 2012.
- [43] «Shaping Ideas», *Ceràmica Cumella*, nov-2014.
- [44] V. Sarrablo, J. Roviras, F. Sánchez, y L. Gil, «Envolvente del Centro de Arte Botín en Santander. Estudio de viabilidad de la solución con discos cerámicos roscados sobre chapa de aluminio», *Inf. Constr.*, vol. 68, n.º 544, p. 165, dic. 2016.
- [45] Fundación Botín, *Comienza la colocación de las piezas cerámicas en el Centro Botín*.
- [46] «Centro Botín de Arte y Cultura, in Detail», *AV Proyectos*, n.º 71, pp. 50-69, sep-2017.
- [47] Arcspace, «Nasher Sculpture Center», *arcspace.com*, 20-ago-2012.
- [48] «Desarrollo y solución técnica de la envolvente del Centro Botín de Renzo Piano», *Tectónica*, 20-mar-2017.
- [49] «Ejecución de Muros Pantalla», *Construpedia, enciclopedia construcción*.
- [50] «Comienza el hormigonado de la losa inferior del sótano del Centro Botín», *Fundación Botín*.
- [51] «Centro Botín (Santander-Cantabria-España)», *Rodio Kronsa*, abr-2013.

- [52] «ANRO empleará unas 1.300 toneladas de acero en las diferentes estructuras de los edificios», *ANRO*, 17-jul-2013.
- [53] Fundación Botín, *Obras del Centro Botín. Santander, abril-junio de 2014.* .
- [54] «Comienza el montaje de los muros cortina del Centro Botín», *Centro Botin*, 28-ene-2016.
- [55] «Abre sus puertas el Centro Botín, nueva joya de Cantabria», *ABC*, 22-jun-2017.
- [56] *AutoCAD*. Autodesk, 2018.
- [57] A. Pérez-García, A. Alonso Durá, F. Gómez-Martínez, J. M. Alonso Ávalos, y P. Lozano Lloret, *Architrave*®. Universitat Politècnica de València, 1015.
- [58] *3ds Max*. Autodesk.
- [59] *V-Ray for 3ds Max*. Chaos Group.
- [60] «Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural. Acciones en la Edificación. (CTE-DBSE-AE)». abr-2009.
- [61] «Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02)». sep-2002.
- [62] «Mapa de peligrosidad sísmica de España 2015». Instituto Geográfico Nacional.
- [63] Fundación Botín, *Construcción del Centro Botín. 19 junio 2012.*

7.3. Referencia de imágenes

Figura 1: El arquitecto italiano Renzo Piano.	10
Fuente: Terragroup.com http://www.terragroup.com/images/media-coverage/large/15_terra-taps-star-architect-renzo-piano-for-nobe-condo-eighty-seven-park_5318.jpg	
Figura 2: Centro Georges Pompidou en París.	10
Fuente: ArtedeXimena.wordpress.com https://artedeximena.files.wordpress.com/2010/10/gc-centre-pompidou-paris-renzo-piano-y-richard-rogers1971-1977.jpg	
Figura 3: RPBW también diseñan rascacielos como The Shard.	11
Fuente: William Matthews Associate http://wma.co/wp-content/uploads/2015/04/RPBW-07-1618x1080.jpg	
Figura 4: Menil Collection en Houston, Texas.	11
Fuente: ArchitectsJournal.co.uk https://www.architectsjournal.co.uk/pictures/1180xany/5/3/8/3048538_menilcollectionphoto.jpg	
Figura 5: El estudio de RPBW en Génova.	12
Fuente: Pinterest.com https://i.pinimg.com/originals/28/a2/b4/28a2b4f212e3e40f882bf827d5075699.jpg	
Figura 6: Cabo Machichaco, en llamas antes de la explosión.	13
Fuente: Puertosantanderubu.wordpress https://puertosantanderubu.files.wordpress.com/2014/05/cabo_machichaco_en_el_muelle1.png	
Figura 7: Daños del incendio tras cinco años (1946).	13
Fuente: Gobierno de Cantabria http://mapas.cantabria.es/	
Figura 8: Cartel de la Exposición de Artes e Industrias, 1905.	14
Fuente: Todocolección.net https://cloud10.todocoleccion.online/coleccionismo-revistas-periodicos/tc/2018/04/05/12/117195055.jpg	
Figura 9: Los jardines de Pereda y la grúa de piedra, en 1957.	14
Fuente: Cantabria y Santander en el recuerdo https://www.facebook.com/cantabriaysantanderenelrecuerdo/	
Figura 10: Monumento a los raqueros de José Cobo Calderón.	15
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 11: Diseño original del centro y la pasarela.	18
© Renzo Piano Building Workshop www.RPBW.com	
Figura 13: Posición original, alineado con la sede social.	18
Fuente: Efecearquitectura.com http://www.efecearquitectura.com/wp-content/uploads/2011/09/023.jpg	
Figura 12: Sede social del Banco Santander.	18
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	

Figura 14: Siguiente versión, alineada al Mercado del Este	18
© Renzo Piano Building Workshop www.RPBW.com	
Figura 15: El Mercado del Este, ahora alineado con el centro	19
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 16: La Grúa de Piedra, en su posición original	19
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 17: Iteraciones sobre el volumen mediante maquetas	20
Fuente: Edgargonzalez.com https://i0.wp.com/www.edgargonzalez.com/wp-content/uploads/2012/06/Imagen15.jpg?resize=700%2C875&ssl=1	
Figura 18: Caruncho y Piano en la inauguración del centro	20
© Pamela Cahill - pamelacahill.com https://pamelacahill.com/2017/06/24/inside-centro-botin-renzo-piano/	
Figura 19: Relación con el mercado y actuación paisajística sobre los Jardines de Pereda	21
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 20: Museo Guggenheim Bilbao	23
Fuente: Wikiarquitectura.com https://es.wikiarquitectura.com/wp-content/uploads/2017/01/00gug-1024x823.jpg	
Figura 21: Palacio de Congresos y Auditorio Kursaal	23
Fuente: Seafoodnet.info http://cdn.blog.hu/ka/kavebar/image/gastronomika2016_2_httpwww_restaurantenineu_com_-1980x865.jpg	
Figura 22: Elevándose sobre el muelle, el Centro Botín permite ver la bahía y reduce su propia presencia	24
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 23: Es apenas visible desde el Paseo de Pereda, por su elevación sobre pilares y reducida altura	25
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 24: Estanque de «Desde lo subterráneo» dejando ver su ‘fondo marino’	26
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 25: Gradas exteriores de la actuación paisajística y pantalla gigante colgada del volumen oeste	27
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 26: Escalera exterior de emergencia del volumen este	28
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 27: El Pachinko, sistema de plataformas y pasarelas	29
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	

Figura 28: Pasarelas del Museo Whitney en Nueva York.	30
Fuente: Archdaily.com https://images.adsttc.com/media/images/5552/af26/e58e/cc8a/2600/005b/newsletter/630.087.jpg?1431482139	
Figura 29: Vista inferior del Pachinko.	30
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 30: Piel cerámica recubriendo el edificio oeste.	31
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 31: La bahía provoca reflejos iridiscentes y cambiantes.	32
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 32: Captadores de luz en el High Museum of Art.	32
Fuente: Archiscapes.wordpress.com https://archiscapes.files.wordpress.com/2014/12/c55af856d122a6ec467abb64ff7921fcdffe8c24.jpg	
Figura 33: El auditorio: madera, vidrio, acero y el mar.	33
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 34: Prototipos de las piezas cerámicas del Centro Botín.	33
Fuente: Edgargonzalez.com https://i0.wp.com/www.edgargonzalez.com/wp-content/uploads/2012/06/Imagen28b.jpg?resize=700%2C487&ssl=1	
Figura 35: Los aseos emulan la iridiscencia del exterior.	33
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 36: Sección transversal del Centro Botín en una fase de diseño casi final.	36
© Renzo Piano Building Workshop www.RPBW.com	
Figura 37: Sistema de cables sujetando las pasarelas.	37
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 38: Vigas principales resolviendo el voladizo sur.	37
Fuente: Eltomavistasdesantander.com/ http://eltomavistasdesantander.com/wp-content/uploads/2013/09/centro-botin-desde-la-bahia.jpg	
Figura 39: Ferralla de uno de los segmentos del muro pantalla.	38
Fuente: Fundación Botín, notas de prensa https://www.fundacionbotin.org/noticia/avanzan-las-obras-del-centro-botin.html	
Figura 40: La cimentación se resuelve dentro del sótano con una losa de cimentación y mediante pilotes fuera.	38
Fuente: Bod.es http://www.bod.es/wp-content/gallery/centro-botin/Centro_Botin_3.jpg	
Figura 41: Apoyos de sección circular bajo el volumen oeste.	39
Fuente: Eltomavistasdesantander.com http://eltomavistasdesantander.com/wp-content/uploads/2013/09/centro-botin-obras-debajo-estructura.jpg	

Figura 42: Las vigas principales resuelven los voladizos.	39
Fuente: AC Ferrero Taller Arquitectura. https://pbs.twimg.com/media/BUSVyPHIAAAIHA.jpg	
Figura 43: Correas IPE entre las vigas secundarias apoyadas en la celosía de borde.	40
Fuente: Cajondearquitecto.com https://cajondearquitecto.files.wordpress.com/2015/02/p1020894.jpg?w=1122&h=1492	
Figura 44: Sección constructiva de la cubierta acristalada.	41
Fuente: AV Monografías "Centro Botín, 2010-2017, Santander (España)." AV Monografías, septiembre 2017.	
Figura 45: Detalle del sistema de fachada.	41
Fuente: AV Monografías "Centro Botín, 2010-2017, Santander (España)." AV Monografías, septiembre 2017.	
Figura 46: Hidrofresa excavando y ferralla siendo insertada.	42
Fuente: Fundación Botín, notas de prensa https://www.fundacionbotin.org/noticia/avanzan-las-obras-del-centro-botin.html	
Figura 47: Ejecución de la losa y apuntalamiento de muros.	42
Fuente: Fundación Botín, notas de prensa https://www.fundacionbotin.org/noticia/comienza-el-hormigonado-de-la-losa-inferior-del-sotano-del-centro-botin.html	
Figura 48: La estructura siendo fabricada en Tomelloso.	43
Fuente: Fundación Botín https://www.youtube.com/watch?v=_n6c0EbExUo	
Figura 49: El núcleo principal del volumen oeste siendo izado.	43
Fuente: AV Proyectos "Centro Botín de Arte y Cultura, in Detail." AV Proyectos, septiembre 2017.	
Figura 50: Forjados, con canales para los conductos de aire.	44
Fuente: Eltomavistasdesantander.com http://www.arquitecturaviva.com/media/Imagenes/visores/abril_2015/botin_4.jpg	
Figura 51: Andamios volando sobre el mar, volumen oeste.	44
Fuente: Arquitecturaviva.com http://www.arquitecturaviva.com/media/Imagenes/visores/abril_2015/botin_4.jpg	
Figura 52: Modelo escala 1:1 en obra del sistema de fachada.	44
Fuente: Cajondearquitecto.com https://cajondearquitecto.files.wordpress.com/2015/02/p1020879.jpg?w=975&h=1297	
Figura 53: Fachada que oculta los sistemas de instalaciones.	45
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 54: Muro cortina en el frente sur del edificio oeste.	45
Fuente: elaboración propia Fotografía tomada durante durante la visita a Santander, 17-19 de abril de 2018.	
Figura 55: Modelo tridimensional y despiece coloreados por función.	49
Fuente: elaboración propia Software utilizado 3ds Max® 2018 y V-Ray 3.6	

Figura 56: Imágenes aéreas del volumen oeste en construcción.....	50
Fuente: AV Proyectos "Centro Botín de Arte y Cultura, in Detail." AV Proyectos, septiembre 2017.	
Figura 57: Vigas principales y pilares en AutoCAD.....	51
Fuente: elaboración propia Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 58: Vigas secundarias de cada planta en AutoCAD	51
Fuente: elaboración propia Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 59: Forjado de segunda planta, formado por caras 3D representando elementos finitos, en AutoCAD.....	52
Fuente: elaboración propia Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 60: Viga triangular, rellena en su sección más delgada, y rellenos en vigas rectangulares.....	53
Fuente: Centrobotin.com https://www.centrobotin.org/wp-content/uploads/2017/06/10-12-2013_3_800.jpg	
Figura 61: El modelo, antes y después de aplicarle rellenos metálicos y pilares de mayor sección, en 3ds Max.	53
Fuente: elaboración propia Software utilizado 3ds Max* 2018 y V-Ray 3.6	
Figura 62: Deformada del primer modelo estructural, mostrando un importante punzonamiento.....	60
Fuente: elaboración propia Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 63: Instantánea del video, con el pilar siendo insertado.	61
Fuente: Fundación Botín https://www.youtube.com/watch?v=_n6c0EbExUo	
Figura 64: Reducción de flecha en voladizo en un pórtico teórico.....	61
Fuente: elaboración propia Software utilizado AutoCAD * 2018	
Figura 65: Instantánea del video, donde no existe pilar central.	62
Fuente: Fundación Botín https://www.youtube.com/watch?v=fxfaik1B-6M	
Figura 66: Dz (cm) en hipótesis de viento, según su dirección.....	63
Fuente: elaboración propia Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 67: Deformada de la estructura vista desde el oeste. ELU 01 gravitatoria uso al 70% de escala.	64
Fuente: elaboración propia Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 68: Detalle de la estructura del edificio del auditorio.....	65
Fuente: AV Proyectos «Centro Botín de Arte y Cultura, in Detail». AV Proyectos, septiembre de 2017.	
Figura 69: Puntos elegidos del forjado de primera planta.	67
Fuente: elaboración propia Software utilizado Architrave * 2015	

Figura 70: Puntos elegidos del forjado de segunda planta.....	68
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 71: Puntos elegidos del forjado de cubierta.....	69
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado AutoCAD * 2018	
Figura 72: Esfuerzos de axiles recibidos por los pilares en planta baja, ELU: viento.....	70
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 73: Esfuerzos de momentos flectores Mz (azul) y My (verde) de los pilares, ELU: viento.....	71
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 74: Pilar de 82 cm de diámetro, en la terraza del bar.	72
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 75: Vy (verde) y Vz (azul) en pilares, ELU: viento.....	72
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 76: Pilar del pórtico Pachinko de perfil PH0 323.0x25.....	73
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 77: Pilar del pórtico Pachinko de perfil PH0 323.0x10.....	73
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 78: El pilar 508x40 falla formado por acero S275.	74
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 79: El pilar 508x40 cumple cuando es de acero S355.....	74
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 80: Pilar del pórtico central PH0 813x30.	75
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 81: Pilar del pórtico central PH0 914x30 de acero S450.....	75
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 82: Esfuerzos axiles de la celosía interior, mostrando el comportamiento de sus barras, ELU 03: uso.....	77
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 83: Momentos en la celosía interior, ELU 03: uso.....	78
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	

Figura 85: Indeformada de la celosía interior.....	78
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 84: Detalle de momentos flectores en las barras.....	78
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 86: Deformada de la celosía interior, ELU 03.	78
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 87: Esfuerzos axiles el pórtico Pachinko, con sus grandes huecos, ELU 03: uso.....	79
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 88: Esfuerzos axiles del pórtico oeste, con sus dos sistemas solapados, ELU 03: uso.....	80
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 89: Detalle del sistema de costillas o nervios.....	81
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado 3ds Max* 2018 y V-Ray 3.6	
Figura 90: Barra de la celosía Pachinko, con un HEB-280.	82
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 91: Barra de la celosía Pachinko, con un HEB-220.	82
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 92: Viga del pórtico interior con sección HEB-280.....	83
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 93: Viga del pórtico interior con sección HEB-320.....	83
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 94: Viga de primera planta: axiles, cortantes, momentos y deformada.	84
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 95: Cordón inferior, cumpliendo a pandeo y resistencia.	85
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 96: Viga de segunda planta: axiles, cortantes, momentos y deformada.....	86
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	
Figura 97: Cordón superior, cumpliendo sin problema tanto a resistencia como a pandeo.....	87
Fuente: elaboración propia	
Software utilizado Architrave * 2015	

Figura 98: Cordón inferior, cumpliendo a resistencia pero fallando en la comprobación a pandeo..... 87
Fuente: elaboración propia
Software utilizado Architrave * 2015

Figura 99: Viga del forjado de cubierta: axiles, cortantes, momentos y deformada..... 88
Fuente: elaboración propia
Software utilizado Architrave * 2015

Figura 100: Cordón superior de la cubierta..... 89
Fuente: elaboración propia
Software utilizado Architrave * 2015

Figura 101: Cordón inferior de la cubierta. 89
Fuente: elaboración propia
Software utilizado Architrave * 2015

Figura 102: Longitud de la correa interpretada por Architrave. 90
Fuente: elaboración propia
Software utilizado Architrave * 2015

Figura 103: Correa IPE-240 cumpliendo a resistencia pero pareciendo fallar catastróficamente a pandeo.. 90
Fuente: elaboración propia
Software utilizado Architrave * 2015

