



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Estudio, análisis y modelización mediante SAP2000 de la
estructura del Estadio Nacional para los Juegos Mundiales
en Kaohsiung de Toyo Ito

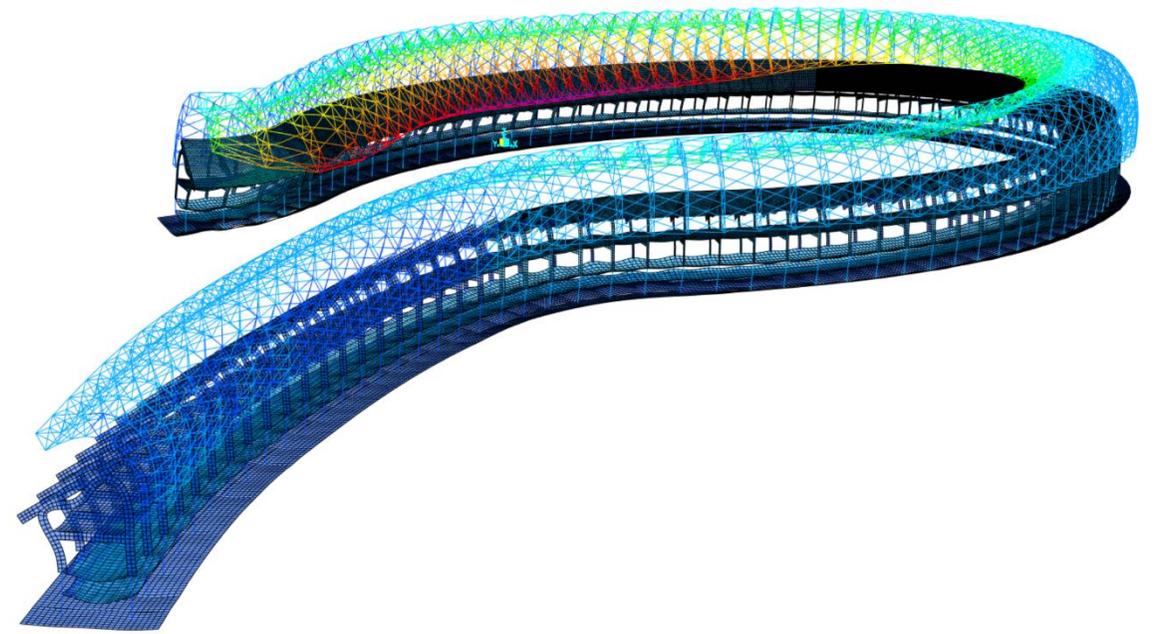
Trabajo Fin de Grado

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

AUTOR/A: Larbi Lalami, Mohamed

Tutor/a: Gallardo Llopis, David

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



TFG Mohamed Larbi Lalami

Estudio, análisis y modelización mediante SAP2000 de la estructura del
Estadio Nacional para los Juegos Mundiales en Kaohsiung de Toyo Ito



Estudio, análisis y modelización mediante SAP2000 de la estructura del Estadio Nacional para los Juegos Mundiales en Kaohsiung de Toyo Ito

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Trabajo Fin de Grado

Autor: Larbi Lalami, Mohamed

Tutor: Gallardo Llopis, David

Curso académico: 2023/2024

ÍNDICE

1 Introducción	2
1.1 Agradecimientos	3
1.2 Resumen	4
1.3 Abstract	5
2 El arquitecto	6
2.1 Toyo Ito	7
2.2 Influencias	8
2.3 Relación con el resto de su obra	12
2.4 Obras relevantes	14
3 Análisis constructivo y estructural	19
3.1 Idea de proyecto	20
3.2 Emplazamiento	21
3.3 Programa	23
3.4 Aspectos estructurales de interés	29
3.5 Simplificaciones	30
4 Generación del modelo paramétrico	31
4.1 Introducción	32
4.2 ¿Cómo funciona la parametrización?	33
4.3 Proceso general	34
4.4 Recuento de los elementos modelizados	41
4.5 Ventajas e inconvenientes	42
5 Modelo en SAP 2000	44
5.1 Agrupación del modelo en grupos	45
5.2 Ajuste fino de los EF	46
5.3 Aplicación de cargas	47
5.4 Apoyos y desconexiones	56
5.5 Cimentación/Muelles	57
5.6 Cálculo de combinaciones	58
6 Resultados	59
6.1 Análisis de deformación	60
6.2 Comprobación de las flechas relativas	70
6.3 Comprobación de los desplomes	73
6.4 Análisis de resistencia	74
7 Conclusiones	79
7.1 Sobre el estudio del edificio, la modelización y los resultados	80
7.2 Relación con los ODS.	81
8 Bibliografía	82
8.1 Listado de referencias textuales	83
8.2 Listado de ilustraciones	84
8.3 Listado de tablas	85
8.4 Listado de figuras	86

1.1 | Agradecimientos

Este trabajo no es fruto de cinco años de carrera e investigación sobre la arquitectura, sino el reflejo de una etapa de mi vida, influenciado por un cúmulo de circunstancias que, en mayor o menor medida, han aportado algo a este documento.

Quisiera dedicar este trabajo

A mi padre, por ser mi guía y mi ejemplo a seguir.

A mi hermana y a mi hermano, por todo lo que hemos vivido juntos, y por todo lo que nos queda por vivir. [إن شاء الله]

A ti, mamá, por tu esfuerzo, tu sacrificio y tus lágrimas.

Y a mi tutor en este Trabajo Final de Grado, David Gallardo Llopis, por su generosidad.

Mil y una gracias a todos.

1.2 | Resumen

El objetivo del presente trabajo es el de presentar un estudio sobre la estructura del Estadio Nacional de Kaohsiung de Toyo Ito. Construido entre 2007 y 2009 para albergar los Juegos Mundiales 2009 en la ciudad de Kaohsiung, Taiwán.

El presente trabajo aborda en primer lugar, el recorrido y las influencias de Toyo Ito. Continúa con la explicación del proceso de modelado paramétrico que se ha seguido en Grasshopper. Por último, se realiza la modelización estructural en SAP 2000 para acabar realizando un análisis que responda a las exigencias de la normativa constructiva española a deformación y resistencia.

Palabras clave:

Toyo Ito, Kaohsiung, parametrización, SAP 2000, Grasshopper, diseño paramétrico, estructura metálica, estadio.

1.3 | Abstract

The objective of this study is to conduct an analysis of the structural design of the Kaohsiung National Stadium by Toyo Ito, constructed between 2007 and 2009 to host the 2009 World Games in Kaohsiung City, Taiwan.

This study first addresses Toyo Ito's career and influences. It then continues with an explanation of the parametric modeling process followed in Grasshopper. Finally, structural modeling is performed in SAP 2000 to conduct an analysis in accordance with the requirements of the Spanish construction standards for deformation and resistance.

Keywords:

Toyo Ito, Kaohsiung, parameterization, SAP 2000, Grasshopper, parametric design, steel structure, stadium.

2.1 | Toyo Ito



Ilustración 1. Fotografía tomada de Toyo Ito en 2013. Fuente: Archdaily.com

Toyo Ito nació el 1 de junio de 1941 en Seúl, Corea, durante la ocupación japonesa. Su familia se trasladó a Japón en 1943, y creció en Nagano y Tokio. Inicó su carrera en el estudio de la arquitectura en la Universidad de Tokio, donde se graduó en 1965. Comenzó su carrera profesional trabajando para Kiyonori Kikutake & Associates hasta 1969, cuando fundó su propio estudio, Urban Robot (URBOT), que más tarde se convirtió en Toyo Ito & Associates.

Toyo Ito es conocido por su enfoque innovador y experimental en la arquitectura que desde sus inicios compartió con los artistas y arquitectos de la conocida “nueva ola japonesa”. Sus diseños buscan integrar las estructuras urbanas con el entorno natural, creando una armonía entre el espacio construido y el paisaje. Se le atribuye una gran actitud defensora de la arquitectura que responde a las necesidades emocionales y sensoriales de las personas, más que a las funcionales o utilitarias.

Además de esto, Ito ha sido pionero en la exploración de nuevas tecnologías y materiales, lo que le ha permitido crear estructuras ligeras y etéreas, aprovechándose del gran potencial de los nuevos sistemas de diseño y cálculo estructural. Su trabajo refleja una visión futurista y una profunda comprensión de la dinámica social y cultural contemporánea.

A lo largo de su carrera profesional, Ito ha recibido numerosos premios, incluyendo el prestigioso Premio Pritzker en 2013. En la actualidad, sigue siendo una figura influyente en la arquitectura contemporánea, conocido por su capacidad para reinventar el espacio y por su enfoque humanista que pone a las personas en el centro de sus diseños.

2.2 | Influencias

La cultura japonesa

Desde sus inicios, Japón se ha encontrado en constante diálogo con la naturaleza en su forma más temible, violenta e impredecible. Esto se debe a su ubicación en el “Cinturón de Fuego” del Pacífico. Una vasta zona geológica en forma de herradura que se extiende por unos 40 000 km a lo largo de las costas del océano Pacífico, reconocido por su asidua actividad sísmica y volcánica, región donde tiene lugar ni más ni menos que el 90% de los terremotos del planeta.

Ito posee una profunda admiración por la naturaleza, el estrecho vínculo que posee con este viene heredado de su cultura japonesa, donde esta es sagrada. Según Frank Lloyd Wright, Japón poseía las más nobles y puras tradiciones del mundo en lo que a bellas artes se refiere. “Occidente tenía mucho que aprender de Oriente, Japón era el puerto de acceso al gran Oriente, con el que yo había soñado desde los primeros grabados japoneses y había leído mi primer Laotzé” (Wright, 1998)

En una entrevista con Federico Lerner (2014), Ito afirmó que en los jardines japoneses aquellos elementos como los árboles, los estanques, o cualesquiera que fuesen las barreras virtuales que separan un sitio de otro, están unidos por el hombre, por su recorrido, de ahí surge el espacio. La intención es siempre la de crear una arquitectura que responda a dicha idea de jardín japonés, es decir, que el eje organizador sea el propio hombre. (Lerner, 2014)

Ito reconoce el estudio que tienen las arquitecturas más primitivas, pues fue en estas donde mayor fue la conexión entre el ser humano y la naturaleza, y donde prevalecía la armonía entre estos dos. “Los humanos solían vivir junto al río y absorber su agua limpia [...] Los humanos eran parte de la naturaleza,” (Ito, La arquitectura como organismo, 2016)



Ilustración 2. La gran ola, de Katsushika Hokusai.

El Movimiento Moderno

El Movimiento Moderno, surgido a raíz de la Segunda Guerra Mundial, va a definir los parámetros de la arquitectura occidental que, junto a la Revolución Industrial, marcará una nueva forma de arquitectura. Será la funcionalidad la que rijan las pautas del desarrollo durante la primera mitad del siglo XX. Encontramos grandes diferencias entre el Movimiento Moderno en occidente y la arquitectura tradicional japonesa, sin embargo, a partir de la era Meiji, con la occidentalización de Japón, el país del sol naciente se verá influenciado drásticamente por la cultura occidental y los parámetros del Movimiento Moderno. Las nuevas generaciones de arquitectos estudiarán las nuevas ciudades en las facultades, y las familias lo vivirán de primera mano en sus casas.

“Nuestra arquitectura cambia con los tiempos, y como primer propósito intentamos ir más allá de un Movimiento Moderno demasiado abstracto que desestima el elemento humano, hacia una arquitectura que acoge a la gente. Estos son mis esfuerzos actuales” (Ito, Conversaciones con estudiantes, 2005)

Ito reconoce que la rigidez que caracterizaba al Movimiento Moderno a lo largo del siglo era propia de la era mecánica, y se encontraba muy alejada de lo que las nuevas tecnologías de la era microelectrónica estaban proponiendo. La tecnología avanza a un ritmo vertiginoso, y la sociedad cambiaba al estilo de esos avances, alejada de la arquitectura que seguía enlazada a la era mecánica.

“A pesar del enorme desarrollo de la microelectrónica, no podíamos plasmarlo en imágenes visibles claras, cosa que si se había conseguido en la era mecánica.” (Ito, 1993)

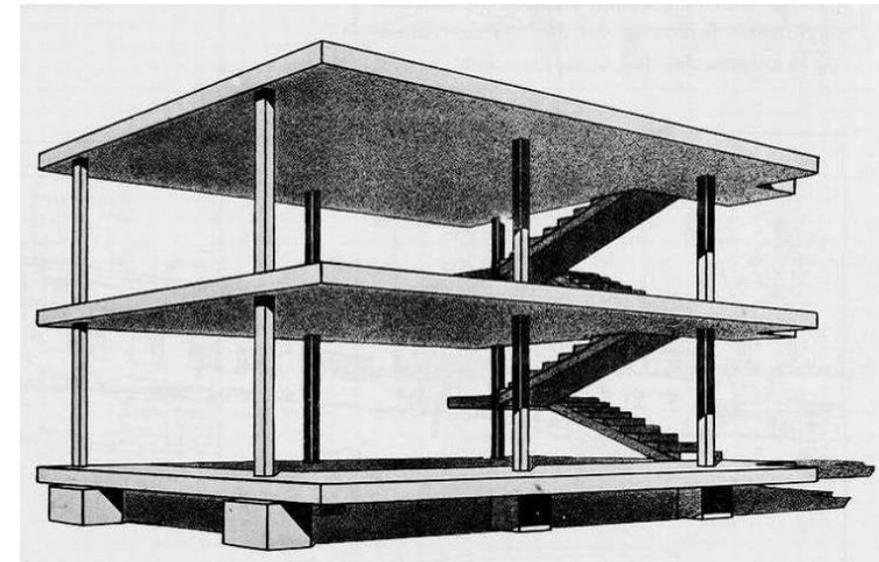


Ilustración 3. Sistema dom-ino de Le Corbusier.

El Metabolismo

Fue el nombre del movimiento arquitectónico, urbano, artístico y filosófico que esbozó Japón durante las décadas de los sesenta y setenta cuyo origen, al igual que el Movimiento Moderno, se remonta a la Segunda Guerra Mundial, evento que dejó devastado al Imperio Japonés y que condujo a una profunda crisis que duraría hasta mediados de los años cincuenta, época en la que Japón pudo experimentar un periodo de expansión económica gracias a las nuevas tecnologías electrónicas que se prolongó hasta la crisis del petróleo de 1973. Bajo estas circunstancias surgió una nueva generación de arquitectos cuyo objetivo fue introducir un nuevo concepto de urbanización que responda al dinamismo urbano y evolución de las ciudades del país del Sol naciente.

Esta corriente buscó responder a todas aquellas cuestiones que el Movimiento Moderno occidental desatendió a ojos de los arquitectos japoneses. El principal agente que contribuyó a los planes de reconstrucción y desarrollo del país fue Kenzo Tange, gracias al cual aparecieron una serie de jóvenes arquitectos, diseñadores y críticos de arte que presentaron en 1960 un manifiesto denominado “*Metabolismo: propuestas para un nuevo urbanismo*” durante el Congreso Mundial de Diseño de ese mismo año. En dicho manifiesto defendían el ideario de una ciudad y una arquitectura ajustada a la situación social y demográfica del país, partiendo del modelo de metabolismo de las células en biología. “El Metabolismo usa metáforas biológicas y las combina con imágenes tecnocientíficas, que, junto a la arquitectura vernácula, evocan la noción de una arquitectura genética capaz de reinventarse en el tiempo.” (Schalk, 2014). Algunos de sus fundadores fueron Kurokawa Kisho, Kikutake Kiyonori, Maki Fumihiko, Otaka Masatom, Ekuan Kenji, Awazu Kiyoshi y Kawazoe Noboru.

Varios proyectos se materializaron a raíz de esta ideología, tanto urbanos como obras singulares, entre ellos, el reconocido Nagakin Capsule Tower, situado en el emblemático barrio comercial de Ginza, Tokio. Aun siendo un proyecto con gran repercusión mediática y próximo a las zonas turísticas, acabó siendo demolido sin resentimiento debido a su estado de deterioro, como muchos otros edificios originados del movimiento, a causa de su elevado costo de mantenimiento.

Es importante resaltar que esta práctica es una tradición arraigada en las ciudades japonesas. Su expansión se caracteriza por su naturaleza amorfa, lo que refleja su sólida integridad física y su capacidad inherente para regenerarse tras sufrir daños, un atributo que Japón ha demostrado a lo largo de los siglos debido a los recurrentes desastres naturales que afectaban y siguen afectando al país. La vida de los edificios en Japón es muy corta, lo que conlleva a considerar la arquitectura en Japón en muchos casos, efímera.

Muchas de las ideas urbanas acabaron siendo utopías que elucubraban la creación de formas geométricas inmensas que se alejaban considerablemente de la escala humana. Las ciudades, o más bien, megaciudades, mostrarían un carácter dominante a través de las estructuras futuristas y desde luego, desproporcionadas. Algunos ejemplos podrían ser el “Sistema de Núcleo Común” y la “Ciudad en el Aire” de Arata Isozaki (1960-1961), la Ecópolis de Kiyonori Kikutake (1990), la “Ciudad Hélice” y la “Ciudad Agrícola” de Kurokawa Kisho (1960-1961) o la Renovación del Distrito Tsukiji de Kenzo Tange (1963).

Si bien es cierto que ninguno de estos proyectos pudo llevarse a cabo en la realidad, no cabe duda de que tuvieron gran trascendencia en las nuevas generaciones de arquitectos japoneses, siendo un ejemplo más en la historia de que planes urbanos a menudo surgen como consecuencia de periodos de cambios sociales, cuando se enfrentan el nuevo orden con el antiguo, y sirven de combustible o plantilla para las generaciones venideras, hasta retomar otra vez el ciclo, como la vida misma.

Si bien es cierto que ninguno de estos proyectos pudo llevarse a cabo en la realidad, no cabe duda de que tuvieron gran trascendencia en las nuevas generaciones de arquitectos japoneses, constituyendo un ejemplo más en la historia de cómo los planes urbanos a menudo surgen de periodos donde el nuevo orden social desafía al viejo, sirviendo de plantilla para las generaciones venideras, hasta retomar otra vez el ciclo.

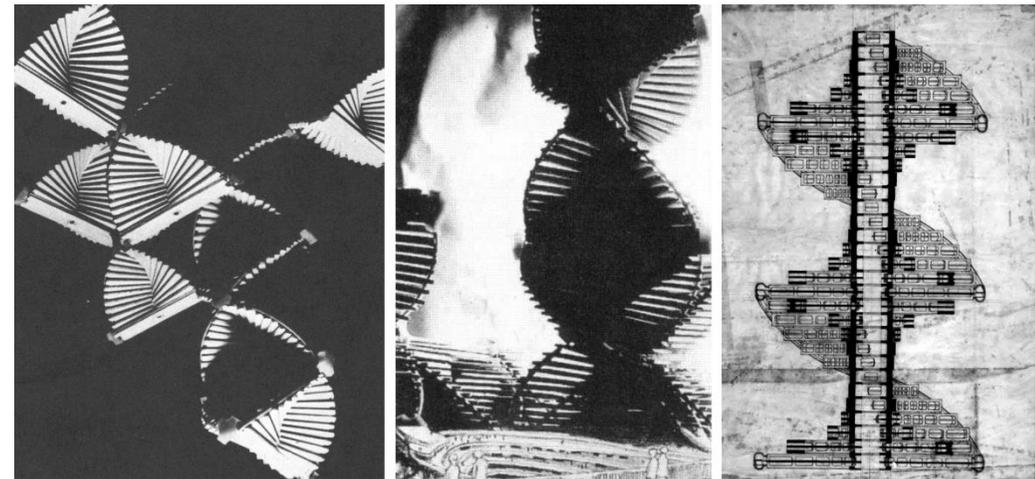


Ilustración 4. La ciudad hélice de Kisho Kurokawa. 1961

La era de la microelectrónica

Precedente a la era microelectrónica fue la era mecánica producto de la revolución industrial, y más adelante la era electrónica con la creación de los transistores, gracias a los cuales surgió la microelectrónica. Hasta entonces habían surgido ciertos inventos como el ábaco, la imprenta o el telégrafo, pero ninguno fue capaz de revolucionar la tecnología informática de la misma forma.

Se puede afirmar que la microelectrónica es la piedra angular de las tecnologías informáticas que penetran cada aspecto de la vida contemporánea... hoy en día se entiende que la microelectrónica no es un invento más, sino uno de los motores principales de la vida moderna. (Cortés L. A., 2007)

El desarrollo de los primeros ordenadores IBM con Windows 3.0 implicaron el pistoletazo de salida para mejorar la conexión mundial y la globalización a través de la informática. “El mundo ‘se aplana’ y el individuo gana poder, la relación entre el espacio y el tiempo se pierde, por ejemplo, un cirujano es capaz de supervisar una operación realizada en el otro extremo del mundo.” (Castells, 1996)

Todo esto supone una oportunidad, que algunos pocos supieron aprovechar en aras de mejorar nuestro mundo. El estudio de estas nuevas tecnologías sugiere de un estudio pormenorizado y extenso, para así poder entender todo el potencial que nos brindan. Así lo remarca Torres Cuenco en el prólogo del libro del propio Ito *Arquitectura en el Bosque de los Medios*.

Probablemente sea Ito uno de los arquitectos que adquirieron una conciencia plena del potencial de los medios electrónicos y las técnicas digitales, cuyos cambios han sido sustanciales en nuestra propia subjetividad, en nuestro modo de percibir la ciudad y el universo fugaz e inestable que nos rodea. (Torres Cuenco, 2004)

“Los habitantes urbanos de hoy día disponen de una sensación corporal androide. Porque en medio del bosque que llamamos espacio urbano, el torrente de la montaña podría ser no solo el ir y venir de los automóviles de las autopistas sino también el flujo de las corrientes magnéticas invisibles de la sombra de los árboles, apropiada para disfrutar del frescor, puede estar dentro del bosque de acero y de aluminio donde retumba el sonido del sintetizador.” (Ito, Una arquitectura que pide un cuerpo androide, 1988)

Según esto Ito afirma que las nuevas generaciones nacen inmersas en un contexto tecnológico, hasta tal punto que son capaces de reconocer elementos naturales en las mismas. La sensación de ser un androide la podemos entender como la habilidad que ha desarrollado el ser humano para captar sensaciones sensoriales a partir de lo ficticio.

Ahora bien, si entendemos arquitectura como reflejo de la sociedad en una franja de tiempo concreta, esta última se encuentra obligada a adaptarse a dichos cambios.

Un ejemplo muy claro es como las nuevas tecnologías y los medios de comunicación han afectado al modo de vivir de las personas, llegando a romper núcleos familiares. Si la relación familiar cambia, el modo de habitar cambia, y, por ende, la vivienda cambia. Si vivimos en una sociedad donde el individualismo es tan fuerte, cabe

preguntarse si es necesario seguir teniendo viviendas con espacios de relacionamiento, tales como la sala de estar o el comedor. (Blengio & Dolan, 2017)

Según (Ashihara, 1986) en *The hidden Order, Tokyo through the twentieth century*, debido a las nuevas distancias de las ciudades el comportamiento del hombre ha cambiado tanto que las actividades que en el pasado eran realizadas en la vivienda, hoy en día se realizan en el espacio urbano. Es decir, el comedor se transforma en restaurante, el estar en café, el ropero en una tienda y el jardín en un parque.

2.3 | Relación con el resto de su obra

Según (Ito, 1993) la primera vez que experimentó la estética de la era microelectrónica fue durante la exposición del MOMA “Information Art. The diagraming of Microchips”. Según él, la forma óptima de materializar la era post mecanicista es partiendo de las bases del microchip, creando de esta forma una arquitectura acorde al orden y fluido de la era microelectrónica. (Lerner, 2014, pág. 81)

Para responder a estos conceptos de ciudad y nuevas formas de habitarla, Juan Antonio Cortes (2004) nos muestra diferentes puntos que propone Ito en diferentes escritos:

1. **La arquitectura debe ser ligera, sin forma, liviana, que flote en el aire.**
2. **Se deben crear espacios como fluidos, siendo estos blandos y flexibles. Espacios donde se desarrollen de forma continua las actividades del hombre.**
3. **Una arquitectura como una película delgada que envuelva al ser humano, homogeneizadora de la sociedad contemporánea.**
4. **Una arquitectura que busca la estabilidad y la permanencia, pero que se nos muestra como algo ficticio, transitorio e inestable.**
5. **La arquitectura como un envoltorio de acciones, generadora de remolinos o vórtices en las corrientes naturales -aire, viento, luz y sonido- y artificiales -información, transporte, flujos electrónicos-, como dispositivos que interprete la forma como fenómeno, que haga visible el fluir de las cosas invisibles y que indique la actuación humana.**
6. **La arquitectura como dispositivo que produzca paisaje.**
7. **Una arquitectura que convierte el punto de destino en punto de paso, y en la que el desplazamiento pasa a desempeñar el papel protagonista; una arquitectura como punto de cruce dentro de una red de actividades, una arquitectura en la que se superponen, o imbrican, espacios heterogéneos.**
8. **Una arquitectura abierta, de límites oscilantes o sinuosos, el límite como membrana, como película osmótica que no separa el interior del exterior, sino que permite el paso a través.**

Como podemos ver, todos puntos, en mayor o menor medida, se perciben en el Estadio Nacional de Kaohsiung.

1. La arquitectura ha de ser liviana, sin una forma precisa, que flote en el aire.
2. El espacio se debe entender como un fluido, siendo esta flexible y blando. La actividad del ser humano se realiza de forma continua.
3. La arquitectura se entendera como una fina película que envuelva al hombre, homogeneizadora de la sociedad contemporánea.
4. La búsqueda de la estabilidad y la permanencia.

2.4 | Obras relevantes

Al emplazar un edificio en un espacio urbano, este ha de integrarse con los flujos alrededor de su parcela, debe ser capaz de responder a las interacciones entre otros edificios, transportes, comunicación y al propio agente humano.

Ito (1992) emplea la metáfora del comportamiento de un río al colocar un palo en él, El flujo de agua no se ve interrumpido, sin embargo, se crea un remolino alrededor del palo. La arquitectura ha de ser como el palo.

Aplicado al ámbito urbano, el edificio, sea de la índole que sea, debe conseguir generar un remolino que responda a las coordenadas espaciales y temporales donde se encuentra, asimilar el contexto y no chocar con el entorno, sino beber de él y convertirlo en el motor de la vida que vaya a recibir dicho espacio.

“Crear arquitectura es un acto de generar vórtices en las corrientes de agua, luz y sonidos” (Ito, Paisaje arquitectónicos de una ciudad envuelta en una película de plástico transparente, 1992)

A continuación, se presentarán algunas obras cuyo carácter responden a estas teorías.



Torre de los vientos

En 1986 Toyo Ito recibe el encargo de remodelación de una torre de hormigón que albergaba las instalaciones de un centro comercial en la estación de Yokohama. Ito decidió colocar para su restauración placas de espejos acrílicos y paneles de aluminio ovalado en cuyo interior se encontraban unas lámparas. A lo largo del día la torre refleja luz a partir de unos sensores microeléctricos que captan información del impacto del viento y sonido de la ciudad, variando la intensidad de la luz que emite la torre.

De esta forma, el anodino bloque de hormigón de la plaza frente a la salida oeste de la estación de ferrocarriles de Yokohama, construido hace unos veinte años con el único propósito de ser un depósito de agua elevado y una torre de aspiración de aire, se convirtió en un gran monumento de la arquitectura contemporánea de la era electrónica. (Suzuki, 1997)

Al final, el logro de Ito ha sido el poder hacer una representación de la naturaleza, mediante el uso de las tecnologías del momento.

Como explica Ito (1991), aunque la torre, que emite luces parpadenates igual que otros anuncios luminosos de neón, es menos espectacular, se dice que produce impresión de que el aire que la rodea se filtra y purifica. Puede que sea así porque lo que yo intentaba no era provocar que una sustancia lanzara luz al aire, sino que el propio aire se convirtiera en luz. (Ito, La arquitectura como metamorfosis, 1991, pág. 10)

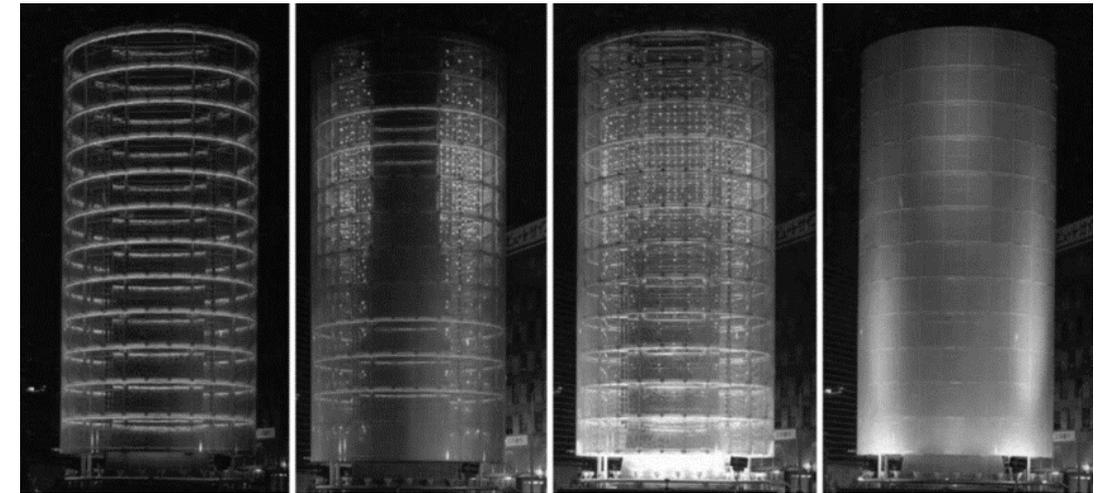


Ilustración 5. Torre de los vientos de Toyo Ito. Yokohama 1986

Mediateca de Sendai

Uno de los proyectos de mayor renombre en su carrera fue el de la mediateca de Sendai. El programa del proyecto pedía ser un nuevo espacio público donde se pudiesen realizar diferentes funciones. Ito vio en este concurso la oportunidad de generar un nuevo “remolino” para la ciudad.

El edificio consta de trece tubos huecos y forjados metálicos que resuelven tanto la estructura del edificio como los servicios. De esta forma, es capaz de liberar tanto fachada como planta, dejando esta última totalmente a disposición del usuario. El diámetro de los tubos varía entre los 2 y 9 metros, permitiendo así la instalación de las instalaciones y circulaciones necesarias para el edificio. Por otro lado, al estar recubiertos de vidrio y conectarse de rasante a cubierta, se convierten también en una fuente de iluminación natural. La sensación que se percibe de los tubos es la de unas algas colgando de una pecera, fluidez y movimiento se consigue gracias a que los tubos cambian de diámetro y dirección de planta a planta.

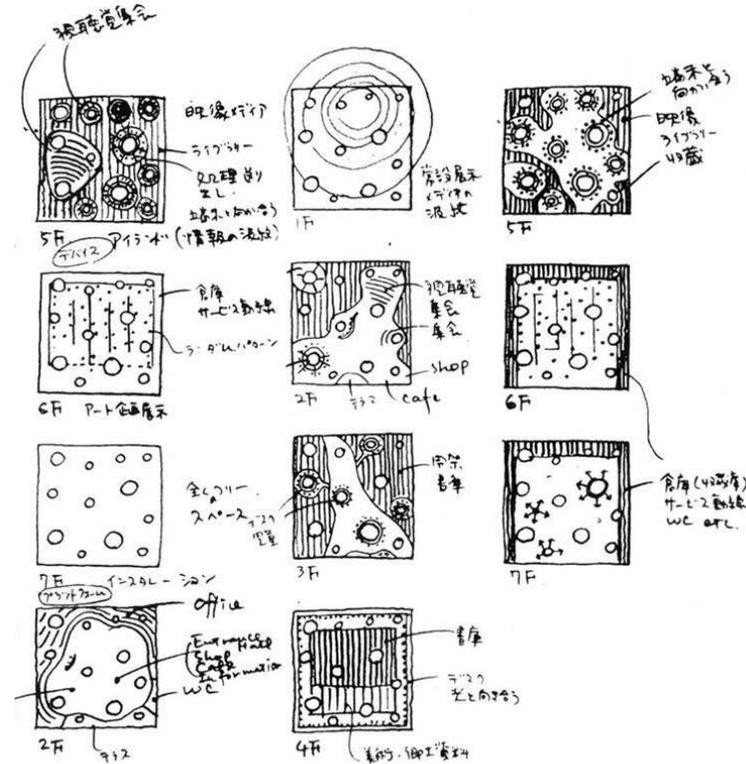


Ilustración 6. Esquema en planta de la mediateca de Sendai. Autor: Toyo Ito.

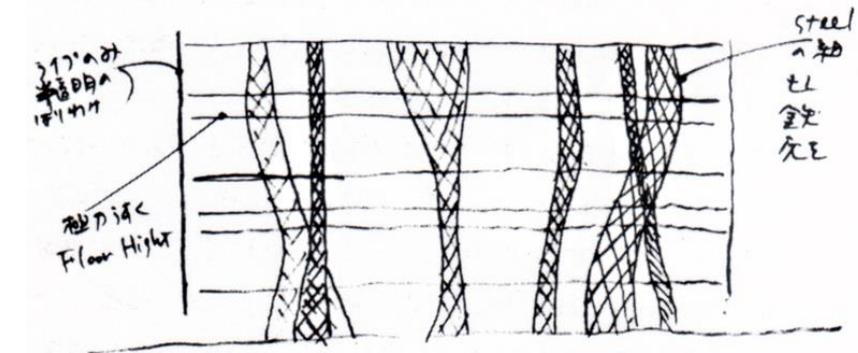


Ilustración 7. Esquema en sección de la mediateca de Sendai. Autor: Toyo Ito.

Gaudí y el Aparthotel de Barcelona

Según Mostafavi (2009) la dualidad de ligereza y abstracción de la naturaleza será la dualidad de conceptos que predomine en los proyectos más recientes de Toyo Ito.

Lo que más le diferenciará del Movimiento Moderno será la gran componente simbólica que dote a sus obras. “No me interesa en particular el simbolismo de sus formas. Basándome en la arquitectura moderna, todo lo que puedo hacer es plantear cómo utilizar el simbolismo para ir más allá” (Ito, T. 2005, pág. 63)

Durante algunas etapas de su carrera, y sobre todo en aquellas obras ubicadas en Barcelona, Ito es comparado con Gaudí. El propio Ito confesó ser un admirador de la arquitectura del maestro catalán, sus espacios fluctuantes, sin intentar imitar en ningún momento la expresión tal y como es, sino reflejar su dinamismo y fluidez como si fueran las olas del mar y así poder corresponder con La Pedrera y con Gaudí (Trenas, 2013). Podemos apreciar muchas similitudes entre ambos en la fachada de la Pedrera y la Fachada del Aparthotel, ubicado en la Suits Avenue de Barcelona.

En este edificio, Ito realiza la reforma de la fachada y los patios interiores mediante una serie de planchas metálicas en tiras horizontales, representando las ondulaciones del mar.



Ilustración 8. Semejanzas entre la Casa Milà de Gaudí y el Aparthotel de Ito.

Edificio TOD's

Durante la década de los 90, en plena expansión económica, multitud de empresas se encontraban en aras de reposicionarse en el mercado a partir de nuevas formas de promover sus productos. Muchas marcas de lujo llegaron a comprender que el contenedor de sus productos, sus tiendas físicas, eran tan cruciales como la calidad intrínseca de sus productos, lo que desencadenó un movimiento generalizado de renovación de sus establecimientos comerciales. Este fenómeno contemporáneo se conoce actualmente como "luxutexture", una estrategia que se centra en la concepción de diseños arquitectónicos exteriores con el propósito de destacar y consolidar la imagen de una marca ante el público consumidor.

Ese fue el caso de la conocida marca TOD's, al abrir su tienda en Omotesando, en pleno centro neuralgico de Tokio. Ito fue el encargado de llevar a la realidad los deseos de esta marca. La calle donde se ubica es reconocida por la abundante presencia de árboles e Ito utiliza este recurso para generar el hilo conductor del proyecto.

El edificio, resuelto con forma de L, se envuelve de una estructura de hormigón, la cual se emplea para liberar la planta, tamizando la fachada y al mismo tiempo permitiendo amplias entradas de luz al interior.

Destaca por el empleo del simbolismo del elemento natural, en este caso un árbol, cuya capacidad portante marca la diferencia entre ser un simple elemento decorativo, sino también estructural.



Ilustración 10. Fotografía interior del edificio TOD's de Ito.



Ilustración 9. Fotografía exterior del edificio TOD's de Ito.

3.1 | Idea de proyecto

Análisis de la obra. Estadio Nacional de Kaohsiung, Taiwán.



Arquitectos: Toyo Ito & Associates. Japón.
Takenaka Corporation. Japón.
Ricky Liu & Associates. Taiwán.
Promotores: Bureau of Public Works City de Kaohsiung.
Diseño estructural: Takenaka Corporation. Japón.
Hsin-Yeh Engineering Consultants. Taiwán.
Constructor: Fu Tsu Construction. Taiwán.
Takenaka Corporation. Japón.

Como ya se ha comentado en el apartado **2.2**, la búsqueda por crear “remolinos” o “revoltones” provoca que las obras proyectadas por Toyo Ito cuenten con una estrecha relación entre la composición del edificio y la naturaleza. El entorno ha de tener una repercusión en el edificio, y viceversa.

En particular, esta componente es especialmente visible a la hora de percibir el Estadio Nacional de Kaohsiung. Al igual que en anteriores obras del autor, la componente estructural es dotada de casi la totalidad del protagonismo. Todo queda visto, una estructura “desnuda” ante los ojos del espectador.

La utilización de los tubos que recorren todo el estadio de forma entrelazada tiene una gran presencialidad, cumpliendo no solo con una función compositiva potente, sino también con el arriostramiento transversal de las cerchas que componen la cubierta del estadio, entre otras funciones, haciendo que el conjunto se comporte como una unidad. Se pueden entender como un ejemplo magnífico de lo que Ito nos intentaba explicar acerca del efecto “remolino”, no se perciben como una barrera que separe al usuario del exterior, sino como un flujo de corrientes de viento materializadas en acero. Se podría decir que mucha de la teoría de Ito queda plasmada en este proyecto.

3.2 | Emplazamiento

El Estadio Nacional de Kaohsiung se encuentra en el distrito de Zuoying de la ciudad de Kaohsiung, Taiwán, ubicado en la parte norte de la ciudad. Cerca del mismo se encuentra el Parque Metropolitano de Kaohsiung, el cual proporciona 35 hectáreas de zonas verdes a la ciudad taiwanesa. La forma abierta del estadio se enfoca hacia dicho parque, el gesto de suprimir las gradas en dicha apertura muestra cierta intención de abrirse hacia el mismo y mantener una conexión directa con el espectador que se encuentre en su interior.

Desde ciertas perspectivas, la forma orgánica de la cubierta dibuja una silueta en el cielo que nos podría llegar a recordar al Monte Banping, situado a escasos kilómetros al Este del estadio, siendo este, otro gesto más hacia ese acercamiento a la naturaleza que tanto se percibe en las obras de Toyo Ito.



Vistas aéreas del conjunto del Estadio Nacional de Kaohsiung.

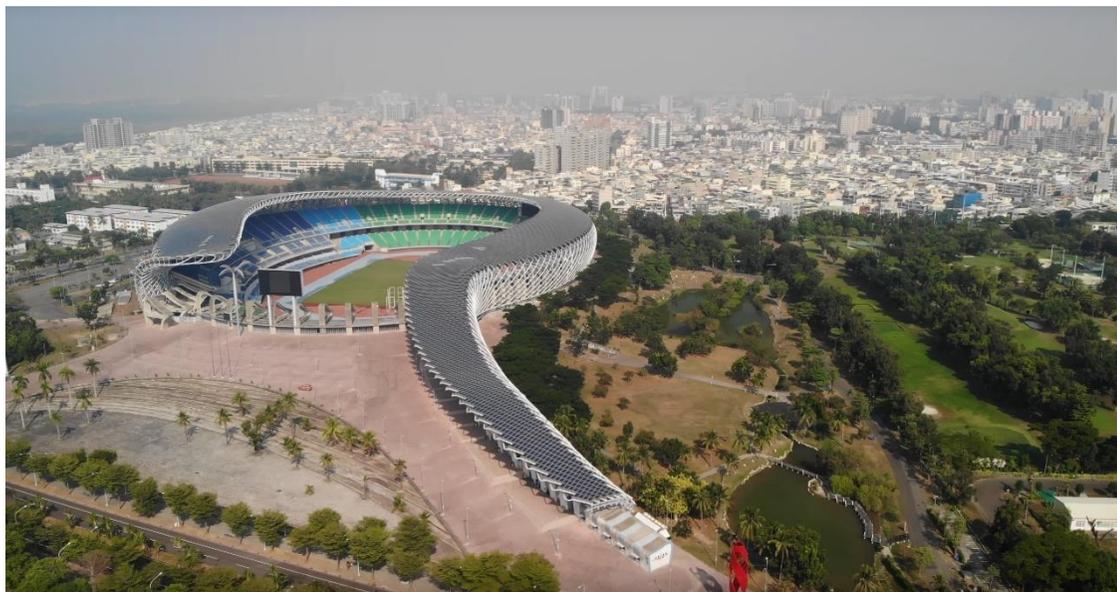


Ilustración 11. Vistas aéreas del estadio.

3.3 | Programa

Como cualquier otra instalación deportiva multifuncional de su categoría, el estadio ofrece un amplio programa tanto para atletas, como para espectadores y personal.

Área de competencia

- Pista de atletismo
- Campo de fútbol

Instalaciones para los atletas

- Vestuarios
- Salas de entrenamiento
- Sala de calentamiento
- Sala de fisioterapia y recuperación

Servicios para los espectadores

- Gradas con capacidad para aproximadamente 55,000 personas
- Áreas VIP y palcos privados
- Áreas de acceso para personas con discapacidad

Instalaciones de prensa y medios

- Sala de prensa
- Áreas de trabajo para periodistas
- Zonas de entrevistas y conferencias de prensa

Comodidades y servicios

- Tiendas de recuerdos y merchandising
- Cafeterías y quioscos
- Restaurantes y áreas de comida rápida
- Áreas de descanso y esparcimiento

Infraestructura de apoyo

- Estacionamiento para vehículos
- Estacionamiento para bicicletas y motocicletas
- Oficinas administrativas
- Sala de control de seguridad y monitoreo
- Cuartos y salas de instalaciones

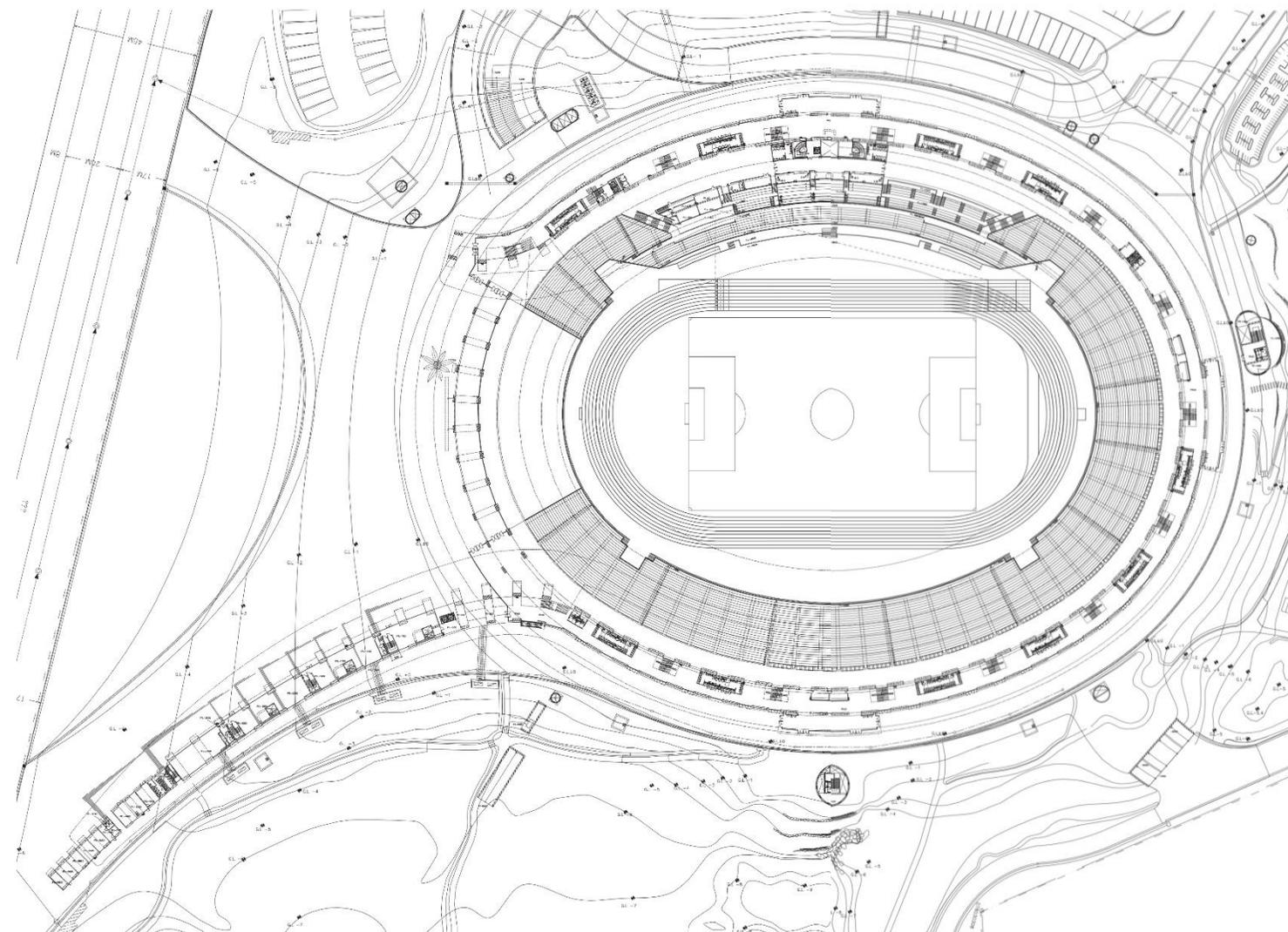


Figura 3.1. Planta de emplazamiento. Fuente: Revista Detail.

Planta de emplazamiento. Fuente: Revista Detail.

Planta baja

1. Aparcamiento para trabajadores y VIP
2. Zona para los medios de comunicación
3. Lobby VIP
4. Cocina
5. Estancia para el staff
6. Oficinas
7. Conferencias
8. Aparcamiento para espectadores
9. Entrada principal
10. Asientos en el césped
11. Gradas
12. Espacio monitoreo
13. Entradas laterales
14. Tiendas
15. Restaurantes
16. Información
17. Taquillas

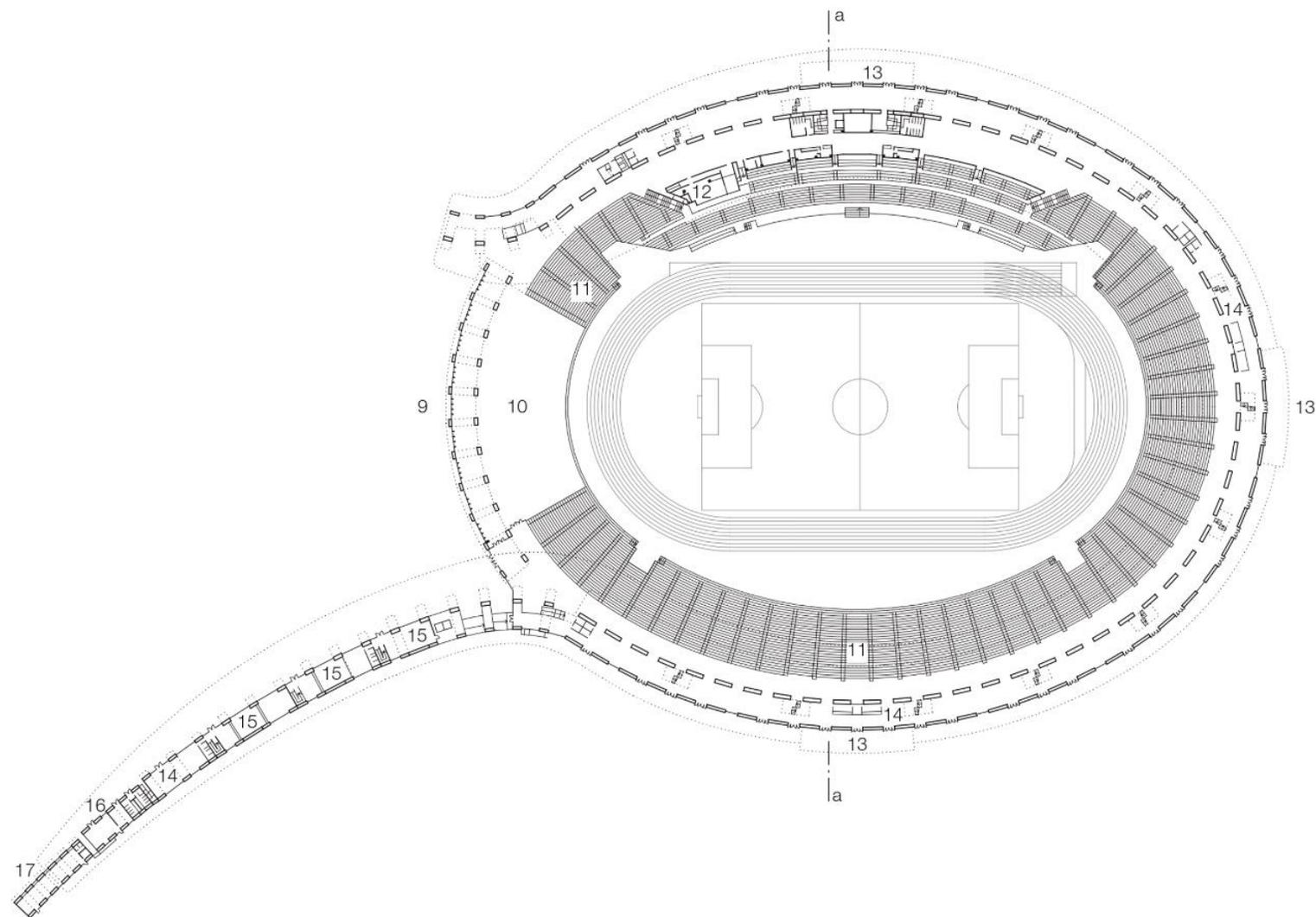


Figura 3.4. Planta baja. Fuente: Revista Detail.

Figura 3.5. Planta baja. Fuente: Revista Detail.

Sótano primero

1. Aparcamiento para trabajadores y VIP
2. Zona para los medios de comunicación
3. Lobby VIP
4. Cocina
5. Estancia para el staff
6. Oficinas
7. Conferencias
8. Aparcamiento para espectadores
9. Entrada principal
10. Asientos en el césped
11. Gradas
12. Espacio monitoreo
13. Entradas laterales
14. Tiendas
15. Restaurantes
16. Información
17. Taquillas

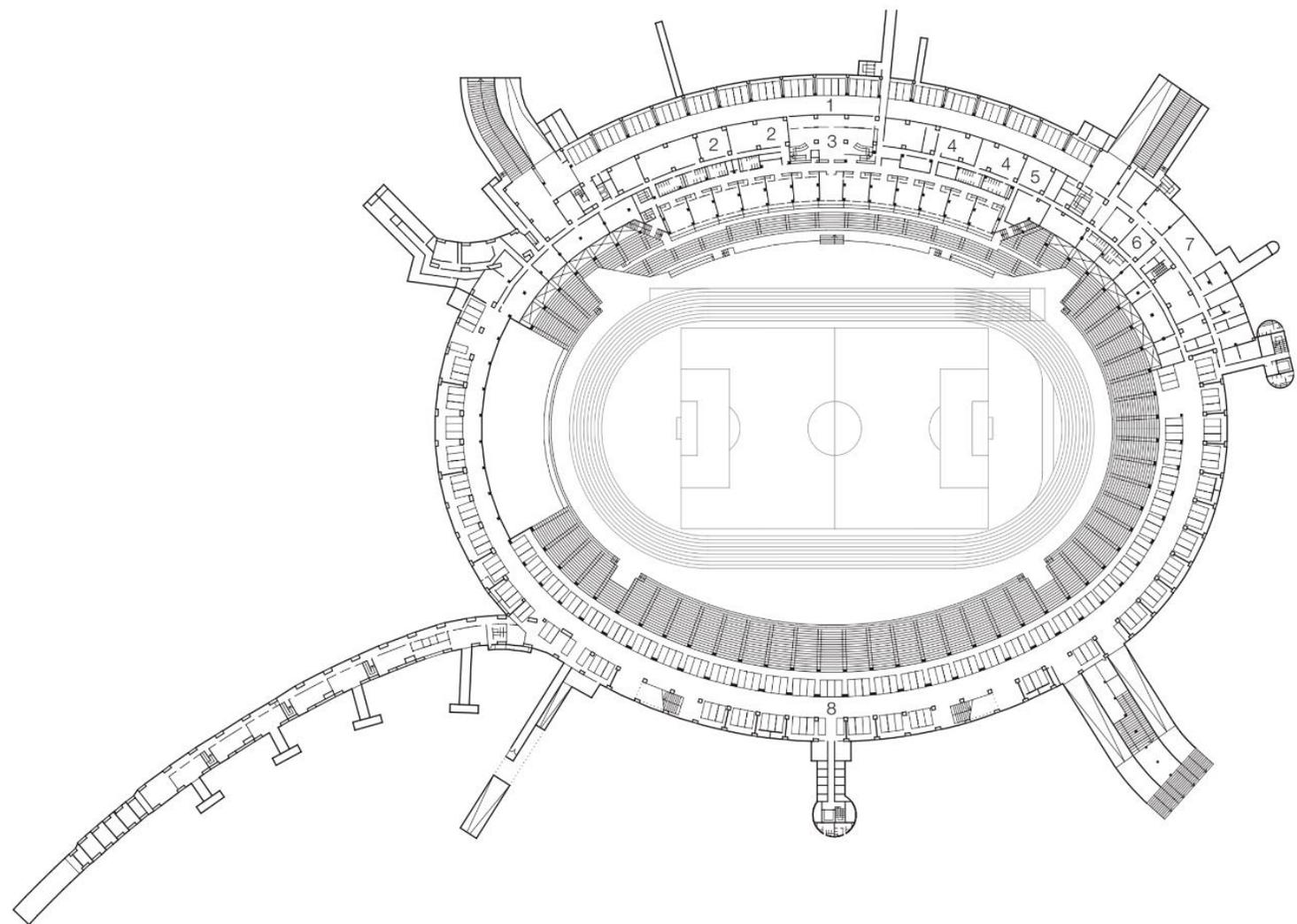


Figura 3.6. Planta del sótano primero. Fuente: Revista Detail.

Figura 3.7. Planta del sótano primero. Fuente: Revista Detail.

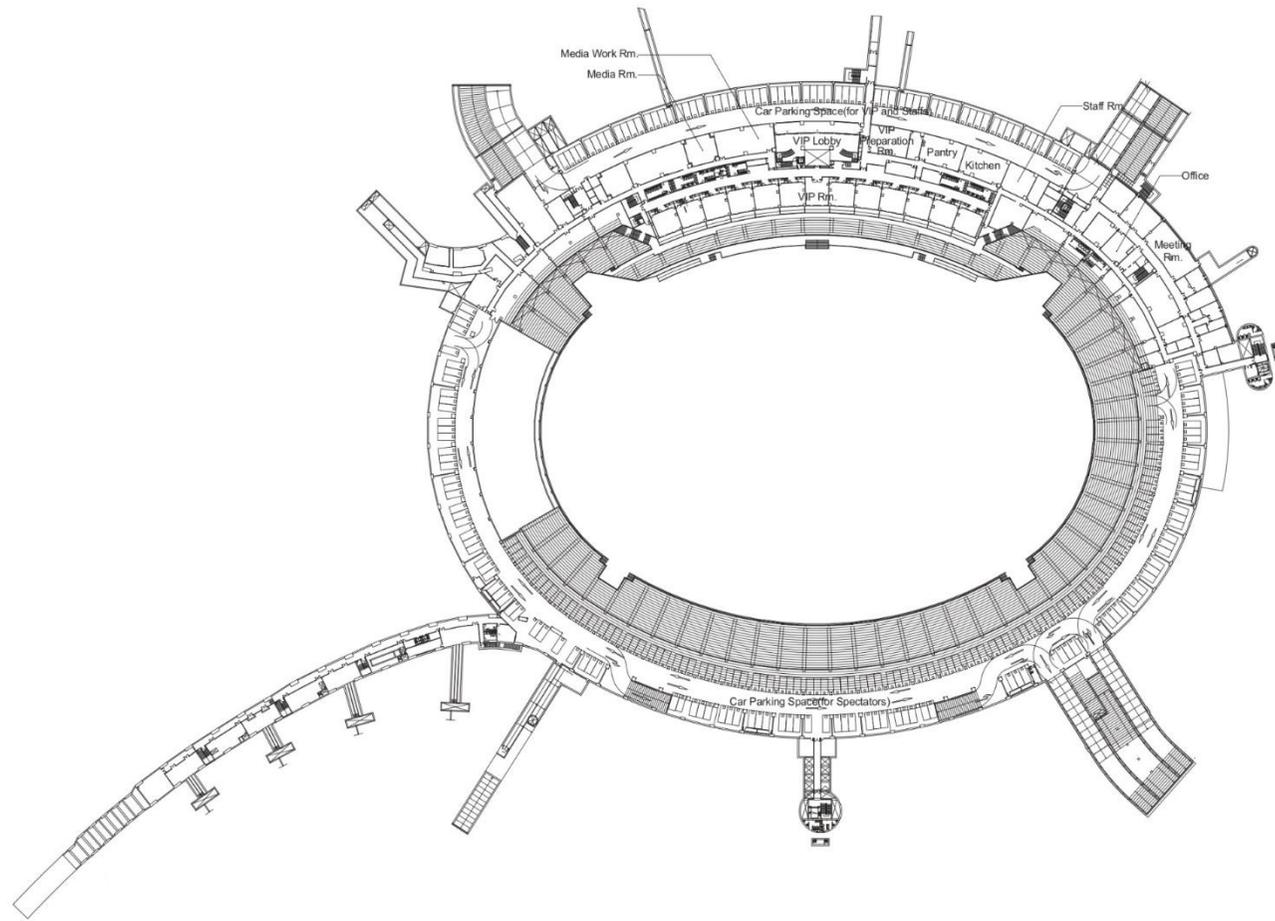


Ilustración 12. Planta del sótano primero. Fuente: Revista Detail.

Ilustración 13. Planta del sótano primero. Fuente: Revista Detail.

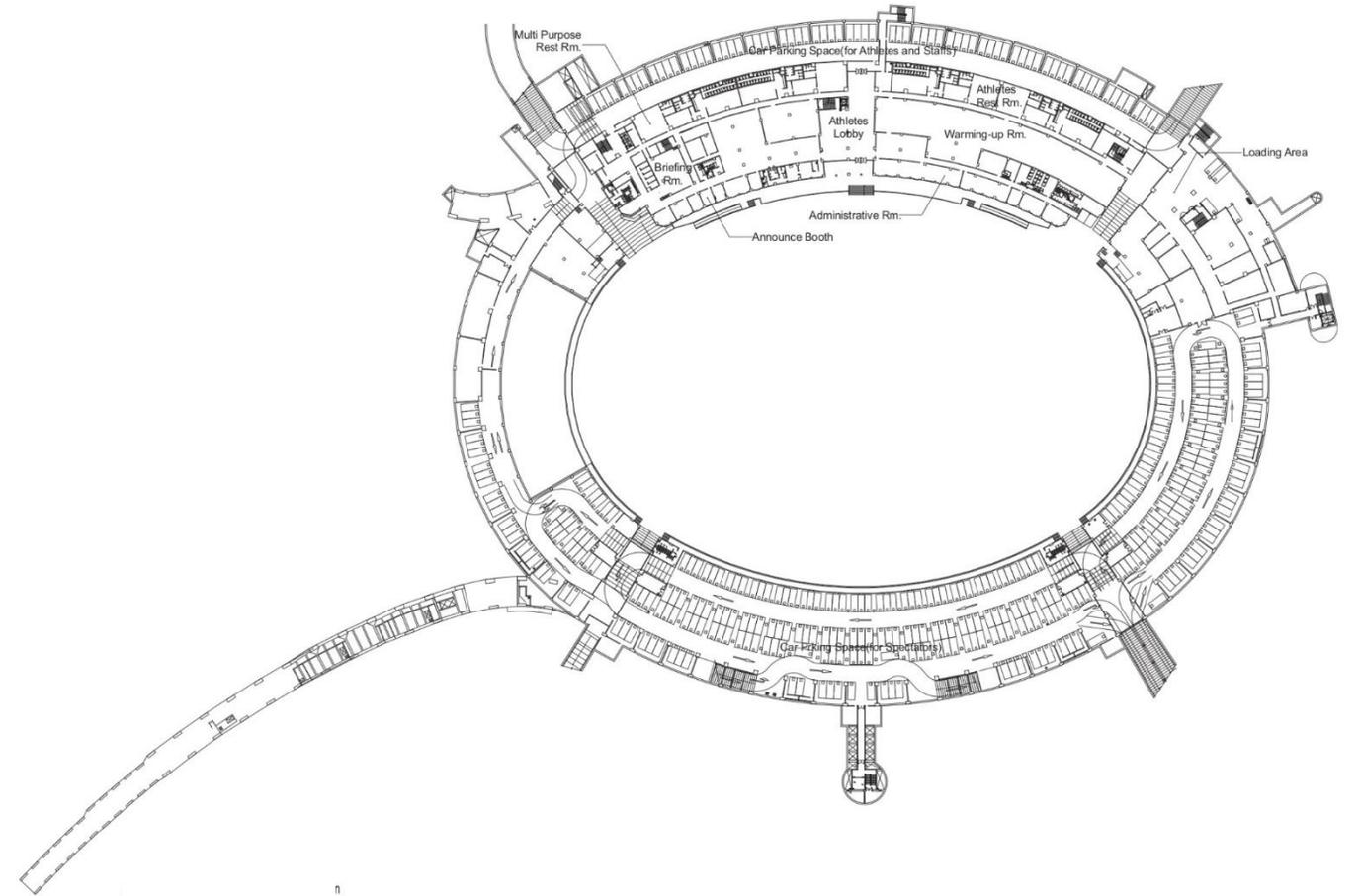


Ilustración 14. Planta del sótano segundo. Fuente: Revista Detail.

Ilustración 15. Planta del sótano segundo. Fuente: Revista Detail.

Alzado noreste y sección longitudinal Norte-Sur.

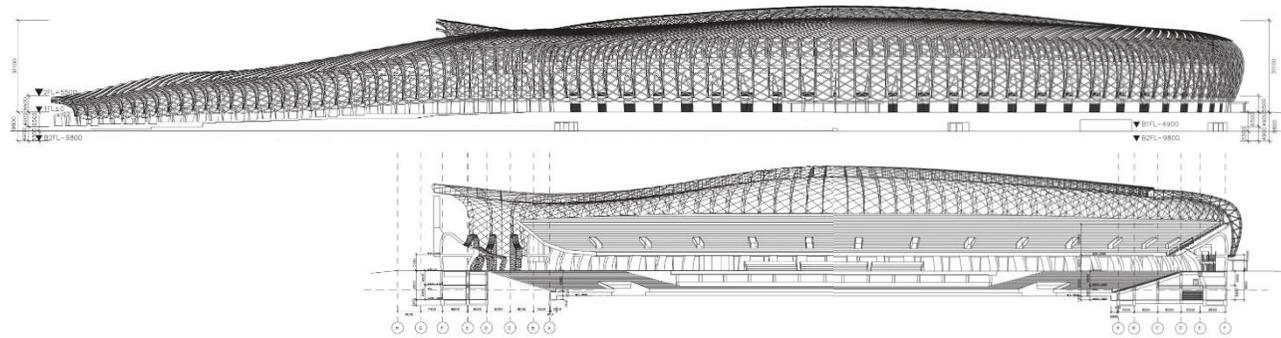


Figura 3.8. Fuente: Revista Detail.

Figura 3.9. Fuente: Revista Detail.

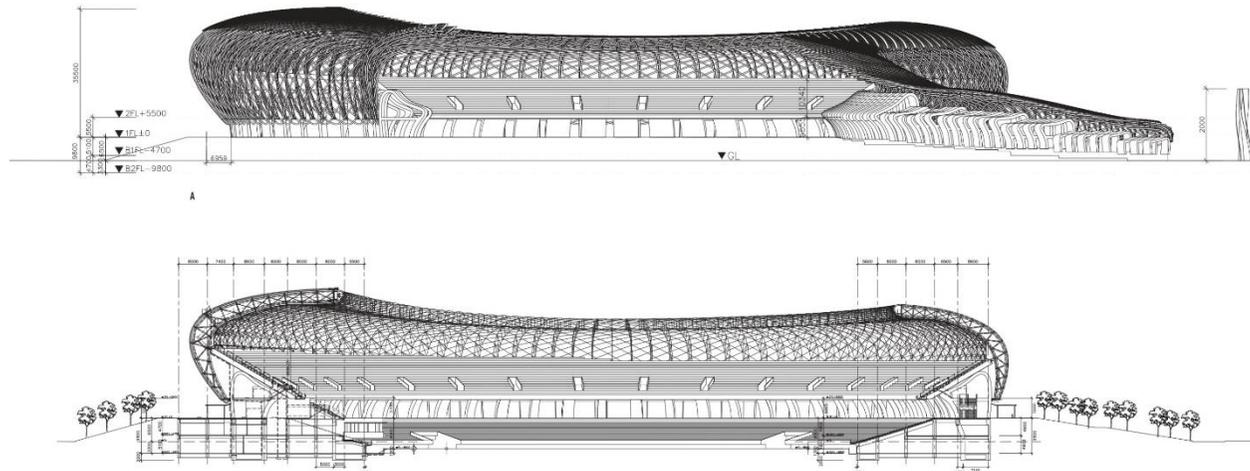


Figura 3.10. Fuente: Revista Detail.

Figura 3.11. Fuente: Revista Detail.

3.4 | Aspectos estructurales de interés

En la obra de Toyo Ito el carácter de la estructura siempre ha tenido una presencia importante, pues aparece desde los primeros esbozos donde se connotan ciertas intenciones de como pretende resolverla.

Tal y como decía Tadao Ando, lo que quedan en las ruinas no es el proyecto en su totalidad, sino la claridad del pensamiento, la estructura desnuda, el espíritu de la obra (Ando, 1991). En parte, Ito sugiere el integrar a la estructura gran parte de esa componente conceptual, pues, tras cierto tiempo, la estructura será aquello que enfatizará los valores que pretende transmitir, esa belleza cruda que perdurará a pesar del paso incesable del tiempo.

En lo que respecta este Trabajo Fin de Grado, nos centraremos en el diseño de ambas partes, tanto las cerchas de acero que componen la cubierta, como de la estructura de pantallas y forjados de hormigón. Con lo que respecta al apartado de cálculo y resultados, el trabajo se limitara a comprobar los resultados de la estructura de acero de la cubierta.

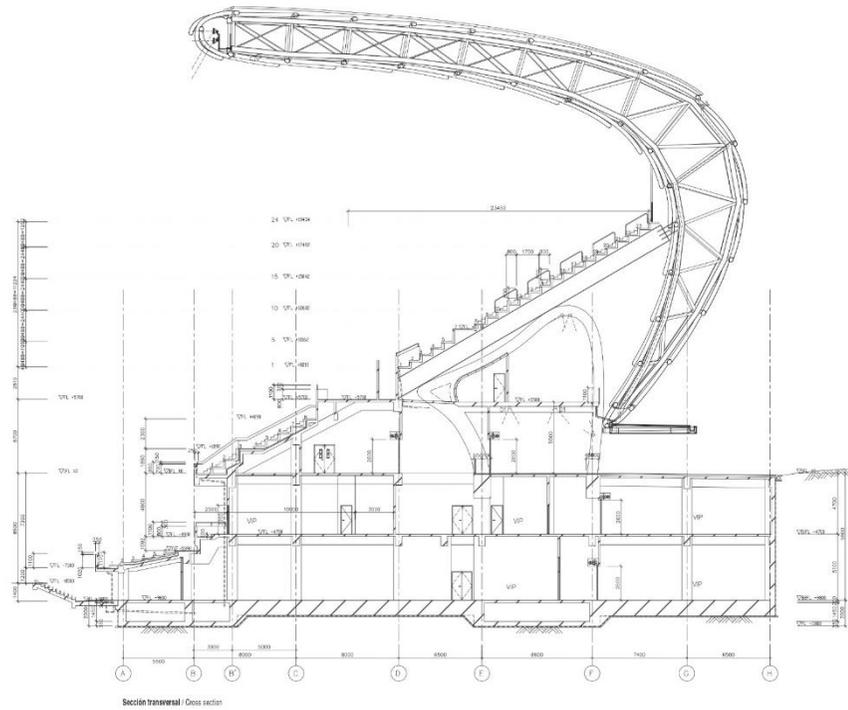


Figura 3.12. Sección tipo de la estructura del estadio. Fuente: Revista Detail.

Figura 3.13. Sección tipo de la estructura del estadio. Fuente: Revista Detail.

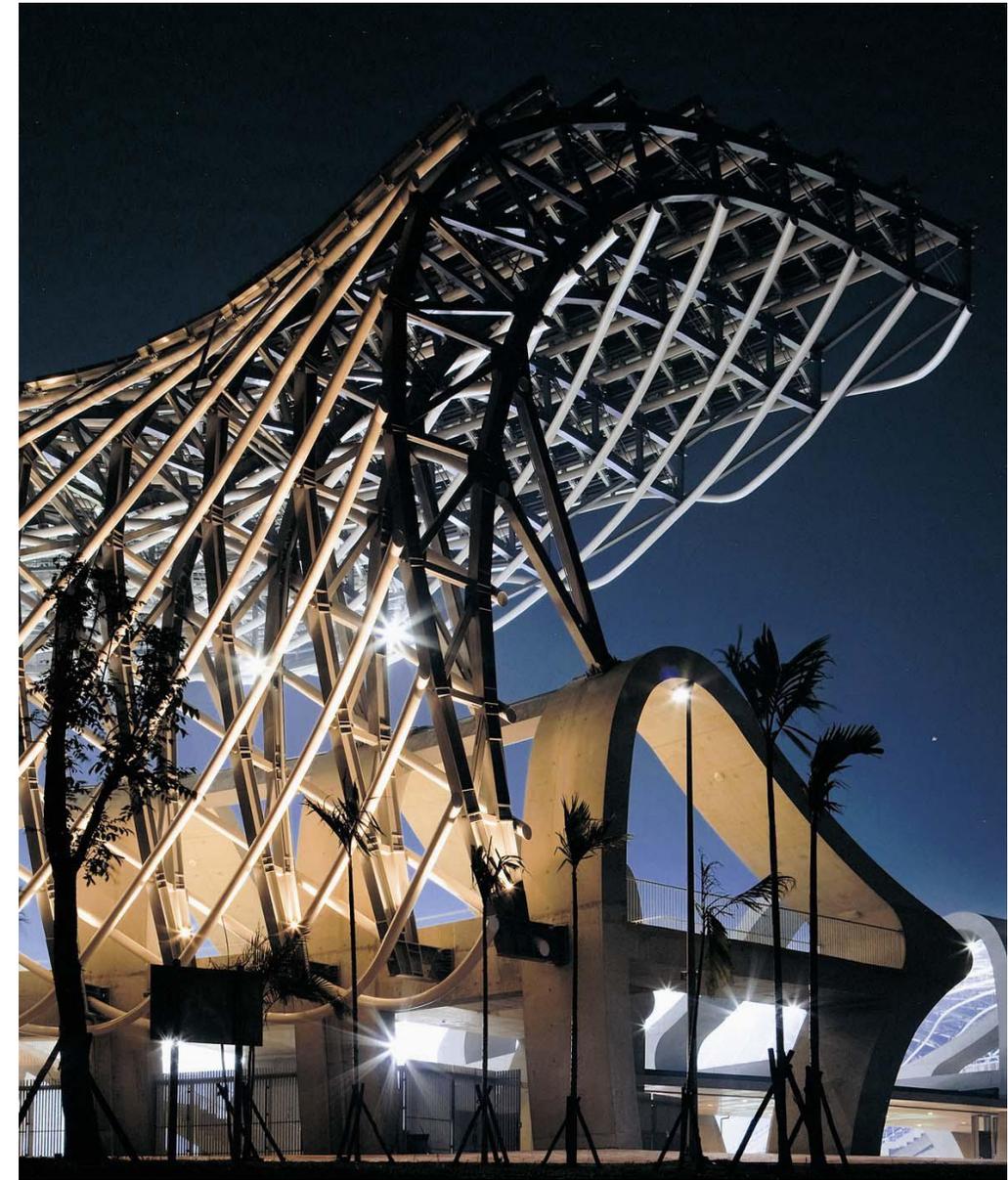


Ilustración 16. Fotografía nocturna de la estructura del estadio.

3.5 | Simplificaciones

Para la aproximación del TFG, se partió de los planos anteriormente mostrados. No obstante, se han realizado simplificaciones a modo de llevar a cabo el objetivo del trabajo de manera óptima, haciendo hincapié en las partes que tienen mayor peso en el proyecto, como son la cubierta, las pantallas de hormigón, las gradas superiores y los forjados inmediatamente inferiores a las gradas principales, los pilares del sótano y la losa de cimentación. Dejando de lado todo aquello que dependiese directamente de la estructura principal, como pueden ser tabiques y núcleos de escaleras.

La mayoría de las simplificaciones se explicarán a medida que se vaya explicando el proceso de modelado paramétrico en las páginas siguientes.

Todo modelo es una simplificación de la realidad. La realidad es una verdad intangible que solo nos sirve como horizonte para tener un rumbo hacia dónde caminar...

4 | Generación del modelo paramétrico

4.1 | Introducción

La parametrización es otro escalón más dentro del tramo de la era microelectrónica. Supone un cambio de paradigma y un avance significativo en la producción, automatización y gestión de la información.

El renombrado filósofo polaco Zygmunt Bauman en sus obras *Modernidad líquida*, *Vida líquida*, *Tiempos líquidos*, entre otros, define esta nueva sociedad, producto de los avances tecnológicos, como la sociedad líquida.

“Los fluidos no conservan una forma durante mucho tiempo y están constantemente dispuestos a cambiarla; por consiguiente, para ellos lo que cuenta es el flujo del tiempo más que el espacio que puedan ocupar; ese espacio que, después de todo, sólo llenan por un momento.” (Bauman, *Modernidad líquida*, 2000, pág. 8)

Según Bauman vivimos en una sociedad inestable, producto de los incesables cambios a los que se ve afectada, tal y como ocurre en los líquidos. Una sociedad que se reinventa por cada nueva aportación tecnológica, y se ve envuelta en un constante proceso evolutivo.

Esto nos lleva a pensar que la sociedad líquida inserta en nuestras mentes la preocupación por la adaptabilidad, ejemplo de ello son las empresas en la actualidad, las cuales compiten por mejorar productos y deshacerse de los antiguos, generando un mercado competitivo que en última estancia beneficia al consumidor, es decir, a la sociedad.

“El uso de algoritmos para descubrir nuevos tipos de espacios es atractivo. Los algoritmos pueden generar patrones "orgánicos" que se asemejan a plantas y otras formas de vida del mundo natural. Además, los patrones generados por algoritmos pueden ser mucho más complejos y fluidos que los que Antonio Gaudí y otros lograron crear en la era previa a las computadoras.” (Ito, *Contextual Algorithms*, 2010)

“Además de satisfacer estos criterios, el objetivo de Ito era renovar la tipología del partido cerrado y concéntrico, abriendo el estadio al paisaje y flexibilizando su forma. Normalmente, los estadios son muy estáticos y simétricos, pero esta vez queríamos hacer una forma más fluida y dinámica” (Pollock, 2010)

En resumen, la crisis de las puntocom impulsó cambios en la industria de la arquitectura hacia una mayor eficiencia, precisión y adopción de tecnologías digitales. Las herramientas de diseño computacional y diseño paramétrico jugaron un papel crucial en la mejora de la eficiencia de producción y gestión de proyectos, permitiendo a los arquitectos y diseñadores adaptarse a un entorno económico más desafiante y competitivo.

4.2 | ¿Cómo funciona la parametrización?

Empleando modos de modelado que entendemos por “convencionales” -no paramétricos- esta etapa del TFG hubiese supuesto la totalidad del **tiempo**, pues uno de los requisitos fundamentales para obtener resultados en SAP 2000 es la **precisión** en la geometría del modelo.

Debido a esto, se ha considerado oportuno introducir un apartado en este trabajo explicando el concepto de parametrización, así como el proceso de modelado de forma interpretable incluso para alguien sin familiaridad con el concepto.

Los procesos de generación de modelados paramétricos se basan principalmente en sistemas de nodos, donde existe un **input** o dato de entrada, una **función** u orden, y **output** o nodo de salida.



Ilustración 17. Esquema del sistema de nodos. [Elaboración propia]

Imaginemos que queremos obtener un círculo.

En las herramientas CAD, tal y como ocurre cuando dibujamos a mano, estamos acostumbrados a escoger un punto “fijo” y un tamaño “fijo”, es decir, el hecho de querer cambiar el tamaño o la posición de dicho círculo implicaría, en principio, borrarlo y volver a crear uno nuevo. En cambio, en un modelado paramétrico, lo que decidimos son los **parámetros** que van a definir nuestro círculo, los cuales podrían ser infinitos, diámetro/radio, color, nombre, tangencias, área, longitud etc. Nos limitamos a escoger los más **característicos/significativos**, los cuales podrían ser, por ejemplo, un punto de **origen** y un **radio**. Una vez escogidos estos “rasgos” el resultado que obtenemos es un Círculo **A**, uno de los infinitos dentro del abanico de posibilidades que conlleva escoger un radio y un punto de origen dentro de un sistema de coordenadas X, Y, Z, tal y como se muestra en el esquema ejemplificador a la derecha.

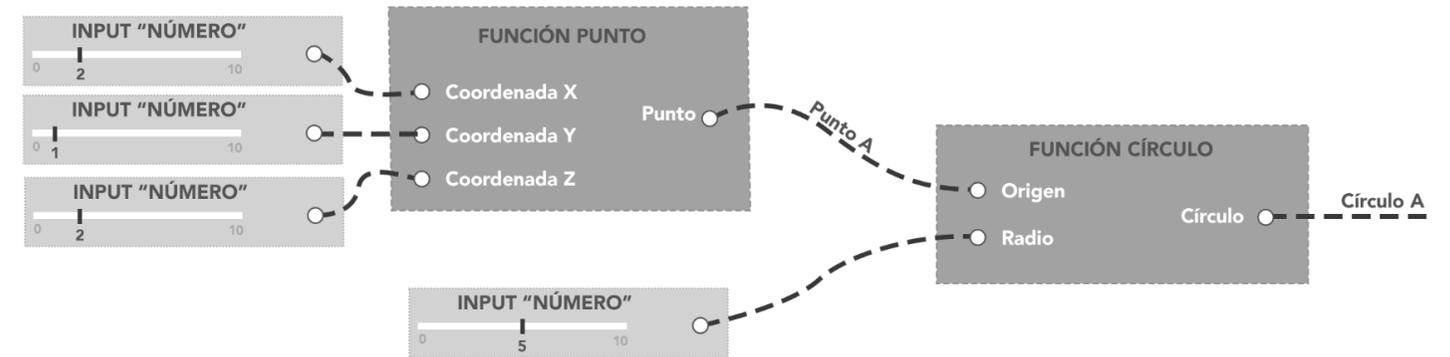


Ilustración 18. Esquema ejemplificador del sistema de nodos. [Elaboración propia]

4.3 | Proceso general

El proceso de generación de la estructura comienza con algo tan simple como la curva del estadio en planta, generada mediante veinte puntos de control que forman una *Spline*. Se podrían haber usado mayor número de puntos de control en función del nivel de detalle al que se quisiera llegar. Con veinte se observa ya cierta similitud que parece ajustada a la realidad. Cabe señalar que a mayor nivel de parámetros (detalle), mayor tiempo requerirá al programa para realizar los cálculos. Más de 100 son los parámetros que definen el estadio en su forma final (versión 10), por lo que conviene ajustarse en la medida de lo posible en la definición geométrica. En este caso, la moneda con la que pagamos el nivel de detalle es el tiempo.

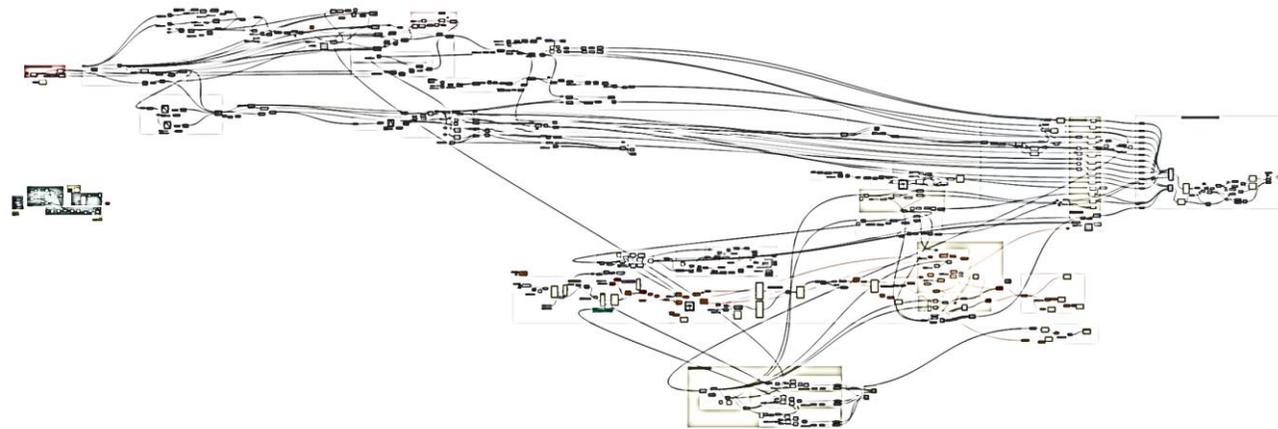


Ilustración 19. Código final creado que genera la globalidad del estadio en Grasshopper. [Elaboración propia]

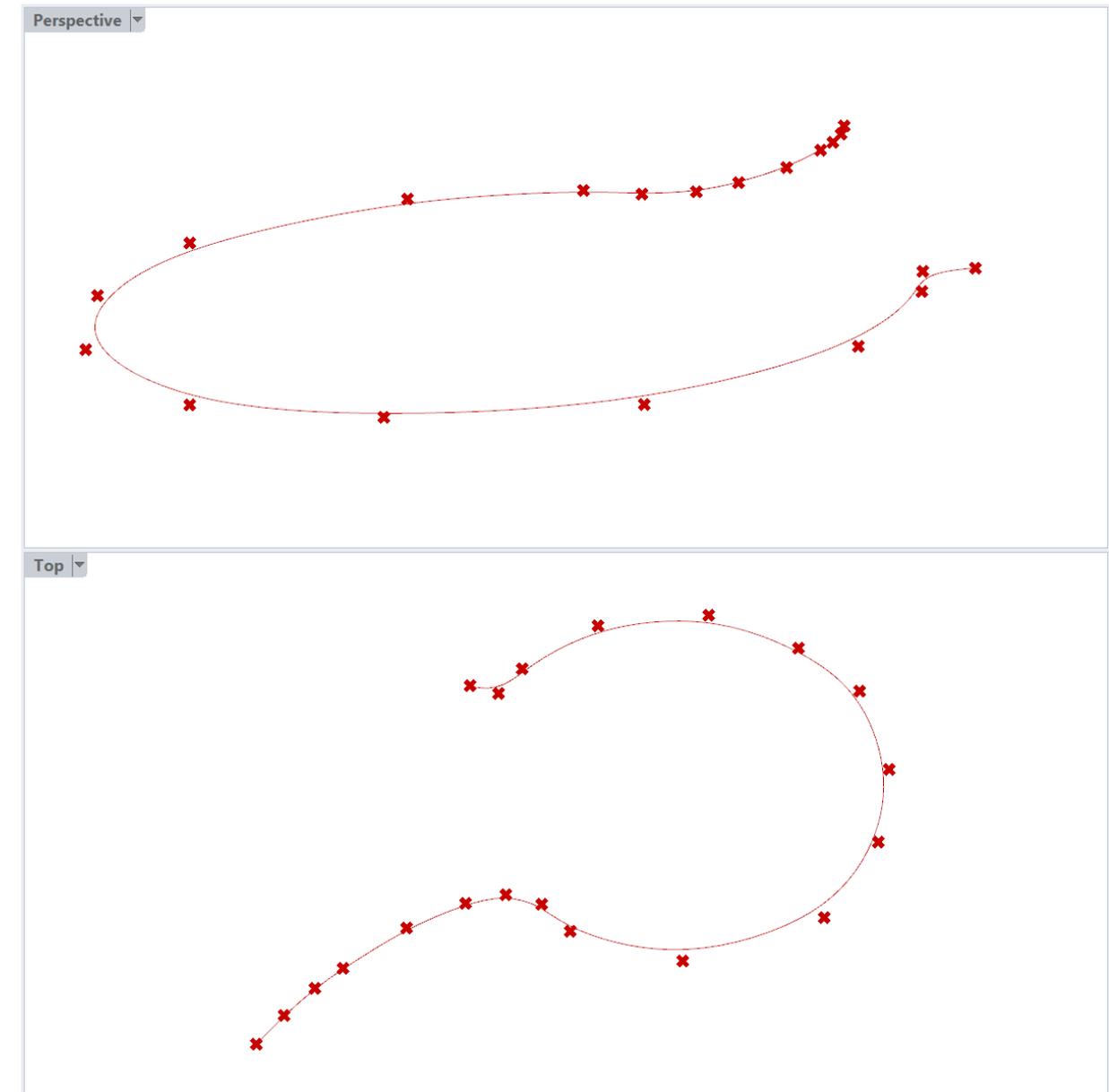


Ilustración 20. Creación de la curva genérica global que conformará la forma del estadio.

Posteriormente, se ha procedido a dividir la curva en el número de pantallas que forman parte de la estructura de hormigón del estadio, en este caso, cien. Por cada punto se traza el plano perpendicular a este, que nos servirá como “lienzo” donde dibujar el perfil de cada una de las cerchas de la cubierta.

Dicho perfil se genera de forma similar al que se creó la curva del estadio, es decir, creando una *Spline* “madre”. *Spline* que posteriormente modificaremos para que se ajuste a la forma real de la cubierta del estadio. En este caso se han empleado nueve puntos de control.

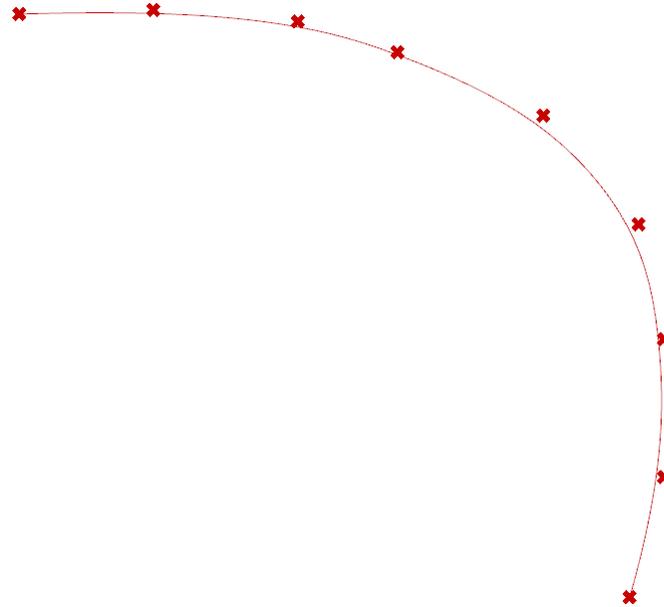


Ilustración 21. Curva madre que genera el perfil de la cercha de la cubierta.

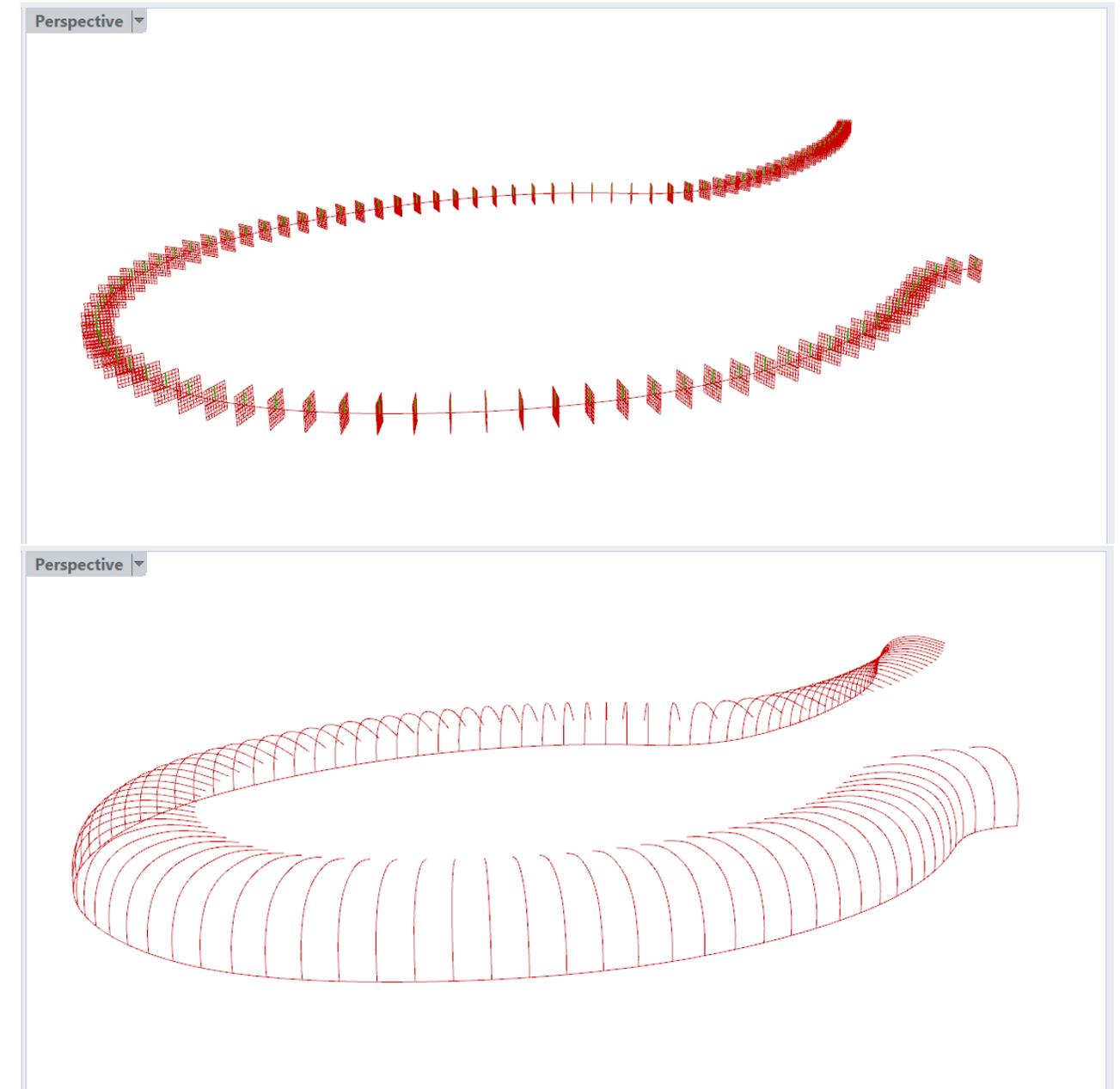


Ilustración 22. División de la curva del estadio en 100 puntos (arriba), y colocación de la Spline “madre” en los planos normales.

Luego, siguiendo los planos anteriormente mostrados, se realiza una aproximación de la silueta de la cubierta mediante funciones que modifican la forma del perfil “madre” tanto en horizontal como en vertical. Empezando desde la “cola” del estadio, la cubierta se va elevando y haciendo más profunda en planta hasta que llega a la zona del palco presidencial, donde finalmente decrece levemente. Esta decisión será la que tendrá una gran repercusión en cuanto a los esfuerzos que absorba la cercha de las cargas que imponamos sobre la misma.

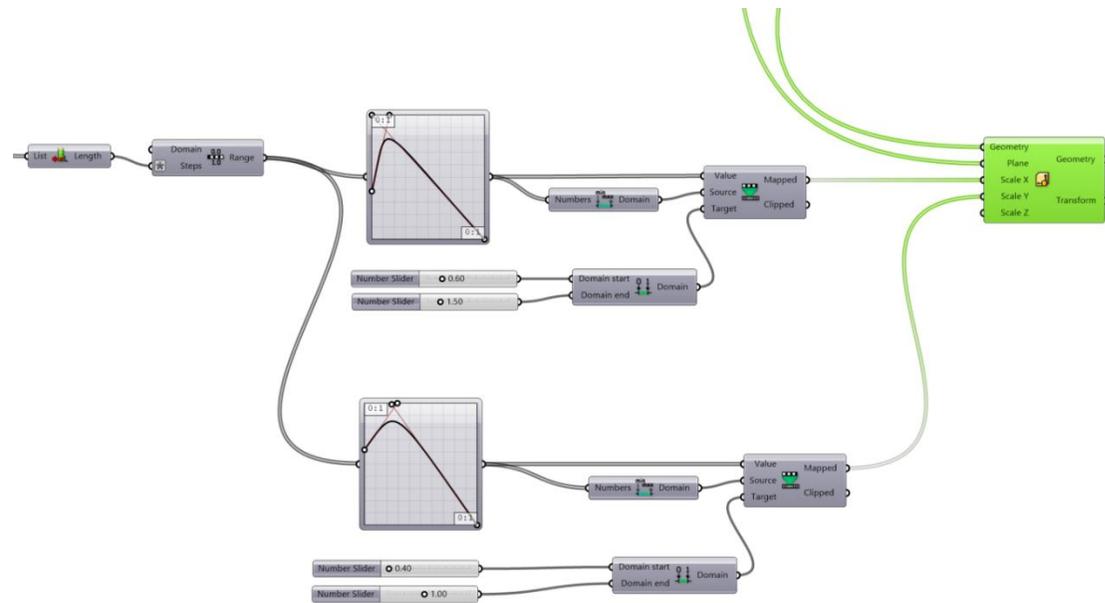


Ilustración 23. Código original que genera las modificaciones sobre la cercha inicial.

Ilustración 24. Código original que genera las modificaciones sobre la cercha inicial.

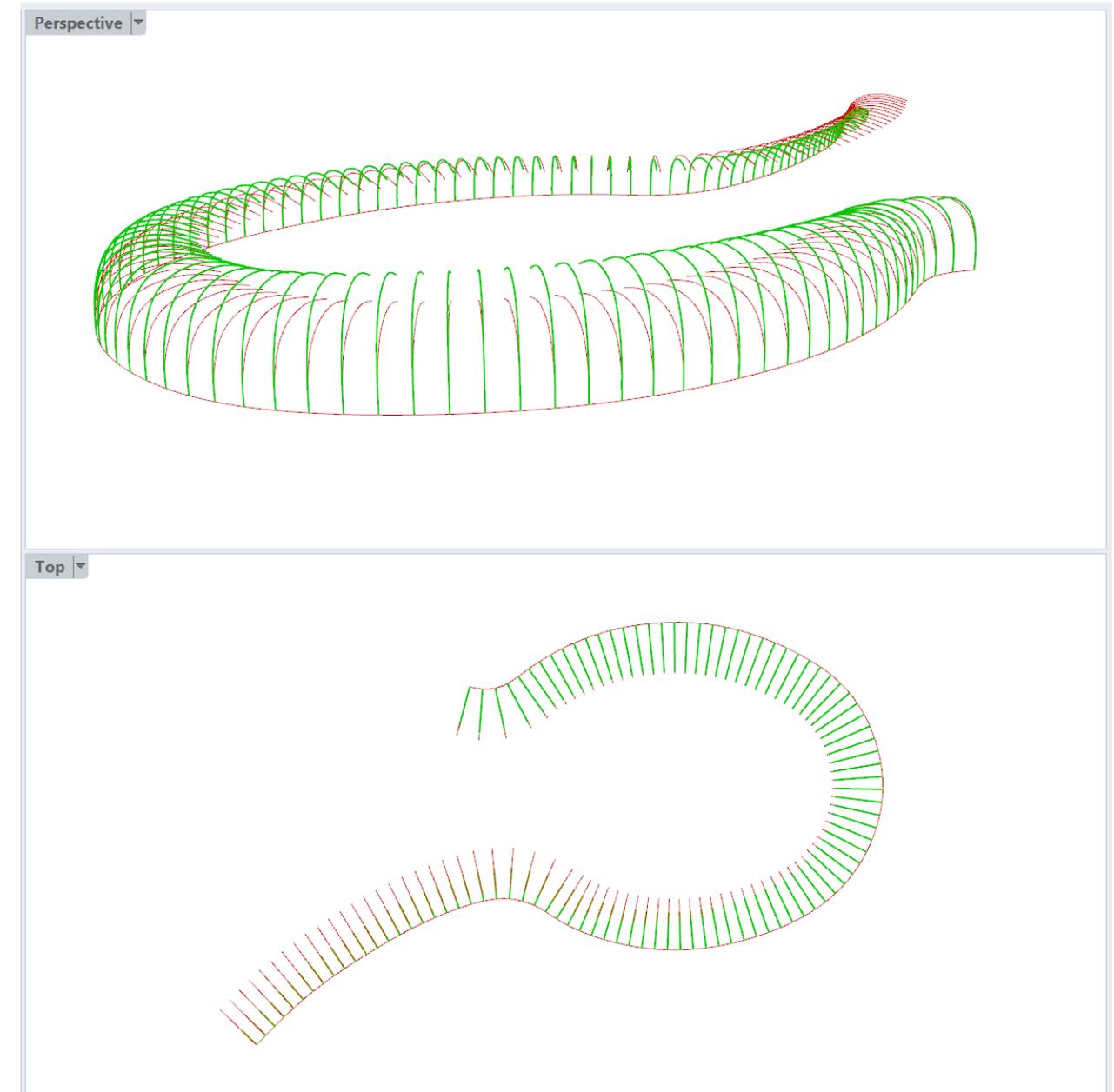


Ilustración 25. En rojo la cubierta inicial, homogénea, igual perfil en todos los puntos. En verde, la resultante tras aplicarle las modificaciones.

Aprovechando que en las *Spline* el primer punto de control coincide con el primer punto geométrico de la misma, generamos las pantallas de hormigón tipo ancladas a ese punto, y de nuevo, colocándolas en cada uno de los planos perpendiculares anteriormente generados.

El siguiente paso tal y como se muestra en las ilustraciones a la derecha, se generan a partir de la *Spline* inicial, el cordón inferior y superior, las diagonales, los montantes, y los tirantes de cada cercha que conforma la cubierta, además de un atado en coronación.

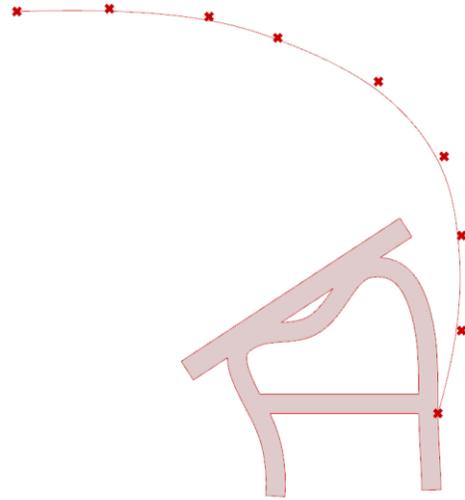


Ilustración 26. Colocación de la pantalla inicial en el modelo auxiliar.

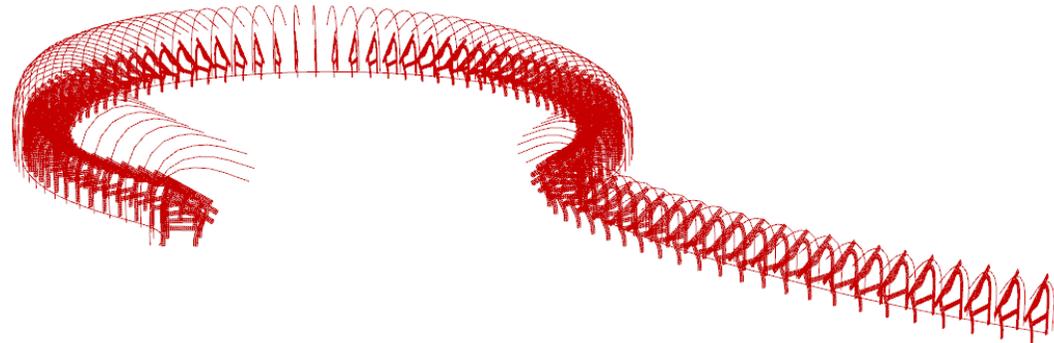


Ilustración 27. Colocación de las pantallas en el modelado global del estadio.

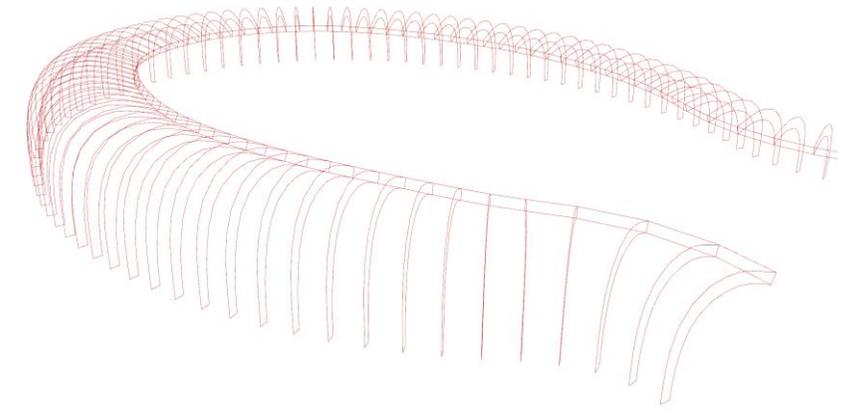


Ilustración 28. Creación de cordón inferior, cordón superior, y el atado en coronación de todas las cerchas.

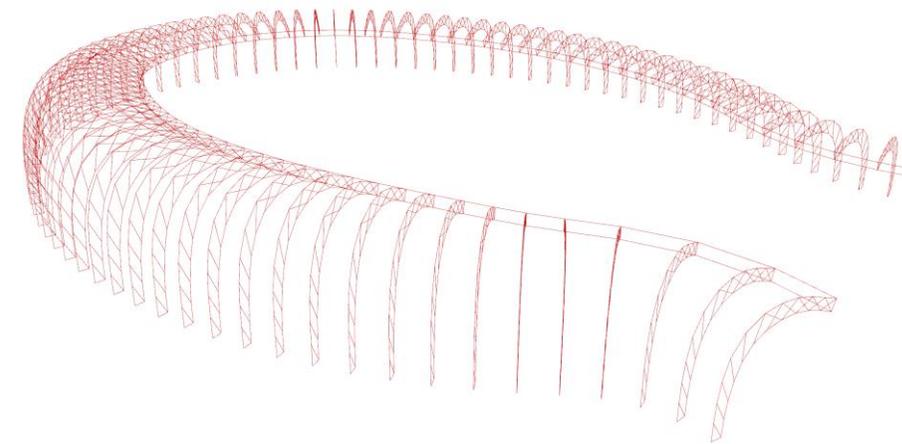


Ilustración 29. Creación de los montantes, diagonales, y tirantes.

A continuación, se procede a generar la parte del estadio que sin duda tiene el mayor impacto visual y conceptual, los tubos en entrelazados. Fue sin duda la parte del modelado que más tiempo consumió en cuanto a la concepción, pero no tanto en cuanto a la ejecución, pues una vez hecho un esquema mental del problema que supone modelarlos, fue cuestión de hacer frente a las herramientas del programa y emplear las “líneas de código” más eficientes para realizarlas.

Para entender el modo en el que se han generado los 24 tubos, explicaremos un ejemplo más sencillo.

Imaginemos un muro donde cada cara se divide con cinco barras verticales, la cara frontal en rojo, y la cara posterior en verde. A su vez, cada una de las barras se divide en cuatro puntos. Cada uno de los tubos tiene su origen en los puntos de las barras A y B, que serían análogamente los extremos del estadio. En el caso del muro son un total de 8, mientras que en el estadio, 24 (12 a cada lado).

Para las barras que tienen su origen en la cara frontal (roja), la secuencia empezaría siendo ascendente 1-2-3-4-4'-3'... Mientras que al otro lado del muro, descendente 2'-1'-1-2... De esta forma se entrelazan las barras a un lado y al otro de cada muro, que en el estadio serían las superficies exteriores e interiores de la cubierta, para acabar generando el patrón de la imagen inferior derecha. Con una opacidad máxima las que viven a un lado, y con la mitad de opacidad las del otro.

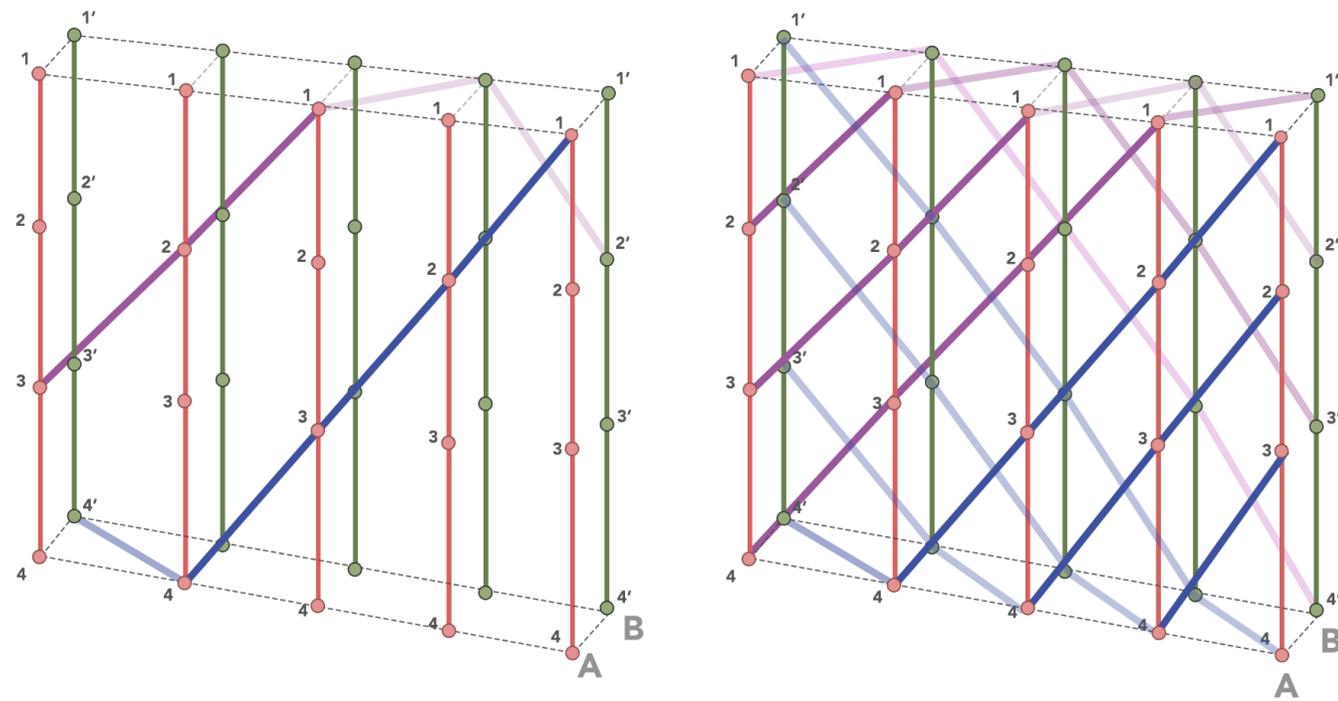


Ilustración 30. Esquema simplificado del sistema de tubos de la cubierta del Estadio Nacional de Kaohsiung. [Elaboración propia]

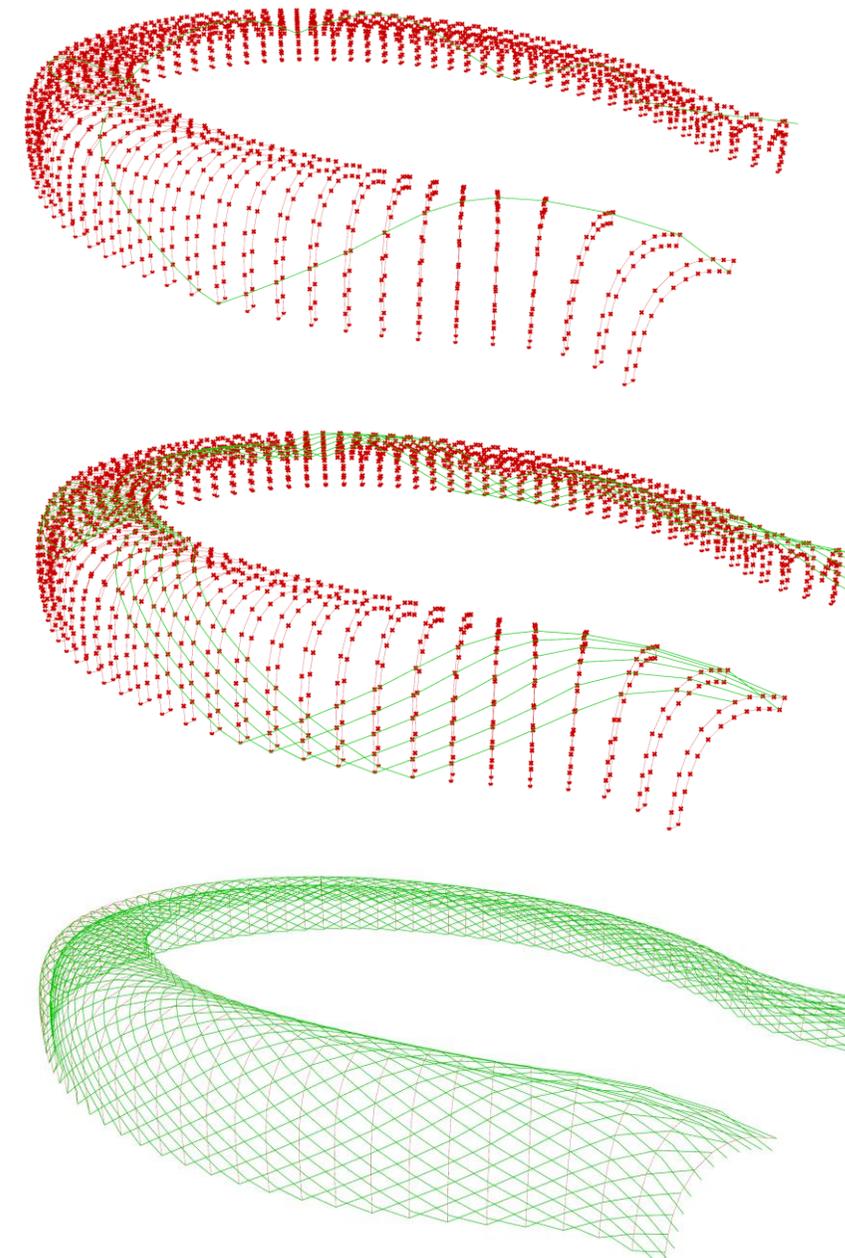


Ilustración 31. Secuencia de la creación de los 24 tubos de la cubierta del Estadio Nacional de Kaohsiung.

Con el objetivo de aportar una respuesta del conjunto más fiable a la hora de realizar los cálculos en SAP 2000 se han modelizado los forjados de hormigón y la cimentación del edificio, esta última sirve para poder emplear el sistema de muelles, que no solo consiguen un comportamiento elástico del conjunto, sino que reducen los tiempos de cálculo modal considerablemente.

En cuanto a la cimentación, en primer lugar, se creó un código mediante el cual, introduciendo los axiles obtenidos mediante un cálculo empleando empotramientos perfectos, y la tensión admisible del terreno obteníamos un área de reparto. Luego, dicho código permitía también escoger el tipo de cimentación deseada (zapata aislada, zapatas combinadas o losa). En cuanto a las cargas de las zapatas, se podía optar tanto por referenciar cada zapata con su axil correspondiente o predimensionar todas con el más desfavorable, obteniendo una dimensión de zapata igual para todos los pilares, o pareja de pilares en caso de ser zapatas combinadas.

Al final, y por cuestiones de velocidad de cálculos, se escogió la cimentación por losa, pues al unificar las áreas el procedimiento era más rápido.

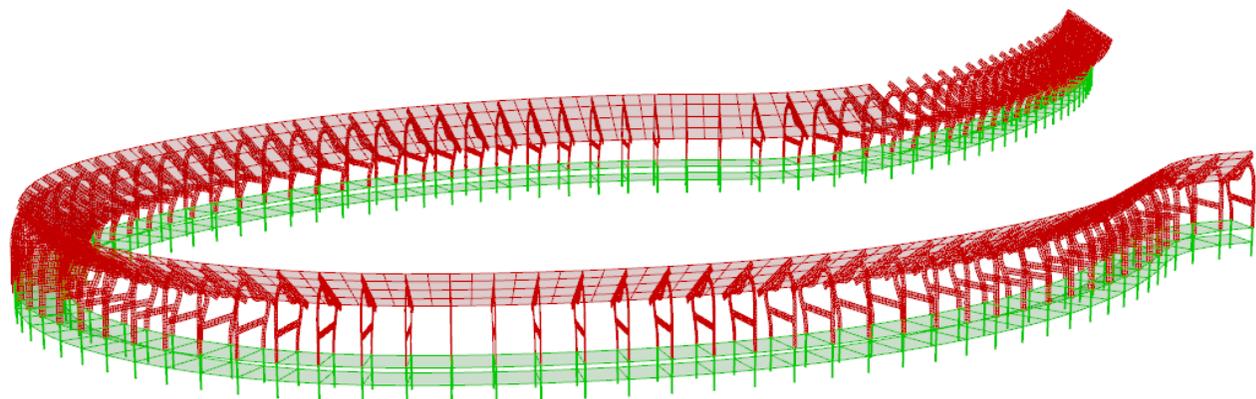


Ilustración 32. En verde, forjados de la planta baja y planta primera del estadio, así como de los pilares correspondientes.

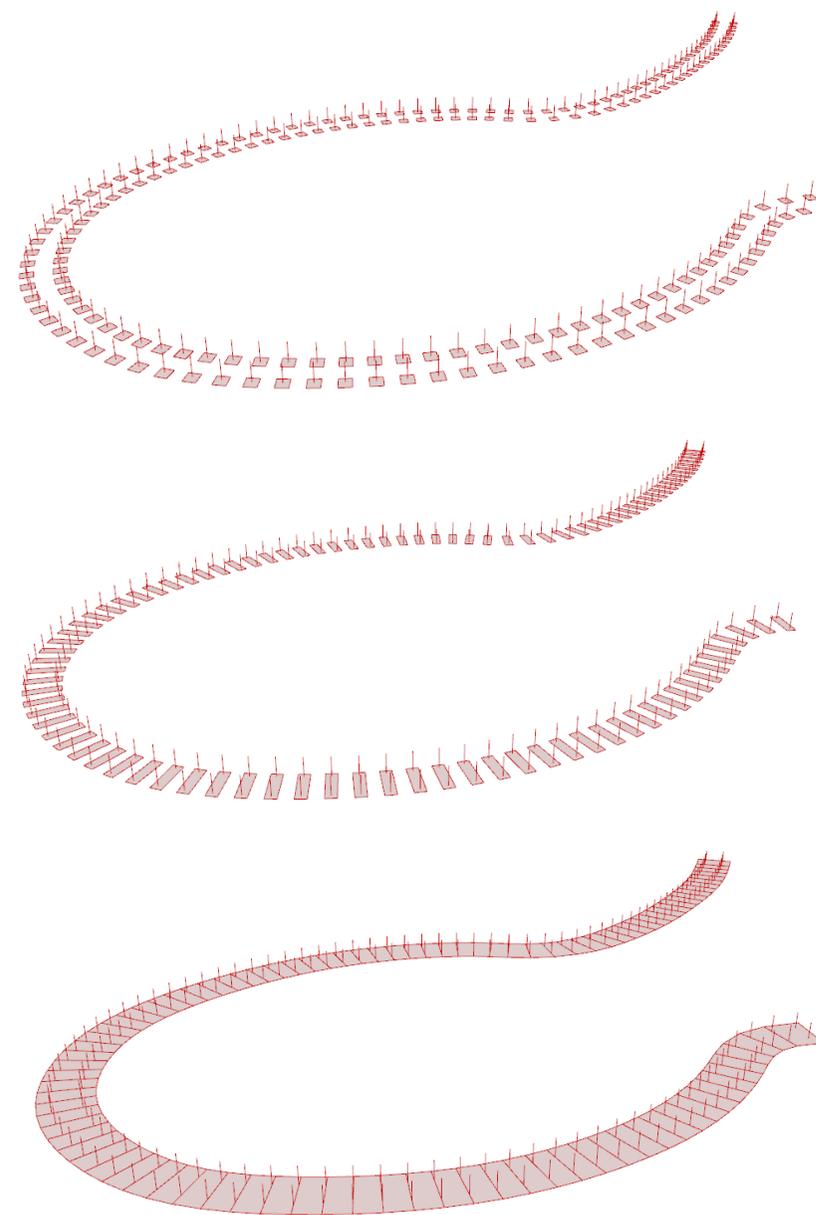


Ilustración 33. De arriba a abajo, cimentación por zapatas aisladas, zapatas combinadas y losa.

En aras de poder aplicar las cargas de nieve, viento, peso propio de los paneles solares, y sobrecarga de mantenimiento que corresponden a cada una de las cerchas, se llevó a cabo la modelización de este elemento que corresponde al área aproximada de los paneles solares en cubierta. Este sería el único elemento modelizado que no existe como tal en el estadio.

Debido a la curvatura del estadio, la distancia entre una cercha y la siguiente varía, por lo que no se podría aplicar una carga lineal equitativa a cada cercha, ya que nos estaríamos alejando excesivamente de la realidad. Por otra parte, calcular la distancia entre cada pareja de cerchas hubiese sido no solo laborioso, sino también poco infructuoso, pues al ser un modelado fácilmente y rápidamente variable, solo serviría para un única forma del estadio, de todas las infinitas posibilidades que permite el código del modelo.

Como veremos más adelante, a estos elementos se les aplicará una sección “nula”, es decir, solo servirá como herramienta auxiliar de asignación de cargas superficiales, evitando así el uso de cargas lineales.

En la figura se señala una de los 99 ámbitos, a las cerchas 3 y 4 le corresponderá la mitad de las cargas que recaigan en el ámbito en verde, más lo que le corresponda a cada una del otro ámbito contiguo.

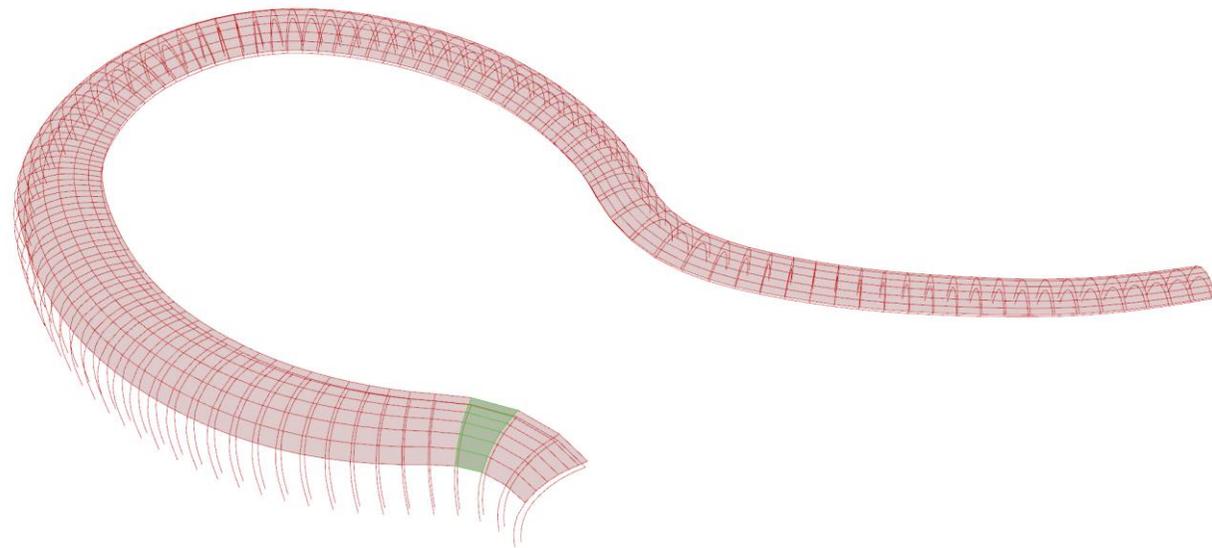


Ilustración 34. Modelización de superficie auxiliar para poder aplicar las cargas correspondientes a las cerchas.

4.4 | Recuento de los elementos modelizados

Mediante otro código se ha llevado a cabo el recuento de los elementos modelizados a título exploratorio y sin ninguna finalidad más allá de saber cuántos elementos iban a ser insertados en una primera instancia en SAP 2000. Sin embargo, este no sería el número definitivo, pues como se verá en las páginas siguientes, las dimensiones de ciertos elementos finitos (forjados y gradas) son excesivamente grandes, llevando al programa a realizar cálculos incorrectos. La recomendación es que cada polígono que conforma un elemento finito tenga unas dimensiones de lado entre 0,5 y 1 metro.

TIPO DE ELEMENTO	MATERIAL	ELEMENTO	CÓDIGO	NÚMERO
BARRAS LÍNEAS	ACERO	Cordón superior	B-2	1100
		Cordón inferior	B-3	1100
		Diagonales	B-4	600
		Tirantes	B-5	1000
		Anclaje inferior	B-6	100
		Anclaje superior	B-7	200
		Montantes	B-8	1100
		Tubos	B-9	2376
		Atado Coronación	B-10	198
		HORMIGÓN	Pilares P-1	B-11
	Pilares P-2		B-12	200
Total				8174 barras
ELEMENTOS FINITOS 3DCARAS	HORMIGÓN	Pantallas	B-14	100
		Gradas	B-15	624
		Planta Primera	B-16	198
		Planta Baja	B-17	99
		Forjado Sotano	B-18	200
		Zapatatas	B-19	99
		Losa	B-20	200
		Total		

Tabla 4.1. Recuento de todos los elementos modelizados en Grasshopper. [Elaboración propia]

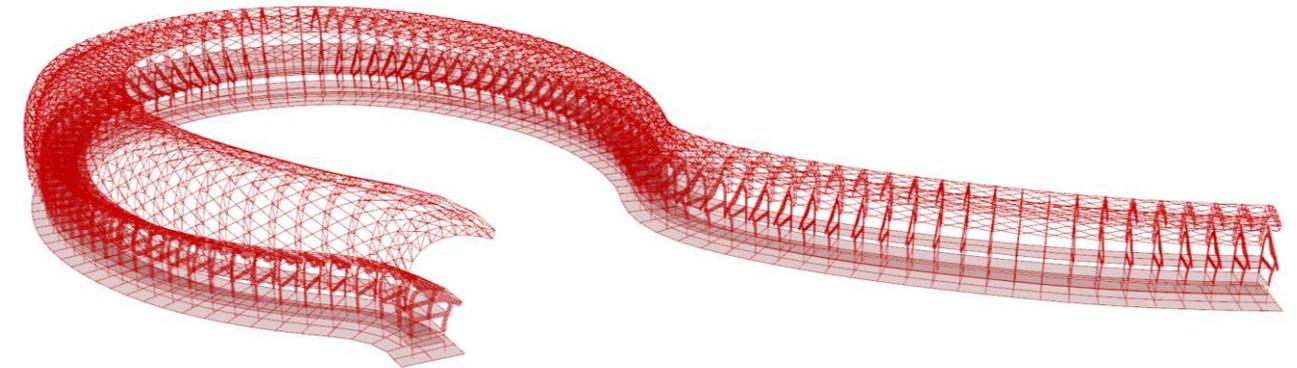


Ilustración 35. Conjunto de los elementos modelizados del Estadio Nacional de Kaohsiung.

4.5 | Ventajas e inconvenientes

La principal ventaja de este procedimiento es sin duda el **tiempo** y el bajo coste de oportunidad. Aun con todas las correcciones y optimizaciones del código, el “escaso” tiempo invertido a esto (en comparación al resto) ha hecho posible el poder investigar más en profundidad sobre el autor, así como poder visualizar las clases de David Gallardo. De esta forma, se ha podido finalizar el trabajo bajo los tiempos establecidos.

A lo largo de todo el transcurso, y desde que este trabajo dio comienzo en diciembre de 2023, se fue tomando nota de las horas invertidas en el TFG, con el objetivo de saber la dedicación de muchas de las partes que lo han compuesto. Si bien es cierto que la clasificación de horas ha sido más detallada, se ha querido presentar un resumen que refleja la gran ventaja que ha supuesto seguir el proceso de modelado paramétrico, y hacer hincapié en la imposibilidad de haber podido realizar este trabajo de no haber sido por su uso.

En rojo:

Fueron **11** las horas dedicadas a realizar la primera de las 10 versiones de modelado que tuvo el estadio. Aun siendo una versión prematura, ya tenía la mayoría de las partes cristalizadas, sirvió de base para la creación de todas las versiones que la sucedieron y “boceto” donde ya se vislumbraban los primeros errores y éxitos del modelo.

En verde:

A continuación, fueron 15 horas las que se tomaron para realizar las siguientes versiones del modelado, donde se optimizó el código a uno más liviano y eficiente, donde los parámetros estaban más claros y completos. Se podía hacer más, con menos.

En azul:

Fueron las horas dedicadas a la redacción de este trabajo, los cálculos, formación de hipótesis, esquemas ilustrativos, creación de tablas, búsqueda de datos, normativas, bibliografías (sin lectura)*... Es decir, las horas de provecho para plasmar los conceptos que se quieren demostrar y dejar por escrito en un trabajo de esta índole.

En gris:

Son las horas dedicadas a visualizar las clases impartidas por el profesor David Gallardo Llopis. Se ha querido hacer una separación a la hora de contabilizar las horas, pues se considera que, aun siendo un pilar importante del trabajo, no han implicado un esfuerzo de producción por parte del autor, sino de atención y aprendizaje.

*Nota: En la tabla no se ha llevado a cabo el cómputo de horas dedicadas a la lectura y comprensión de la bibliografía consultada que aparece al final de este trabajo, pues se ha considerado que son horas dedicadas a la cultivación del pensamiento analítico y crítico, y no a la ejecución del trabajo per se.

Día	Horas produciendo	Horas de clases
Día 1	2	0
Día 2	1	6
Día 3	2	6
Día 4	8	0
Día 5	6	4
Día 6	4	1
Día 7	2	0
Día 8	1	3
Día 9	1	1
Día 10	4	1
Día 11	2	1
Día 12	6	2
Día 13	8	0
Día 14	0	1
Día 15	1	2
Día 16	3	2
Día 17	2	2
Día 18	2	0
Día 19	3	0
Día 20	2	0
Día 21	6	0
Día 22	2	0
Día 23	2	0
Día 24	2	0
Día 25	5	0
Día 26	3	0
Día 27	4	0
Día 28	4	0
Día 29	6	0
Día 30	4	0
Día 31	5	0
Día 32	4	0
Día 33	1	0
Total	108 h	32 h
Total global	140 h	

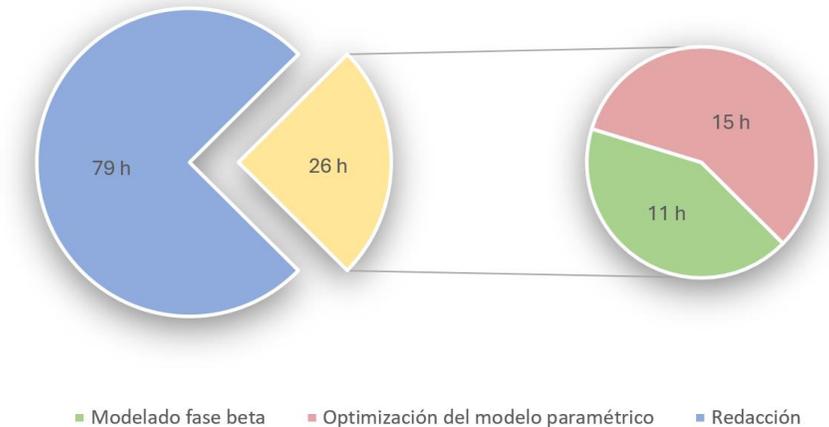


Ilustración 36. Diagrama general de cada proporción del trabajo.

Tabla 4.2. Cómputo de horas invertidas en el TFG.

Como inconvenientes podemos resaltar la dificultad de gestionar los datos del código, así como la forma de creación del mismo, pues, el diseño computacional y la parametrización no es más que otro lenguaje de programación, enfocado a la generación de modelos bidimensionales o tridimensionales.

La complejidad de gestionar árboles de datos y líneas de código puede resultar abrumadora, en ocasiones los errores van más allá de la geometría, y la forma de resolverlos reside en entender el fundamento del problema “lingüístico”. Resulta un ejercicio intelectual apasionante intentar enfrentarse a un problema y encontrar al menos **una** de las **numerosas** soluciones.

En el caso de la generación del modelado del estadio, el punto de inflexión fue el de solucionar la geometría de los tubos entrelazados, pues fueron incontables las formas e intentos de acercarse a una solución capaz de representar geoméricamente la obra de Toyo Ito, y que, además, sea capaz de ser interpretada por SAP 2000 de forma acertada.

A la derecha se encuentra una captura de pantalla del programa SAP 2000 una vez importada la versión 2 del modelado, donde el principal error fue la conexión de los tubos en la base de la cubierta. Como se puede observar, al no estar bien conectada la secuencia de un tubo con el siguiente, el programa no entendía una continuidad, por lo que saltaban los tubos a la hora de realizar el proceso de análisis y cálculo.

Más adelante, durante una de las versiones de optimización del código, se dió con la solución al problema.



Ilustración 38. Zona inferior de la cubierta del estadio.

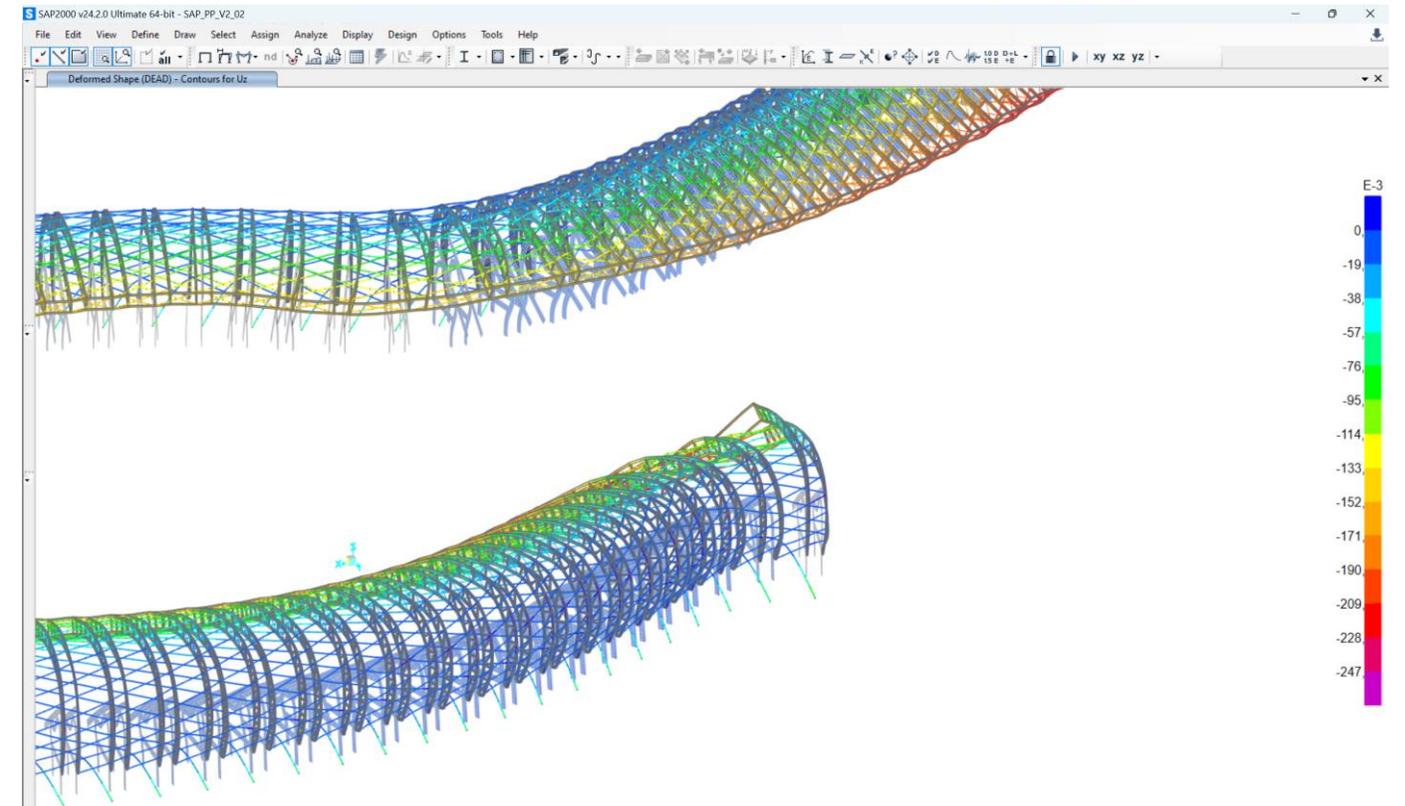


Ilustración 39. Captura de SAP 2000 de la versión 2/10 del modelado paramétrico. [Elaboración propia]

5.1 | Agrupación del modelo en grupos

Una vez realizado el modelado en Rhinoceros, se procede a la importación de las distintas capas a SAP 2000, teniendo en cuenta la distinción entre Frame (LÍNEAS) o Shell (3DCARAS).

Para un empleo eficiente del programa ha resultado de vital importancia agrupar aquellos elementos que se considere que vayan a tener una misma sección, tanto si son de acero como de hormigón (Cordón inferior, Superior, Montante, Pantalla, Forjado 0, Forjado 1...) de esta forma se asignan rápidamente aquellas propiedades requeridas en cada caso, como ya veremos a lo largo de este apartado.

Frame/Líneas

stAnclajesInferiores
stAnclajesSuperiores
stAtadoCoronación
stCordónInferior
stCordónSuperior
stDiagonales
stMontantes
stTirantes
stTubos
stPilaresSótano

Shell/3DCARAS

stCubiertaAuxiliar
stGradas
stForjadoPlanta1
stForjadoPlantaBaja
stForjadoSótano
stPantallas
stLosa

A lo largo del proceso se ha hecho uso del comando *Groups* para poder seleccionar de forma cómoda dichos elementos de interés para cada momento, accediendo desde **Select > Groups** (atajo Ctrl+G) y el comando *Define Groups* para modificarlos o crear nuevos, desde el apartado **Define > Groups**.

Una particularidad de este proyecto es la participación de empresas de multitud de naciones, entre ellas, Japón, Corea del Sur, Taiwan y Estados Unidos. El cliente del proyecto es el *Bureau of Public Works City* de Kaohsiung, Taiwan, el diseño estructural fue realizado por la empresa japonesa *Takenaka Corporation* y *Hsin-Yeh Engineering Consultants* y la constructora fue la empresa taiwanesa *Fu Tsu Construction* y la propia *Takenaka Corporation*.

De ahí que la normativa y los estándares empleados para la construcción del Estadio Nacional de Kaohsiung se rijan por la normativa americana **American Society for Testing and Materials (ASTM)** y la normativa coreano-japonesa **KS/JIS**.

Gracias a una bibliografía específica, se han encontrado los perfiles empleados para la cubierta del estadio pertenecientes a la normativa ASTM. No obstante, por motivos académicos, se ha optado por emplear secciones de la normativa europea **UNE-EN**. Veremos más adelante el ajuste automático que hace SAP 2000 para asignar las secciones que cumplan con el **Eurocodigo 3** mediante un proceso iterativo.

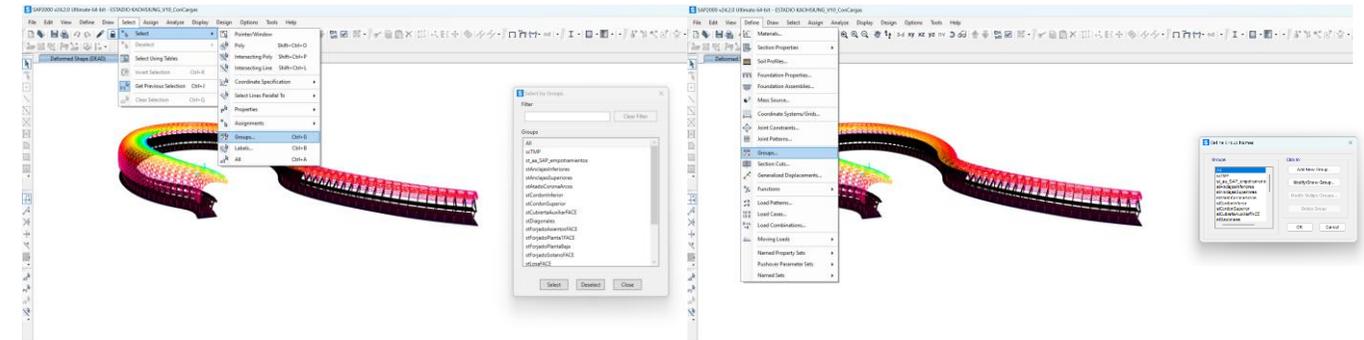


Ilustración 40. Acceso a los apartados de creación y asignación de grupos en SAP 2000.

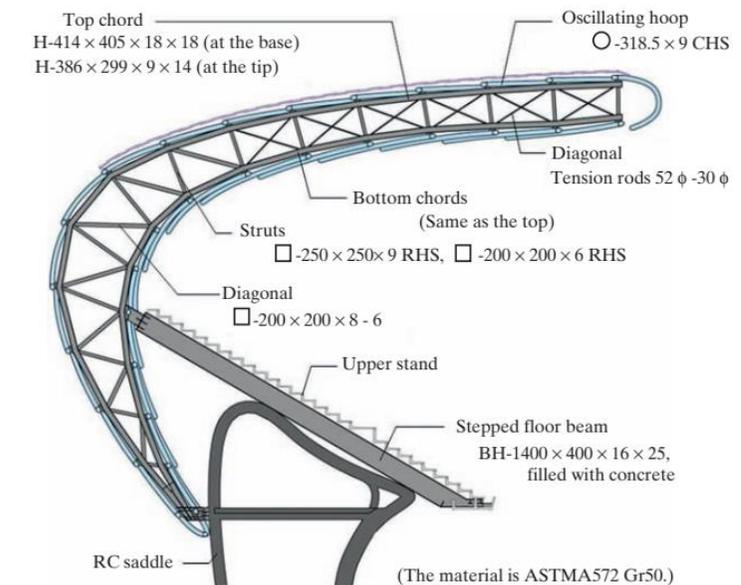


Ilustración 41. Secciones empleadas, normativa ASTM. Fuente: *Structural Design of Kaohsiung Stadium, Taiwan*. Francis & Taylor.

5.2 | Ajuste fino de los EF

A la hora de modelar ciertos elementos finitos, como pueden ser las gradas o los forjados, se realizaron con polígonos de dimensiones que cubrían la luz entre pantallas, es decir, entorno a los 6 metros. Estas dimensiones resultarían en errores de cálculo, puesto que SAP 2000 requiere de elementos finitos de proporciones más reducidas, de aproximadamente un metro de lado. Para ello, se ha procedido a la división de las caras empleando como nuevos vértices los ya existentes en aquellas pantallas donde se apoyan las propias gradas, tal y como se muestra en las ilustraciones.

El recuento final, tras el ajuste fino de los elementos finitos, queda reflejado en la siguiente tabla. Como podemos observar, pasamos de 1520 elementos finitos iniciales, a 10605 elementos finitos finales, lo cual repercutirá en tiempos de cálculo mayores. De nuevo, la moneda con la que pagamos el detalle en resultados, es el tiempo.

TIPO DE ELEMENTO	MATERIAL	ELEMENTO	CÓDIGO	NÚMERO
BARRAS LÍNEAS	ACERO	Cordón superior	B-2	1100
		Cordón inferior	B-3	1100
		Diagonales	B-4	600
		Tirantes	B-5	1000
		Anclaje inferior	B-6	100
		Anclaje superior	B-7	200
		Montantes	B-8	1100
		Tubos	B-9	2376
		Atado Coronación	B-10	198
		HORMIGÓN	Pilares P-1	B-11
	Pilares P-2		B-12	200
Total				8174 barras
Total FINAL				8174 barras
ELEMENTOS FINITOS 3DCARAS	HORMIGÓN	Pantallas	B-14	100
		Gradas	B-15	624
		Planta Primera	B-16	198
		Planta Baja	B-17	99
		Forjado Sotano	B-18	200
		Zapatatas	B-19	99
		Losa	B-20	200
		Total		
Total FINAL				106005 EF

Tabla 5.1. Recuento final de todos los elementos modelizados en Grasshopper. [Elaboración propia]

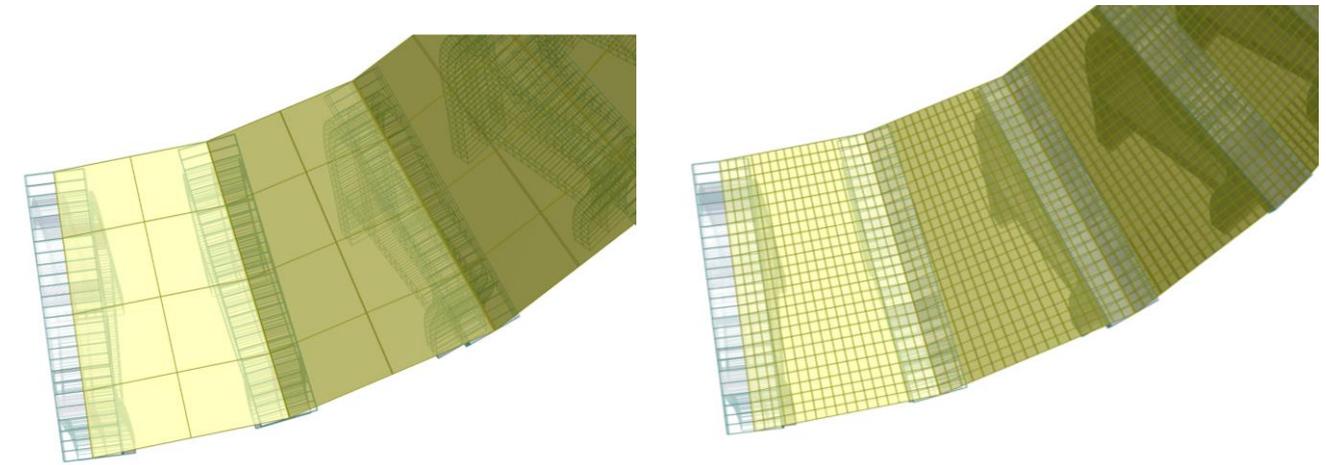


Ilustración 42. División de las caras de grandes dimensiones de los elementos finitos que conforman las gradas.

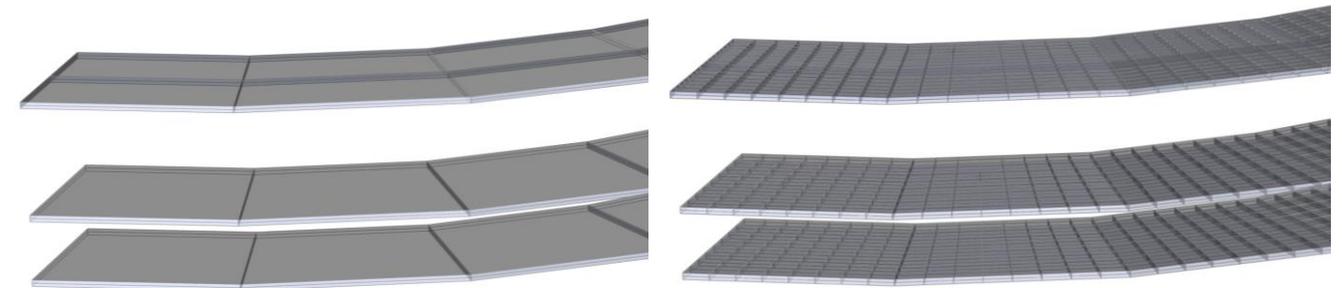


Ilustración 43. División de las caras de grandes dimensiones de los elementos finitos que conforman los forjados de planta baja y primera.

5.3 | Aplicación de cargas

Para poder verificar el cumplimiento de los requerimientos de seguridad estructural (estabilidad y capacidad portante) y aptitud al servicio, la asignación de cargas se ha establecido conforme a la normativa del **Documento Básico de Seguridad Estructural-Acciones en la edificación** (DBSE-AE).

La clasificación de las cargas sería la siguiente:

Permanentes/Persistentes

Ocurren de forma casi constante durante la vida del edificio y aquellas que crecen en tiempo con un valor límite constante.

Variables

corresponden a aquellas que no tienen un valor fijo a lo largo del tiempo y dependen de ciertas condiciones de contorno y otros factores.

Excepcionales/Extraordinarias

Se tratan de situaciones en las que puede estar expuesto el edificio.

Para la asignación de las cargas en superficie se acude al cuadro de diálogo **Assign > Area Loads > Uniform (Shell)**, mientras que para asignar cargas lineales nos dirigimos a **Assign > Frame Loads > Distributed...** Como podemos observar ambas son muy similares en cuanto al modo de aplicación. La asignación se realiza estableciendo un valor a la carga y asignándola para una *Hipótesis* determinada. El programa más adelante establecerá el factor multiplicador en función de las combinaciones creadas. Cabe señalar que una vez que realizamos el cálculo del programa, se pueden seguir creando hipótesis y combinaciones, pues no tiene un efecto en la rigidez de los elementos.

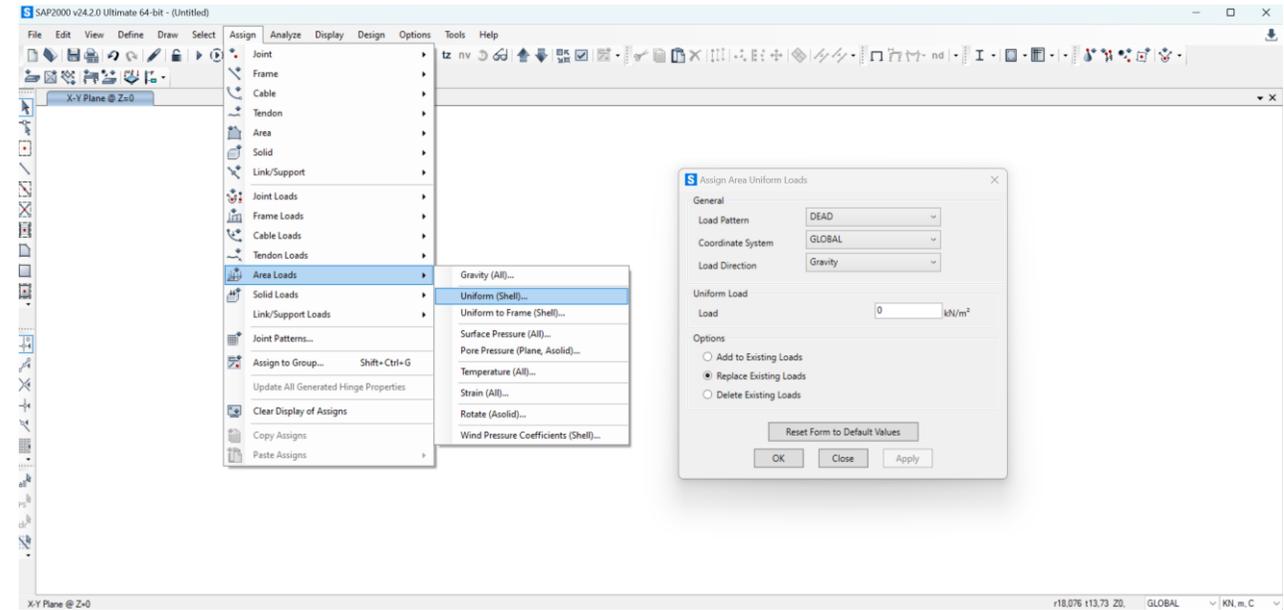


Ilustración 44. Asignación de cargas en superficie.

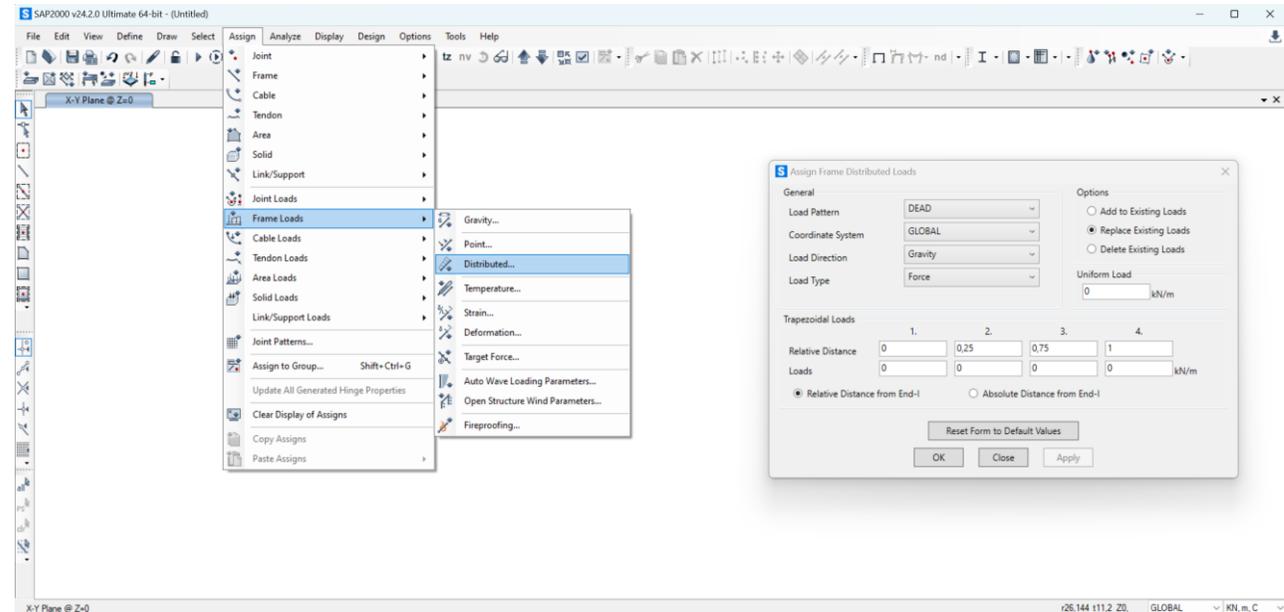


Ilustración 45. Asignación de cargas lineales.

5.3.1 | Cargas Permanentes

Se entienden por cargas muertas permanentes aquellas referenciadas al peso propio de la estructura (DEAD) y carga muerta permanente (CMP), que engloban el peso que aportan los paneles solares, los revestimientos, la tabiquería, los cerramientos, los falsos techos y las instalaciones. Es decir, elementos cuya carga siempre estará presente durante la vida útil del edificio y que no forman parte de la estructura per se.

PESO PROPIO (DEAD)

El programa asigna los pesos propios correspondientes una vez conocidas las secciones y los materiales que corresponden a cada elemento finito o barra de la estructura portante.

Para introducir estos parámetros acudimos al cuadro **Define > Materials...** concretamente, en la casilla “Weight per Unit Volume”, donde el dato a insertar es el peso específico de cada material, además de propiedades como el módulo elástico o propiedades mecánicas. Por tanto, quedaría:

$$\gamma_{\text{hormigón}} = 24,5 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{\text{acero}} = 76,97 \text{ kN/m}^3$$

The image displays two side-by-side screenshots of the 'Material Property Data' dialog box in a software application. Both windows are titled 'Material Property Data' and have a close button (X) in the top right corner.

Left Screenshot (Concrete Material):

- General Data:** Material Name and Display Color: HA-30; Material Type: Concrete; Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume: 24,5; Mass per Unit Volume: 2,4983; Units: KN, m, C
- Isotropic Property Data:** Modulus of Elasticity, E: 28576791; Poisson, U: 0,2; Coefficient of Thermal Expansion, A: 1,000E-05; Shear Modulus, G: 11906996
- Other Properties for Concrete Materials:** Specified Concrete Compressive Strength, f_c: 30000; Expected Concrete Compressive Strength: 30000; Lightweight Concrete; Shear Strength Reduction Factor: (empty)
- Switch To Advanced Property Display:
- Buttons: OK, Cancel

Right Screenshot (Steel Material):

- General Data:** Material Name and Display Color: S275; Material Type: Steel; Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume: 76.9729; Mass per Unit Volume: 7,849; Units: KN, m, C
- Isotropic Property Data:** Modulus of Elasticity, E: 2,100E+08; Poisson, U: 0,3; Coefficient of Thermal Expansion, A: 1,170E-05; Shear Modulus, G: 80769231
- Other Properties for Steel Materials:** Minimum Yield Stress, F_y: 275000; Minimum Tensile Stress, F_u: 430000; Expected Yield Stress, F_{ye}: 302500; Expected Tensile Stress, F_{ue}: 473000
- Switch To Advanced Property Display:
- Buttons: OK, Cancel

CARGA MUERTA PERMANENTE (CMP)

Corresponde a las cargas permanentes del edificio aportada por todo aquello que no sean pesos propios, es decir, principalmente por el mobiliario, el pavimento, los paneles solares y particiones interiores. Puesto que no se disponen de la información específica sobre dichas cargas, se ha recurrido al **Anejo C. Prontuario de pesos y coeficientes de rozamiento interno del DBSE-AE**, donde aparecen valores aproximados de pesos de diferentes elementos por unidad lineal o de superficie.

Se ha elaborado una tabla, a modo resumen, donde se plasma la memoria de las cargas muertas permanentes que se han considerado en el estadio.

Pavimento

El pavimento del proyecto se ha supuesto de granito, cuyo valor según la Tabla C.1 es de 27-30 kN/m³. Además, tomando como valor del espesor 30mm, se obtiene un valor de 0.75 kN/m². Si además tenemos en cuenta el valor de cemento, obtenemos como carga de pavimentación:

$$q_{pavimento} = 1 \text{ kN/m}^2$$

Paneles solares

La carga de los paneles solares recae sobre la cercha, y puesto que la distancia entre los distintos ejes varía debido a la propia forma del estadio se ha realizado el modelado de una superficie auxiliar, donde distribuye la carga, y reparte la carga del peso propio de los paneles sobre los dos arcos de la cercha. La carga por metro cuadrado considerada es de 50kg/m², es decir:

$$q_{paneles} = 0,5 \text{ kN/m}^2$$

Tabiquería

La carga de tabiquería, considerada según el apartado 2.1 de la misma normativa es:

$$q_{tabiquería} = 1 \text{ kN/m}^2$$

Falsos techos e instalaciones

$$q_{instalaciones} = 0,25 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{falsos\ techos} = 0,25 \text{ kN/m}^2$$

MEMORIA DE CARGAS				
PERMANENTES				
ESTRUCTURA				
ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS				
Cubierta	Paneles solares	m	kN/m ³	kN/m ²
		-		0,25
	TOTAL			0,25
Gradas	Mobiliario fijo (asientos, barandillas, luminarias...)	m	kN/m ³	kN/m ²
		-		5
	TOTAL			5
Planta 1	Pavimento cerámico	m	kN/m ²	kN/m ²
		0,05	23,00	1,15
	Poliestireno extruido		0,10	0,30
	Mortero de regularización		0,02	22,00
	Hormigón celular (formación de pendientes)		0,20	10,00
	TOTAL			3,62
Planta 0	Pavimento cerámico	m	kN/m ²	kN/m ²
		0,05	23,00	1,15
	Poliestireno extruido		0,10	0,30
	Mortero de regularización		0,02	22,00
	Hormigón celular (formación de pendientes)		0,20	10,00
	TOTAL			3,62
Planta -1	Pavimento cerámico	m	kN/m ²	kN/m ²
		0,05	23,00	1,15
	Poliestireno extruido		0,10	0,30
	Mortero de regularización		0,02	22,00
	Hormigón celular (pendientes)		0,20	10,00
	TOTAL			3,62
TOTAL POR PLANTA				
Cubierta	Elementos constructivos			kN/m ³
	Instalaciones			0,25
	Falso techo			0,25
	TOTAL			0,75
Gradas	Elementos constructivos			kN/m ³
	Instalaciones			5
	Falso techo			0,25
	TOTAL			5,5
Planta 1	Elementos constructivos			kN/m ³
	Instalaciones			3,62
	Falso techo			0,25
	TOTAL			4,12
Planta 0	Elementos constructivos			kN/m ³
	Instalaciones			3,62
	Falso techo			0,25
	TOTAL			4,12
Planta -1	Elementos constructivos			kN/m ³
	Instalaciones			3,62
	Falso techo			0,25
	TOTAL			4,12

Tabla 5.2. Memoria de cargas muertas permanentes. [Elaboración propia].

5.3.2 | Cargas Variables

SOBRE CARGA DE USO (SCU)

En el apartado 3.1 del DBSE.AE, se designa como sobrecarga de uso la carga en elementos por razón de su uso de los usuarios.

Atendiendo a la siguiente tabla de la normativa, encontramos los valores característicos de la sobrecarga. Escogeremos los más oportunos para cada elemento modelado del estadio.

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1 ⁽⁷⁾	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 ⁽⁴⁾⁽⁶⁾	2
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁶⁾	0,4 ⁽⁴⁾	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Tabla 5.3. Valores característicos de las sobrecargas de uso [Tabla 3.1 DBSE-AE]

Planta baja

El acceso a esta se realiza desde la misma calle y con función principal es la de acoger a los visitantes y distribuirlos por las distintas secciones del estadio, no solo las gradas sino también tiendas, restaurantes, y demás servicios ofrecidos por el estadio.

Se trata pues de una zona de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc.), por lo que estamos en la categoría C y subcategoría C3.

$$q_{u,P0} = 5 \text{ kN/m}^2$$

Planta primera

En esta zona se conglomeran diferentes actividades, comerciales, aglomeración, gimnasios, administración etc.

Se toma el valor más desfavorable de las categorías C y D.

$$q_{u,P1} = 5 \text{ kN/m}^2$$

Gradas

Desde aquí se proporciona un lugar para que los espectadores se sienten y observen eventos deportivos, conciertos u otras actividades que se realicen en el estadio.

$$q_{u,Gradas} = 5 \text{ kN/m}^2$$

Cubierta

Se trata de una persona no accesible al público general, aunque sí accesible por razón de mantenimiento, por lo que la categoría de uso es F.

$$q_{u,Cubierta} = 0,4 \text{ kN/m}^2$$

SOBRE CARGA DE VIENTO (SCV)

Según el apartado 3.3.2 del DB-SE AE del CTE, la acción del viento q_e se expresa como la fuerza perpendicular a la superficie de cada uno de los puntos expuestos al mismo, dependiendo de la forma y las dimensiones de la construcción, mediante la ecuación:

$$q_e = q_b \times c_e \times c_p$$

Siendo:

q_b la presión dinámica del viento, función del emplazamiento

c_e el coeficiente de exposición, función del entorno y la altura del edificio

c_p el coeficiente eólico o de presión, función de la orientación y la forma del edificio

q_b | presión dinámica del viento

$$q_b = 0,5 \cdot \delta \cdot v_b^2$$

siendo:

δ la densidad del aire, $1,25 \text{ kg/m}^3$

v_b el valor básico de la velocidad del viento

La Figura D.1 muestra el valor básico de la velocidad del viento, v_b , en Granada, situada en la **Zona A**, es de 27m/s, obteniéndose una presión dinámica del viento igual a:

$$q_b = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 27^2 = 455,625 \text{ N/m}^2 = \mathbf{0,456 \text{ kN/m}^2}$$

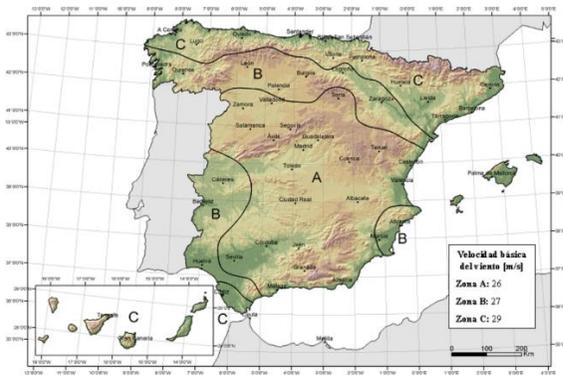


Figura 5.1. Valor básico de la velocidad del viento, del Anejo D (Tabla D.1) del DB-SE-AE del Código Técnico de la Edificación.

c_e | coeficiente de exposición

A partir de la tabla 3.4 del DB-SE AE del CTE, obtendremos el coeficiente de exposición, el cual es función de la altura del edificio y del grado de aspereza del entorno.

El valor del coeficiente de exposición se obtiene de la tabla 3.4 del mismo documento. Es función del grado de aspereza del entorno y la altura del punto en cuestión.

Consideramos que el estadio se ubica en una zona de terreno llano y sin la existencia de arbolado de importancia y una altura máxima del estadio con respecto a la rasante de 44 m.

Puesto que no aparece en la tabla dicho valores, acudimos al Anejo E para calcularlo con mayor precisión:

$$c_e = F \cdot (F + 7 \cdot k)$$

Siendo k, L, Z:

$$F = k \ln (\text{máx} (z, Z) / L)$$

$$F = 0,17 \cdot \ln (44/0,01) = 1,4262$$

	Grado de aspereza del entorno	Parámetro		
		k	L (m)	Z (m)
I	Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	0,156	0,003	1,0
II	Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	0,17	0,01	1,0
III	Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	0,19	0,05	2,0
IV	Zona urbana en general, industrial o forestal	0,22	0,3	5,0
V	Centro de negocios de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	0,24	1,0	10,0

Tabla 5.4. Tabla D.2 – Coeficientes para el tipo de entorno

$$c_e = 1,4262 \cdot (1,4262 + 7 \cdot 0,17) = 3,73$$

Por ende, el valor obtenido será:

$$c_e = \mathbf{3,73} \text{ para la cubierta}$$

$$c_e = \mathbf{3,10} \text{ para las pantallas}$$

c_p | coeficiente eólico o de presión

A la hora de definir un valor para el coeficiente de presión se encuentran ciertas incertidumbres al tratarse de una construcción singular. De acuerdo con el CTE, tomando el dato de una marquesina para un agua (Tabla D.11), con una inclinación de 5° y situada la Zona B, encontramos un valor de presión de 1.8 y un valor máximo de succión de 2, que coinciden además con los máximos valores de entre las tres zonas, estando de nuevo del lado de la seguridad.

Pendiente de la cubierta α	Efecto del viento hacia	Factor de obstrucción φ	Coeficientes de presión c _{p,φ}			
			Zona (según figura)			
			A	B	C	D
-20°	Abajo	0 ≤ φ ≤ 1	0,8	1,6	0,6	1,7
	Arriba	0	-0,9	-1,3	-1,6	-0,6
-15°	Abajo	0 ≤ φ ≤ 1	0,6	1,5	0,7	1,4
	Arriba	0	-0,8	-1,3	-1,6	-0,6
-10°	Abajo	0 ≤ φ ≤ 1	0,6	1,4	0,6	1,1
	Arriba	0	-0,8	-1,3	-1,5	-0,6
-5°	Abajo	0 ≤ φ ≤ 1	0,5	1,5	0,8	0,8
	Arriba	0	-0,7	-1,3	-1,6	-0,6
0°	Abajo	0 ≤ φ ≤ 1	0,6	1,8	1,3	0,4
	Arriba	0	-0,6	-1,4	-1,4	-1,1
10°	Abajo	0 ≤ φ ≤ 1	0,7	1,8	1,4	0,4
	Arriba	0	-0,7	-1,5	-1,4	-1,4
15°	Abajo	0 ≤ φ ≤ 1	0,9	1,9	1,4	0,4
	Arriba	0	-0,9	-1,7	-1,4	-1,8
20°	Abajo	0 ≤ φ ≤ 1	1,1	1,9	1,5	0,4
	Arriba	0	-1,2	-1,8	-1,4	-2,0
25°	Abajo	0 ≤ φ ≤ 1	1,2	1,9	1,6	0,5
	Arriba	0	-1,4	-1,9	-1,4	-2,0
30°	Abajo	0 ≤ φ ≤ 1	1,3	1,9	1,6	0,7
	Arriba	0	-1,4	-1,9	-1,4	-2,0

Tabla 5.5. Marquesinas a dos aguas. Tabla D.11 del DB-SE-AE del Código Técnico de la Edificación.

Luego, nos quedaría una Sobrecarga de Viento para presión y succión tal que:

Para las pantallas:

$$q_p = 0,456 \cdot 3,1 \cdot 0,8 = 1,13 \text{ kN/m}^2$$

$$q_s = 0,456 \cdot 3,1 \cdot (-0,7) = -0,99 \text{ kN/m}^2$$

Para la cubierta:

$$q_p = 0,456 \cdot 3,73 \cdot 1,8 = 3,07 \text{ kN/m}^2$$

$$q_s = 0,456 \cdot 3,73 \cdot (-2) = -3,41 \text{ kN/m}^2$$

SOBRE CARGA DE NIEVE (SCN)

El valor de la carga de nieve por unidad de superficie en proyección horizontal, q_n, depende de la ubicación geográfica del proyecto y se puede expresar de forma simplificada mediante la siguiente fórmula:

$$q_n = s_k \cdot \mu$$

siendo:

s_k el valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal

μ el coeficiente de forma de la cubierta

El valor s_k se adopta de la Tabla 3.8 del DBSE-AE, donde aparece un valor asociado a cada capital de provincia. Tal y como se ha indicado anteriormente se tomó como ubicación la localidad de Granada, cuyo valor s_k es de 0.6 kN/m².

En cuanto al factor de forma de la cubierta corresponde a la facilidad con la que la nieve es susceptible de quedarse acumulada en la cubierta.

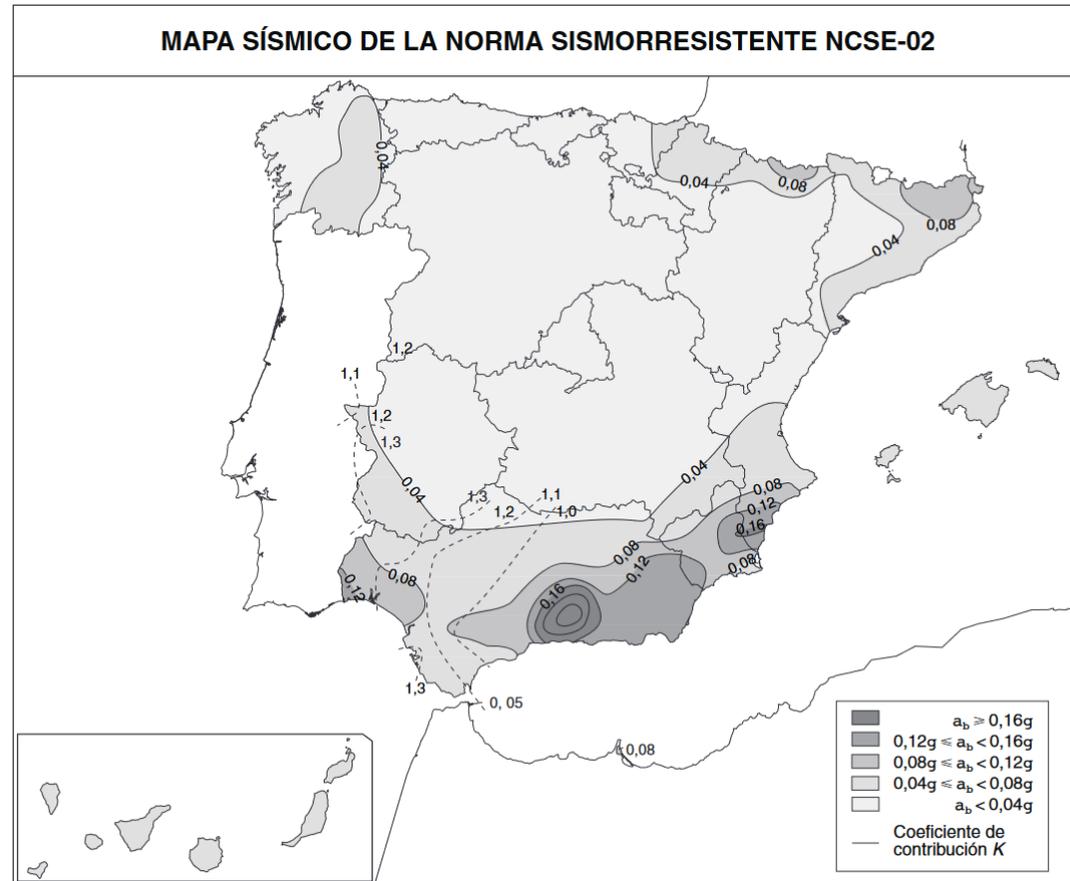
La cubierta se considera de sección cóncava con pendientes a ambos lados y una parte de transición plana. Se considera entonces el valor μ = 1, quedaría:

$$q_n = s_k \cdot \mu = 0,6 \cdot 1 = 0,6 \text{ kN/m}^2$$

5.3.3 | Cargas excepcionales (A)

SISMO (SIS)

La peligrosidad sísmica del territorio nacional se define por medio del mapa de peligrosidad sísmica. Dicho mapa muestra la aceleración sísmica básica a_b , en relación con el valor de la gravedad, y el coeficiente de contribución K, que tienen en cuenta la influencia de los distintos tipos de terremotos esperados en la peligrosidad sísmica de cada punto.



La actividad sísmica en España es moderada y las zonas con mayor actividad se concentran en el sur de España, tal y como se muestra en la figura procedente de la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02).

Consideraremos la aceleración sísmica de la ciudad de Granada. $a_c = 0,24g$

Por otro lado, la NCSE02 distingue cuatro coeficientes de terreno C en función de la velocidad de propagación de las ondas s, NSPT o la resistencia a compresión simple del terreno. Supondremos un Terreno Tipo IV cuyo coeficiente C es 2.

Una vez establecidos los parámetros correspondientes a la situación geográfica y propiedades del edificio, generamos un espectro elástico que SAP interpretará para los cálculos de los modos de vibración del edificio, y que será el que se emplee para el cálculo del sismo modal.

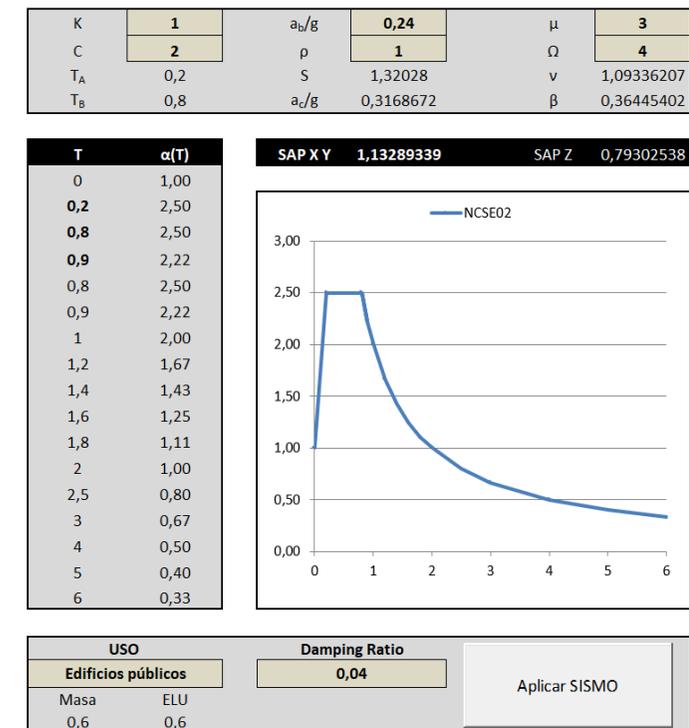


Tabla 5.6. Tabla Excel proporcionada por el profesor David Gallardo Llopis para el cálculo del espectro elástico del edificio.

TEMPERATURA (TMP)

Al encontrarnos con una estructura principalmente de acero, las variaciones de temperatura, el nivel de exposición y la orientación pueden generar deformaciones en los elementos estructurales del mismo. En el caso del estadio de Kaohsiung, gran parte de la estructura queda completamente expuesta. Por un lado, los tubos quedan únicamente cubiertos de una pintura blanca, mientras que las cerchas están cubiertas por una pintura protectora de corrosión de color oscura. Cabe destacar que no está totalmente expuesta, pues la cubierta de paneles solares la protege parcialmente de la radiación solar.

De acuerdo con el apartado 3.4 del DB-SE-AE, calcularemos los efectos de la carga térmica en elementos completamente expuestos a la intemperie, en este caso los tubos que rodean el estadio.

A continuación, acudiremos al apartado **Assign > Frame Loads > Temperature**, donde insertaremos en la hipótesis “TMP” el incremento de la temperatura con respecto a la temperatura que suponemos de fabricación, pudiendo considerarse la media anual del lugar donde se construyó el elemento o 10°C. En este caso escogeremos los 10°C.

A continuación, en el Anejo E de dicha normativa, obtenemos las temperaturas ambientales extremas de Granada en invierno y verano.

Invierno (contracción): T^a mínima = Temperatura más baja en Granada = -11°C

La carga térmica (°C) será la variación de temperatura.
 $\Delta T^a = 10 - (-11) = 21^\circ\text{C}$

Verano (dilatación): T^a máxima = Temperatura más alta en Granada + incremento de la tabla 3.7

Fachada norte y este: $48 + 0 = 48$

Fachada sur y oeste: $48 + 18 = 66$

La carga térmica (°C) será igual a la variación de temperatura.

Fachada norte y este $\Delta T^a = 48 - 10 = 38^\circ\text{C}$

Fachada sur y oeste $\Delta T^a = 66 - 10 = 56^\circ\text{C}$

Debido a la geometría del estadio, la carga térmica que aplicaremos a los tubos será la variación máxima de entre las calculadas (teóricas), es decir, **56°C**

Tabla 3.7 Incremento de temperatura debido a la radiación solar

Orientación de la superficie	Color de la superficie		
	Muy claro	Claro	Oscuro
Norte y Este	0 °C	2 °C	4 °C
Sur y Oeste	18 °C	30 °C	42 °C

Figura 5.2. Tabla 3.7 del DB-SE-AE del Código Técnico de la Edificación. Fuente: Ministerio de Fomento.

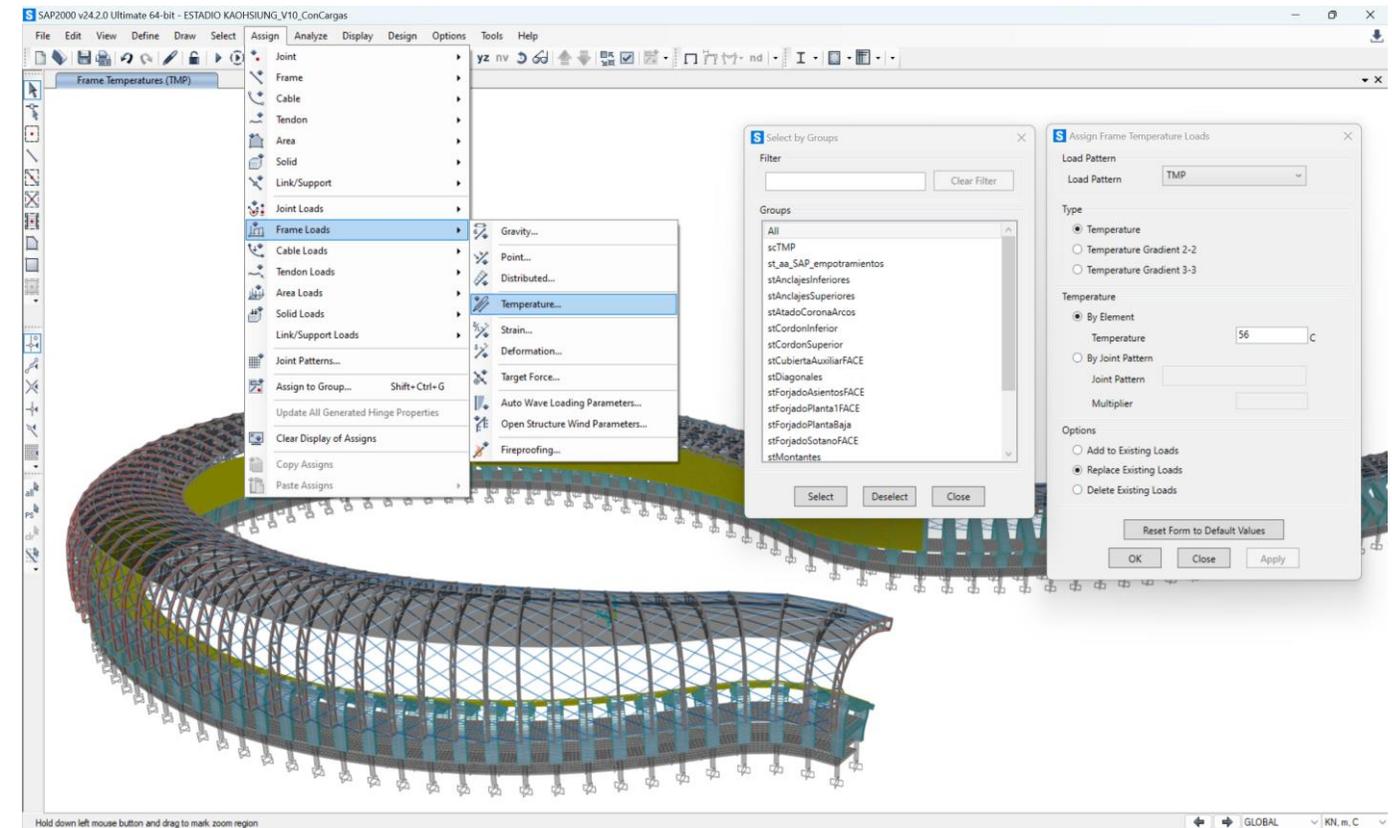


Figura 5.3 Proceso de asignación de la carga térmica a los 2376 tubos que engloban el estadio, en SAP 2000

En la siguiente tabla se recogen las cargas variables aplicadas al modelo, clasificadas en función de los grupos ya creados en SAP 2000, de forma que su asignación se realice de forma eficiente.

MEMORIA DE CARGAS				
VARIABLES				
USO-VIENTO-NIEVE				
POR PLANTA				
Cubierta	USO (MANTENIMIENTO)		kN/m ³ 0,4	
	NIEVE		0,25	
	VIENTO	Presión		0,25
		Succión		
	TOTAL			0,9
Gradas	USO		kN/m ³ 5	
	NIEVE		0,25	
	VIENTO		1,13	
	TOTAL		6,38	
Planta 1	USO		kN/m ³ 0,00	
	TOTAL		0,00	
Planta 0	USO		kN/m ³ 5,00	
	TOTAL		5,00	
Planta -1	USO		kN/m ³ 4,00	
	TOTAL		4,00	
Pantallas	VIENTO	Presión	kN/m ³ 1,13	
		Succión	0,99	
Cerchas	VIENTO	Presión	kN/m ³ 3,07	
		Succión	-3,41	

Tabla 5.7. Cajetín de cargas variables aplicadas al estadio.

5.4 | Apoyos y desconexiones

Algunos nudos del modelo poseen ciertas condiciones de contorno (giros y desplazamientos) diferentes al resto, por lo que el programa ha de tener dicha información en consideración para un cálculo más aproximado a la realidad.

En un principio, se consideró que todos los nudos que llegaban a cimentación serían empotramientos perfectos. Sin embargo, esto correspondería a una condición irreal, pues una situación de empotramiento perfecto supone rigidez infinita, lo cual es imposible. Para los primeros cálculos se asignó dicha condición de empotramiento perfecto a los 200 nudos que correspondían a la base de los pilares. Para ello, se seleccionaron todos ellos a partir del cuadro de diálogo **Select > Coordinate Specification > Specified Coordinate Range...** Una vez seleccionados se marcan sus condiciones de contorno mediante el cuadro **Assign > Joint > Restraints...**

Más adelante, se modelizó una losa y se realizaron los cálculos mediante muelles, consiguiendo resultados de cálculo más verídicos y rápidos.

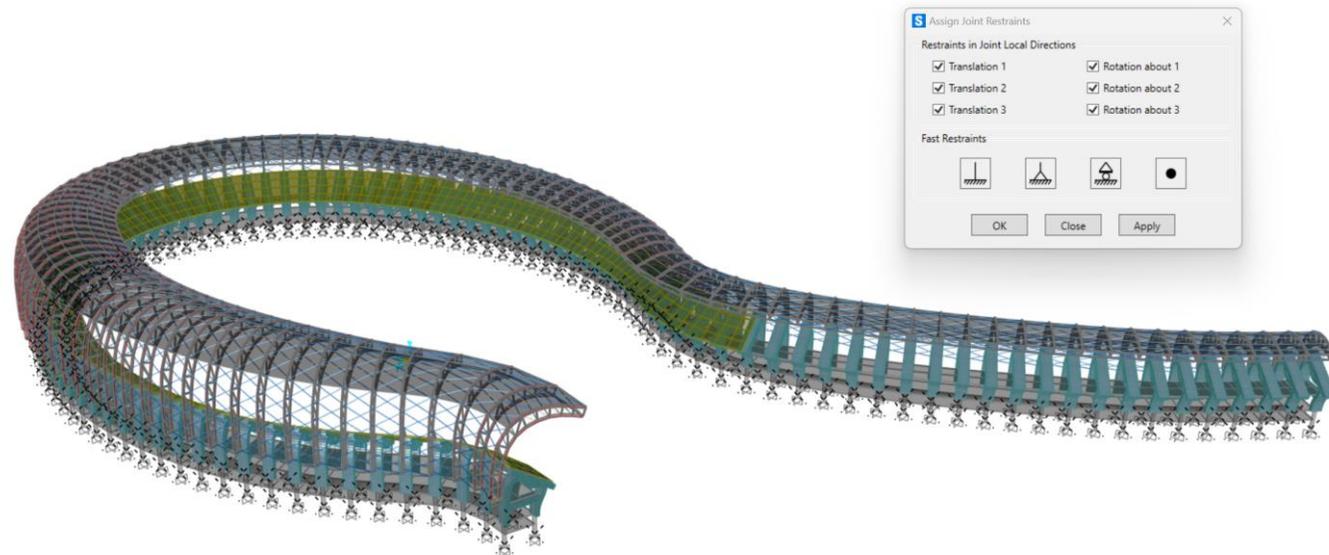


Ilustración 46. Modelo en SAP 2000 empleando apoyos rígidos.

Por otro lado, se asocia a los tirantes la articulación a ambos nudos extremos del mismo. En esta ocasión, para realizar dicha función se acude al menú **Assign > Frame > Releases/Partial Fixity...**

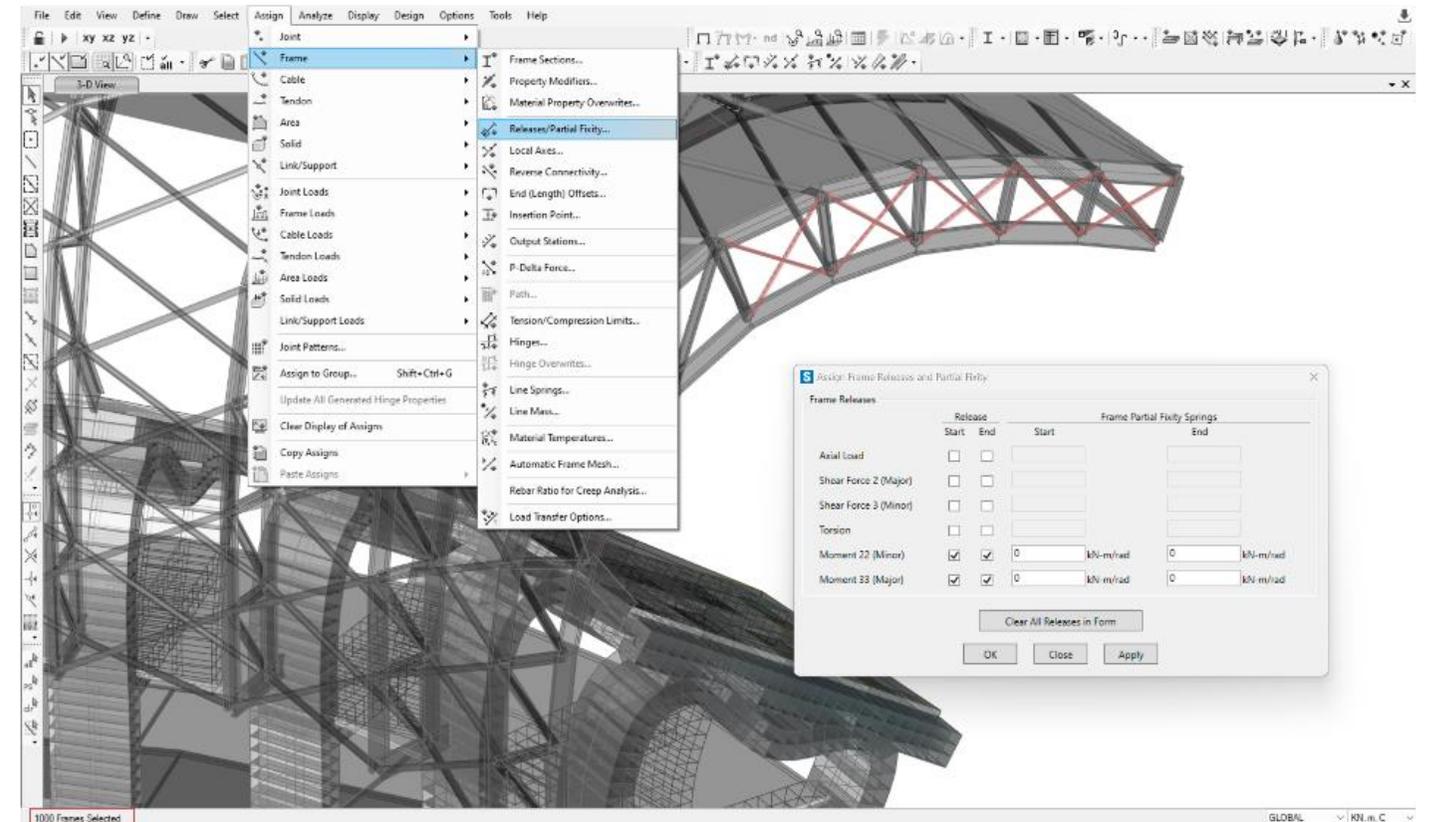


Ilustración 47. Cuadro de diálogo que se emplea para establecer condiciones de contorno específicas a los 1000 tirantes del modelo.

5.5 | Cimentación/Muelles

Como ya se ha comentado, evitamos el uso de empotramientos perfectos en aras de aproximarnos un poco más a la realidad, y modelizaremos una posible cimentación haciendo uso de muelles. De esta forma, el peso vertical del edificio sí que asentará. Asumimos que la cimentación tendrá libertad de movimiento en vertical (dejamos que los muelles se muevan verticalmente) pero impedimos los movimientos en X e Y (laterales). De esta forma, podremos obtener el asentamiento del edificio, y conociendo el peso propio de nuestro edificio, podemos obtener las cargas que llegan a cada pilar.

Se pueden obtener mediante SAP todos los axiles que llegan a cada uno de los 200 pilares del edificio. Existen dos posibles caminos a partir de aquí, por un lado, asignar a cada pilar una dimensión de zapata correspondiente a la carga que le llega, o, por otro lado, escoger el valor más desfavorable y aplicarlo a todas las zapatas del edificio. En ambos casos el cálculo a mano sería tedioso, pues no solo por la variación de valores sino también por la geometría del propio edificio. Sin embargo, colocando los valores en una tabla Excel se puede parametrizar el proceso de forma que se obtengan las dimensiones y las 3DCARAS correspondientes a cada zapata. El código que se ha creado para esta ocasión permite escoger entre tres variables: zapata aislada, combinada y losa.

Se tomó la decisión de realizar los cálculos con una cimentación por losa.

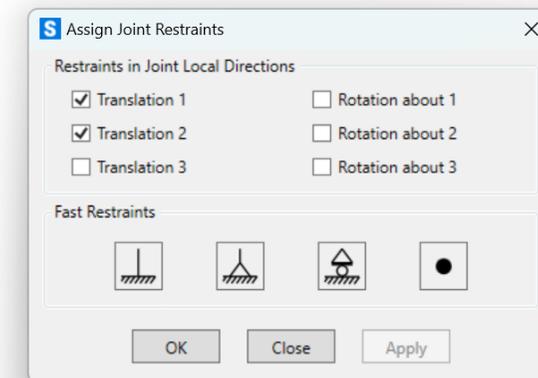
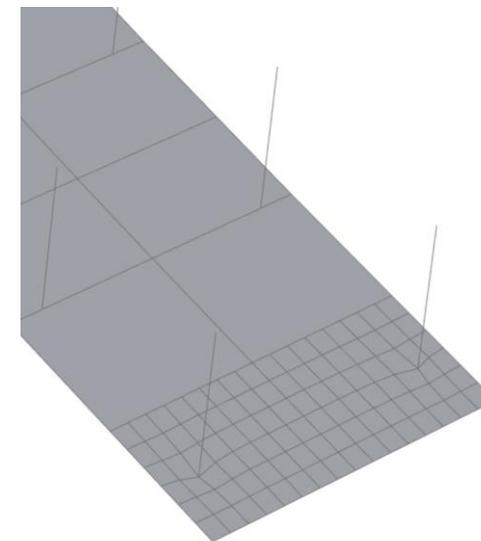
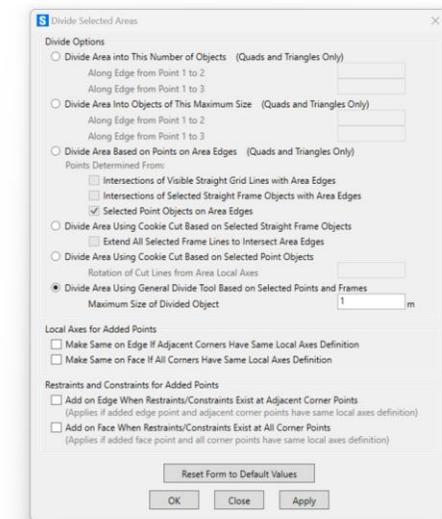
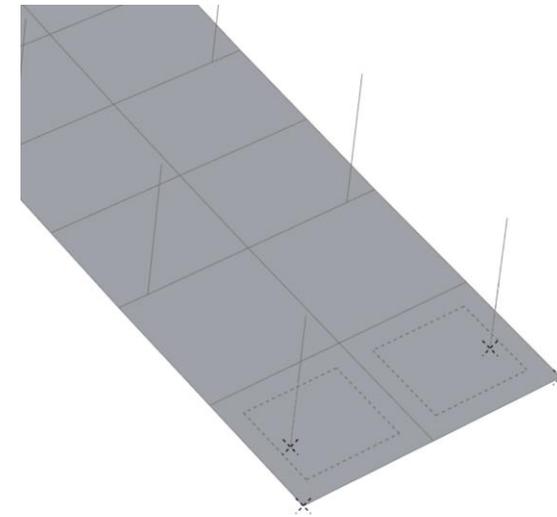
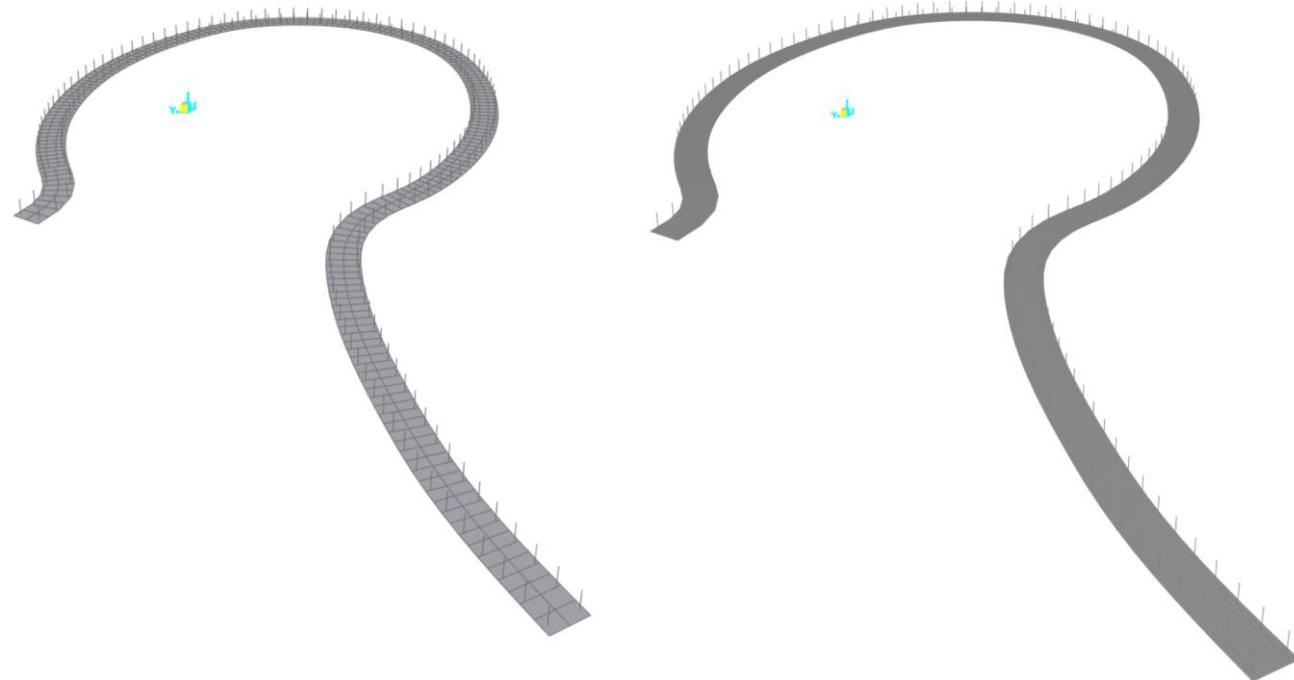


Figura 5.4. Liberamos únicamente el desplazamiento vertical (Translation 3)

5.6 | Cálculo de combinaciones

De acuerdo con lo visto hasta ahora en cuanto a las acciones asignadas a la estructura, tenemos:

Cargas permanentes (G)

Peso propio estructura (DEAD)
Carga muerta permanente (CMP)

Cargas variables (Q)

Sobrecarga de uso (SCU)
Sobrecarga de viento (SCV)
Sobrecarga de nieve (SCN)

Cargas excepcionales (A)

Sismo (SIS) [sismo modal]
Temperatura (TMP)

Para definir las combinaciones se ha acudido al **Documento básico de Seguridad Estructural (DBSE)** en su apartado **4.2.2 Combinación de acciones**. Suponiendo un comportamiento lineal de la estructura, la norma establece una serie de combinaciones lineales de acciones mediante coeficientes de simultaneidad, es decir, teniendo en cuenta la probabilidad ante una situación de presencia simultánea de cargas de diferente índole.

Las hipótesis son introducidas desde el apartado **Define > Load > Patterns...** La hipótesis de viento se ha introducido como hipótesis separadas, descompuesta sobre los ejes principales x e y.

La norma establece una diferenciación entre Estados Límites de Servicio (ELS) o Estados Límites Últimos (ELU). Se considerará el **Estado Límite de Servicio** aquel que una vez sobrepasado produzca deficiencias en los elementos constructivos debidos a la ocurrencia de deformaciones, agrietamientos, vibraciones o daños que afecten el correcto **funcionamiento** de la construcción. Por otro lado, el **Estado Límite Último** se asocia al **colapso** u otra forma de fallo estructural que pueda poner en peligro la seguridad de las personas.

Se define un de coeficientes de seguridad y de simultaneidad (γ) igual a 1 en el caso de ELS, mientras que en el caso de ELU se aplica un coeficiente en función de si son acciones permanentes o variables según la tabla 4.1 del **DB SE** “Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones”. Por otro lado, se establecen los coeficientes de simultaneidad (Ψ) según establece la misma norma en la tabla 4.2.

COMBINACIÓN ELS	PERMANENTES		VARIABLE 1		VARIABLE 2								
	γ	G	γ	Q	γ	Ψ	Q						
ELSp	1	·G											
ELSqpu	1	·G			+1	·0,6	·SCU						
ELSu	1	·G	+1	SCU									
ELSn	1	·G	+1	SCN									
ELSVx+	1	·G	+1	SCVx									
ELSVx-	1	·G	+1	SCVx									
ELSVy+	1	·G	+1	SCVy									
ELSVy-	1	·G	+1	SCVy									
ELSt	1	·G	+1		+1		·TMP						
ELSintcon	1	·CMP	+1		+1	·0,6	·SCU						
COMBINACIÓN ELU	PERMANENTES		VARIABLE 1		VARIABLE 2			VARIABLE 3			VARIABLE 4		
ELU	γ	G	γ	Q	γ	Ψ	Q	γ	Ψ	Q	γ	Ψ	Q
ELUp	1,35	·G											
ELUqpu	1,35	·G			+1,5	·0,6	·SCU						
ELUu	1,35	·G	+1,5	SCU									
ELUn	1,35	·G	+1,5	SCN									
ELUvx+	1,35	·G	+1,5	SCVx									
ELUvx-	1,35	·G	+1,5	SCVx									
ELUvy+	1,35	·G	+1,5	SCVy									
ELUvy-	1,35	·G	+1,5	SCVy									
ELUunvx+t	1,35	·G	+1,5	SCU	+1,5	·0,5	SCN	+1,5	·0,6	SCVx	+1,5	·0,6	TMP
ELUunvx-t	1,35	·G	+1,5	SCU	+1,5	·0,5	SCN	-1,5	·0,6	SCVx	+1,5	·0,6	TMP
ELUnuvx+t	1,35	·G	+1,5	SCN	+1,5	·0,7	SCU	+1,5	·0,6	SCVx	+1,5	·0,6	TMP
ELUnuvx-t	1,35	·G	+1,5	SCN	+1,5	·0,7	SCU	-1,5	·0,6	SCVx	+1,5	·0,6	TMP
ELUvx+unt	1,35	·G	+1,5	SCVx	+1,5	·0,7	SCU	+1,5	·0,5	SCN	+1,5	·0,6	TMP
ELUvx-unt	1,35	·G	+1,5	SCVx	+1,5	·0,7	SCU	+1,5	·0,5	SCN	+1,5	·0,6	TMP
ELUunvy+t	1,35	·G	+1,5	SCU	+1,5	·0,5	SCN	+1,5	·0,6	SCVy	+1,5	·0,6	TMP
ELUunvy-t	1,35	·G	+1,5	SCU	+1,5	·0,5	SCN	-1,5	·0,6	SCVy	+1,5	·0,6	TMP
ELUnuvy+t	1,35	·G	+1,5	SCN	+1,5	·0,7	SCU	+1,5	·0,6	SCVy	+1,5	·0,6	TMP
ELUnuvy-t	1,35	·G	+1,5	SCN	+1,5	·0,7	SCU	-1,5	·0,6	SCVy	+1,5	·0,6	TMP
ELUvy+unt	1,35	·G	+1,5	SCVy	+1,5	·0,7	SCU	+1,5	·0,5	SCN	+1,5	·0,6	TMP
ELUvy-unt	1,35	·G	+1,5	SCVy	+1,5	·0,7	SCU	+1,5	·0,5	SCN	+1,5	·0,6	TMP
ELUtunvx+	1,35	·G	+1,5	TMP	+1,5	·0,5	SCN	+1,5	·0,6	SCVx	+1,5	·0,6	SCVx
ELUtunvx-	1,35	·G	+1,5	TMP	+1,5	·0,5	SCN	-1,5	·0,6	SCVx	-1,5	·0,6	SCVx
ELUtunvy+	1,35	·G	+1,5	TMP	+1,5	·0,5	SCN	+1,5	·0,6	SCVy	+1,5	·0,6	SCVy
ELUtunvy-	1,35	·G	+1,5	TMP	+1,5	·0,5	SCN	-1,5	·0,6	SCVy	-1,5	·0,6	SCVy

Tabla 5.8. Cuadro resumen de combinaciones aplicadas al modelo. [Elaboración propia]

6.1 | Análisis de deformación

Tras haber introducido en el modelo SAP 2000 los datos relativos a materiales, secciones, cargas, hipótesis... vista en los apartados anteriores, se procede al cálculo del modelo con el comando **Analyze > Run Analysis**.

La estructura realizada por el programa es lineal, de primer orden, donde las deformaciones se consideran demasiado pequeñas para cambiar los puntos de aplicación de las cargas. Esto permite combinar la deformación con cada hipótesis de trabajo considerada y así obtener las deformaciones de cada combinación como la suma de las deformaciones provocadas por cada hipótesis.

El proceso de análisis del programa se inicia con el cálculo de las matrices de rigidez, dando como resultado las deformaciones de la estructura gracias a las cuales se consigue calcular los esfuerzos en todos los puntos.

A continuación, mediante el cuadro de diálogo **Display > Show Deformed Shape** se puede escoger tanto la combinación para la cual se desea ver la deformada de la estructura, como ajustar la escala y el criterio de colores a visualizar en las líneas de contorno, facilitando la lectura de los desplazamientos de esta.

SAP 2000 realiza cálculos para materiales elásticos, sin embargo, el edificio ante el que nos encontramos está constituido tanto por acero (cubierta) como por hormigón (pantallas, gradas y forjados). El hormigón no tiene un comportamiento completamente elástico ni lineal, sino que presenta una serie de deformaciones diferidas en el tiempo que varían en función del tiempo de aplicación de cargas. El estudio estructural realizado en el presente trabajo será exclusivamente de la estructura de la cubierta del estadio, que se compone exclusivamente de acero.

Para poder tomar como válidos los cálculos del programa, y debido a la consideración sísmica, la normativa pide alcanzar unos mínimos en las diferentes iteraciones que se realizan en el cálculo modal, para ello. La normativa establece un mínimo de 90% de participación con respecto a la masa total del edificio en los ejes X e Y. Como podemos ver en las tablas de la derecha, se han satisfecho dichos requerimientos, incluso en la dirección Z. Tan solo han hecho falta 15 modos, esto ha sido gracias al comportamiento de los muelles que se han asignado a la cimentación modelada.

TABLE: Modal Participating Mass Ratios									
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1,368914	0,05125	0,07101	0,00107	0,05125	0,07101	0,00107
MODAL	Mode	2	1,1642	0,01927	0,34255	0,00004064	0,07052	0,41356	0,00111
MODAL	Mode	3	1,154219	0,017	0,29008	0,00022	0,08752	0,70364	0,00133
MODAL	Mode	4	1,069327	0,00584	0,08441	0,00078	0,09335	0,78805	0,00211
MODAL	Mode	5	0,897228	0,26264	0,00005092	0,00013	0,356	0,7881	0,00224
MODAL	Mode	6	0,856665	0,4821	0,00007217	0,00032	0,8381	0,78818	0,00256
MODAL	Mode	7	0,813845	0,0585	0,03959	0,00022	0,8966	0,82777	0,00278
MODAL	Mode	8	0,766939	0,00474	0,04132	0,00439	0,90134	0,86909	0,00717
MODAL	Mode	9	0,7301	0,00226	0,02053	0,02094	0,9036	0,88962	0,0281
MODAL	Mode	10	0,713269	0,01713	0,00091	0,00119	0,92073	0,89053	0,02929
MODAL	Mode	11	0,684824	0,00052	0,00038	0,00085	0,92125	0,8909	0,03014
MODAL	Mode	12	0,631381	0,00049	0,00001563	0,00359	0,92174	0,89092	0,03373
MODAL	Mode	13	0,601233	0,00235	0,00142	0,02117	0,9241	0,89235	0,0549
MODAL	Mode	14	0,56654	0,0004	0,00052	0,000006121	0,9245	0,89286	0,0549
MODAL	Mode	15	0,532512	0,00043	0,00891	0,04455	0,92493	0,90178	0,09946

Ilustración 48. Cálculos del sismo modal en sus primeros 15 modos.

TABLE: Modal Load Participation Ratios				
OutputCase	ItemType	Item	Static	Dynamic
Text	Text	Text	Percent	Percent
MODAL	Acceleration	UX	99,912	94,3696
MODAL	Acceleration	UY	99,9594	95,5613
MODAL	Acceleration	UZ	98,0684	91,5014

Ilustración 49. Resumen de cálculo del sismo modal, modos necesarios para llegar a un mínimo del 90% de masa en X, Y, Z.

Deformación de la losa de cimentación

Una de las comprobaciones en cuanto a cimentación han sido las tensiones de la losa. La predimensión se realizó suponiendo una tensión admisible del terreno de 200kPa. Se ha comprobado que en ningún punto se supere dicho valor, y evitar la existencia de zonas traccionadas en la losa de cimentación, pues el terreno es incapaz de absorberlas.

Como podemos observar en la ilustración siguiente, los asentamientos se homogeneizan en todos los puntos, si bien los valores de tensión alcanzan los máximos en las zonas de apoyos de las pantallas donde se encuentran los puntos de inflexión de la curva generadora del estadio.

Los máximos se alcanzan en las zonas convexas de aquellos puntos de inflexión, y no se superan en ningún caso los 145kPa.

En la graficas adjuntadas a la derecha se ha impuesto a la escala de colores un límite de 200, es decir, aquellas partes del modelo que superen o igualen 200kPa estarían coloreadas de morado, cosa que no ocurre en ningún punto de la cimentación.

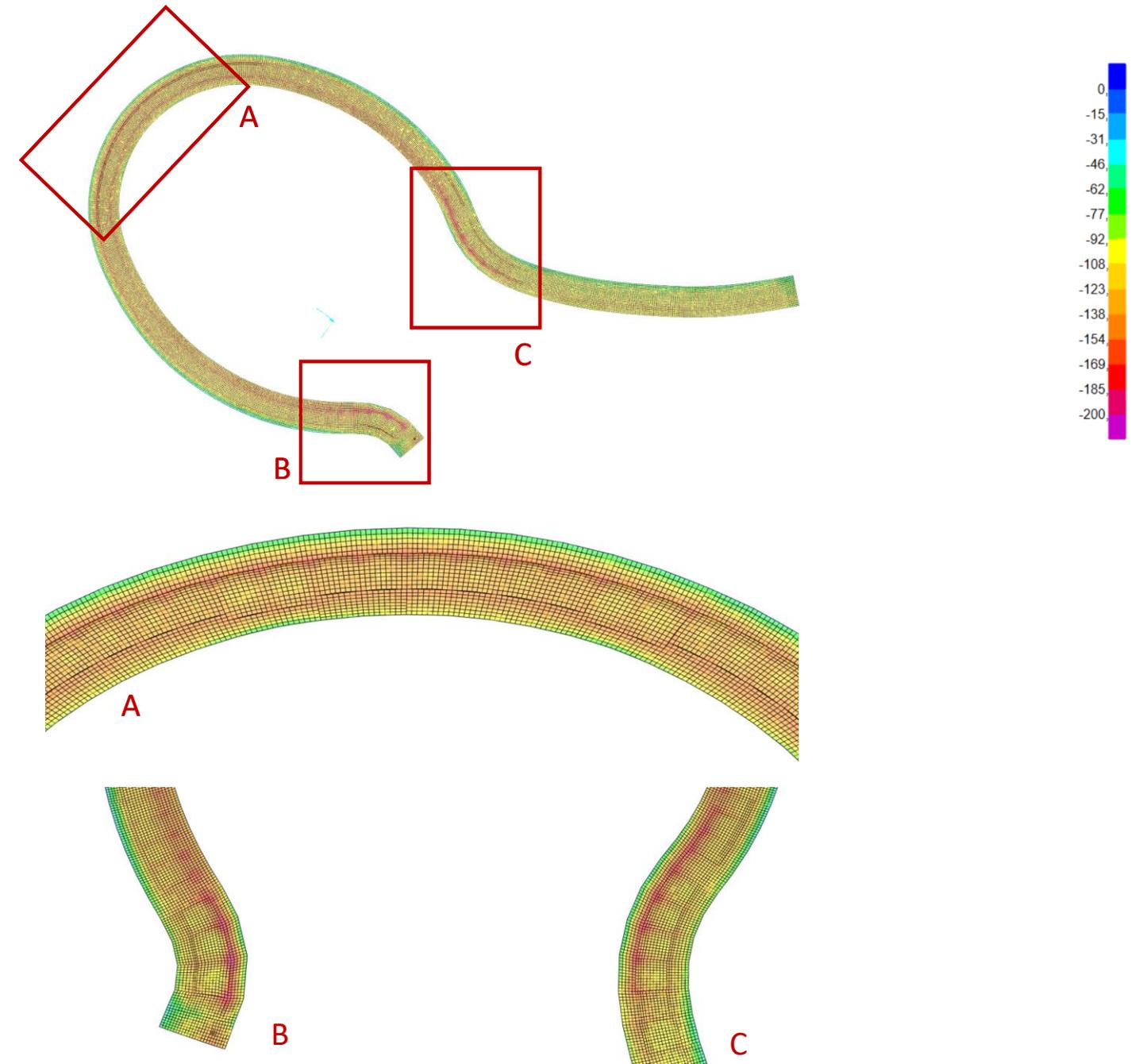


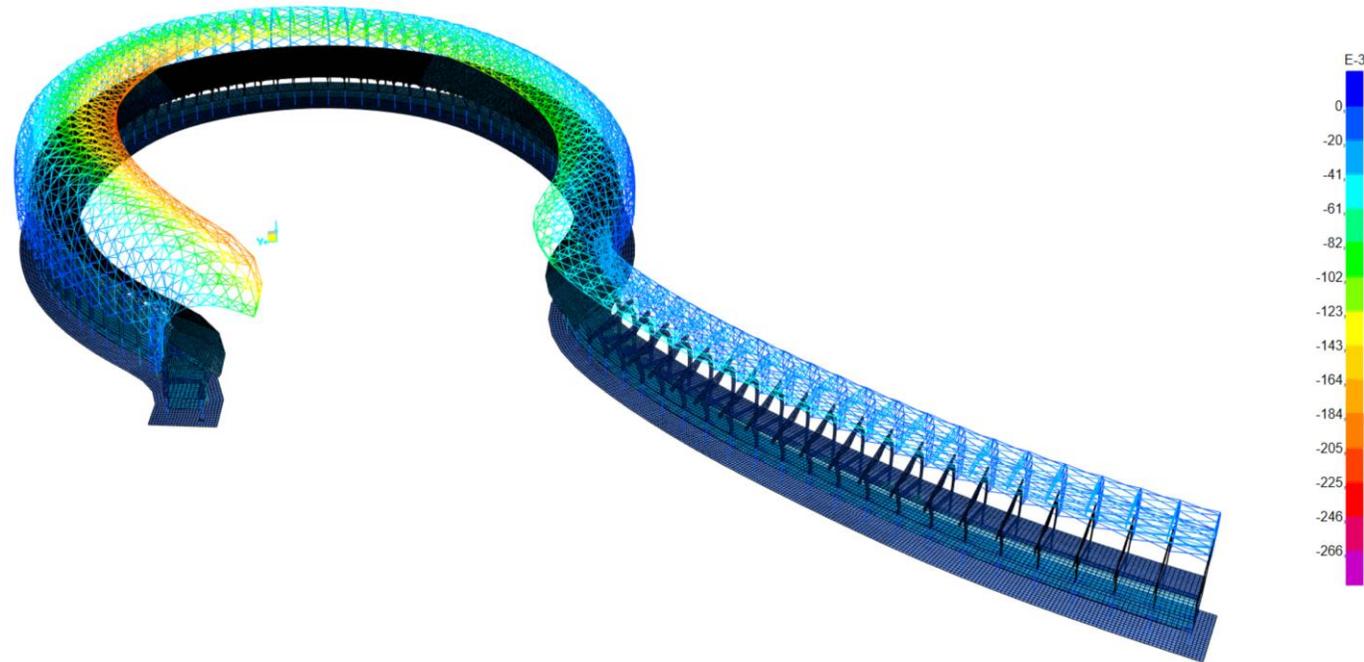
Figura 6.1. Deformación de la losa de cimentación (200kPa tensión admisible). Escala en kPa.

Deformación de la cubierta del estadio

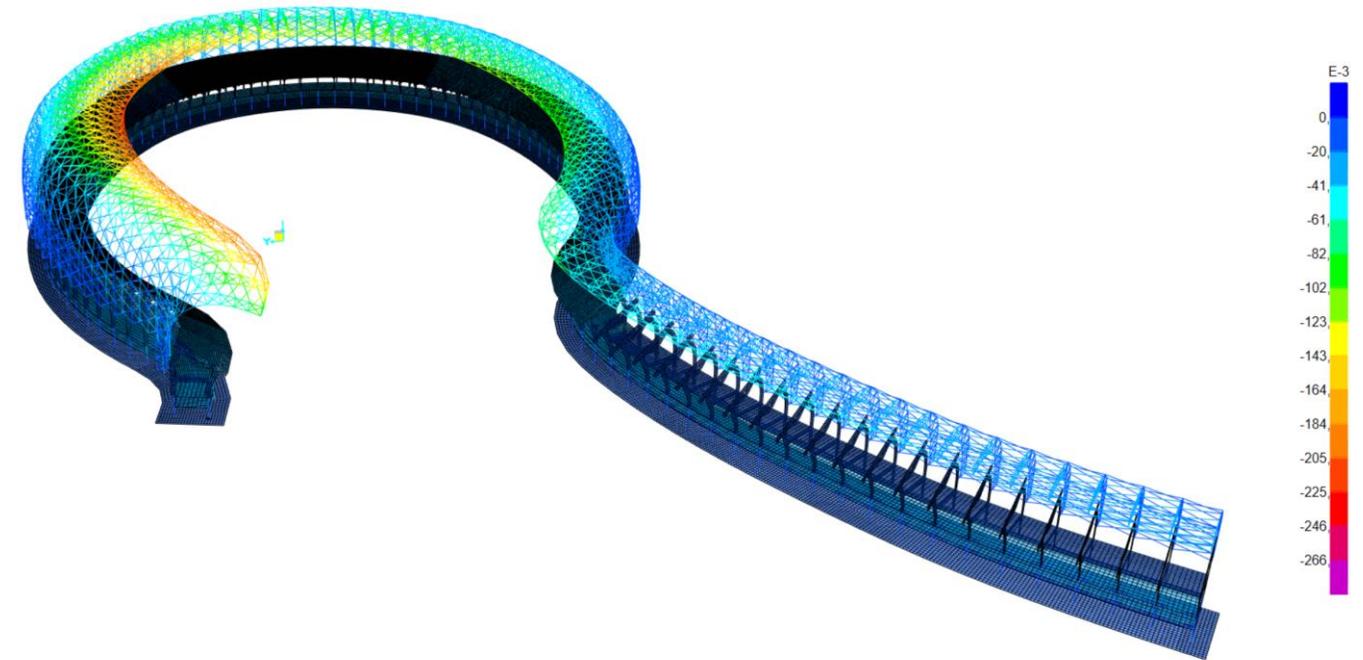
A continuación, se muestran las deformadas de la estructura para las combinaciones de acciones más características, es decir ELSqpu, ELSn, ELSvx+, ELSvx-, ELSvy+ y ELSvy-. Con objeto de establecer una comparativa entre las mismas, se ha impuesto, en la escala de colores del programa SAP 2000, la asignación del color magenta al movimiento vertical máximo de las tres combinaciones, es decir, 26'60 cm.

ELSqpu | Estado límite de servicio en la situación de cargas casi permanentes

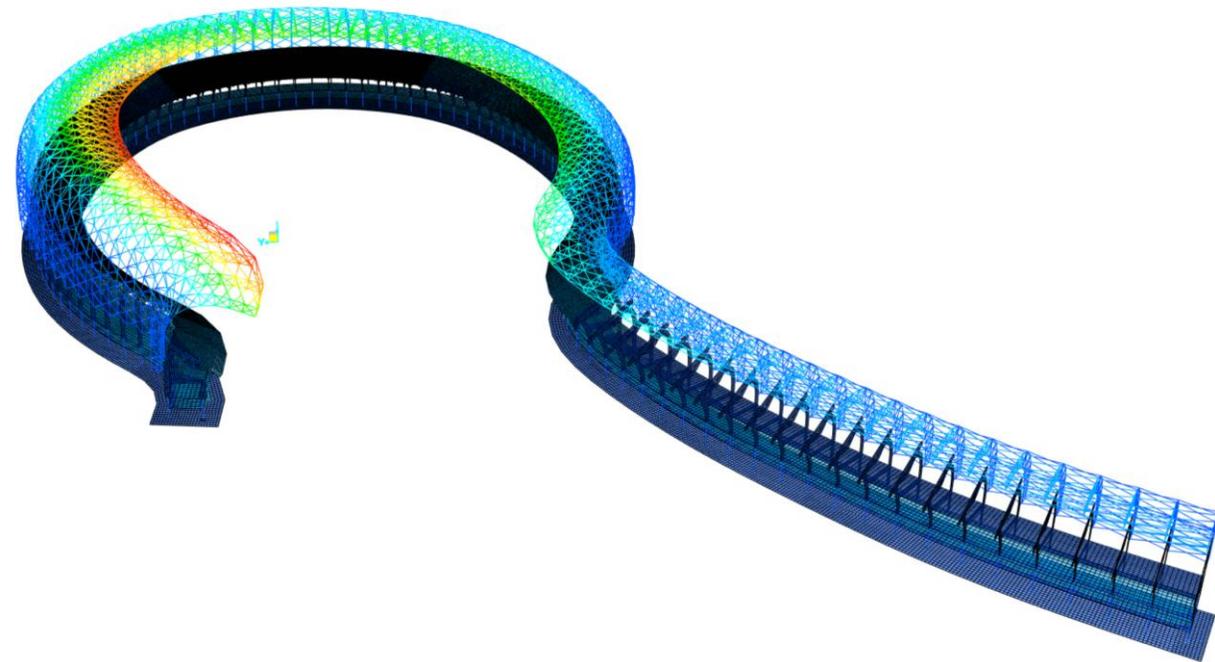
ELSqpu 1·G + 0·SCU



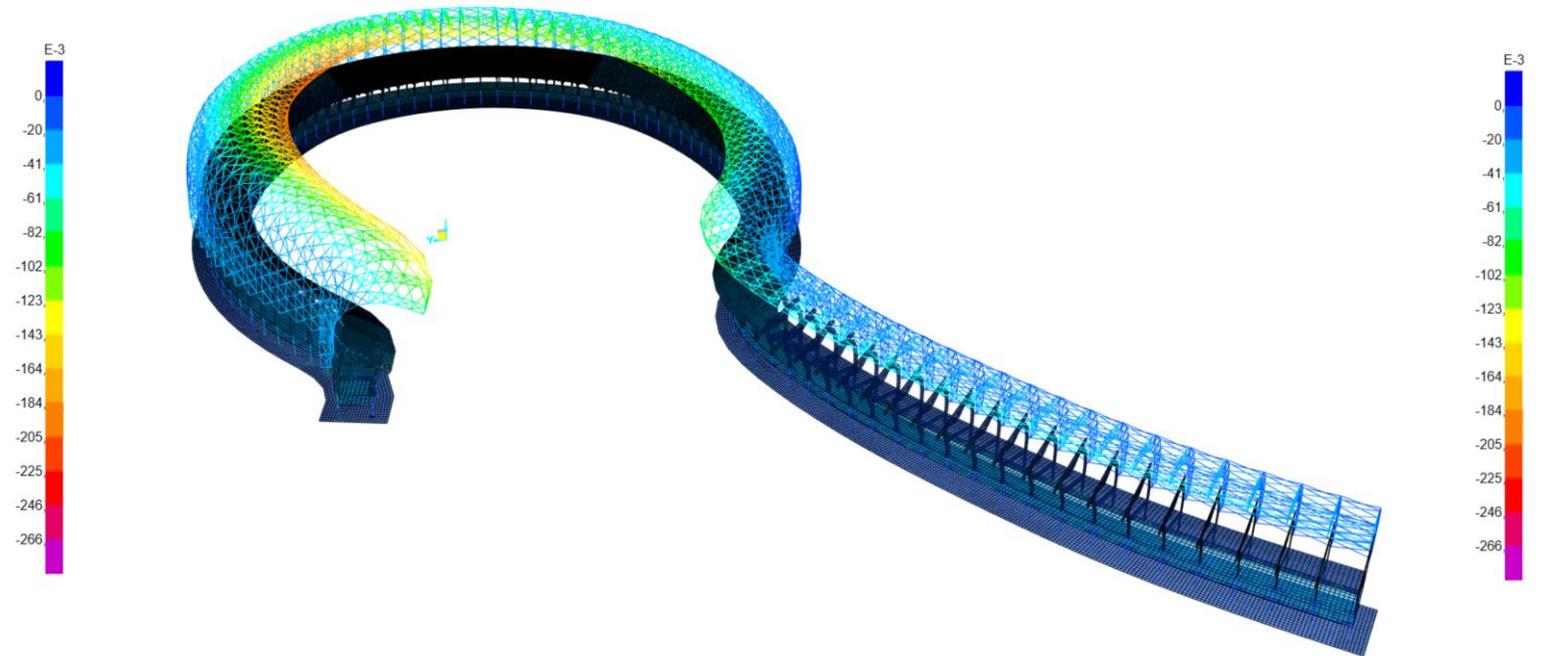
ELSn | Estado límite de servicio con variable principal de nieve

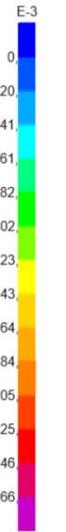
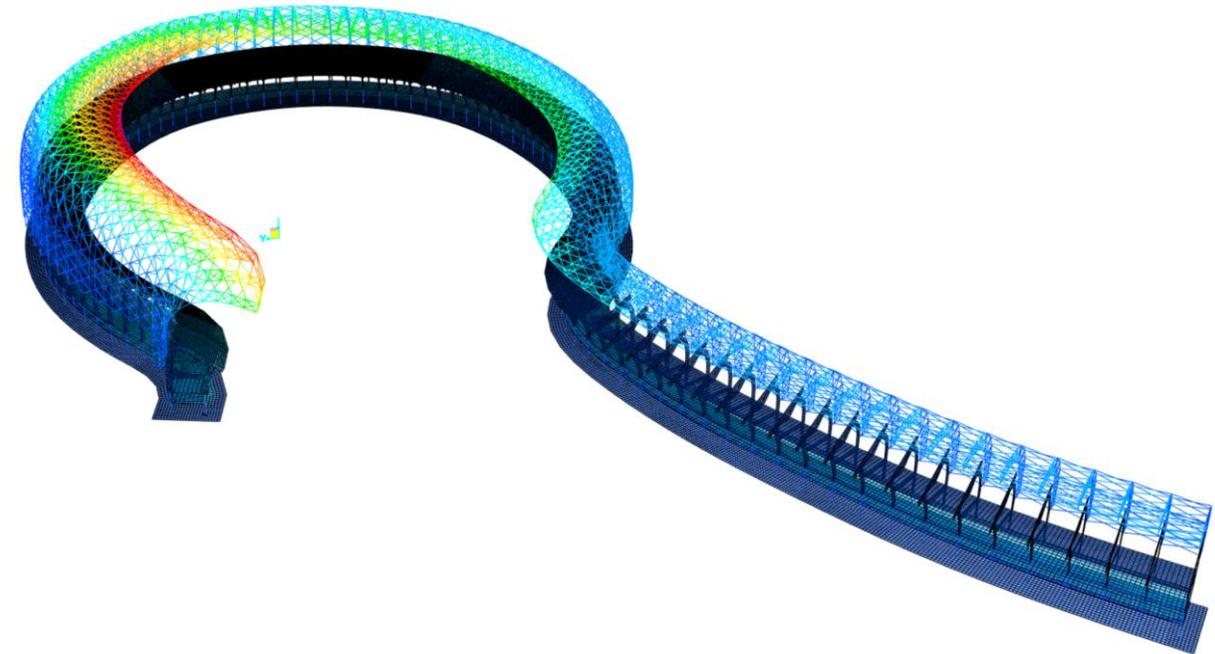
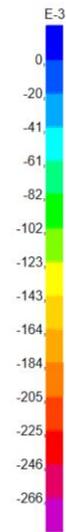
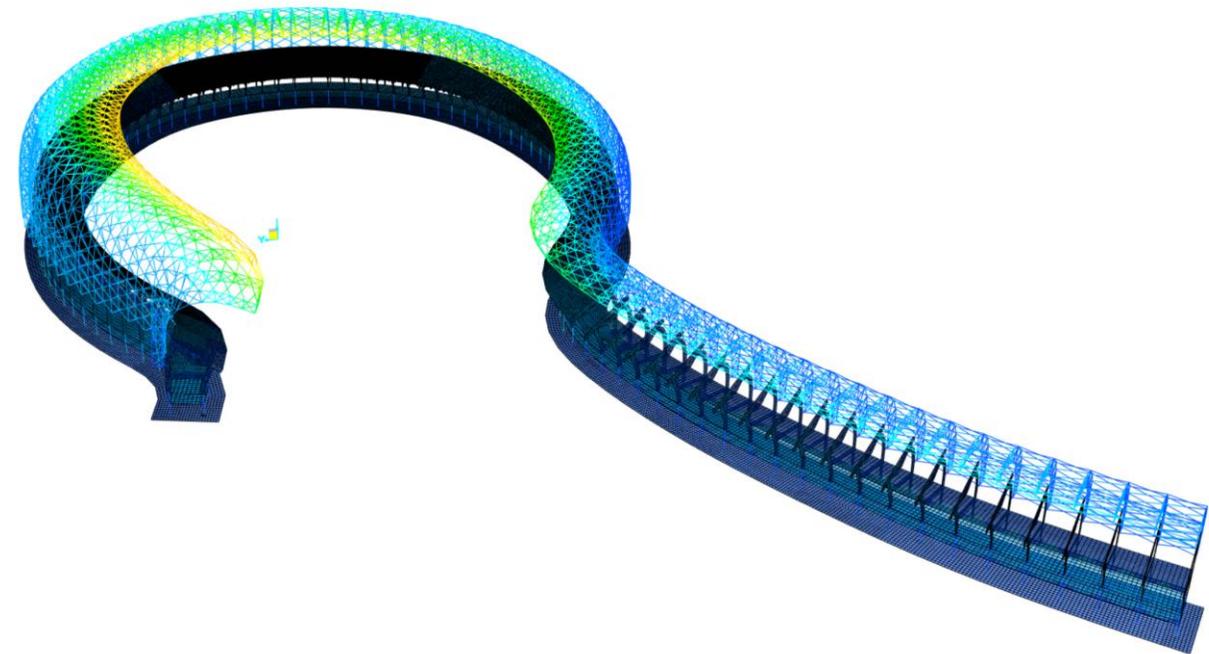


ELSVx+ | Estado límite de servicio con variable principal de viento en x+.



ELSVx- | Estado límite de servicio con variable principal de viento en y-.



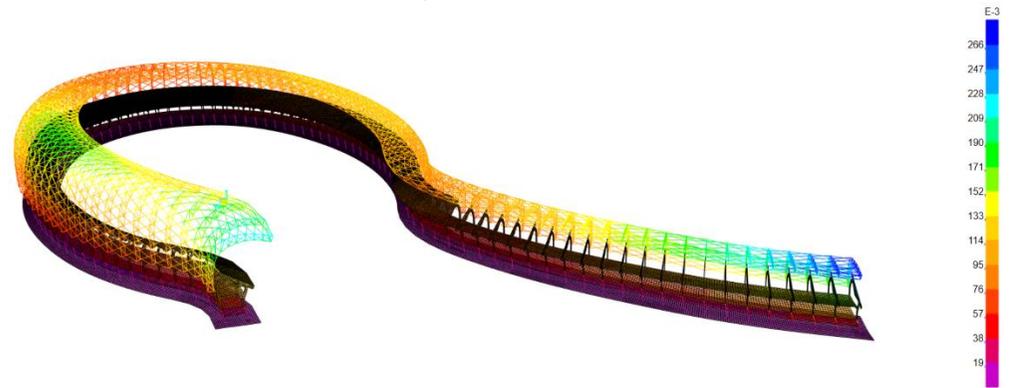


Veamos en esta ocasión los desplazamientos generados a causa de la hipótesis del **sismo**

Desplazamiento en X



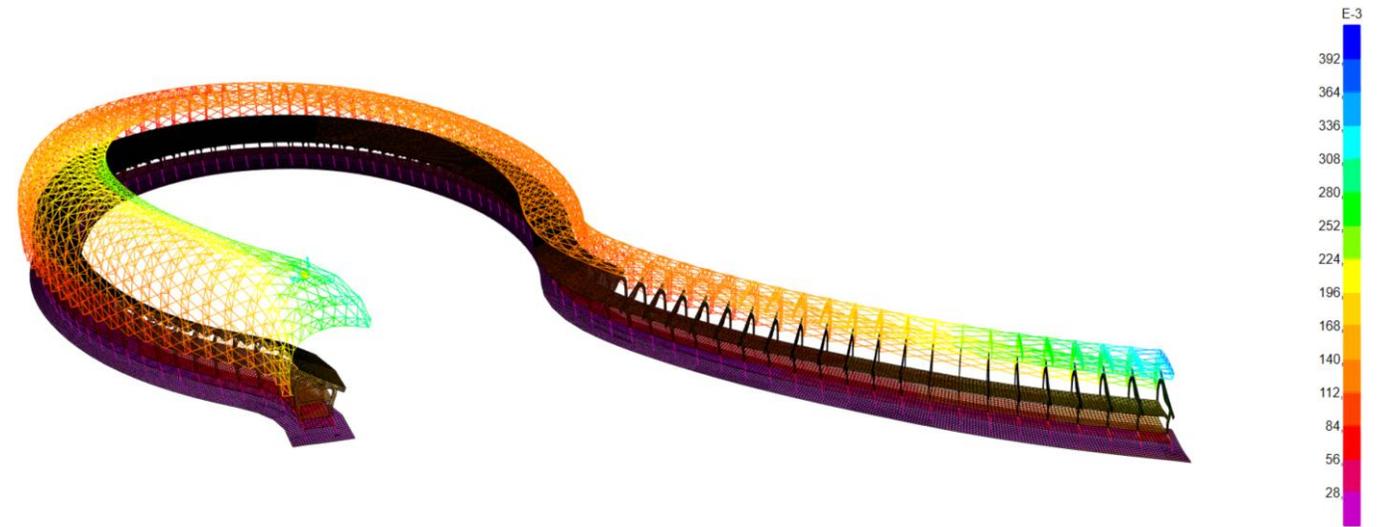
Desplazamiento en Y



Desplazamiento en Z

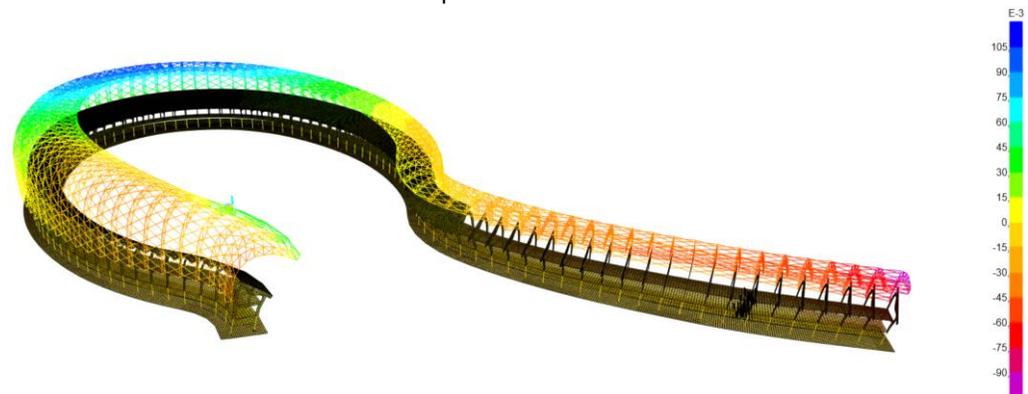


Resultante

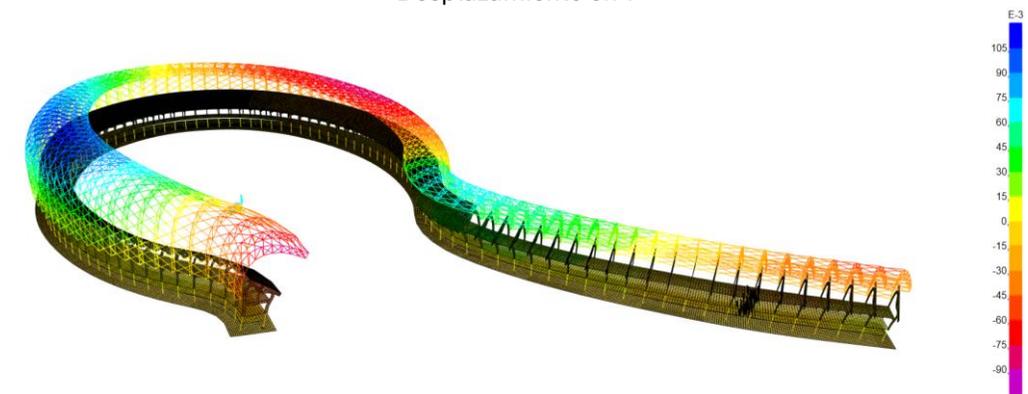


A continuacio en esta ocasi3n los desplazamientos generados a causa de la hip3tesis de **temperatura**

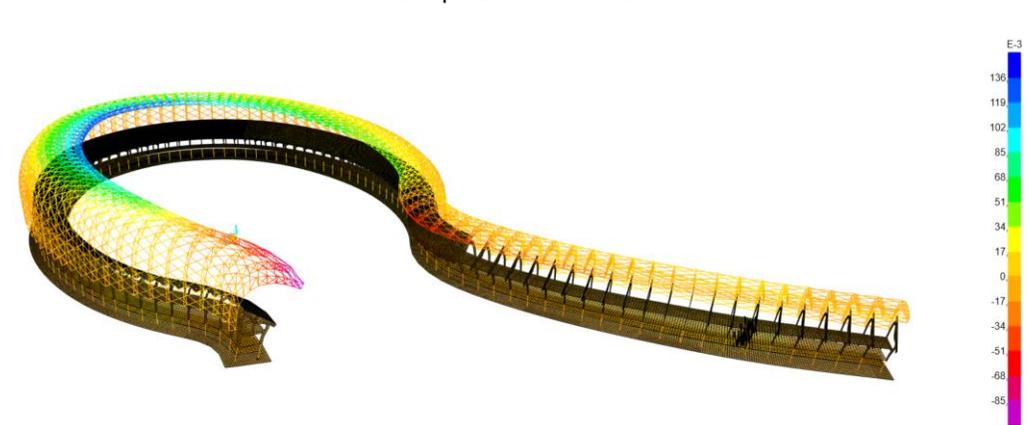
Desplazamiento en X



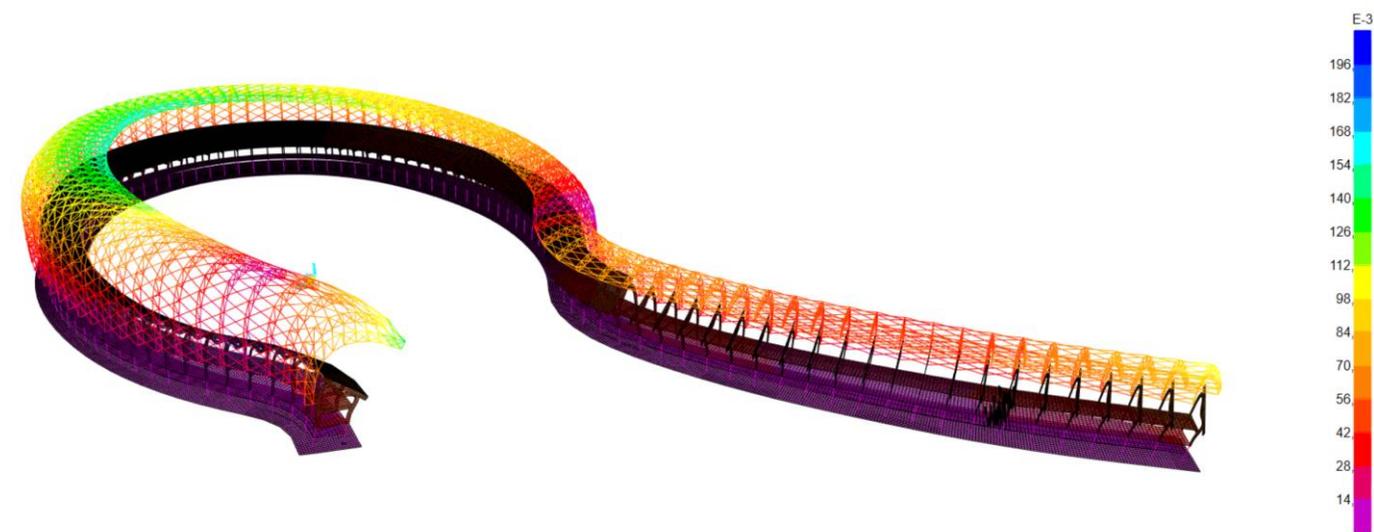
Desplazamiento en Y



Desplazamiento en Z



Resultante



A continuación, se muestran las deformadas con una escala de 100, es decir, 1 metro de desplazamiento en el grafico corresponde 1 mm en la realidad. Por un lado, a la izquierda, del conjunto del estadio, y por otro, a la derecha, únicamente de la cubierta del estadio.

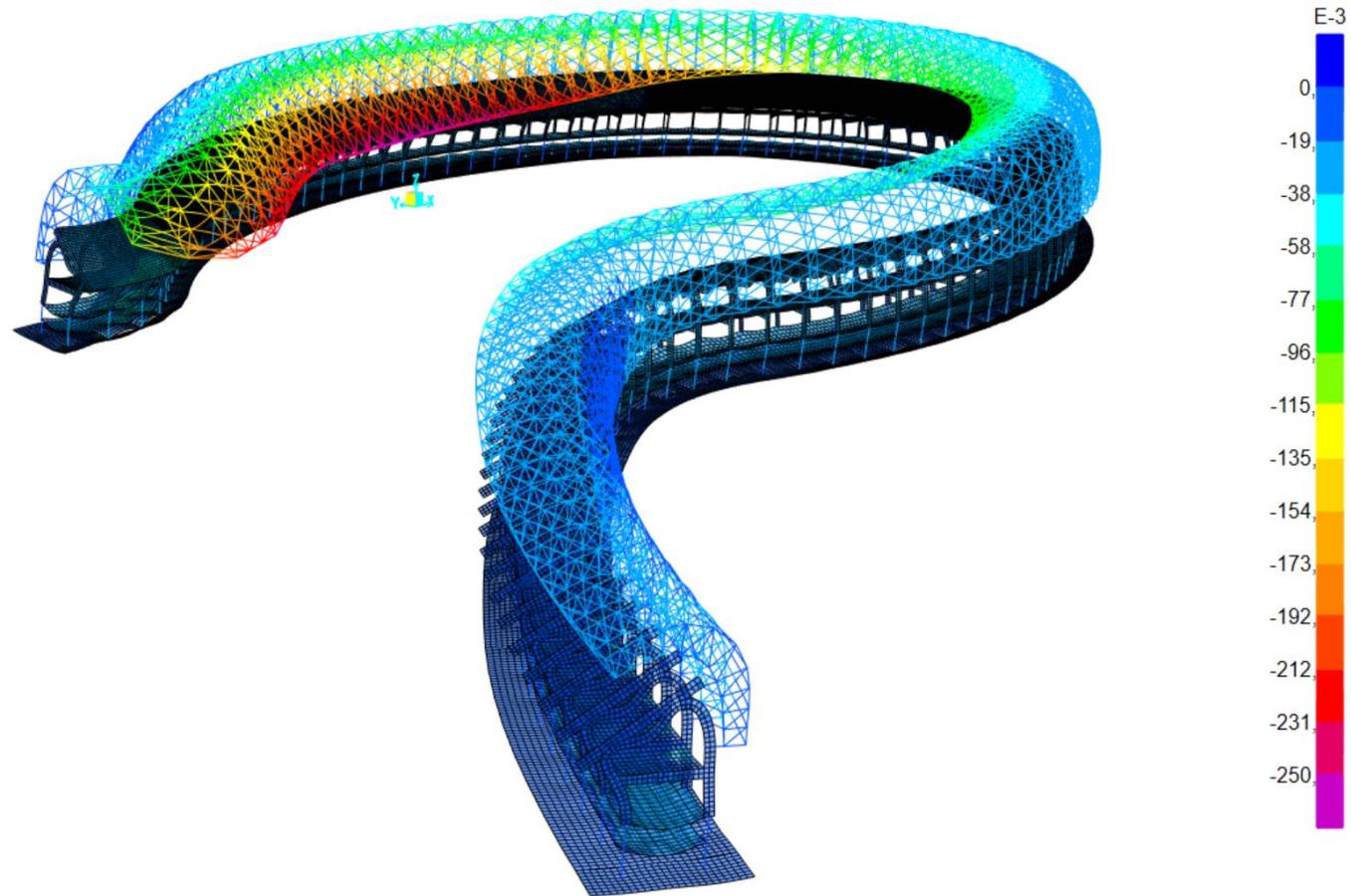


Ilustración 50. Deformada del conjunto del estadio a escala 100.

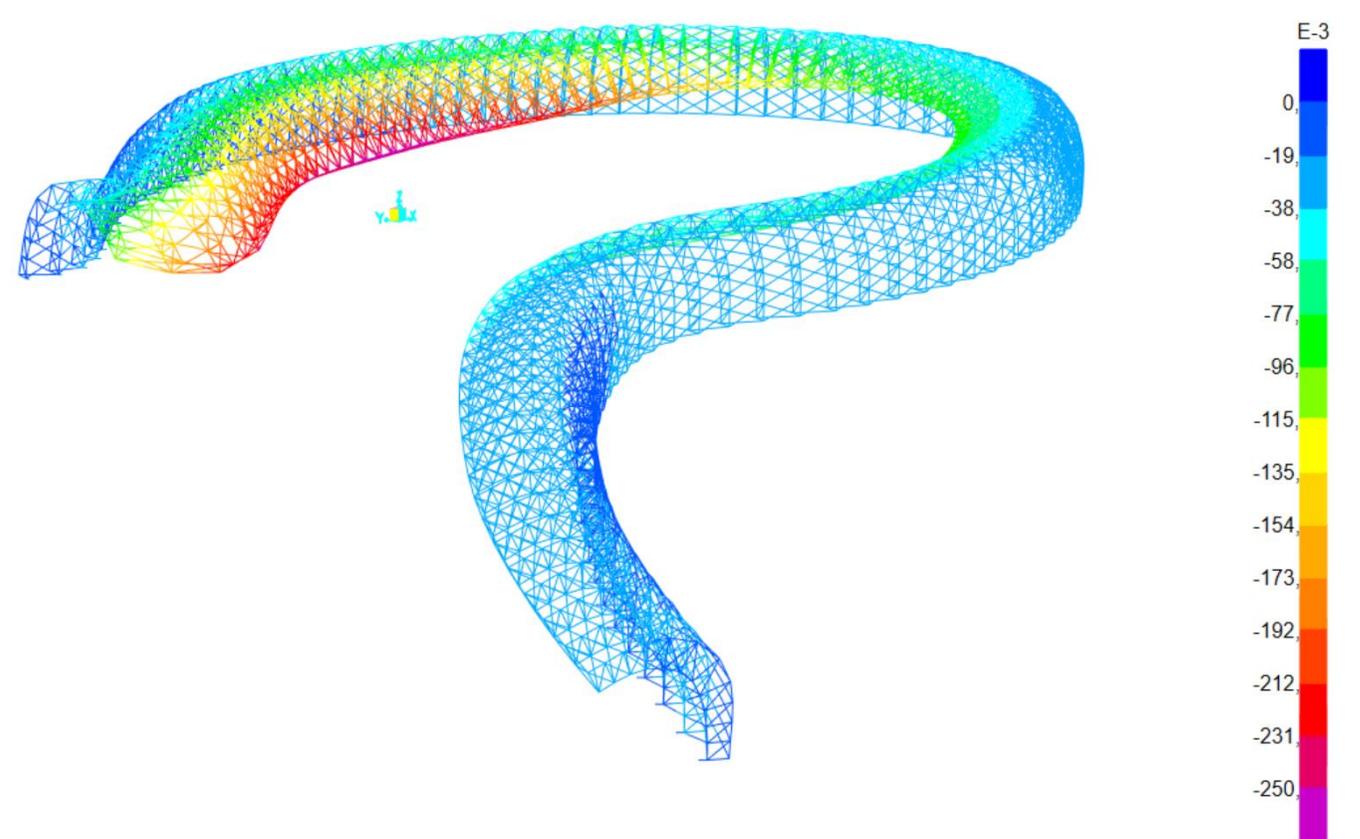


Ilustración 51. Deformada de la cercha a escala 100

A continuación, se muestran los esfuerzos en la combinación más desfavorable **ELS_{vy}**- de los diferentes elementos lineales que componen la cercha.

Esfuerzos **Axiles Tubos**

Axil máximo de tracción: **2 900 kN**

Axil máximo de compresión: **-4 600 kN**

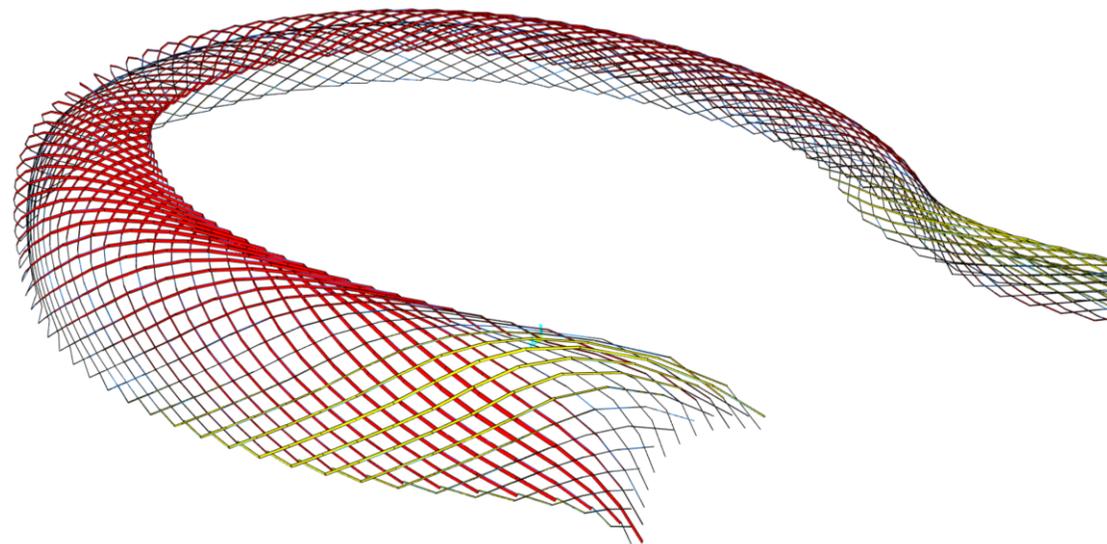
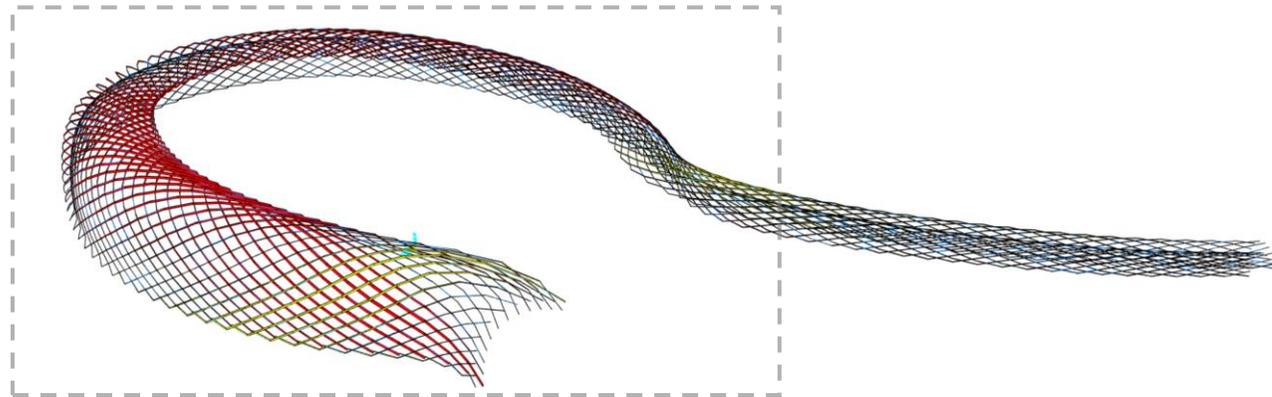
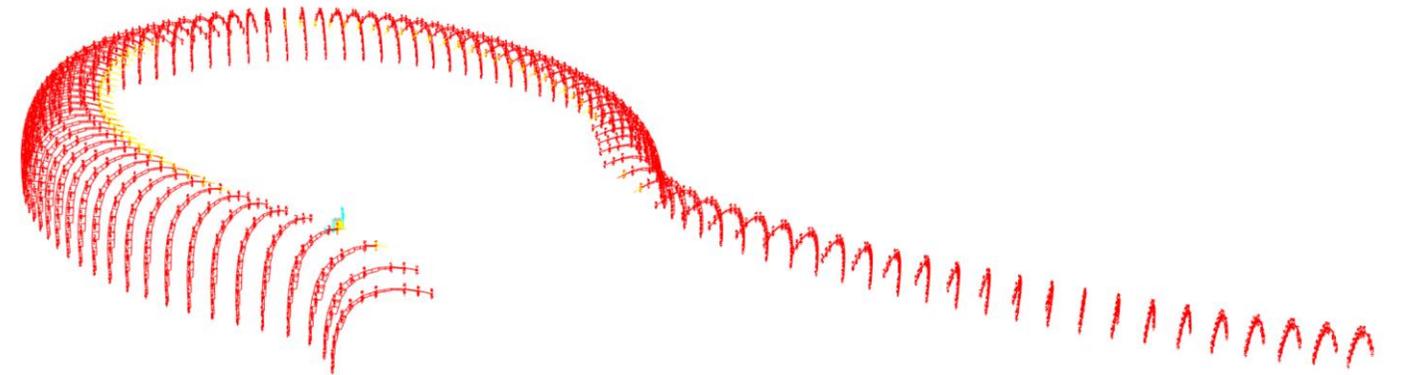


Ilustración 52. Diagramas de axiles con respecto a los tubos.

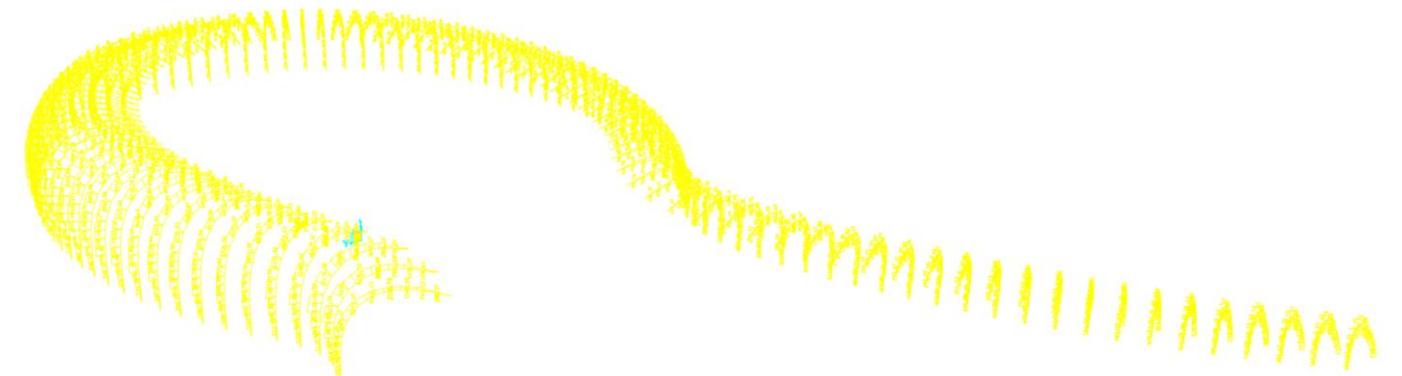
Axil máximo de tracción: **1 200 kN**

Axil máximo de compresión: **-13 800 kN**



Esfuerzos **Axiles** cordones superiores

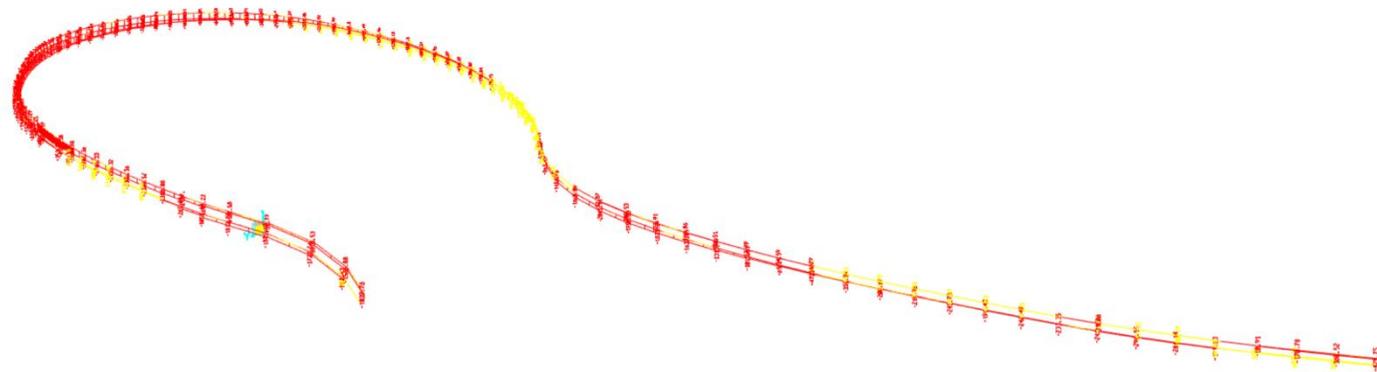
Axil máximo (tracción): **12 700 kN**



Esfuerzos **Axiles** *atado coronación*

Axil máximo de tracción: **2 100 kN**

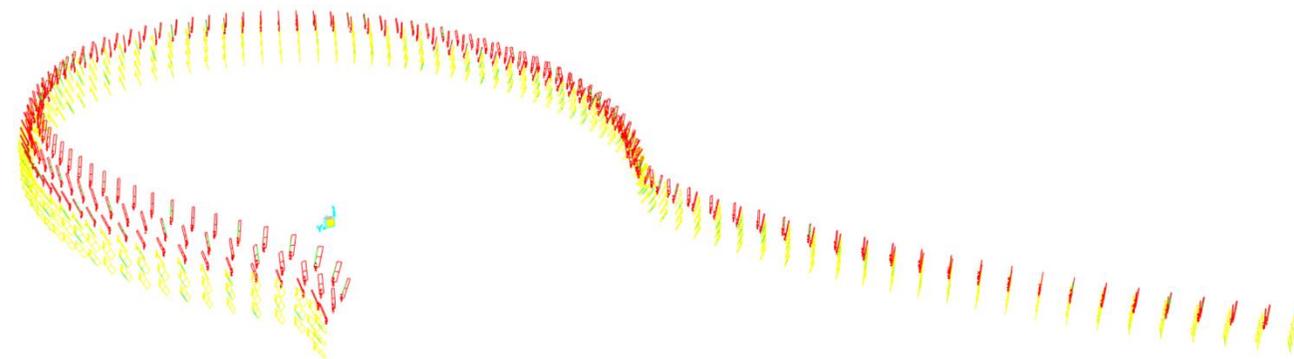
Axil máximo de compresión: **-9 200 kN**



Esfuerzos **Axiles** *diagonales*

Axil máximo de tracción: **3 600 kN**

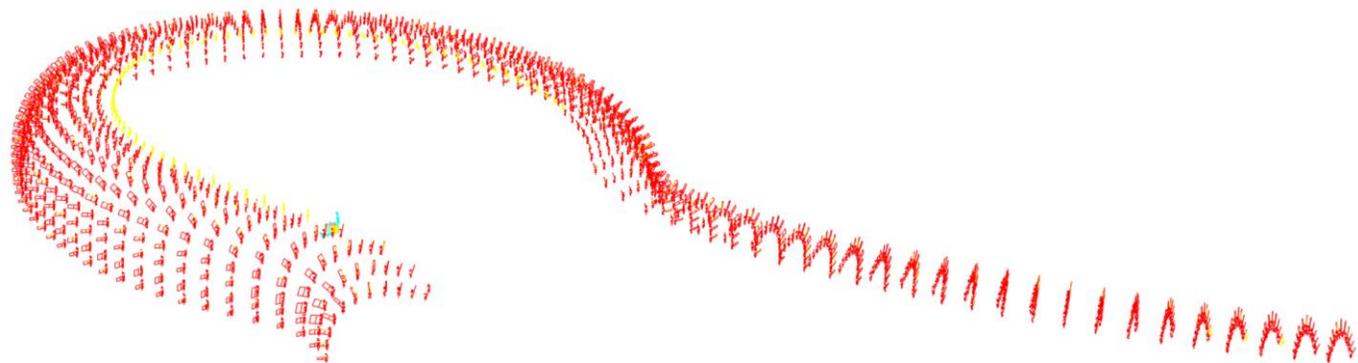
Axil máximo de compresión: **-3 200 kN**



Esfuerzos **Axiles** *montantes*

Axil máximo de tracción: **800 kN**

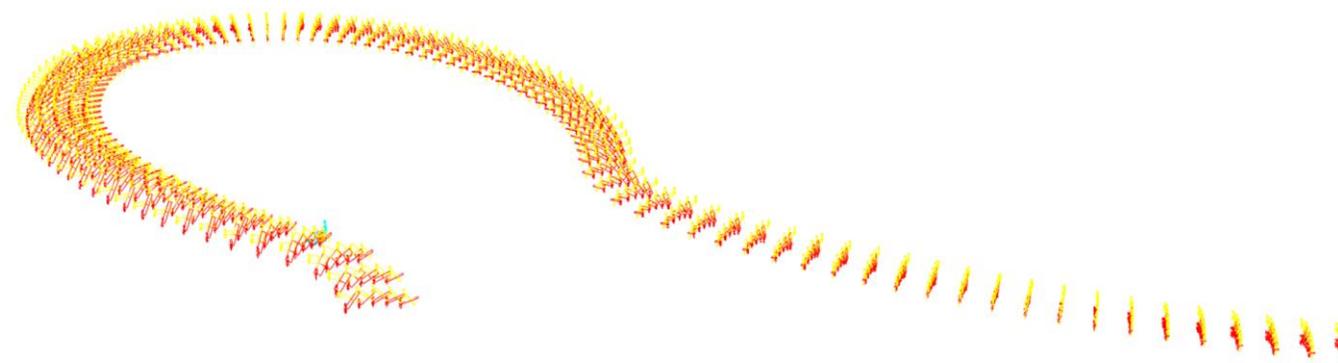
Axil máximo de compresión: **-2 800 kN**



Esfuerzos **Axiles** *tirantes*

Axil máximo de tracción: **1200 kN**

Axil máximo de compresión: **-1 500 kN**



6.2 | Comprobación de las flechas relativas

El **Documento Básico de Seguridad Estructural** establece en su apartado **4.3.3 Deformaciones** los distintos casos por los que se consideran las flechas y los desplomes de un edificio. Dichas flechas se calculan dividiendo la diferencia de desplazamientos entre dos puntos cualesquiera 1 y 2 de la estructura, y dividiéndola por el doble de la distancia D entre dichos puntos en proyección horizontal.

$$\Delta dz = \Delta dz_2 - \Delta dz_1$$

$$f = \frac{\Delta dz}{2 \cdot D} < \frac{1}{k} \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{2 \cdot D}{\Delta dz} > k \text{ (en cada caso)}$$

El resultado de esta flecha relativa deberá ser menor a los límites establecidos por la norma (inversa de k) dependiendo del caso.

Integridad de los elementos constructivos → k = 500 → ELSintcon

La deformación excesiva puede resultar en el colapso de algunos de los elementos colocados a posteriori, como pueden falsos techos o tabiques.

Confort de los usuarios → k = 350 → SCU

Esta consideración considera las posibles deformaciones del edificio que impidan su correcto uso. Solo se tienen en cuenta las acciones de corta duración, en nuestro caso corresponde a la combinación de sobrecarga de uso (SCU).

Apariencia de la obra → k = 300 → ELSqpu

Según la normativa, la estructura no solo tiene que resistir, sino que también tiene que parecer que resiste, es decir, que una curvatura excesiva no altere la sensación de seguridad ni resultar desagradable para los usuarios al hacer uso del edificio.

6.2.1 | Estructura de acero

El material del que está hecha la cercha del estadio es de acero, y al tratarse de una cubierta de un estadio de estas características, se asume el desplazamiento que tenga, por lo que no será necesario cumplir los criterios de **integridad de los elementos constructivos** ni en el de **confort de los usuarios**, sin embargo, veremos qué ocurre con el criterio de **aparición de la obra**.

Integridad de los elementos constructivos

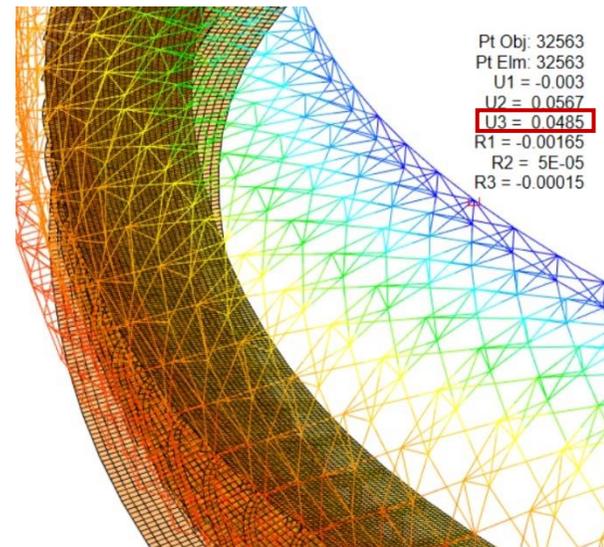
Sería necesario considerar la flecha que se produce una vez construidos los paneles solares (toda la deformación previa ya producida no le afectaría). Es por ello, que solo habría que considerar la deformación por uso, o por viento, pero sin contar la deformación permanente previa. Es decir, en vez de mirar ELS_v (que incluye DEAD y CMP), solo SCV_v.

Como podemos observar en los diagramas de la derecha, la más desfavorable será la deformación por viento. Teniendo en cuenta que $k = 500$, nos quedaría:

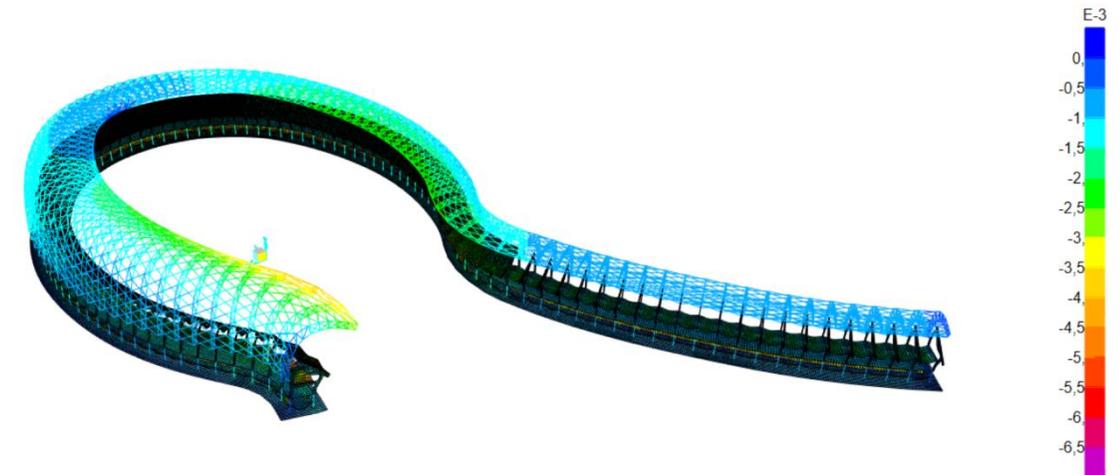
$$\begin{aligned} \Delta dz_2 &= 4.85 \text{ cm} \\ \Delta dz_1 &= 1,85 \text{ cm} \\ \Delta dz &= 25,57 \text{ cm} \\ D &= 36,05 \text{ m} \end{aligned}$$

$$f < \frac{1}{300} \rightarrow f = \frac{2 \cdot 36,05 \cdot 10^3}{3 \cdot 10} = 2403,33 < 300$$

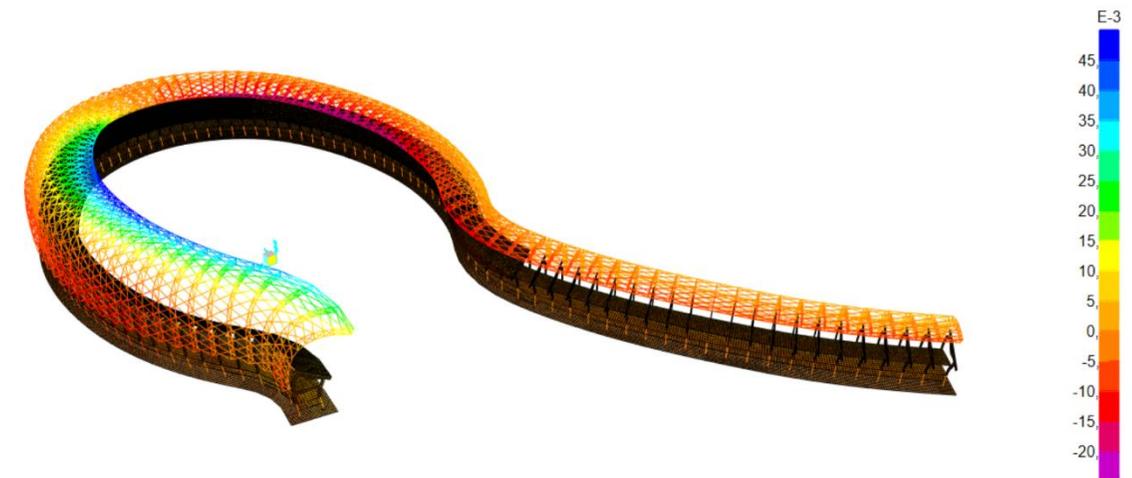
Cumple a integridad constructiva holgadamente



Deformación por uso



Deformación por viento en y



Apariencia de la obra

Debido a la propia forma curva de la cubierta, no tiene mucho sentido hablar de deformación por curvatura pues esta debería ser exageradamente grande para poder percibirse como un peligro para los usuarios. No obstante, se procederá al cálculo para ver si esta es exagerada.

Al tratarse de acero, las deformaciones serán elásticas, y las flechas serán instantáneas. La combinación más desfavorable será la de ELSvy-, donde tiene en cuenta la combinación de cargas permanentes y la del viento.

Flecha relativa en el extremo de la cercha.

$$\Delta dz2 = 26,6 \text{ cm}$$

$$\Delta dz1 = 1,07 \text{ cm}$$

$$\Delta dz = 25,57 \text{ cm}$$

$$D = 36,05 \text{ m}$$

$$f < \frac{1}{300} \rightarrow f = \frac{2 \cdot 36,05 \cdot 10^3}{25,57 \cdot 10} = 281,97 < 300$$

Como podemos ver, el cálculo no cumple por muy poco la normativa española, aunque como ya se ha señalado, no tiene una razón de ser, pues no se puede hablar de disconfort en la apariencia de la obra por parte de los usuarios como tal en una cubierta curva como esta, siendo un margen tan pequeño.

Cabe destacar que, en edificios singulares como este, se suele hacer un estudio en un túnel de viento para optimizar las cargas de viento, que quizás en nuestro caso sean excesivas las aplicadas según CTE.

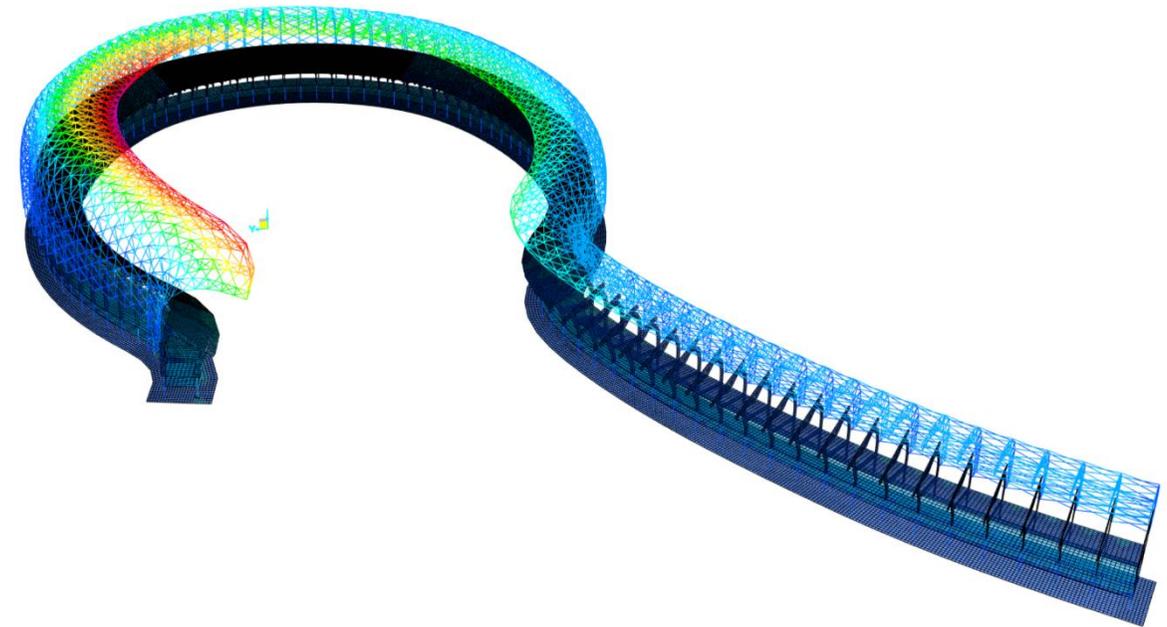


Ilustración 53. Esquema de deformación correspondiente a la combinación más desfavorable en ELS. Escala en mm.

6.3 | Comprobación de los desplomes

Los desplazamientos horizontales de la estructura se comprueban de acuerdo con el **Documento Básico de Seguridad Estructural** en su apartado **4.3.3.2 Desplazamientos horizontales**, uno de integridad constructiva y otro de apariencia de la obra, de manera análoga al caso de las flechas relativas.

Siendo h la altura del edificio y dx el desplazamiento horizontal, mediremos los desplomes de la siguiente forma:

$$\Delta dx < \frac{h}{k} \rightarrow \frac{h}{\Delta dx} > k$$

El factor k depende de la condición a considerar:

Integridad de los elementos constructivos $\rightarrow k = 500 \rightarrow \text{ELSintcon}$

La deformación excesiva puede resultar en el colapso de algunos de los elementos colocados a posteriori, como pueden ser falsos techos o tabiques.

Confort de los usuarios $\rightarrow k = 350 \rightarrow \text{SCU}$

Esta consideración considera las posibles deformaciones del edificio que impidan su correcto uso. Solo se tienen en cuenta las acciones de corta duración, en nuestro caso corresponde a la combinación de sobrecarga de uso (SCU).

Apariencia de la obra $\rightarrow k = 250 \rightarrow \text{ELSqupu}$

Según la normativa, la estructura no solo tiene que resistir, sino que también tiene que parecer que resiste, es decir, que una curvatura excesiva no altere la sensación de seguridad ni resultar desagradable para los usuarios al hacer uso del edificio.

Se han realizado las comprobaciones en la parte más perjudicada del estadio, es decir, en la cercha que cubre el palco presidencial del estadio.

La condición a comprobar se hará considerando la total como local con un factor $k = 250$.

Desplome total

$$\Delta d = +11.3\text{mm}$$

$$h = 35,09\text{mm}$$

$$\Delta dx < \frac{h}{k} \rightarrow \frac{h}{\Delta dx} > k$$

$$\Delta dx < \frac{h}{k} \rightarrow \frac{35,09 \cdot 10^3}{11.3} = 3105,31 > 250$$

Se puede observar que al igual que en la limitación **apariciencia de la obra** en flechas relativas, se cumple holgadamente con la limitación debido a que la carga de viento, al igual que la de uso, es poco relevante con respecto al peso que aportan tanto la parte de hormigón como la de acero del estadio.



Ilustración 54. Deformada con respecto al eje Y en la combinación más desfavorable (ELSvy-). Escala en mm.

6.4 | Análisis de resistencia

Una consideración importante que se ha tenido a la hora de realizar el cálculo es que se ha considerado el edificio **traslacional**. En caso de justificar la intraslacionalidad del edificio, se podría cambiar la condición desde el apartado **Design > Steel Frame Design > View Revise preferences** en la pestaña “*Consider delta*” marcándola como “Yes”. Debido a la dificultad que conlleva realizar dichas comprobaciones, se ha optado considerar el edificio como traslacional, estando del lado de la seguridad.

Las comprobaciones que se hacen en ELU corresponden a las que hacemos al modelo frente a la rotura.

Para la comprobación a resistencia de los elementos lineales, se ha llevado a cabo la comprobación que hace SAP 2000 de acuerdo con el **Eurocodigo 3**. Como ya se comentó anteriormente, al haber empleado perfiles de una norma diferente a la empleada en el edificio en la realidad (ASTM), se ha tenido que hacer la comprobación de secciones mediante la herramienta autoselección de SAP 2000. Gracias a esta, se puede asignar un abanico de posibles perfiles a un elemento en concreto, mediante un cálculo iterativo. Debido a que cambian rigidez y cargas en función de la sección escogida, el programa asigna a cada elemento el perfil más pequeño del abanico de posibilidades ofrecido.

De esta forma, como podemos observar en las figuras de la derecha, pasamos de tener 1780 barras que no cumplían, luego 167, a continuación 73, hasta finalmente encontrar un modelo donde todos los perfiles asignados cumplían.

Finalmente, se asigna a cada grupo de elementos (cordón inferior, cordón superior, diagonales...) una misma sección en función del elemento más desfavorable, es decir, aquel que posee una saturación más grande con un máximo de 1 (el 1 correspondería a un aprovechamiento máximo).

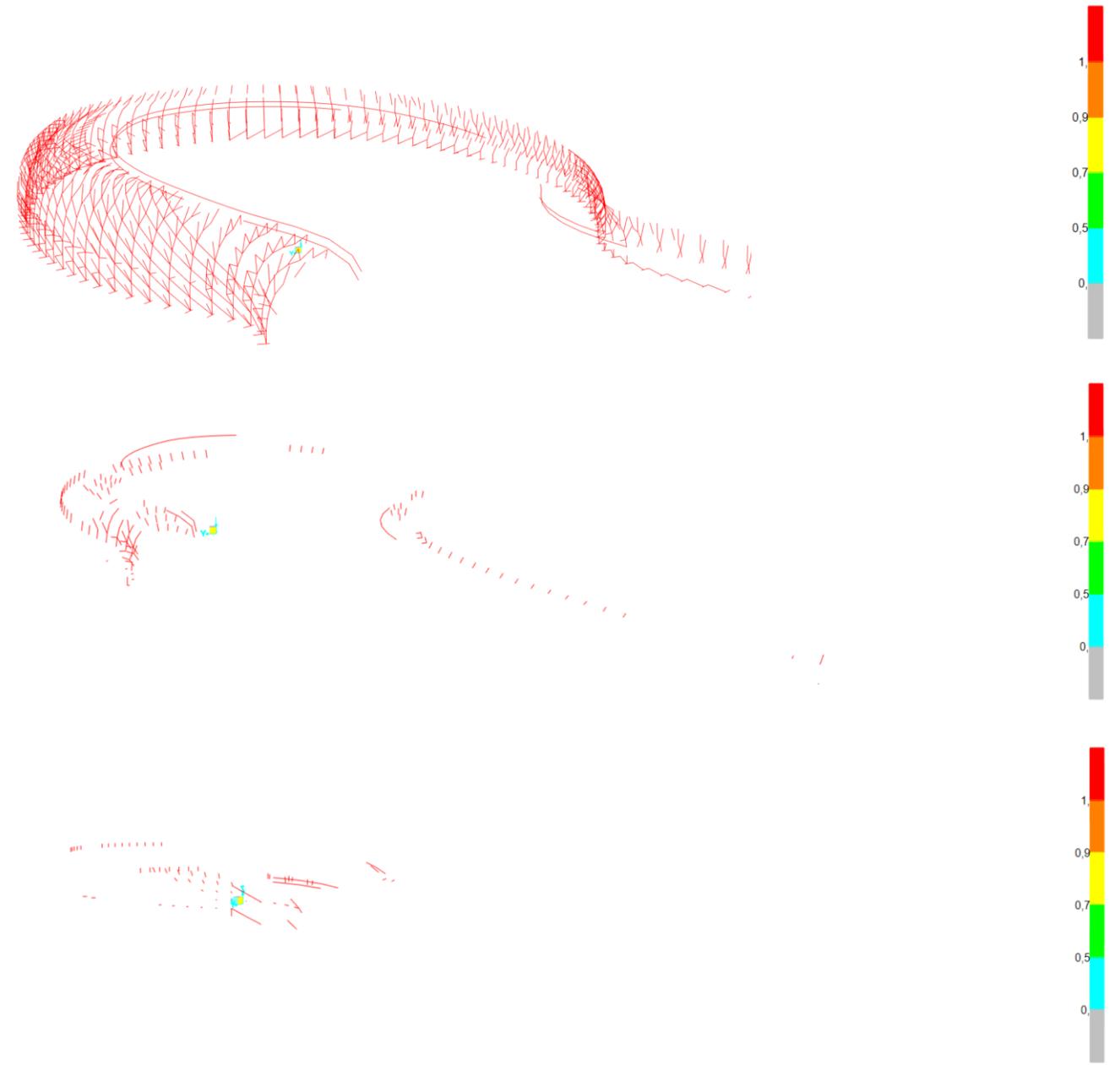
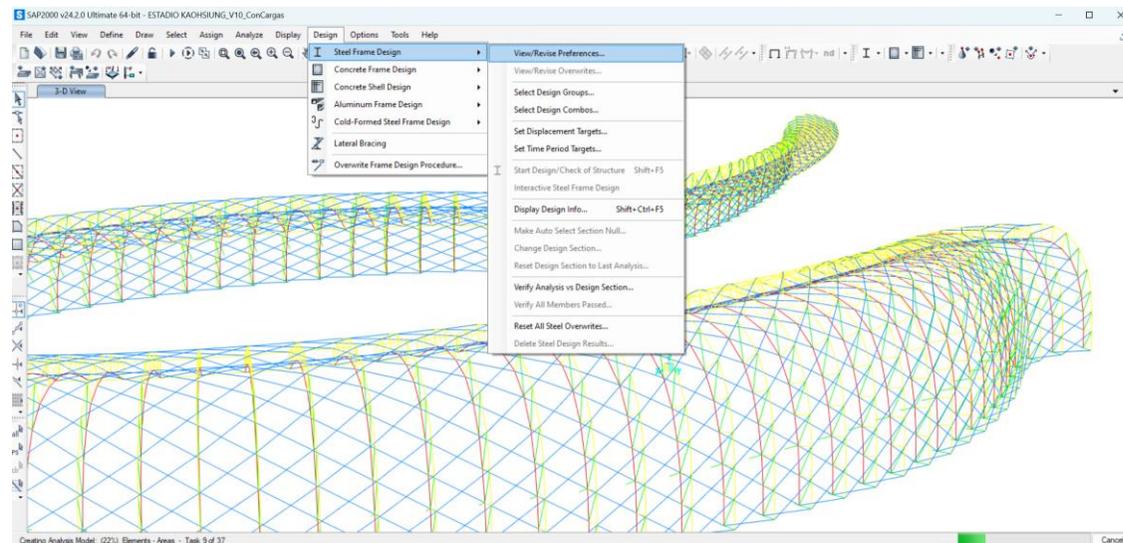


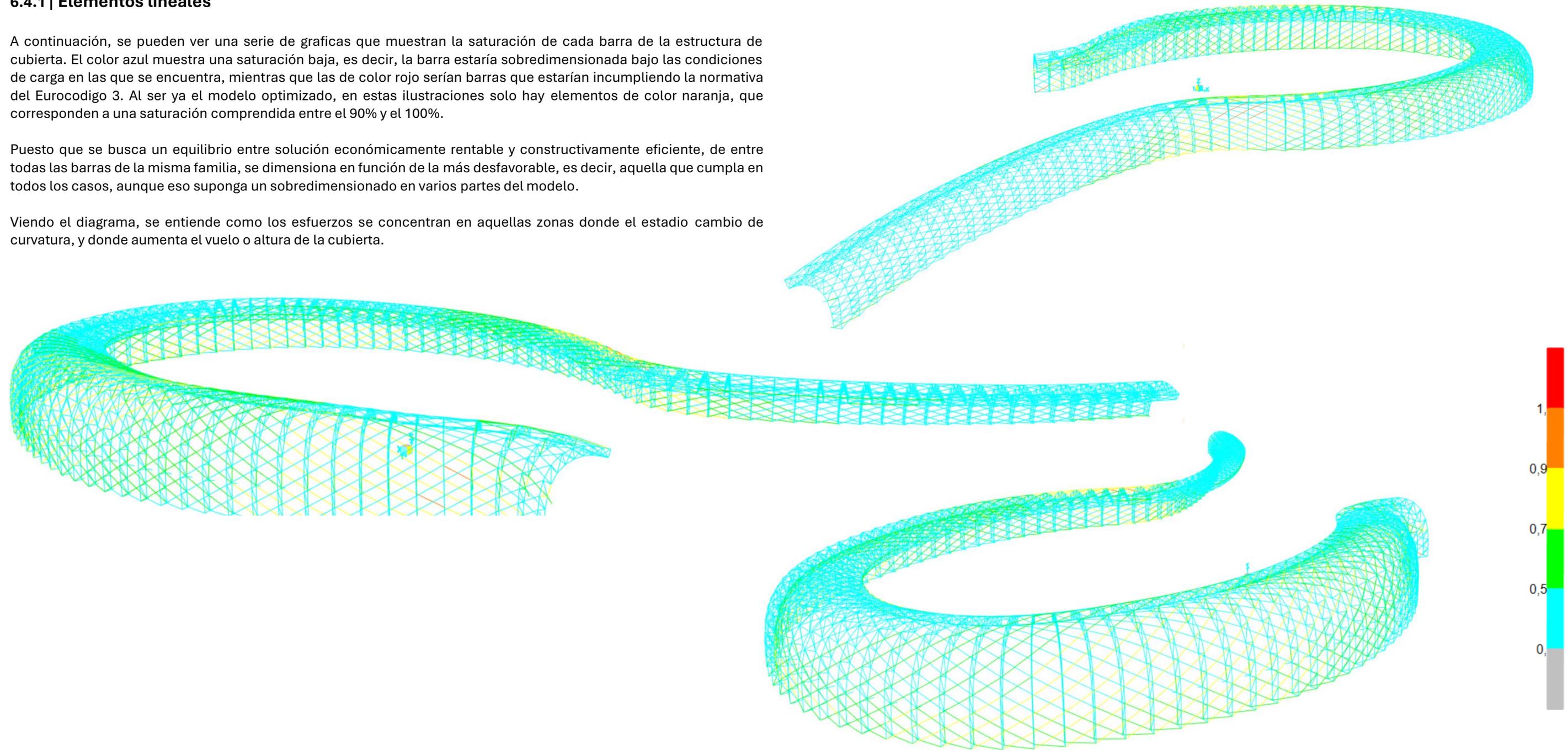
Ilustración 55. Secuencia iterativa de autoselección de secciones en SAP 2000.

6.4.1 | Elementos lineales

A continuación, se pueden ver una serie de graficas que muestran la saturación de cada barra de la estructura de cubierta. El color azul muestra una saturación baja, es decir, la barra estaría sobredimensionada bajo las condiciones de carga en las que se encuentra, mientras que las de color rojo serían barras que estarían incumpliendo la normativa del Eurocodigo 3. Al ser ya el modelo optimizado, en estas ilustraciones solo hay elementos de color naranja, que corresponden a una saturación comprendida entre el 90% y el 100%.

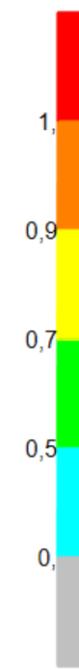
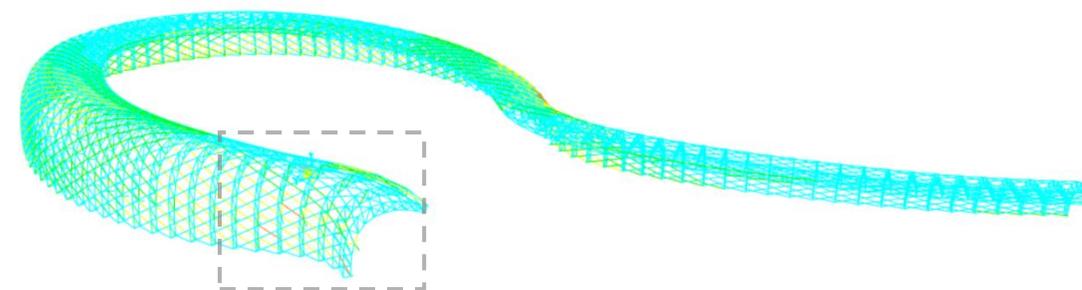
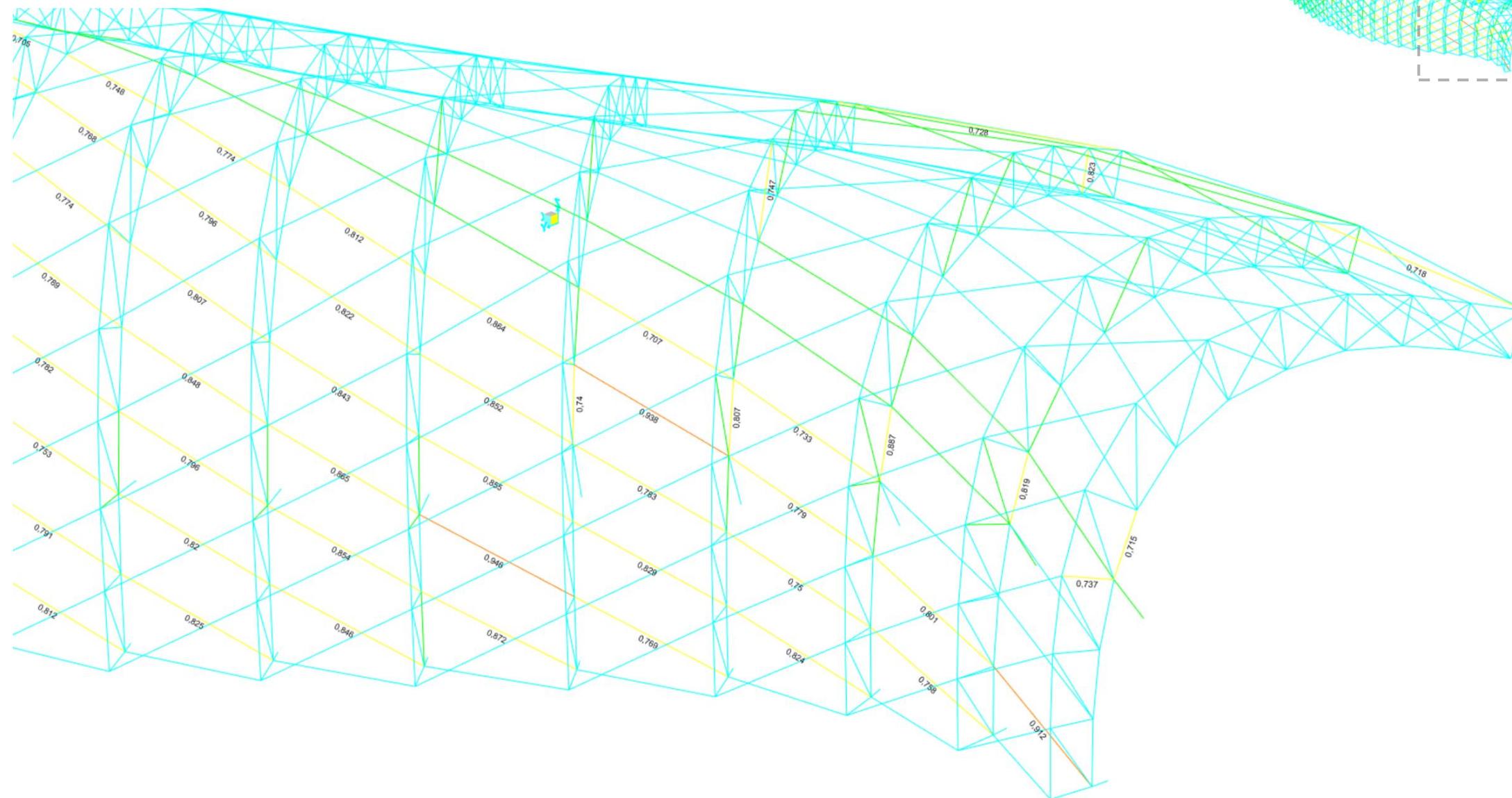
Puesto que se busca un equilibrio entre solución económicamente rentable y constructivamente eficiente, de entre todas las barras de la misma familia, se dimensiona en función de la más desfavorable, es decir, aquella que cumpla en todos los casos, aunque eso suponga un sobredimensionado en varios partes del modelo.

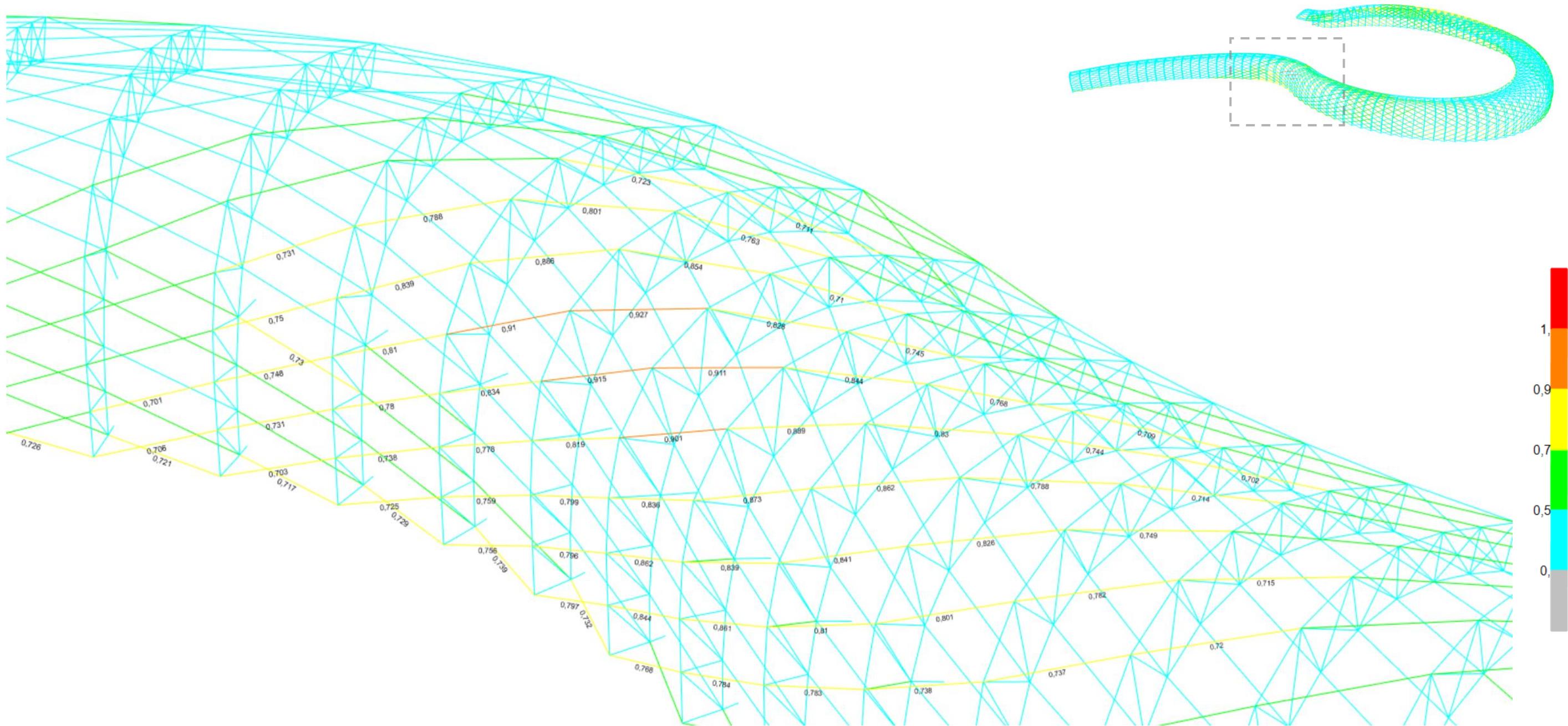
Viendo el diagrama, se entiende como los esfuerzos se concentran en aquellas zonas donde el estadio cambio de curvatura, y donde aumenta el vuelo o altura de la cubierta.



En este zoom se muestra la barra perteneciente a la familia de “Tubos” que estaría más saturada con la sección empleada, en este caso, sección circular de $\varnothing 425 \times 11$ de acero S450.

De igual modo se ha procedido con las barras pertenecientes al cordón inferior, cordón superior, diagonales, tirantes, y atado de coronación.





Dando clic derecho con el ratón en cualquier elemento lineal, podemos obtener los datos de solicitaciones y de resistencias en los que se encuentra dicho elemento.

En este caso, por ejemplo, se adjuntan las tablas para el tubo más saturado (94,6%), situado en la zona de palco presidencial.

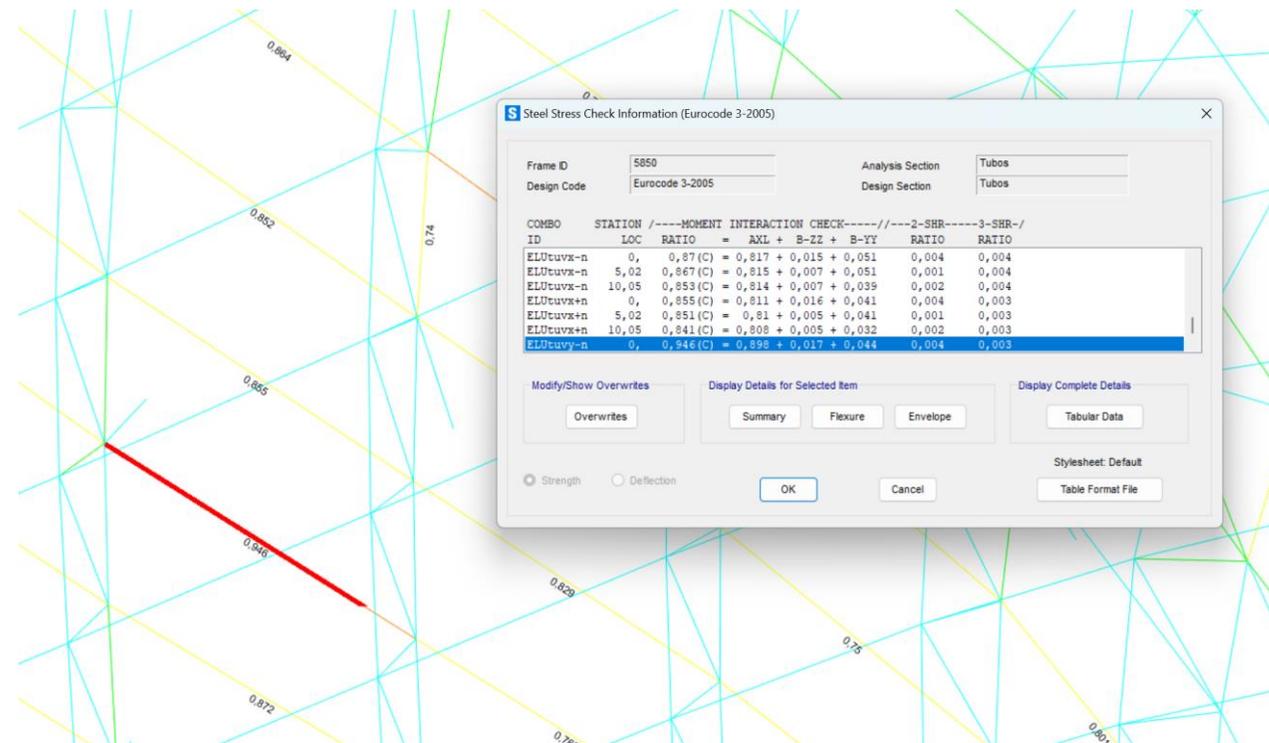


Figura 6.2. Cuadro de comprobación del tubo más saturado en SAP 2000.

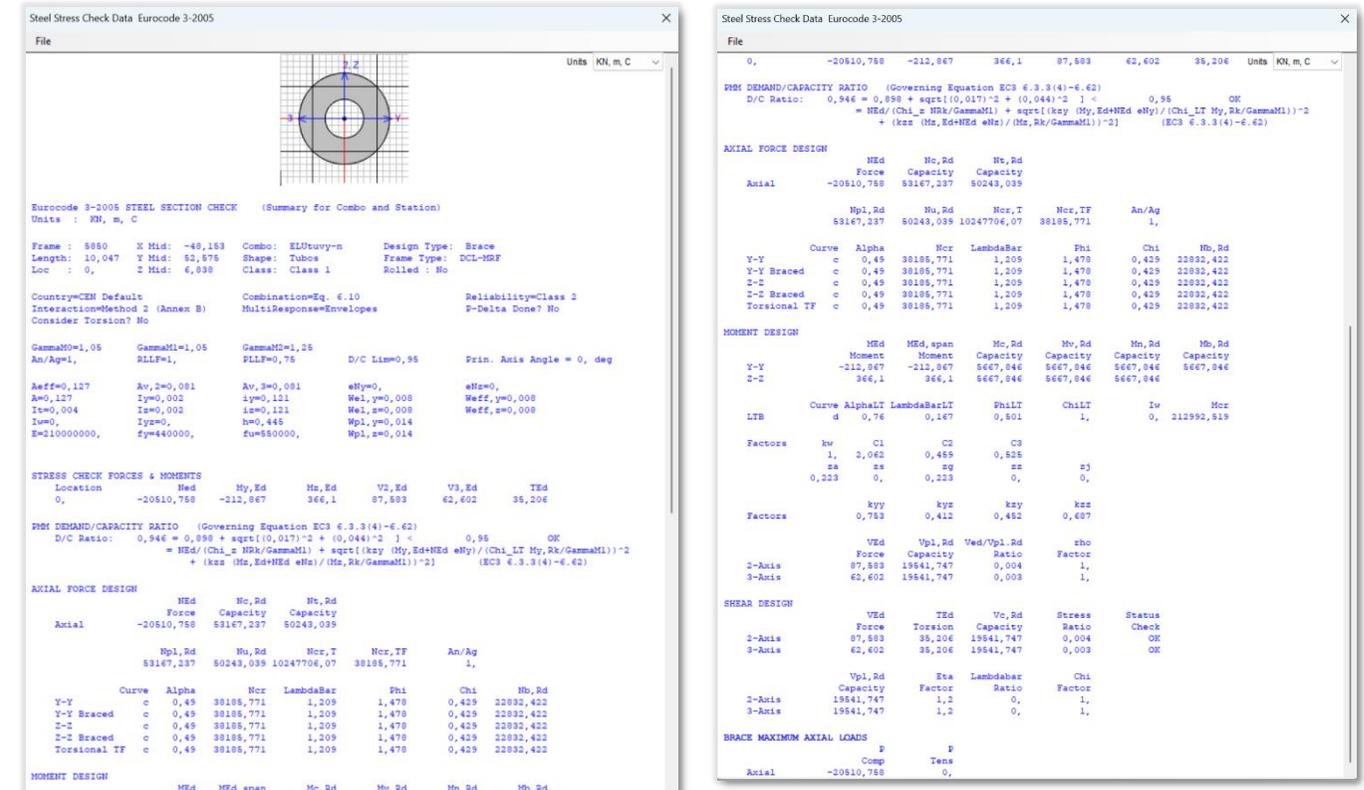


Figura 6.3. Tabla de datos de comprobación de la barra de estudio en SAP 2000.

7.1 | Sobre el estudio del edificio, la modelización y los resultados

Una vez mostrados los resultados obtenidos de análisis y diseño estructural de los elementos del Estadio Nacional de Kaohsiung, se pueden realizar una serie de conclusiones.

Sobre el edificio

Se trata de una obra muy interesante proyectada por uno de los maestros de la arquitectura de nuestros tiempos, tanto por composición y estética como por la complejidad de ejecución constructiva y estructural. Resalta la importancia del uso de las nuevas herramientas tecnológicas incluso ya por 2006, fecha de creación del estadio, y la imposibilidad de realizar proyectos de esta envergadura en tiempos razonables sin el uso de estas.

Sobre el análisis.

El estudio sobre el arquitecto ha sido un apartado revelador, pues entendiendo la trayectoria y los diferentes puntos de vista por los que ha pasado el mismo se llega a un nivel de empatía y valoración de la obra muy superior.

Por otro lado, el uso de la parametrización ha resultado de crucial importancia para poder llevar a cabo el estudio de un edificio de estas características. La curvatura del edificio hace que sea complejo, por no decir imposible, su realización mediante herramientas de dibujo como AutoCAD o SAP 2000.

Sobre la modelización

En cuanto a la modalización en SAP 2000, gracias al uso de la información recopilada se ha llegado a un acercamiento notable de la solución estructural propuesta por el arquitecto, y que, una vez introducido el modelo en el mismo, el proceso se hace francamente más sencillo, en gran medida gracias a la jerarquización por capas realizadas previamente a importar el modelado en dicho programa.

El diseño de los elementos ha sido una experiencia gratificante puesto que, al finalizar, se obtiene una comprensión completa de todas las dimensiones, espesores, refuerzos y perfiles de la estructura del edificio. Esto se debe a que el SAP 2000 no asume prácticamente nada, sino que es el usuario el que tiene que evaluar en casi todo el proceso que y como colocar cada dato, a diferencia de otros programas de cálculo estructural. Aunque esto podría parecer un inconveniente al principio, resulta muy educativo ya que requiere un conocimiento profundo de cómo funcionan las estructuras y la familiaridad con los perfiles y espesores que se están utilizando en cada momento.

7.2 | Relación con los ODS

En todo proyecto arquitectónico, no solo resulta desafiante lograr que una obra cumpla con ciertos criterios estéticos y compositivos, sino también garantizar que soporte las cargas y esfuerzos estructurales impuestos en el edificio. Este último aspecto es el que se ha abordado a lo largo del presente Trabajo de Fin de Grado.

Según los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el **Objetivo 11**, se busca que las ciudades y los asentamientos humanos sean **inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles**, promoviendo un crecimiento urbano en contextos de recursos limitados. Este trabajo se alinea con dicha meta, ya que un cálculo adecuado de los edificios asegura que tengan una vida útil lo más prolongada posible, dentro de las limitaciones de su época y contexto de construcción.

El Estadio Nacional de Kaohsiung, clasificado como un edificio monumental y singular, tiene una vida útil estimada mínima de 100 años. Para alcanzar una longevidad similar, es esencial realizar estimaciones precisas en los cálculos estructurales y asegurar una correcta ejecución constructiva.

Asimismo, en consonancia con el **Objetivo 7**, que busca garantizar el acceso a **energía asequible**, segura, sostenible y moderna para todos, el Estadio Nacional de Kaohsiung incorpora un elemento distintivo, los 8844 paneles solares que cubren gran parte de su cubierta. Estos paneles, que abarcan una superficie de 14.155 m², están integrados en la estructura tubular, tal como se muestra en las ilustraciones a la derecha. El sistema, instalado por *Delta Group Electronics*, permite que el 30% de la radiación solar ilumine el interior del estadio, ofreciendo al público la posibilidad de experimentar el clima exterior en tiempo real, mientras que el 70% restante se aprovecha para generar energía solar, con una capacidad anual de 1,14 MW. Esta energía cubre prácticamente todas las necesidades del estadio durante el año, permitiendo además almacenar y vender el excedente.

De esta forma, podemos observar cómo los proyectos arquitectónicos, y en particular los estructurales, implican una serie de decisiones y preocupaciones que nos guían hacia un desarrollo sostenible y un futuro prometedor para las generaciones venideras. El Estadio Nacional de Kaohsiung ejemplifica este compromiso, demostrando cómo la integración de tecnologías avanzadas y el respeto por el medio ambiente pueden coexistir en una obra monumental. Este enfoque no solo satisface las necesidades actuales, sino que también establece un modelo a seguir para futuros proyectos, promoviendo ciudades más resilientes y sostenibles.

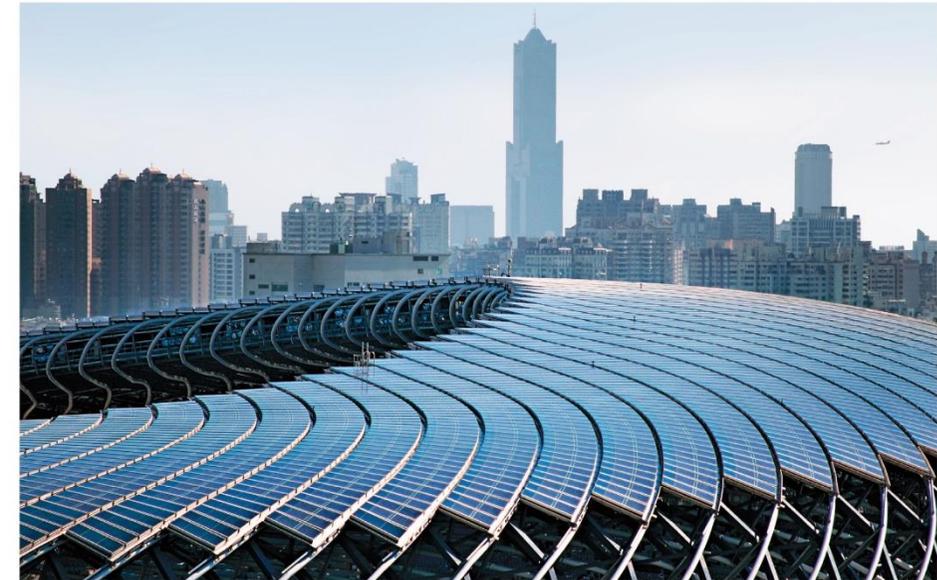


Ilustración 56. Cubierta de placas solares del estadio.

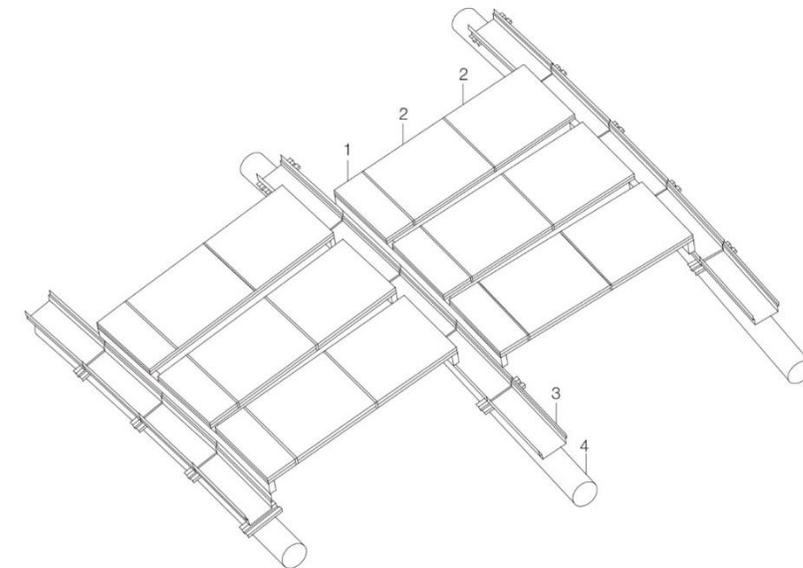


Ilustración 57. Esquema de colocación de las placas solares sobre la estructura de tubos. Fuente: Revista Detail.

8.1 | Listado de referencias textuales

Ando, T. (1991). *Tadao Ando: Conversations with Students*. Princeton Architectural Press.

Ashihara, Y. (1986). *The hidden Order. Tokyo through the twentieth century*. Nueva York: Kodansha International.

Bauman, Z. (2000). *Modernidad líquida*. Fondo de cultura económica de España.

Bauman, Z. (2010). *Vida líquida*. Paidós.

Blengio, E., & Dolan, M. (2017). Toyo Ito. El espacio en la era microelectrónica. *Tesis*.

Castells, M. (1996). *La era de la informacion, Vol La sociedad red*. Alianza.

Cortés, J. A. (2004). Toyo Ito y la búsqueda de una nueva arquitectura orgánica. Más allá del Movimiento Moderno. *El Croquis*. N. 123, 16-42.

Cortés, J. A. (2005). Toyo Ito y la búsqueda de una nueva arquitectura organica. *El Croquis vol 123*, 16-42.

Cortés, L. A. (24 de Julio de 2007). *Presente y futuro de la microelectrónica*. Obtenido de <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902687.pdf>

Foster, N. (4 de septiembre de 2015). *The creativity and creations that led to the Pritzker Prize*. Obtenido de Leader League: <https://www.leadersleague.com/en/news/the-creativity-and-creations-that-led-to-the-pritzker-prize>

Ito, T. (1988). *Una arquitectura que pide un cuerpo androide*. Escritos. Murcia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia.

Ito, T. (1991). La arquitectura como metamorfosis. En J. M. Torres Nadal. Murcia: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia.

Ito, T. (1992). *Paisaje arquitectónicos de una ciudad envuelta en una película de plástico transparente*. Murcia.: Torres Nadal.

Ito, T. (1993). *El Croquis*, 98.

Ito, T. (2005). *Conversaciones con estudiantes*. GG.

Ito, T. (2010). Contextual Algorithms. *The Japan Architect*, 36.

Ito, T. (2013). (J. d. Pritzker, Entrevistador)

Ito, T. (2016). *La arquitectura como organismo*. Plot, vol 30.

Lerner, F. (2014). *Toyo Ito, Imaginería y materialización*. Diseño.

Mostafavi, M. (2009). Suavizar el rigor de la retícula, la nueva naturaleza de Toyo Ito y el artificio de la arquitectura. *El Croquis N.147*, 21-30.

Pogrebin, R. (13 de Marzo de 2013). *Architectural Iconoclast Wins the Pritzker Prize*. Obtenido de New York Times: <https://www.nytimes.com/2013/03/18/arts/design/toyo-ito-wins-the-pritzker-architecture-prize.html>

Pollock, N. R. (2010). Play time: Toyo Ito raises the bar for sports facilities with his graceful, sustainable design for the National Stadium in Kaohsiung, Taiwan. *Architectural record*, 64-71.

Schalk, M. (13 de junio de 2014). The Architecture of Metabolism. Inventing a Culture of Resilience. *Arts*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/>

Solà-Morales, I. d. (2001). *Arquitectura líquida*.

Suzuki, Y. (1997). De lo ecléctico a la fusión. *2G*, 18-23.

Torres Cuenco. (2004). *Arquitectura en el Bosque de los Medios*. General de ediciones de arquitectura.

Trenas, M. (18 de marzo de 2013). *Bajo el influjo de Gaudí*. Obtenido de El Mundo: <https://www.elmundo.es/elmundo/2013/03/17/cultura/1363551595.html>

Wright, F. L. (1998). *Autobiografía*. El Croquis.

Zazo (2020). Estudio, análisis y modelización de la estructura del Instituto del patrimonio cultural de España, Mediante SAP 2000

8.2 | Listado de ilustraciones

Ilustración.01	Fotografía tomada de Toyo Ito en 2013. Fuente: Archdaily.com	7
Ilustración.02	La gran ola, de Katsushika Hokusai.....	8
Ilustración.03	Sistema dom-ino de Le Corbusier.....	9
Ilustración.04	La ciudad hélice de Kisho Kurokawa. 1961	10
Ilustración.05	Torre de los vientos de Toyo Ito. Yokohama 1986	15
Ilustración.06	Esquema en planta de la mediateca de Sendai. Autor: Toyo Ito.....	16
Ilustración.07	Esquema en sección de la mediateca de Sendai. Autor: Toyo Ito.....	16
Ilustración.08	Semejanzas entre la Casa Milà de Gaudí y el Aparhotel de Ito.	17
Ilustración.09	Fotografía exterior del edificio TOD's de Ito.....	18
Ilustración.10	Fotografía interior del edificio TOD's de Ito.	18
Ilustración.11	Vistas aéreas del estadio.	22
Ilustración.12	Planta del sótano primero. Fuente: Revista Detail.	27
Ilustración.13	Planta del sótano primero. Fuente: Revista Detail.	27
Ilustración.14	Planta del sótano segundo. Fuente: Revista Detail.	27
Ilustración.15	Planta del sótano segundo. Fuente: Revista Detail.	27
Ilustración.16	Fotografía nocturna de la estructura del estadio.	29
Ilustración.17	Esquema del sistema de nodos. [Elaboración propia].....	33
Ilustración.18	Esquema ejemplificador del sistema de nodos. [Elaboración propia].....	33
Ilustración.19	Código final creado que genera la globalidad del estadio en Grasshopper. [Elaboración propia].....	34
Ilustración.20	Creación de la curva genérica global que conformará la forma del estadio.	34
Ilustración.21	Curva madre que genera el perfil de la cercha de la cubierta.....	35
Ilustración.22	División de la curva del estadio en 100 puntos (arriba), y colocación de la Spline “madre” en los planos normales.....	35
Ilustración.23	Código original que genera las modificaciones sobre la cercha inicial.....	36
Ilustración.24	Código original que genera las modificaciones sobre la cercha inicial.....	36
Ilustración.25	En rojo la cubierta inicial, homogénea, igual perfil en todos los puntos. En verde, la resultante tras aplicarle las modificaciones.	36
Ilustración.26	Colocación de la pantalla inicial en el modelo auxiliar.	37
Ilustración.27	Colocación de las pantallas en el modelado global del estadio.	37
Ilustración.28	Creación de cordón inferior, cordón superior, y el atado en coronación de todas las cerchas.	37
Ilustración.29	Creación de los montantes, diagonales, y tirantes.....	37
Ilustración.30	Esquema simplificado del sistema de tubos de la cubierta del Estadio Nacional de Kaohsiung. [Elaboración propia]	38
Ilustración.31	Secuencia de la creación de los 24 tubos de la cubierta del Estadio Nacional de Kaohsiung.	38

Ilustración.32	En verde, forjados de la planta baja y planta primera del estadio, así como de los pilares correspondientes.....	39
Ilustración.33	De arriba a abajo, cimentación por zapatas aisladas, zapatas combinadas y losa.	39
Ilustración.34	Modelización de superficie auxiliar para poder aplicar las cargas correspondientes a las cerchas.	40
Ilustración.35	Conjunto de los elementos modelizados del Estadio Nacional de Kaohsiung.....	41
Ilustración.36	Diagrama general de cada proporción del trabajo.	42
Ilustración.37	Diagrama general de cada proporción del trabajo.	42
Ilustración.38	Zona inferior de la cubierta del estadio.....	43
Ilustración.39	Captura de SAP 2000 de la versión 2/10 del modelado paramétrico. [Elaboración propia]	43
Ilustración.40	Acceso a los apartados de creación y asignación de grupos en SAP 2000.	45
Ilustración.41	Secciones empleadas, normativa ASTM. Fuente: Structural Design of Kaohsiung Stadium, Taiwan. Francis & Taylor.	45
Ilustración.42	División de las caras de grandes dimensiones de los elementos finitos que conforman las gradas.	46
Ilustración.43	División de las caras de grandes dimensiones de los elementos finitos que conforman los forjados de planta baja y primera.....	46
Ilustración.44	Asignación de cargas en superficie.	47
Ilustración.45	Asignación de cargas lineales.	47
Ilustración.46	Modelo en SAP 2000 empleando apoyos rígidos.	56
Ilustración.47	Cuadro de diálogo que se emplea para establecer condiciones de contorno específicas a los 1000 tirantes del modelo.	56
Ilustración.48	Cálculos del sismo modal en sus primeros 15 modos.	60
Ilustración.49	Resumen de cálculo del sismo modal, modos necesarios para llegar a un mínimo del 90% de masa en X, Y, Z.	60
Ilustración.50	Deformada del conjunto del estadio a escala 100.	67
Ilustración.51	Deformada de la cercha a escala 100.....	67
Ilustración.52	Diagramas de axiles con respecto a los tubos.	68
Ilustración.53	Esquema de deformación correspondiente a la combinación más desfavorable en ELS. Escala en mm.	72
Ilustración.54	Deformada con respecto al eje Y en la combinación más desfavorable (ELSVy-). Escala en mm.....	73
Ilustración.55	Secuencia iterativa de autoselección de secciones en SAP 2000.	74
Ilustración.56	Cubierta de placas solares del estadio.	81
Ilustración.57	Esquema de colocación de las placas solares sobre la estructura de tubos. Fuente: Revista Detail.	81

8.3 | Listado de tablas

Tabla.01	Recuento de todos los elementos modelizados en Grasshopper. [Elaboración propia]	41
Tabla.02	Cómputo de horas invertidas en el TFG.	42
Tabla.03	Recuento final de todos los elementos modelizados en Grasshopper. [Elaboración propia]	46
Tabla.04	Memoria de cargas muertas permanentes. [Elaboración propia].....	49
Tabla.05	Valores característicos de las sobrecargas de uso [Tabla 3.1 DBSE-AE].....	50
Tabla.06	Tabla D.2 – Coeficientes para el tipo de entorno	51
Tabla.07	Marquesinas a dos aguas. Tabla D.11 del DB-SE-AE del Código Técnico de la Edificación.	52
Tabla.08	Tabla Excel proporcionada por el profesor David Gallardo Llopis para el cálculo del espectro elástico del edificio.	53
Tabla.09	Cajetín de cargas variables aplicadas al estadio.	55
Tabla.10	Cuadro resumen de combinaciones aplicadas al modelo. [Elaboración propia]	58

8.4 | Listado de figuras

Figura.01	Planta de emplazamiento. Fuente: Revista Detail.	24
Figura.02	Planta baja. Fuente: Revista Detail.	25
Figura.03	Planta baja. Fuente: Revista Detail.	25
Figura.04	Planta baja. Fuente: Revista Detail.	25
Figura.05	Planta baja. Fuente: Revista Detail.	25
Figura.06	Planta del sótano primero. Fuente: Revista Detail.	26
Figura.07	Planta del sótano primero. Fuente: Revista Detail.	26
Figura.08	Fuente: Revista Detail.	28
Figura.09	Fuente: Revista Detail.	28
Figura.10	Fuente: Revista Detail.	28
Figura.11	Fuente: Revista Detail.	28
Figura.12	Sección tipo de la estructura del estadio. Fuente: Revista Detail.	29
Figura.13	Sección tipo de la estructura del estadio. Fuente: Revista Detail.	29
Figura.14	Valor básico de la velocidad del viento, del Anejo D (Tabla D.1) del DB-SE-AE del Código Técnico de la Edificación.	51
Figura.15	Tabla 3.7 del DB-SE-AE del Código Técnico de la Edificación. Fuente: Ministerio de Fomento.	54
Figura.16	Proceso de asignación de la carga térmica a los 2376 tubos que engloban el estadio, en SAP 2000.	54
Figura.17	Liberamos únicamente el desplazamiento vertical (Traslacion 3)	57
Figura.18	Deformación de la losa de cimentación (200kPa tensión admisible). Escala en kPa.	61
Figura.19	Cuadro de comprobación del tubo más saturado en SAP 2000.	78
Figura.20	Tabla de datos de comprobación de la barra de estudio en SAP 2000.	78

