



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Estudio, modelización y análisis de la estructura de la
terminal T4S del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas,
mediante SAP2000

Trabajo Fin de Grado

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

AUTOR/A: Coll Martínez, Diego

Tutor/a: Gallardo Llopis, David

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA
TERMINAL T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS,
MEDIANTE SAP2000

TRABAJO FINAL DE GRADO
GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

Autor: Diego Coll Martínez
Tutor: David Gallardo Llopis

Curso 2023-2024

Resumen

El presente Trabajo Final de Grado tiene el objetivo de desarrollar el estudio, modelización y análisis de la estructura de la terminal T4S del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, mediante SAP2000. Dicho análisis, incorpora el modelo con las simplificaciones y detalles necesarios para que los resultados sean lo más fieles posible a la realidad. A partir de estos resultados, se comprueba la validez del modelo, así como la respuesta estructural de la terminal.

Palabras clave: estudio, modelización, análisis, estructura, terminal, aeropuerto, SAP2000.

Resum

El present Treball Final de Grau té l'objectiu de desenvolupar l'estudi, modelització i anàlisi de l'estructura de la terminal T4S de l'Aeroport Adolfo Suárez Madrid-Barajas, per mitjà de SAP2000. Esta anàlisi, incorpora el model amb les simplificacions i detalls necessaris perquè els resultats siguin el més fidels possible a la realitat. A partir d'aquests resultats, es comprova la validesa del model, així com la resposta estructural de la terminal.

Paraules clau: estudi, modelització, anàlisi, estructura, terminal, aeroport, SAP2000.

Abstract

The objective of this Final Degree Project is to develop the study, modeling and analysis of the structure of the terminal T4S of the Adolfo Suárez Madrid-Barajas Airport, using SAP2000. This analysis incorporates the model with the necessary simplifications and details so that the results are as close as possible to reality. Based on these results, the validity of the model is verified, as well as the structural response of the terminal.

Keywords: study, modeling, analysis, structure, terminal, airport, SAP2000.

Índice de contenidos

1 Introducción	7
2 Análisis arquitectónico	8
2.1 Estudio Lamela	8
2.2 Rogers Stirk Harbour + Partners	13
2.3 Terminal T4S	18
3 Análisis constructivo y estructural	20
3.1 Planos	20
3.2 Proceso de ejecución	28
3.3 Estado final	31
4 Modelo de análisis	35
4.1 Modelización	35
4.2 Definición de los materiales	38
4.3 Definición de las secciones	38
4.3.1 Vigas principales	40
4.3.2 Vigas secundarias	40
4.3.3 Correas	42
4.3.4 Perfiles perimetrales	43
4.3.5 Cubierta	45
4.3.6 Pilares "V"	47
4.3.7 Pilares "Y"	48
4.3.8 Pilares interiores de hormigón armado	50
4.3.9 Pilares exteriores de hormigón armado	51
4.4 Cargas	52
4.4.1 Hipótesis básicas de carga	52
4.4.2 Combinaciones de carga	52
4.4.3 Asignación de cargas	55
4.4.3.1 Cargas muertas permanentes	56
4.4.3.2 Sobrecarga de uso	57
4.4.3.3 Sobrecarga de nieve	58
4.4.3.4 Sobrecarga de viento	60
4.4.3.5 Sismo	66

4.5 Enlaces	71
4.5.1 Apoyos	71
4.5.2 Desconexiones	77
5 Interpretación de los resultados	85
5.1 Estados límite de servicio.....	85
5.1.1 Desplazamientos verticales	86
5.1.1.1 Integridad constructiva	86
5.1.1.2 Confort de los usuarios	88
5.1.1.3 Apariencia de la obra.....	90
5.1.2 Desplazamientos horizontales	92
5.1.2.1 Integridad constructiva	93
5.2 Estados límite últimos.....	95
5.2.1 Perfiles metálicos.....	95
5.2.2 Pilares de hormigón armado.....	98
5.2.2.1 Pilares interiores	98
5.2.2.2 Pilares exteriores.....	103
6 Conclusiones	108
7 Listado de imágenes	109
8 Listado de tablas	115
9 Bibliografía	116

1 | Introducción

El presente trabajo consiste en la realización del análisis estructural de la terminal **T4S** del **Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas**. Este análisis se realiza a partir del estudio previo y posterior modelización de la terminal.

En el **estudio** previo, se analizan tanto los autores del proyecto como la propia obra en cuestión, prestando especial atención a aspectos tales como el diseño y la forma, además de otras características más técnicas como el proceso constructivo y el sistema estructural. Todos estos datos aportan información acerca de las intenciones y objetivos que los autores de la obra pretendían alcanzar. A su vez, todo ello, permite comprender el comportamiento estructural del edificio y obtener, en la medida de lo posible, resultados precisos y fieles a la realidad.

Por otro lado, la **modelización** consiste en la representación de la terminal mediante un modelo simplificado. En dicho modelo, se introducen los datos necesarios mediante **SAP2000**, lo que permite conocer el comportamiento estructural de la terminal para posteriormente, realizar el análisis de los resultados obtenidos.

Finalmente, se analizan e interpretan los **resultados** obtenidos en el programa atendiendo en todo momento a la normativa. De esta manera, se comprueba si el comportamiento estructural del modelo realizado cumple o no las exigencias de dicha normativa. Para ello, junto con SAP2000, se utiliza la documentación facilitada por David Gallardo Llopis, tutor del presente trabajo.

2 | Análisis arquitectónico

En este apartado se realiza el análisis de los principales autores del proyecto, los estudios de arquitectura **Estudio Lamela** y **Rogers Stirk Harbour + Partners**, además del análisis de la propia terminal T4S.

2.1 | Estudio Lamela

El **Estudio Lamela** se fundó en 1954 por el arquitecto español **Antonio Lamela** (imagen 1) y desde entonces, ha desarrollado proyectos que abarcan actividades de transporte, hoteleras, deportivas y urbanísticas, entre otras.



Imagen 1 | Antonio Lamela. (Arquitectura Viva)

Durante los años 60, España experimentó un crecimiento significativo del turismo internacional. Por este motivo, en el estudio aumentó el desarrollo de proyectos residenciales destinados al uso turístico. Fue en el año 1967, cuando se realizó uno de los proyectos más destacables para el estudio en esta época, el **Hotel Meliá Madrid Princesa** (imagen 2).



Imagen 2 | Hotel Meliá Madrid Princesa. (Estudio Lamela)

Más adelante, en el año 1976 se inauguró el proyecto de las **Torres de Colón** en Madrid (imagen 3). Sin duda, este edificio se convirtió en una de las obras más importantes para el estudio debido, entre otras características, a la avanzada tecnología que presentaba para la época. Su innovador diseño estructural permitía que los pisos estuvieran colgados de la estructura superior, en vez de estar apoyados unos encima de otros como ocurre en las edificaciones convencionales.

“El sistema estructural de las Torres se diseñó completamente en hormigón armado, utilizando hormigones postensados de alta resistencia. De este modo, el Estudio se apartó de la técnica más difundida para construir edificios “colgados”, que utilizaba cabezas estructurales de acero, para adoptar en cambio una solución de “arquitectura suspendida”: los forjados de las plantas tipo apoyan por su perímetro en los tirantes exteriores, que no están traccionados como en el caso de la “arquitectura colgada”, sino comprimidos contra la estructura de hormigón postensado de las vigas-cabeza. Esta estructura superior, en cuyo interior se ubica la maquinaria de instalaciones, recibe la carga de los 21 forjados suspendidos y la transmite al núcleo, por el que descende finalmente hasta la cimentación en el terreno” (Estudio Lamela).



Imagen 3 | Torres de Colón. (Estudio Lamela)

Carlos Lamela (imagen 4), hijo de Antonio Lamela, se incorporó al equipo en 1984 y actualmente es el **presidente ejecutivo** del estudio. Entre los años 80 y 90, coincidiendo con la llegada de Carlos Lamela, el estudio se convirtió en un referente de proyectos de gran envergadura en el ámbito urbanístico, residencial y terciario.



Imagen 4 | Carlos Lamela. (Estudio Lamela)

Otro proyecto considerado como uno de los más relevantes para el estudio es la **ampliación del Estadio Santiago Bernabéu** (imagen 5), la cual finalizó en el año 1994.



Imagen 5 | Ampliación del Estadio Santiago Bernabéu. (Estudio Lamela)

Este proyecto no fue el único realizado en el estadio ya que, más adelante, entre los años 2002-2005 se realizó una **intervención en la grada del tercer anfiteatro del Lateral Este** (imagen 6). En ella se introdujo una fachada uniforme a partir de una malla metálica, además de una cubierta ligera con la que se logró alcanzar el cierre de la totalidad de la cubierta del estadio.

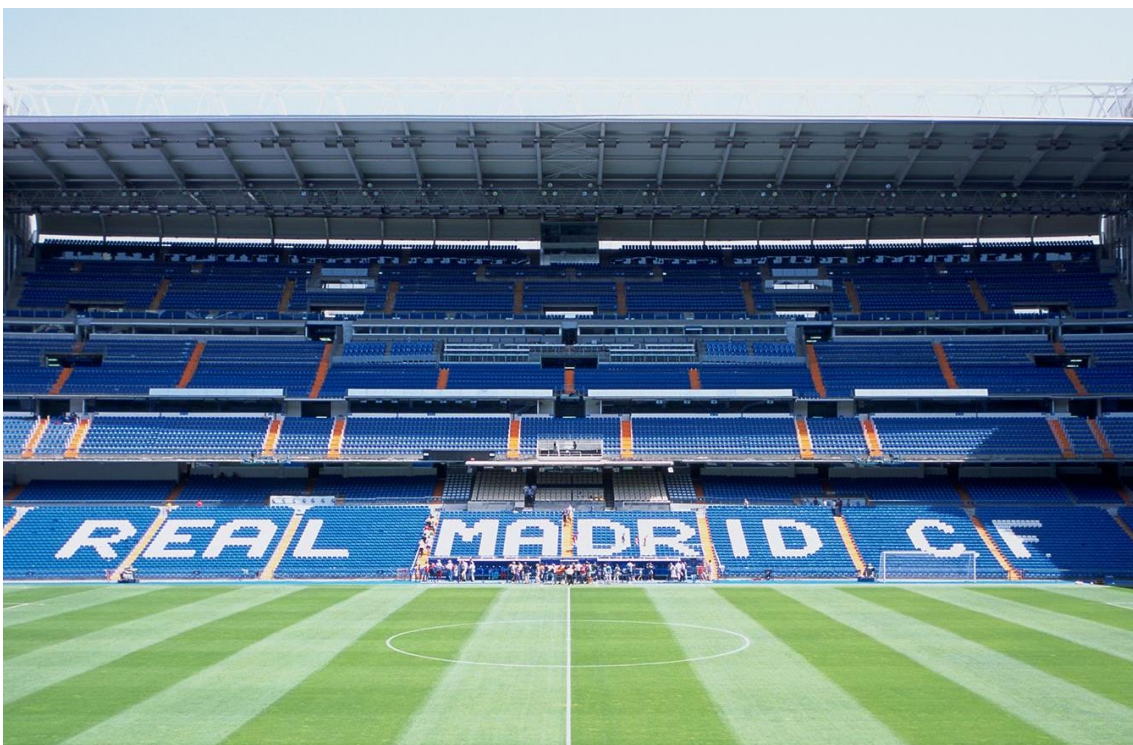


Imagen 6 | Intervención en la grada del tercer anfiteatro del Lateral Este del Estadio Santiago Bernabéu. (Estudio Lamela)

En cuanto al sector aeroportuario, además de las terminales T4 y T4S del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, dos de los proyectos más relevantes para el estudio son la ampliación del Aeropuerto de Gran Canaria y la ampliación del Aeropuerto Chopin de Varsovia.

Por un lado, en la **ampliación del Aeropuerto de Gran Canaria** (imagen 7), la cual concluyó en el año 2014, se pretendió mejorar el funcionamiento del edificio mediante su remodelación y ampliación en el lado tierra¹, además de en la dirección norte y sur.



Imagen 7 | Ampliación del Aeropuerto de Gran Canaria. (Estudio Lamela)

Por otro lado, la **ampliación del Aeropuerto Chopin de Varsovia** (imagen 8) tuvo lugar entre los años 2000-2015. En este proyecto se realizó la remodelación de las antiguas terminales 1 y 2 que pasaron a formar parte de una única terminal, la nueva terminal A. El sistema estructural de la nueva terminal consiguió duplicar los tramos de la estructura original, manteniendo la misma modulación.



Imagen 8 | Ampliación del Aeropuerto Chopin de Varsovia. (Estudio Lamela)

¹ El lado tierra hace referencia a las zonas del aeropuerto destinadas a los pasajeros y visitantes.

2.2 | Rogers Stirk Harbour + Partners

El estudio de arquitectura Rogers Stirk Harbour + Partners se fundó en 1977 por el arquitecto británico **Richard Rogers** (imagen 9), bajo el nombre inicial de **Richard Rogers Partnership**. Con el tiempo, otros socios como **Graham Stirk** y **Ivan Harbour**, se unieron al estudio, lo que derivó en la evolución del nombre a **Rogers Stirk Harbour + Partners (RSHP)**.



Imagen 9 | Richard Rogers. (ROOM Diseño)

Desde su fundación, RSHP ha mostrado una constante evolución y capacidad para adaptarse a las nuevas exigencias dentro del sector de la construcción y la arquitectura. Los proyectos realizados por el estudio, destacan por responder a las necesidades humanas desde un punto de vista regenerativo, desarrollando distintas propuestas según las necesidades y características de cada proyecto.

“Nuestras soluciones de diseño nunca son las mismas, porque analizamos todos los aspectos del emplazamiento, teniendo en cuenta tanto el contexto físico como el socioeconómico, para crear un edificio que sea una respuesta original, pero totalmente adecuada” (Graham Stirk).

Uno de los proyectos más importantes para el estudio es el **Centro Nacional de Arte y Cultura Georges Pompidou** en París (imagen 10). Este proyecto se realizó en colaboración con el arquitecto italiano Renzo Piano y finalizó en el año 1977.

La obra se trata de un proyecto, tanto arquitectónico como urbanístico, en el que se consiguió revitalizar una zona que, en aquel entonces en París, estaba en declive.

La fachada destaca por su carácter expresivo y está compuesta por un sistema estructural atirantado, además de unas instalaciones y servicios de comunicación vertical, que lejos de quedar ocultos, forman parte del conjunto de la envolvente.

“La decisión de situar la estructura y los servicios en el exterior obedeció a la necesidad de flexibilidad interna, lo que permitió disponer de enormes extensiones de espacio ininterrumpido en plantas masivas y abiertas; la asombrosa escala de estos espacios internos está libre de la intrusión de servicios y escaleras” (RSHP).

Por todo ello, el Centro Pompidou se ha convertido en un gran ejemplo de regeneración urbana y en un hito de la arquitectura parisina.



Imagen 10 | Centro Nacional de Arte y Cultura Georges Pompidou. (RSHP)

Más adelante, entre los años 1978-1986, se realizó otro proyecto de gran relevancia para el estudio, el Edificio Lloyd's de Londres (imagen 11).

El estudio optó por un diseño en el que una serie de galerías se disponían en torno a un espacio central, formando una compleja agrupación de torres. Por otro lado, gran parte de las instalaciones y servicios se situaron en el exterior con el fin de liberar y maximizar el espacio interior.

El proyecto, el cual combina la eficiencia técnica con la expresividad arquitectónica, es considerado como uno de los grandes logros arquitectónicos de la década de 1980 y además, es reconocido como uno de los edificios más simbólicos de la época moderna.



Imagen 11 | Edificio Lloyd's. (Architecture Today)

Otro proyecto considerado como uno de los más importantes para RSHP es el **Edificio Leadenhall** (imagen12), cuya construcción concluyó en el año 2014 y donde se encuentran las oficinas principales del estudio en la actualidad.

Este edificio de 50 plantas presenta una forma de cuña característica que le distingue de los edificios próximos. Esta forma se obtuvo a partir de la superposición de plantas rectangulares, las cuales disminuyen progresivamente en profundidad a medida que se aproximan al punto más alto de la torre. Por otro lado, tanto las instalaciones como el núcleo de comunicación vertical están situados en un volumen independiente orientado al norte.

En cuanto a la estructura, en lugar de existir un núcleo rígido central, el conjunto estructural principal se sitúa en la envolvente del edificio. Esta estructura consiste en un sistema de perfiles perimetrales arriostrados, los cuales aportan estabilidad al edificio frente a las cargas de viento.



Imagen 12 | Edificio Leadenhall. (Building Centre)

Por lo que respecta al sector aeroportuario, además de las terminales T4 y T4S del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, RSHP ha participado en numerosas intervenciones en distintos aeropuertos. Dos de los proyectos más relevantes del estudio son la terminal T5 del Aeropuerto de Heathrow y la ampliación de la terminal 1 del Aeropuerto de Lyon-Saint Exupéry.

Por un lado, la construcción de la **terminal T5 del Aeropuerto de Heathrow** (imagen13) finalizó en 2008 y se desarrolló con la colaboración de estudios de arquitectura como Pascall+Watson, entre otros.

El proyecto destaca por su gran envergadura y su característica envolvente. En dicha envolvente, las fachadas están formadas por un gran muro cortina perimetral, mientras que la cubierta presenta una forma ondulada que transmite la sensación de estar flotando sobre el edificio, siendo conceptualmente similar a las terminales T4 y T4S del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas.

En cuanto al sistema estructural, este se basa en una estructura de acero desmontable y reconfigurable, la cual permitió obtener un espacio interior prácticamente libre de obstáculos, dotando al proyecto de flexibilidad y libertad.

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

DIEGO COLL MARTÍNEZ



Imagen 13 | Terminal T5 del Aeropuerto de Heathrow. (RSHP)

Por otro lado, entre los años 2013-2018 y en colaboración con Chabanne & Partenaires, se desarrolló la ampliación de la terminal 1 del Aeropuerto de Lyon-Saint Exupéry (imagen 14).

El proyecto consistió en la construcción de un nuevo edificio con forma circular, además de la prolongación de la antigua terminal 1, la cual se conectó con dicho edificio. La nueva terminal está formada por elementos estructurales sencillos y como es habitual en los proyectos de RSHP, presenta un diseño modular flexible que permite realizar futuras ampliaciones con facilidad.

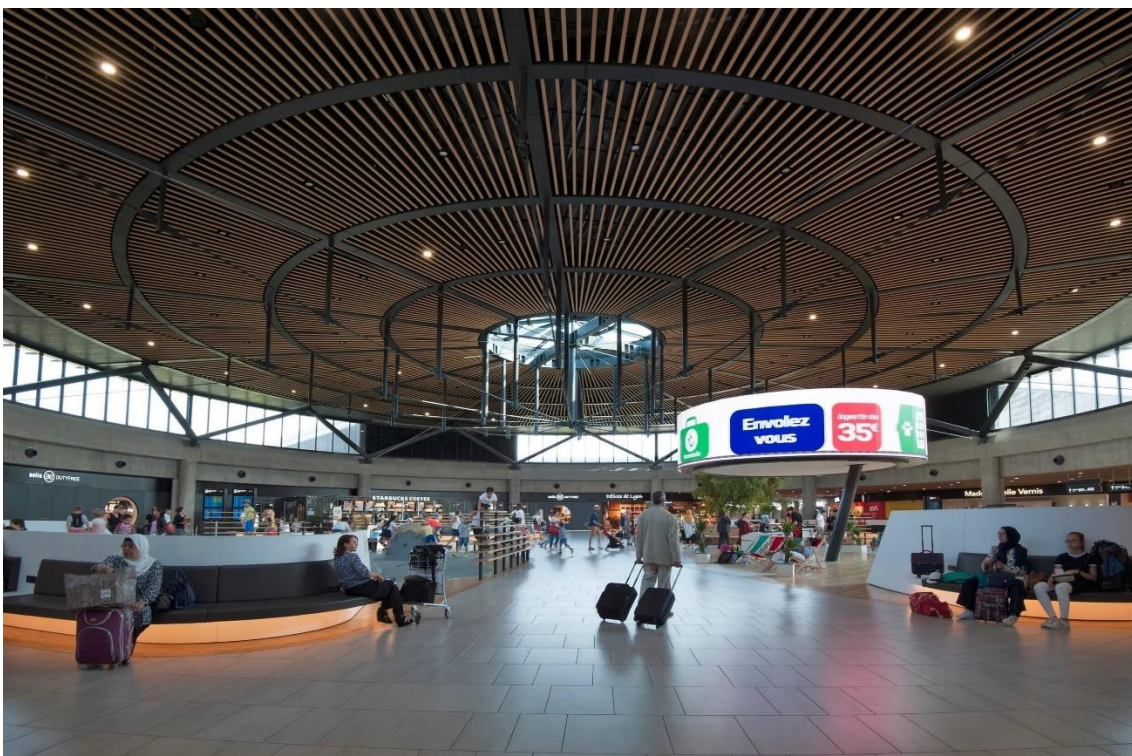


Imagen 14 | Ampliación de la terminal 1 del Aeropuerto de Lyon-Saint Exupéry. (RSHP)

2.3 | Terminal T4S

Los estudios de arquitectura **Estudio Lamela** y Richard Rogers Partnership (actualmente **Rogers Stirk Harbour + Partners**) fueron los encargados de diseñar y construir, tanto la terminal T4, como su edificio satélite el cual se analiza en el presente trabajo, la **terminal T4S**.

El proyecto de la T4S, el cual se inauguró en el año 2006, destaca por diferentes motivos y uno de ellos es su **funcionalidad**. Su composición lineal permite que los pasajeros circulen de la manera más directa y eficaz posible. De esta forma, se consiguió mejorar el flujo de pasajeros en el interior del edificio y reducir el tiempo necesario para ir de un punto a otro de la terminal.

Por lo que respecta al **espacio interior**, los materiales y acabados tuvieron un papel muy importante. Esto se debe a que el objetivo principal consistía en crear un ambiente cálido y agradable para los pasajeros, lo cual se consiguió de diferentes maneras. Por un lado, el perímetro de la terminal está formado por un **muro cortina** que destaca por su transparencia, permitiendo la entrada de luz natural en el interior y estableciendo una conexión con el exterior en todo momento. Por otro lado, se decidió utilizar piedra caliza de color crema y ocre para el **pavimento**. La presencia de esta piedra natural a lo largo de todo el edificio, hizo que se convirtiera en un elemento fundamental para conseguir el ambiente cálido que se pretendía obtener desde un principio. Además, para el **falso techo** se propuso una solución que consistía en una superficie formada por lamas de bambú, las cuales, debido a su flexibilidad, presentaban las características idóneas para adaptarse a las superficies curvas de la cubierta. Este material de aspecto natural se ha convertido en uno de los elementos más singulares del proyecto.

Por otra parte, el **sistema constructivo** destaca por su **flexibilidad** y se basa en la repetición de módulos a lo largo de todo el proyecto, lo que facilita el crecimiento de la terminal en todas sus direcciones. Estos módulos, se separan transversalmente mediante cañones que permiten la entrada de luz natural en la zona central de la terminal, donde los muros cortina perimetrales no inciden directamente. Además, el **sistema modular repetitivo** hizo posible que el diseño y la ejecución de las formas singulares del proyecto se realizaran de manera rápida y sistemática, agilizando notablemente el proceso de ejecución de la obra.

En cuanto a la **estructura** de la terminal, se diferencian dos sistemas completamente distintos, con diferentes materiales y funciones dentro del conjunto, pero que al combinarlos, forman una estructura mixta capaz de soportar los diversos esfuerzos a los que está siendo sometida.

Por un lado, la **parte superior** de la estructura de la terminal es de **acero** y destaca por su flexibilidad y ligereza. En esta parte de la estructura, los elementos principales son las vigas principales, las vigas secundarias, las correas, los pilares en forma de "V" y los pilares en forma de "Y". Las **vigas principales** tienen una longitud de 72 m en planta y están dispuestas cada 9 m en dirección longitudinal. Estas vigas de forma ondulada influyen notablemente en la forma de la cubierta por lo que tienen una gran relevancia para la imagen del edificio. Perpendicularmente a las vigas principales, se disponen las **vigas secundarias** en forma de arcos, a su vez, sobre estas vigas secundarias descansan las **correas**, las cuales se colocan paralelamente a las vigas principales. Cada viga principal tiene cuatro apoyos, dos centrales y dos en los extremos. Los apoyos centrales están formados por rótulas que sirven como puntos de unión entre las vigas principales y los **pilares en forma de "V"**. De igual manera, los apoyos

situados en los extremos están formados por rótulas que sirven como puntos de unión entre las vigas principales y los **pilares en forma de "Y"**. Estos pilares en forma de "Y", inclinados 19° respecto a la vertical, están sometidos a grandes esfuerzos de flexión. Dichos esfuerzos, se reducen tanto por las uniones articuladas de los perfiles, como por el tirante que une los extremos superiores de los brazos del pilar.

Por otro lado, la **parte inferior** de la estructura es de **hormigón armado** y tiene un carácter más rígido y robusto. En esta parte de la estructura, los elementos principales son los pilares interiores y los pilares exteriores. Por un lado, en sus extremos superiores, los **pilares interiores** están conectados con los pilares en forma de "V" y su unión consiste en un empotramiento. Por otro lado, en sus extremos superiores, los **pilares exteriores** están conectados con los pilares en forma de "Y", pero en este caso, la unión entre ambos soportes consiste en una rótula.

Por último, la **cubierta** se convierte en el **elemento principal de la envolvente**. Esta cubierta con forma ondulada armoniza y se integra en el entorno, prolongándose más allá del muro cortina perimetral, lo cual, sumado a la ligereza y transparencia del muro cortina, transmite la sensación de estar flotando sobre el edificio.

3 | Análisis constructivo y estructural

En el presente apartado, se realiza el análisis constructivo y estructural a partir de la información recopilada acerca de la terminal. Esta información consiste en una serie de **planos** y detalles constructivos, además de imágenes del **proceso de ejecución** de la obra y del **estado final** de la misma.

3.1 | Planos

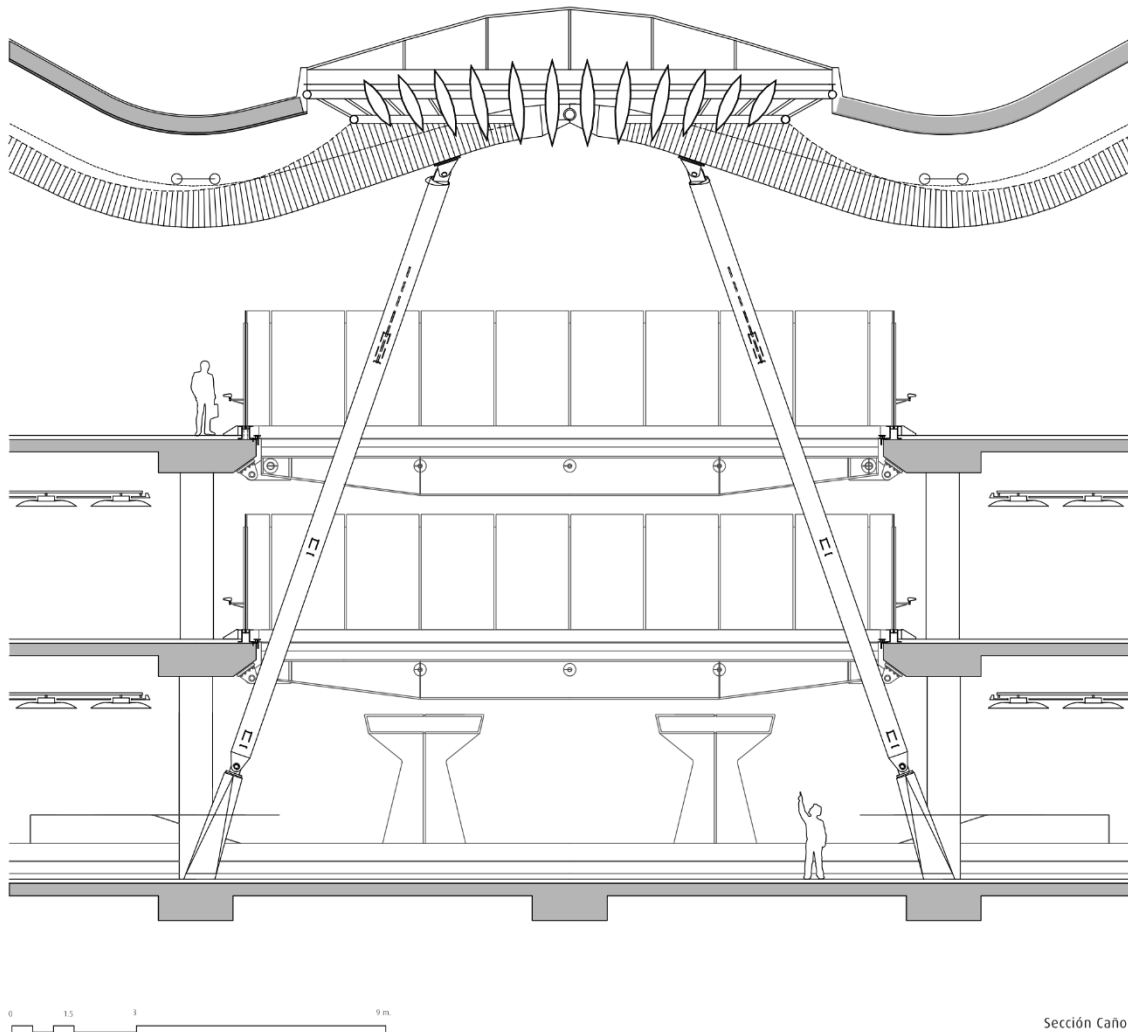
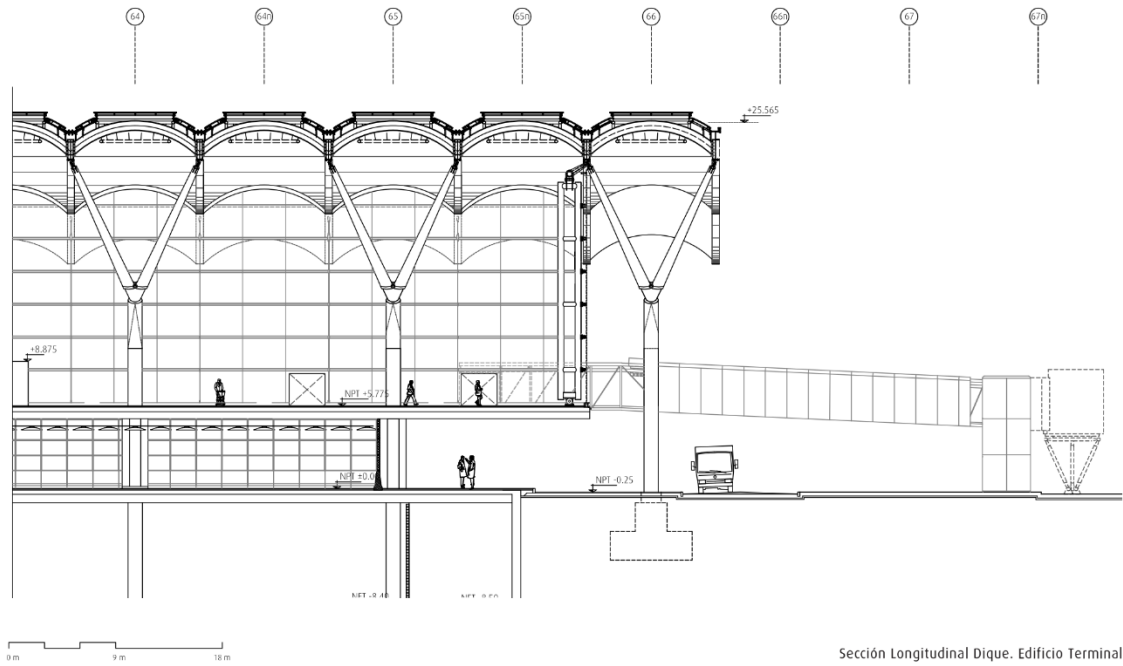


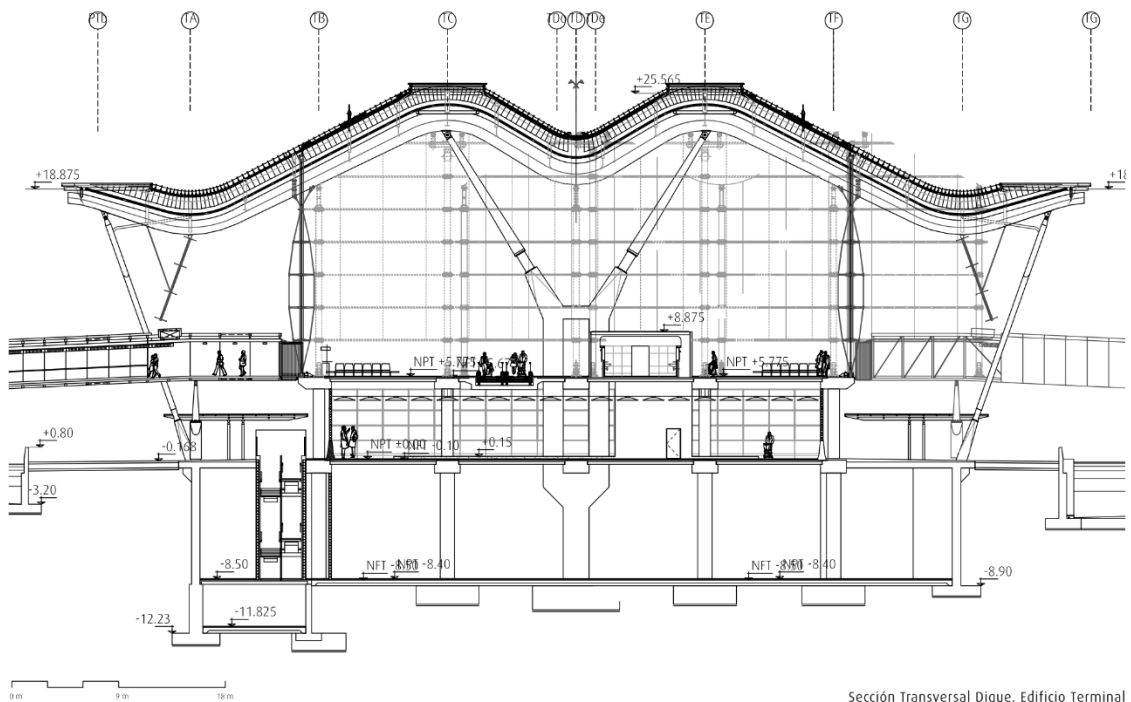
Imagen 15 | Sección transversal de la zona central de la terminal. (TC Cuadernos)

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL
T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

DIEGO COLL MARTÍNEZ



Sección Longitudinal Dique. Edificio Terminal



Sección Transversal Dique. Edificio Terminal

Imagen 16 | Sección longitudinal y sección transversal del extremo de la terminal. (TC Cuadernos)

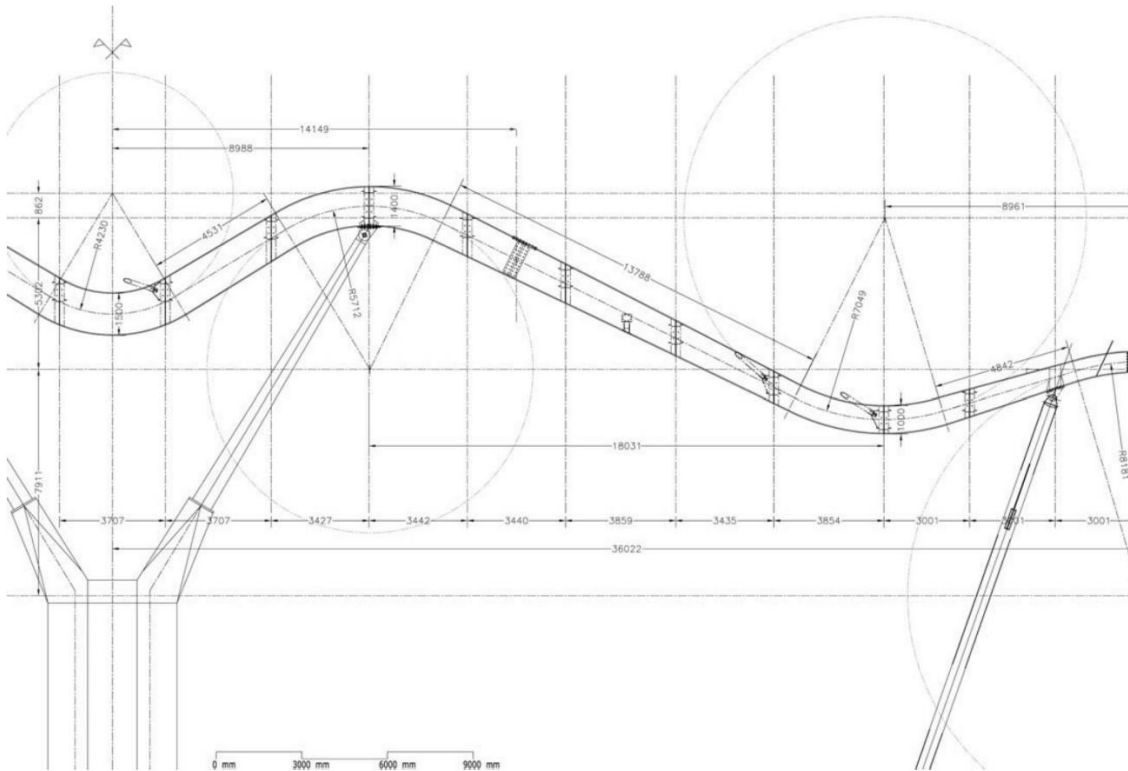


Imagen 17 | Alzado acotado de una viga principal. (TC Cuadernos)

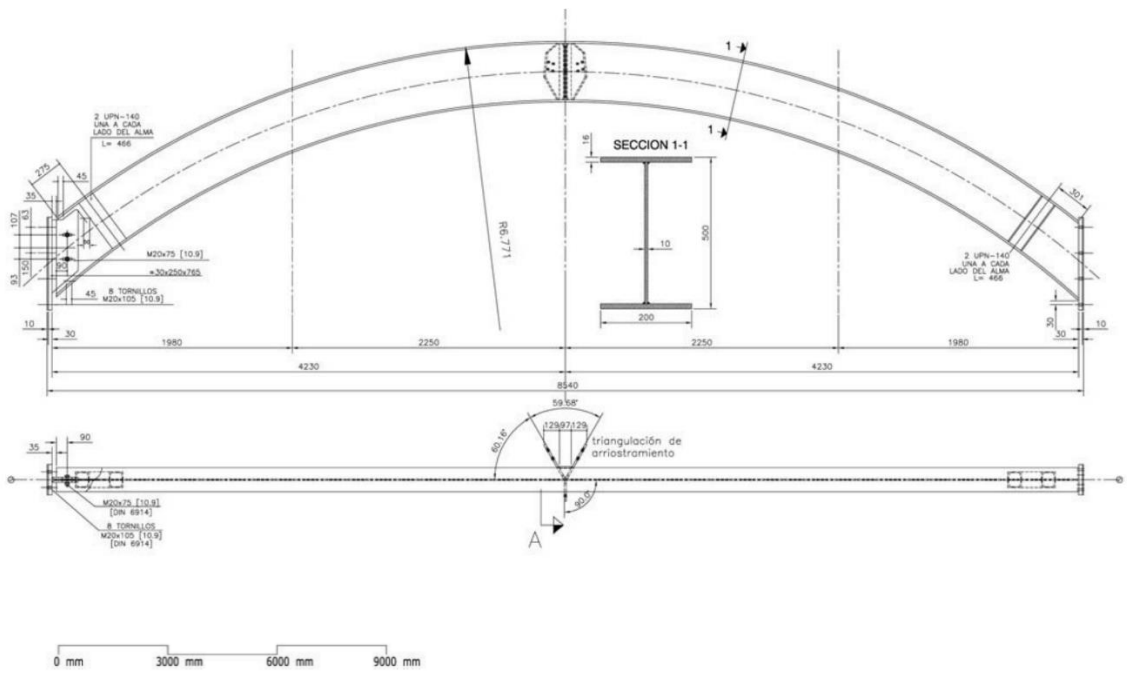
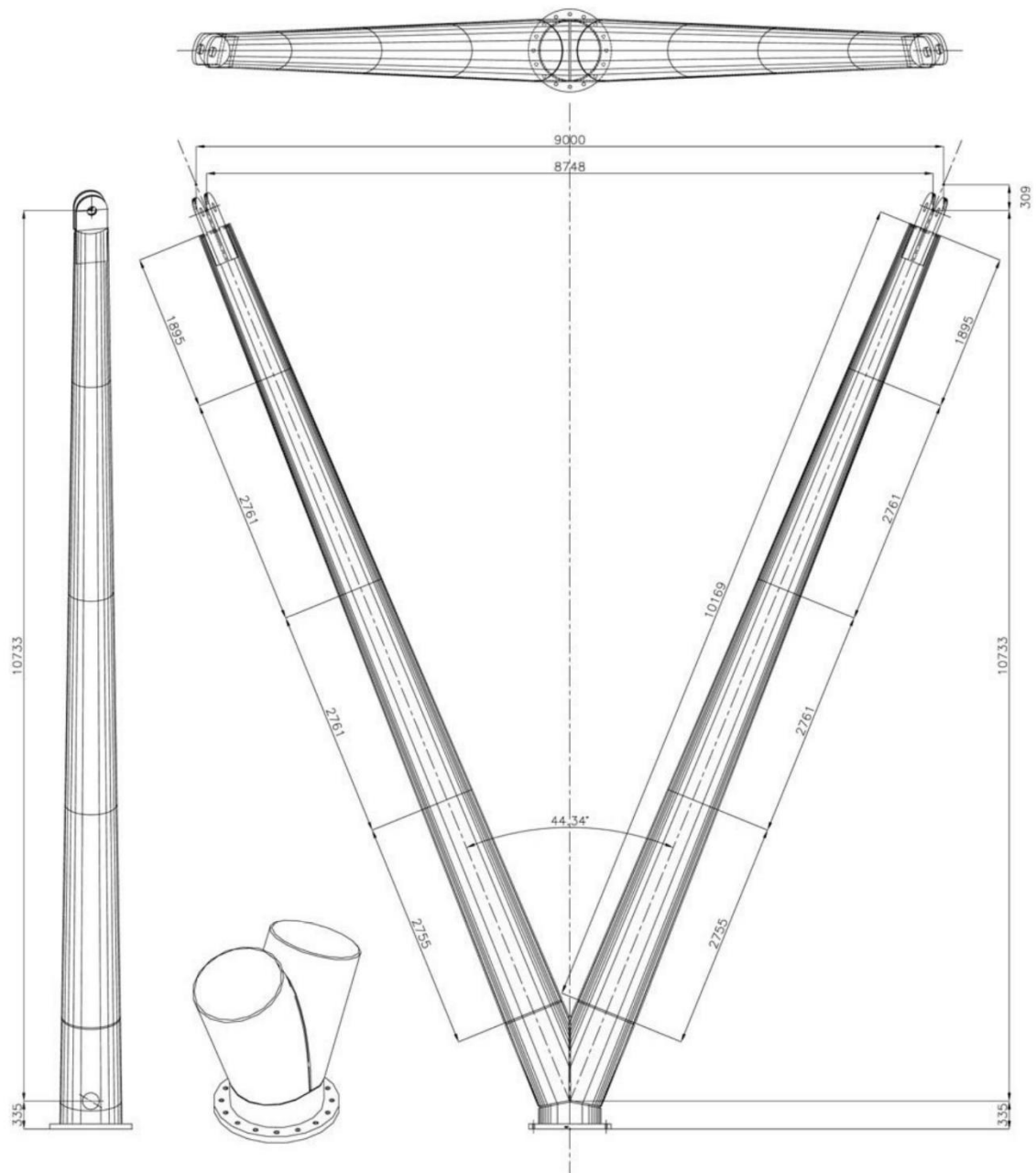


Imagen 18 | Alzado y planta acotados de una viga secundaria. (TC Cuadernos)



Estructura de Acero
Definición formal de pilares en "V"

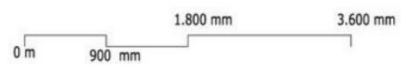


Imagen 19 | Planta, alzado lateral y alzado frontal acotados de un pilar en forma de "V". (TC Cuadernos)

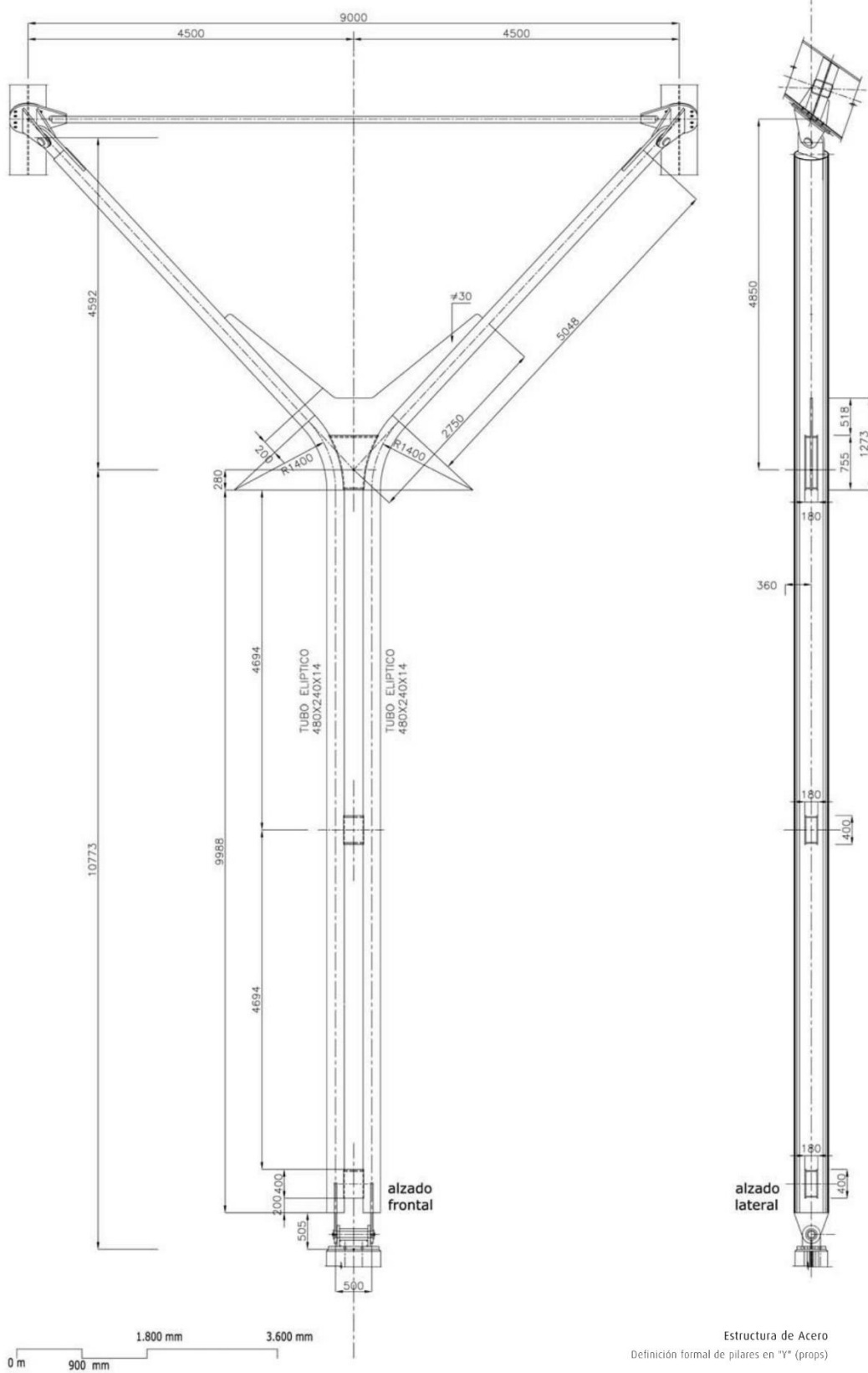


Imagen 20 | Alzado frontal y alzado lateral acotados de un pilar en forma de "Y". (TC Cuadernos)

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL
T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

DIEGO COLL MARTÍNEZ

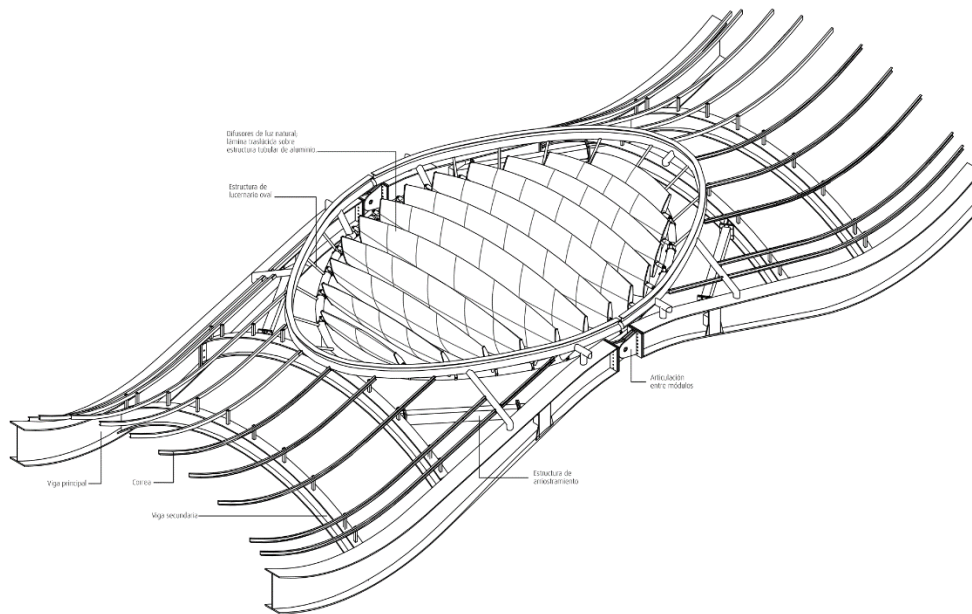
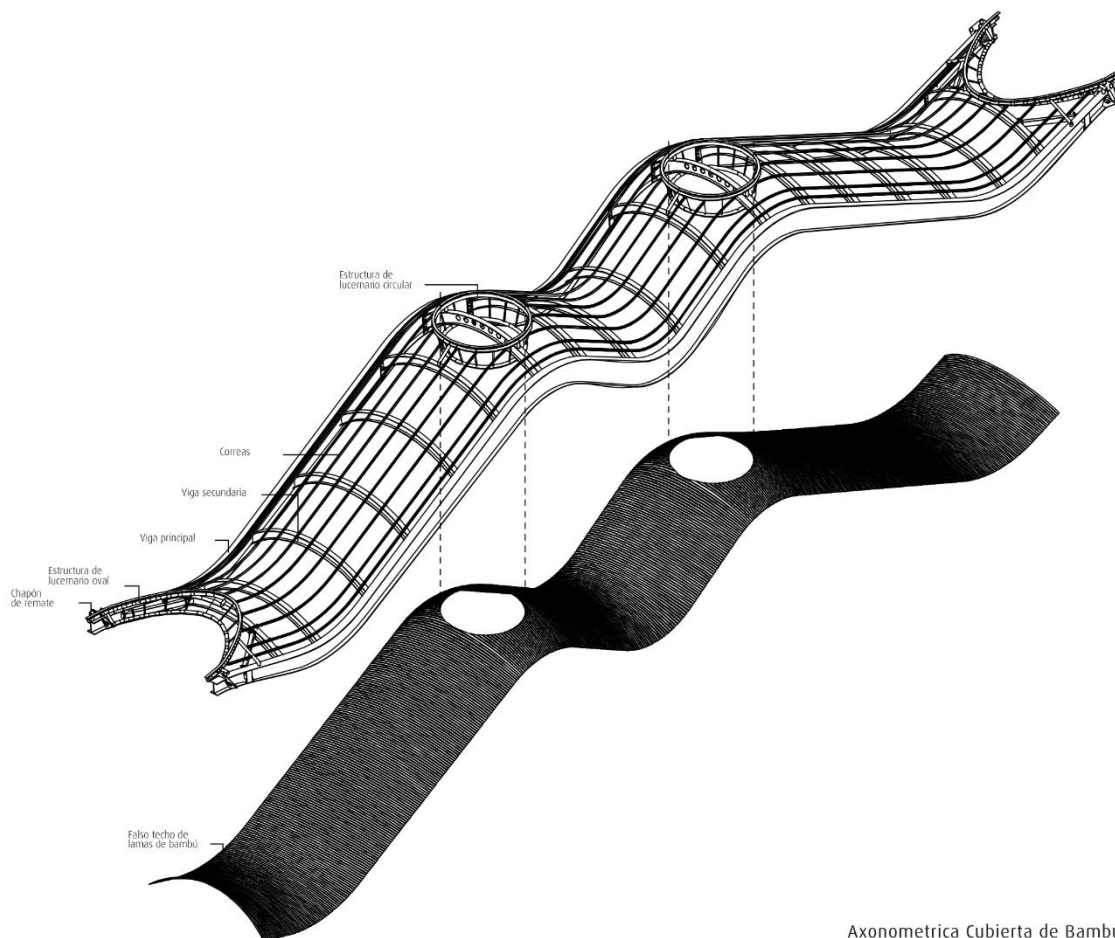


Imagen 21 | Esquema de un cañón de la zona central de la terminal. (TC Cuadernos)

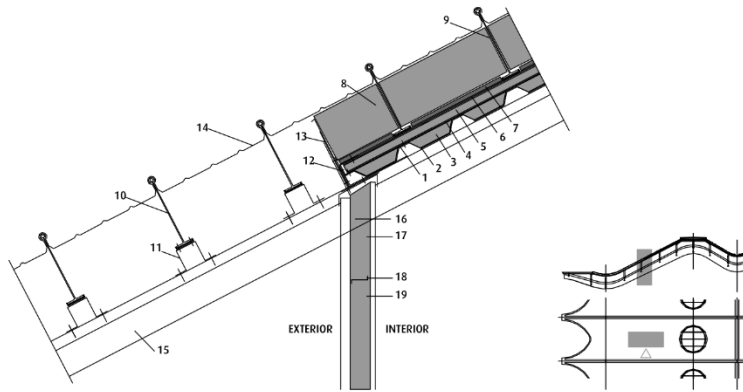


Axonometrica Cubierta de Bambú

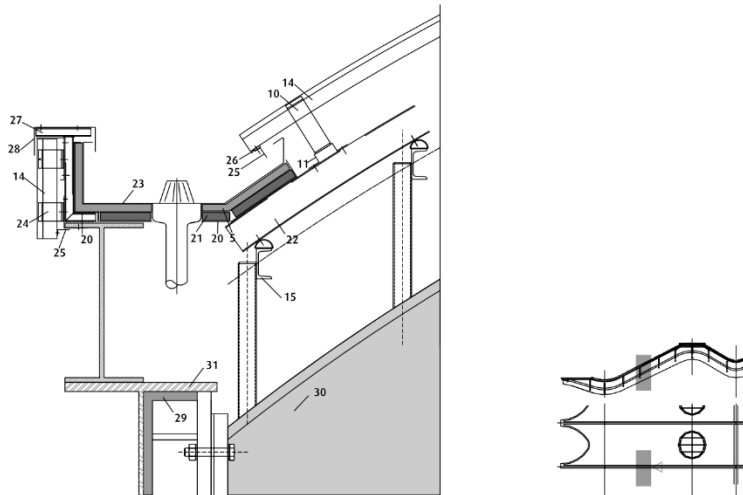
Imagen 22 | Axonometría de la cubierta. (TC Cuadernos)

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

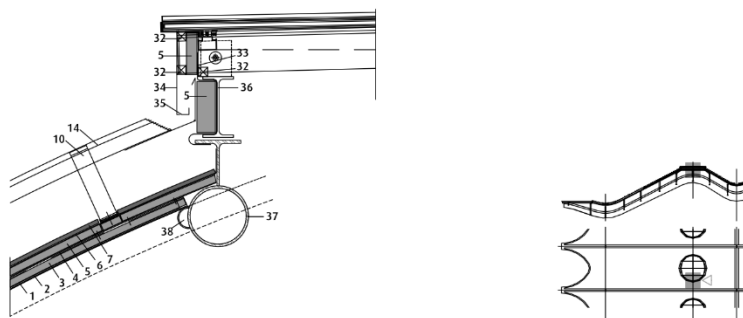
DIEGO COLL MARTÍNEZ



Sección Tipo de Cubierta



Sección Tipo de Canalón de Borde



Encuentro Cubierta con Lucernario Circular

1. Kalbau 35/200/1,2 perforado
2. Refuerzo Kalbau con lana de roca, e=35mm, 100kg/m³
3. Relleno de Kalbau con lana de roca, e=35mm, 100 kg/m³
4. Perfil omega de acero galvanizado, e=1,5mm
5. Lana de roca, e=30mm, 100 kg/m³
6. Kalflex, barrera de vapor
7. Viroc, tablero acústico
8. Lana de roca, e=200mm, (comprimido a 175mm), 22-25 kg/m³ (2 tablas de 100mm)
9. Clip L190+aislamiento
10. Clip L190
11. Sobrecorreas de estructura metálica de acero en chapa plegada h=70mm
12. Remate 2 partes
13. Remate final
14. Kalzip 65/400/0.9
15. Correa de arriostamiento
16. Relleno de 2 capas de aislante e=2x30mm, 100 kg/m³
17. Pladur e=150mm
18. Zeta 30-80-30 acero galvanizado
19. Chapa grecada acero galvanizado
20. Chapa de soporte de acero galvanizado
21. Tablero aglomerado ignífugo fenólico
22. Omega 40.100.100.40.2
23. Chapa de canalón de AlMn1Mg1+AlZn1, e=3mm,z=1260mm
24. Clip L25
25. Goterón
26. Junta de goma
27. Estructura metálica
28. Chapa de acero
29. Poliuretano proyectado
30. Viga secundaria h=700mm
31. Viga principal, canto variable
32. Ángulo L20.20 acero galvanizado (curvado)
33. Chapa de acero galvanizado
34. Remate de aluminio curvado e=1.4mm
35. Desagüe condensación
36. IPE200.
37. Estructura de lucernario
38. Perfil media caña

0 100 300 900 mm.

Imagen 23 | Detalles constructivos de la cubierta. (TC Cuadernos)

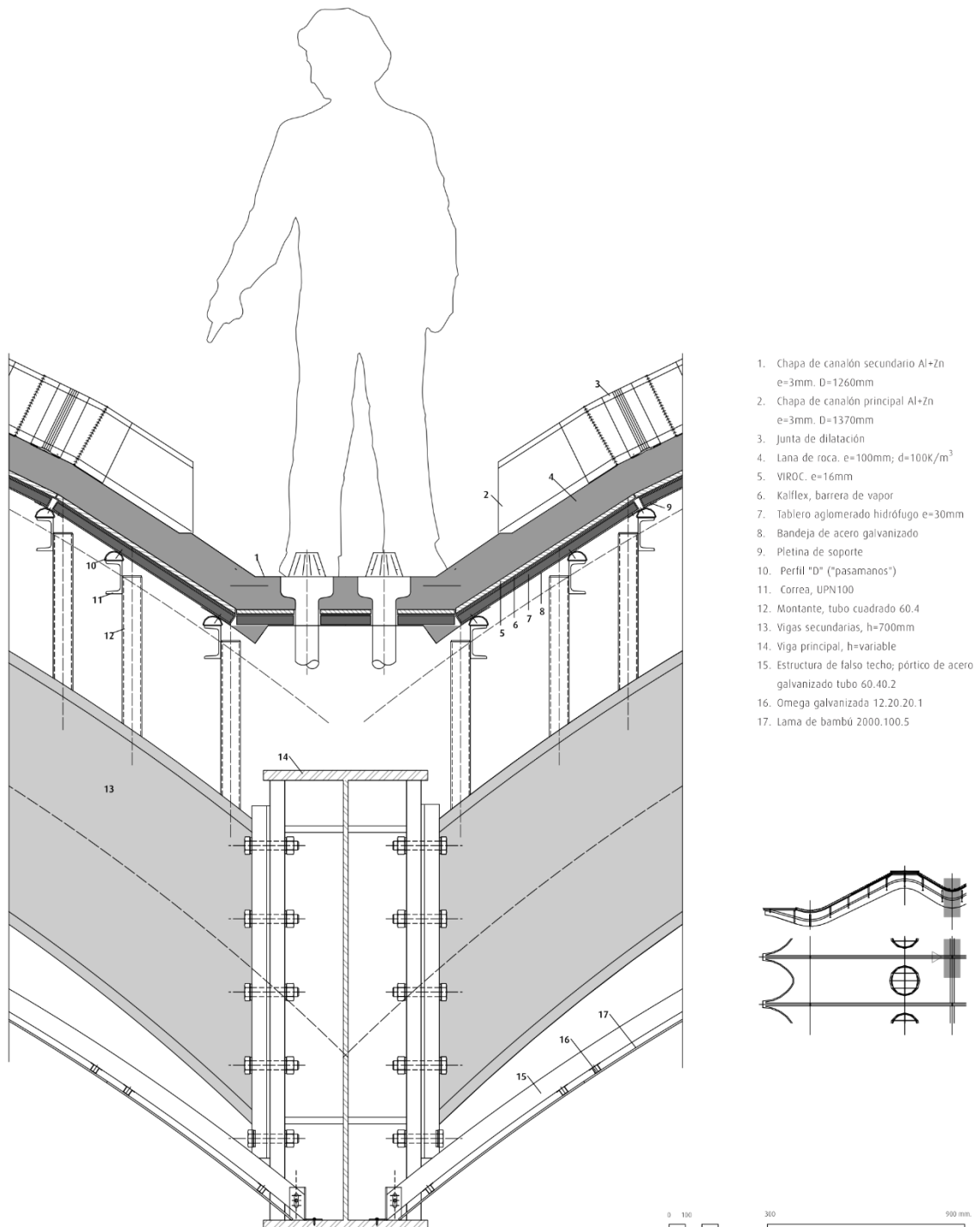


Imagen 24 | Detalle constructivo de la cubierta. (TC Cuadernos)

3.2 | Proceso de ejecución



Imagen 25 | Vista exterior del extremo de la terminal en construcción. (Horta Coslada)



Imagen 26 | Vista exterior de la parte superior de la estructura de la terminal. (Horta Coslada)

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL
T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

DIEGO COLL MARTÍNEZ



Imagen 27 | Vigas principales. (RSHP)

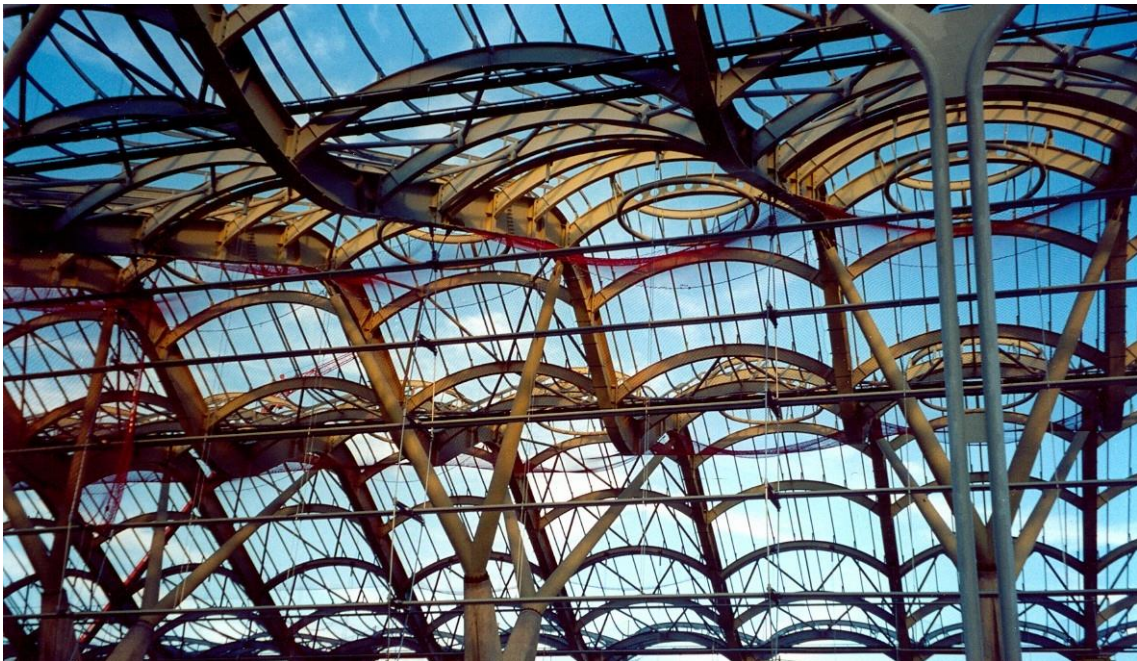


Imagen 28 | Vista interior de la terminal en construcción. (Horta Coslada)



Imagen 29 | Vista interior de la zona central de la terminal en construcción. (Horta Coslada)

3.3 | Estado final



Imagen 30 | Vista exterior del extremo de la terminal. (Estudio Lamela)

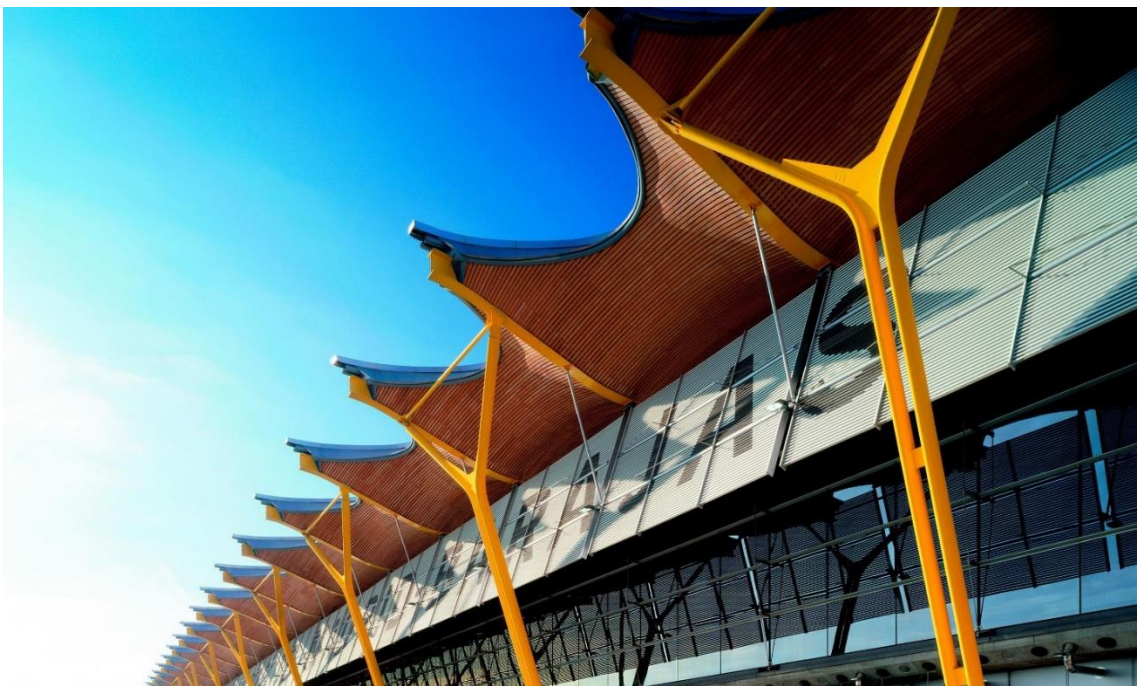


Imagen 31 | Vista exterior del lateral de la terminal. (Estudio Lamela)

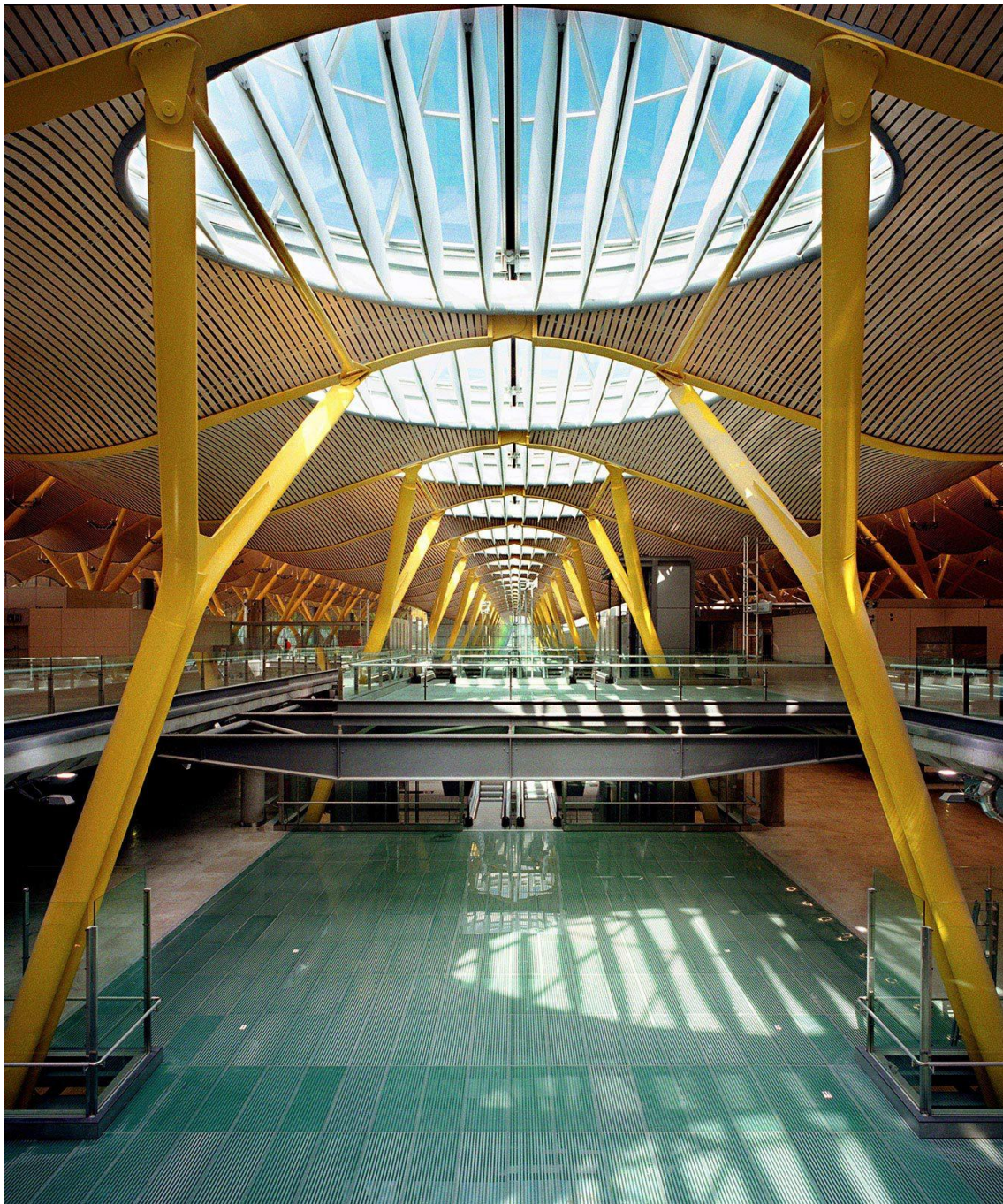


Imagen 32 | Vista interior de la zona central de la terminal. (Estudio Lamela)

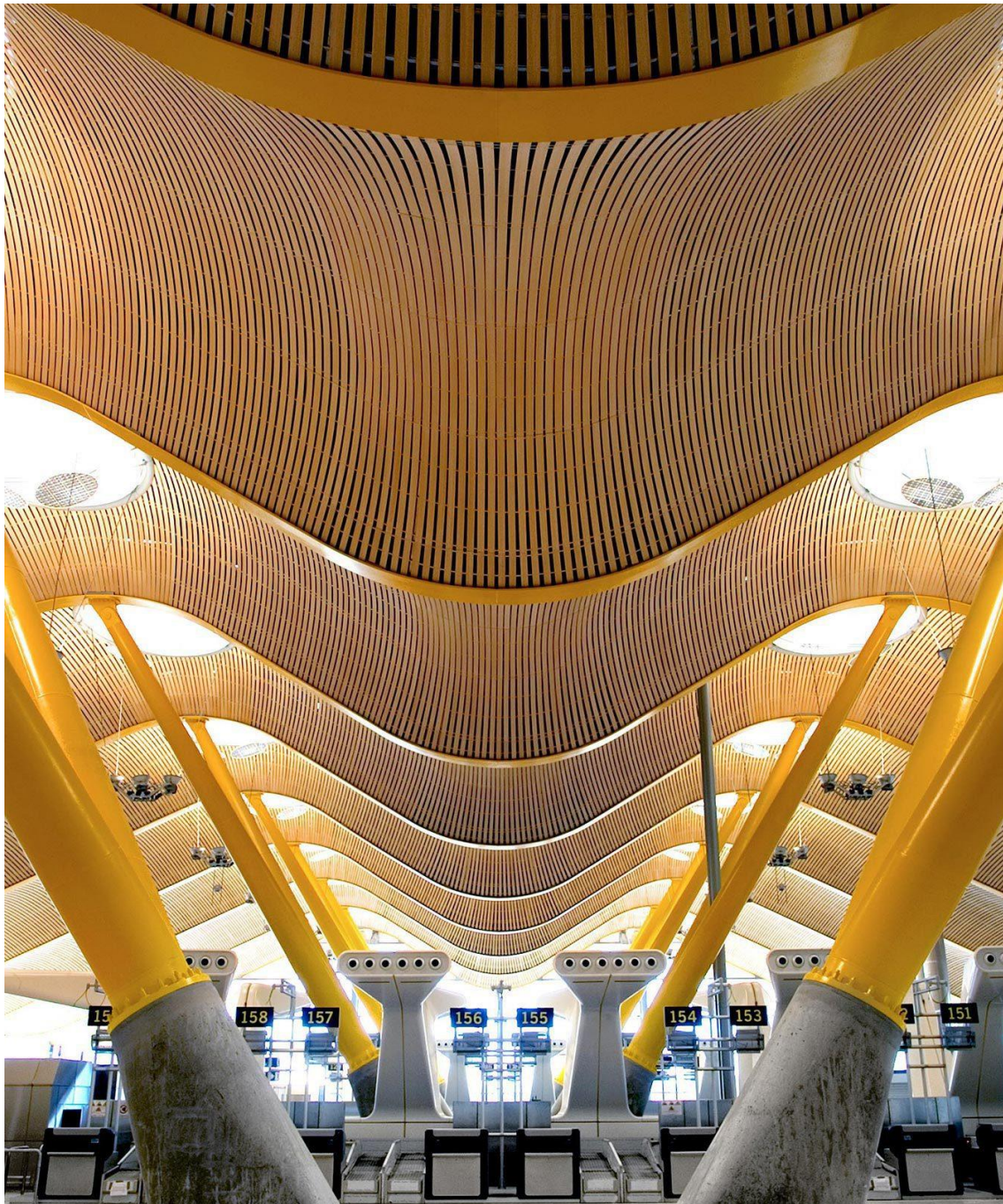


Imagen 33 | Falso techo. (Estudio Lamela)

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL
T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

DIEGO COLL MARTÍNEZ



Imagen 34 | Lucernario de la cubierta. (RSHP)



Imagen 35 (izquierda) | Limahoyas de la cubierta. (Estudio Lamela)



Imagen 36 (derecha) | Canalón de la cubierta. (RSHP)

4 | Modelo de análisis

Para poder realizar el análisis estructural de la terminal, teniendo en cuenta que toda modelización es una representación simplificada de la estructura que se esté modelizando, es necesario crear un modelo que represente, de la manera más precisa posible, el comportamiento real de la estructura. A partir de esta **modelización**, se definen los **materiales** y las **secciones** además de las **cargas** y los **enlaces**.

4.1 | Modelización

La modelización de la terminal se realiza en **AutoCAD**. Intentando aproximarse todo lo posible al comportamiento real de la estructura, los elementos estructurales se representan de manera distinta atendiendo a su geometría y dimensiones.

En el presente trabajo, a la hora de realizar el modelo, se excluye la modelización de los forjados y de las plantas subterráneas de la terminal. De esta forma, se consigue reducir el número de elementos modelizados, facilitando el proceso de cálculo.

Por un lado, los **perfiles metálicos** se definen mediante **elementos lineales** con el comando "LÍNEA" (imagen 37) y por otro lado, tanto los **pilares de hormigón armado** como la **cubierta** se representan mediante **elementos finitos** con el comando "3DCARA" (imagen 38).

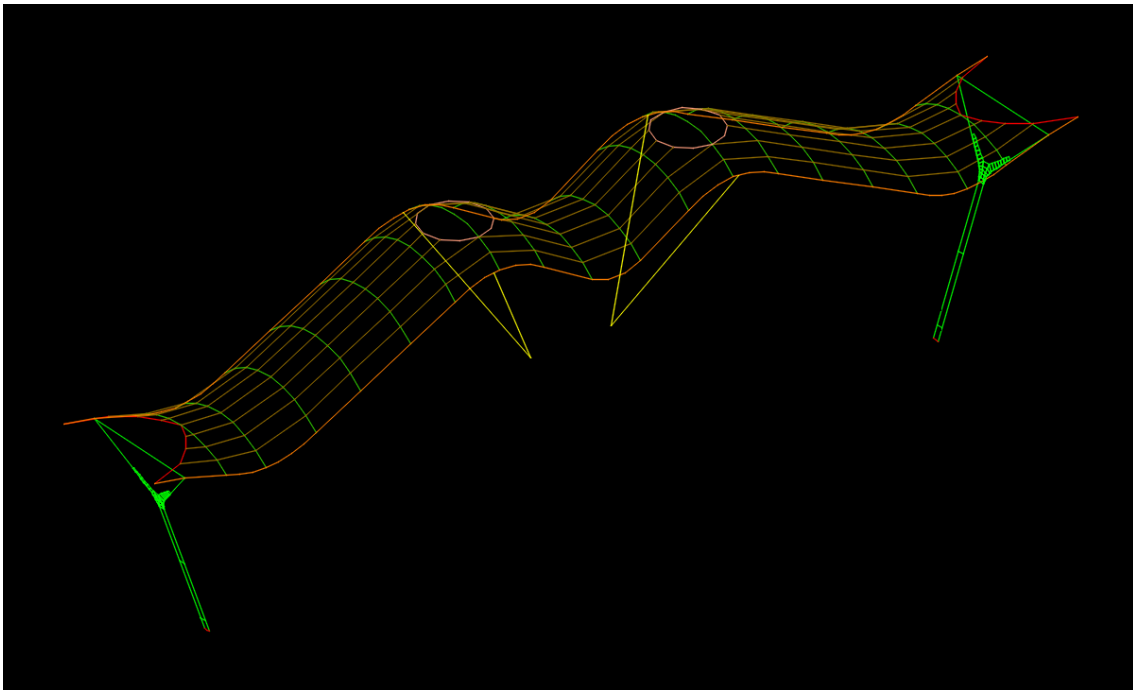


Imagen 37 | Captura de AutoCAD: Modelización de los elementos lineales. (elaboración propia)

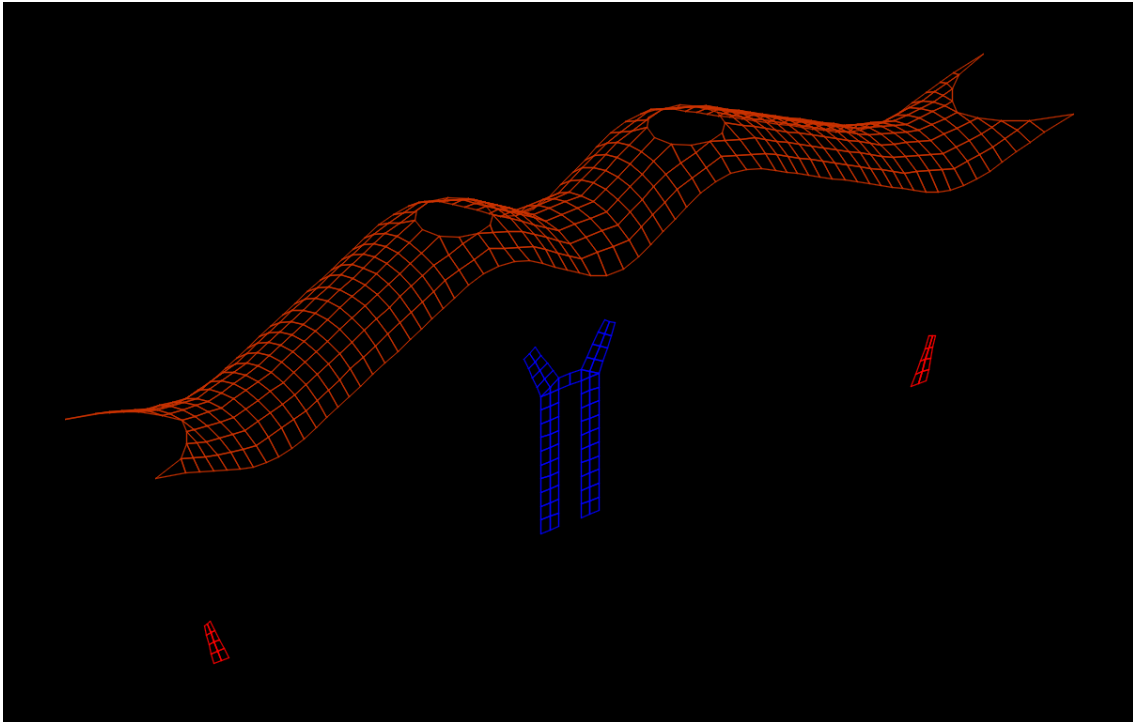


Imagen 38 | Captura de AutoCAD: Modelización de los elementos finitos. (elaboración propia)

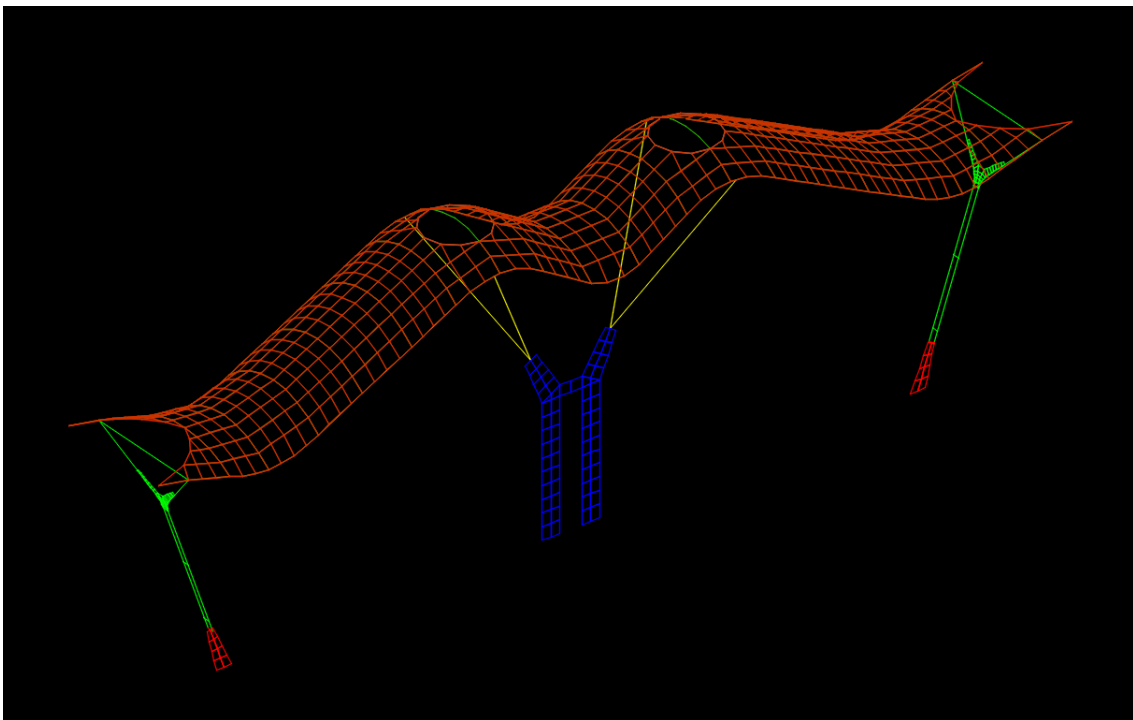


Imagen 39 | Captura de AutoCAD: Modelización de un módulo completo de la terminal. (elaboración propia)

Una vez modelizado un módulo completo (imagen 39), se modeliza la terminal mediante la repetición sucesiva de dicho módulo, tal y como se muestra en la imagen 40.

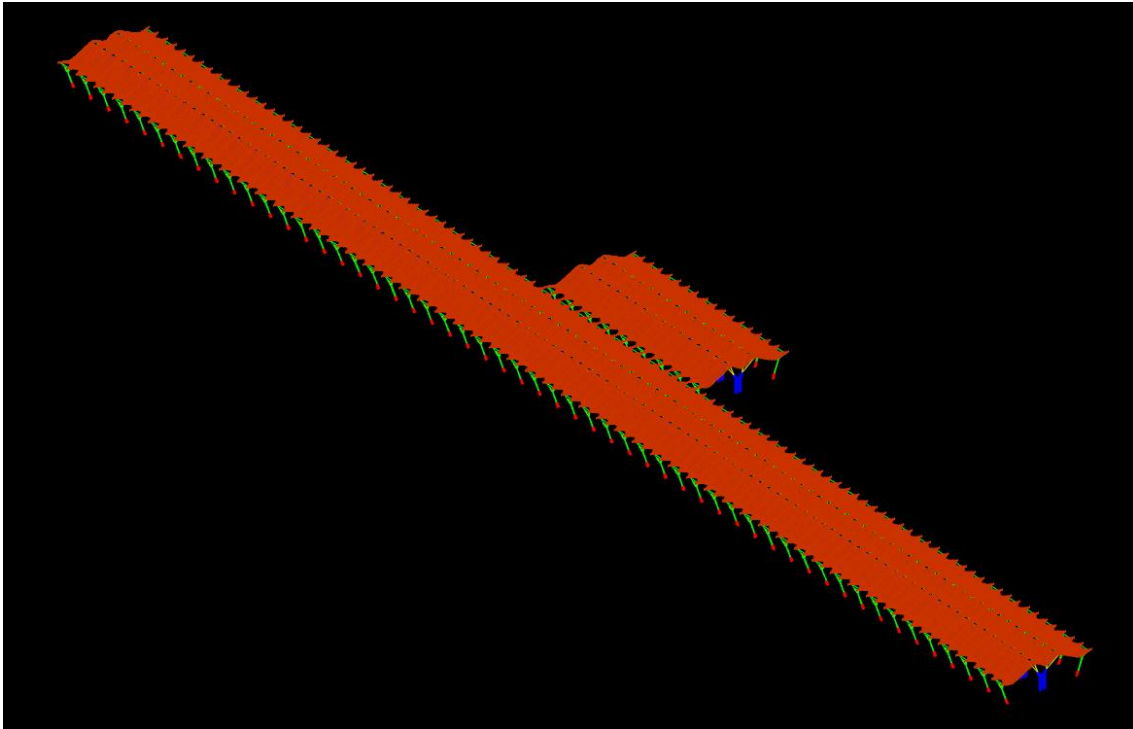


Imagen 40 | Captura de AutoCAD: Modelización de la terminal. (elaboración propia)

Teniendo en cuenta la gran cantidad de elementos obtenidos (123.718), los cuales dificultan el proceso de cálculo, se reduce el tamaño de la terminal tal y como se muestra en la imagen 41. La reducción se considera razonable debido a que el comportamiento estructural no varía significativamente. Esto se debe a que únicamente se eliminan los módulos de los extremos de la terminal.

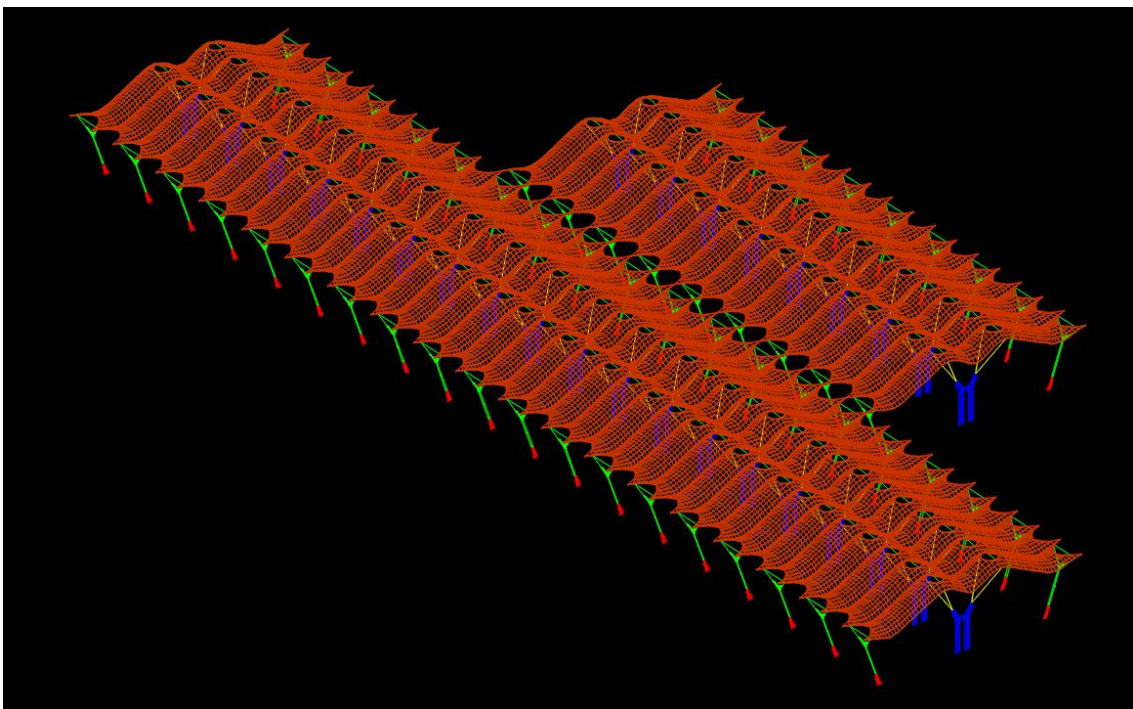


Imagen 41 | Captura de AutoCAD: Modelización de la terminal reducida. (elaboración propia)

Una vez reducido el tamaño de la terminal, se exporta el modelo a **SAP2000** para analizar su comportamiento estructural, tal y como se muestra en la imagen 42.

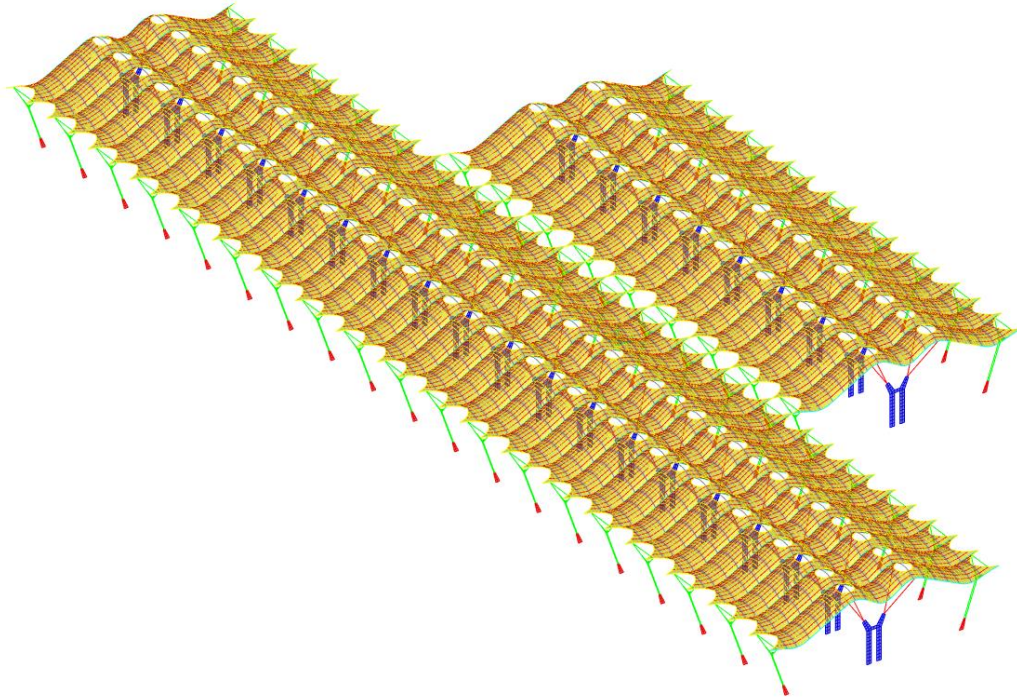


Imagen 42 | Captura de SAP2000: Modelización de la terminal reducida. (elaboración propia)

4.2 | Definición de los materiales

Los materiales empleados se determinan a partir de la información recopilada acerca de la estructura de la terminal, la cual permite reducir el número de suposiciones a la hora de asignar dichos materiales al modelo.

En cuanto a la estructura metálica, el material utilizado es el acero **S355** a excepción de las correas, las cuales son de acero **S275** y de las chapas del panel sándwich que son de acero **S235**.

La información disponible acerca del hormigón empleado es escasa, por ello, se opta por suponer que se trata de un hormigón **HA-50**.

4.3 | Definición de las secciones

De igual manera que en el apartado 4.2, la definición de las secciones se realiza a partir de la información recopilada, por lo que también es posible reducir el número de suposiciones.

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL
T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

DIEGO COLL MARTÍNEZ

Las secciones de los elementos estructurales se introducen en el programa tal y como están definidas en la tabla 1.

Elemento	Perfil/Sección	Material
Vigas principales	Perfiles armados doble T de canto variable ²	S355
Vigas secundarias	IPE 500	S355
Correas	UPN 100	S275
Perfiles perimetrales	Tubo circular unido a un perfil en T	S355
Cubierta	Panel sándwich 305 mm (espesor)	S235
Pilares "V"	Perfiles tubulares circulares de canto variable ³	S355
Pilares "Y"	Perfiles tubulares elípticos 480.240.14 mm ⁴	S355
Pilares interiores de hormigón armado	100 cm (espesor)	HA-50
Pilares exteriores de hormigón armado	75 cm (espesor)	HA-50

Tabla 1 | Tabla de las secciones de los elementos estructurales. (elaboración propia)

Como se observa en la imagen 43, se aísla un módulo de la terminal para identificar cada elemento estructural.

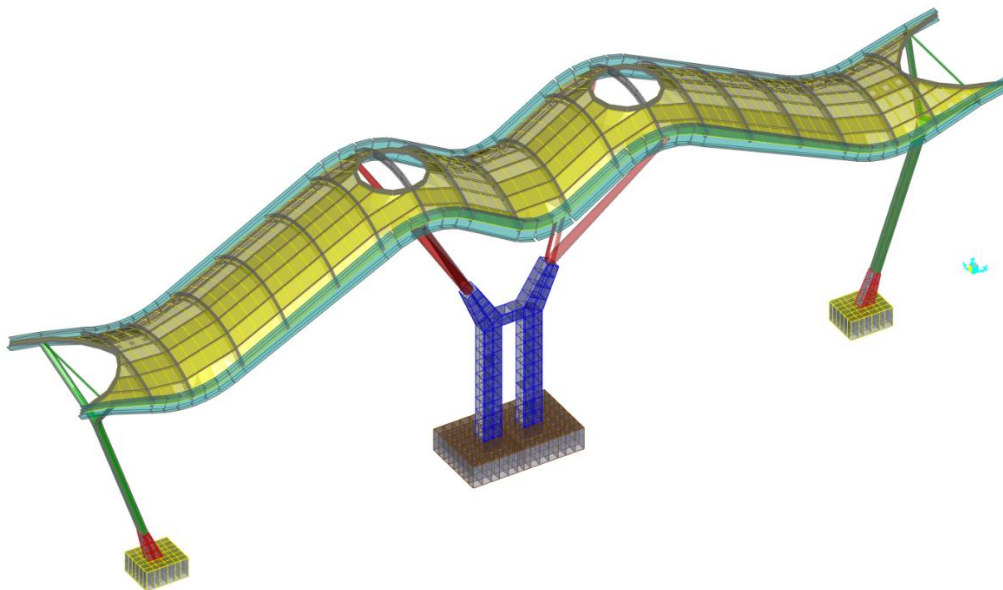


Imagen 43 | Captura de SAP2000: Elementos estructurales. (elaboración propia)

² El canto varía entre los 750 mm en los extremos y los 1500 mm en el centro. Las alas son de 500 mm de ancho y 30 mm de espesor, mientras que el alma tiene un espesor de 15 mm.

³ El diámetro de los perfiles varía entre los 400 mm en el extremo superior y los 750 mm en el extremo inferior.

⁴ Uno de sus diámetros mide 480 mm y el otro 240 mm y el espesor de los perfiles es de 14 mm.

4.3.1 | Vigas principales

Las vigas principales están formadas por perfiles armados doble T de canto variable y se disponen tal y como se muestra en la imagen 44.

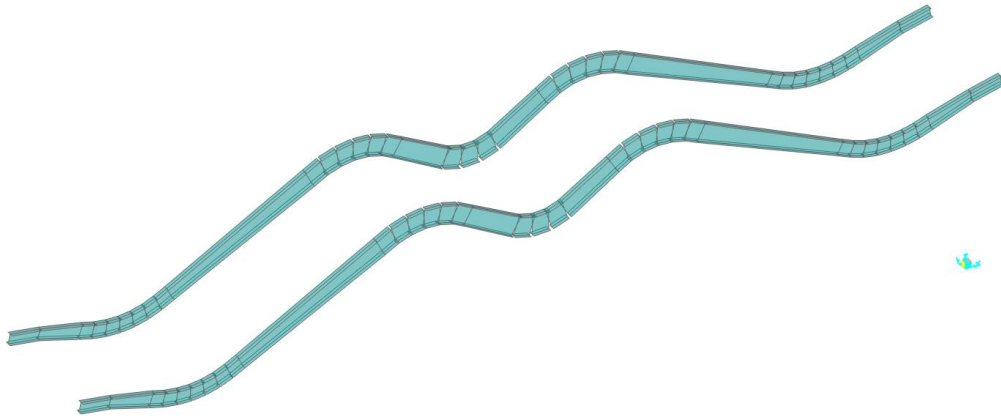


Imagen 44 | Captura de SAP2000: Vigas principales. (elaboración propia)

4.3.2 | Vigas secundarias

Las vigas secundarias están formadas por perfiles IPE 500 y se disponen tal y como se muestra en la imagen 45.

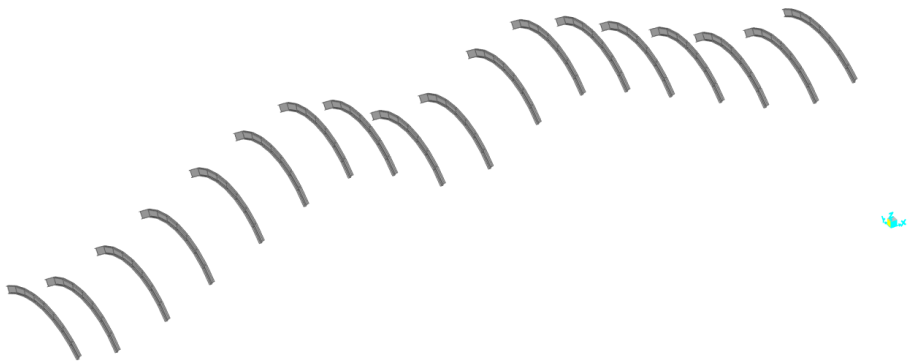


Imagen 45 | Captura de SAP2000: Vigas secundarias. (elaboración propia)

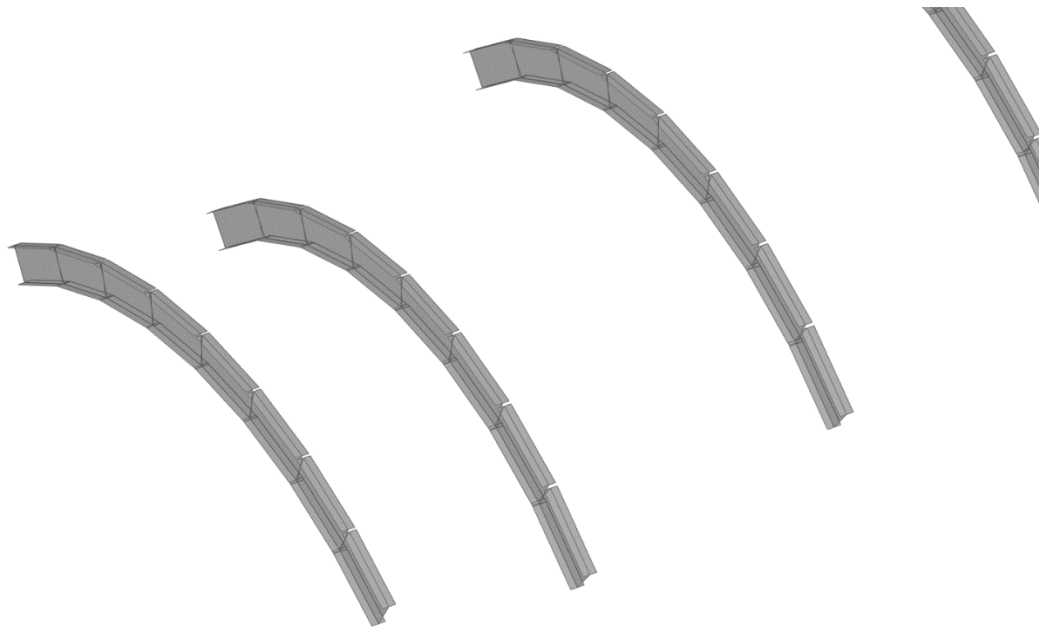


Imagen 46 | Captura de SAP2000: Detalle de las vigas secundarias. (elaboración propia)

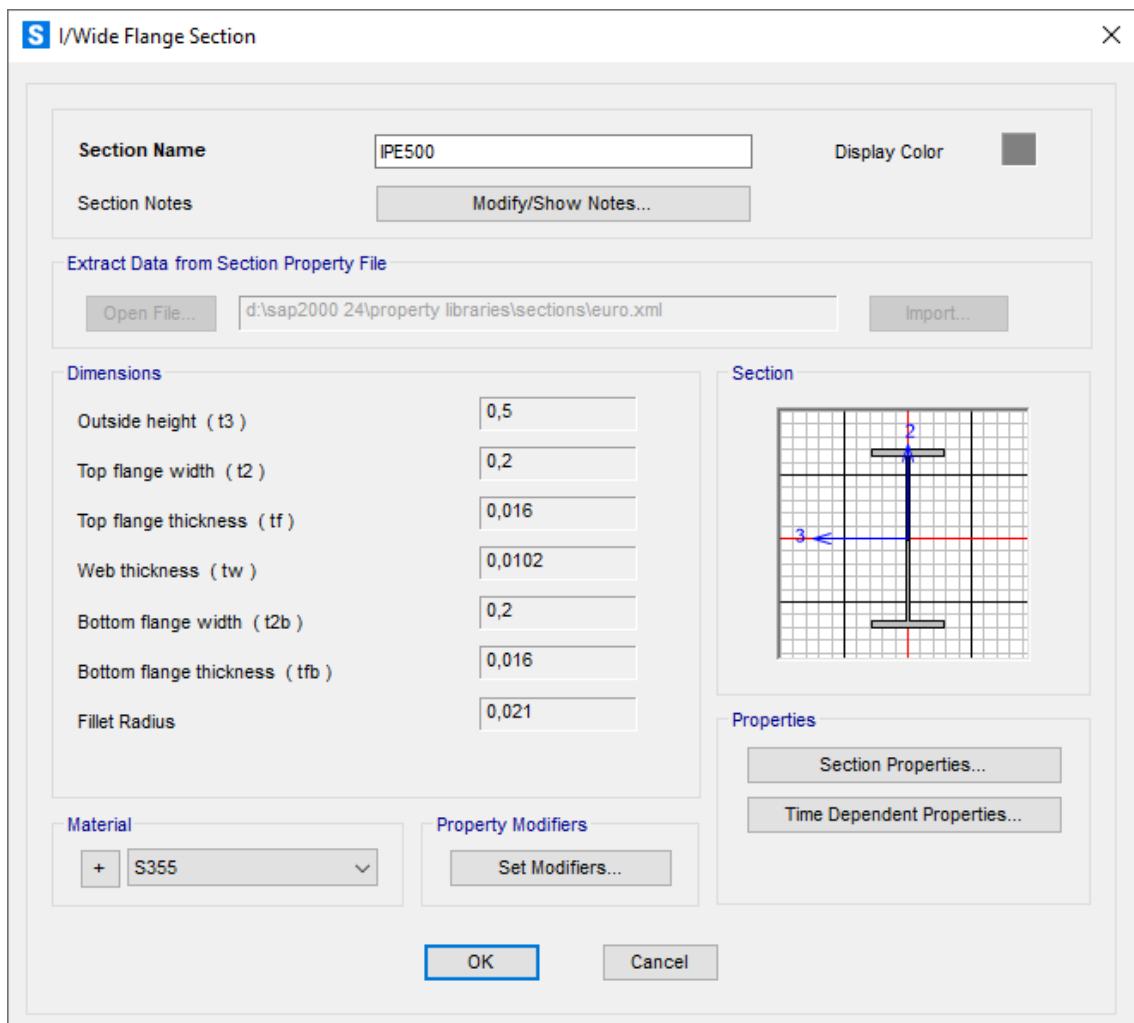


Imagen 47 | Captura de SAP2000: Propiedades del perfil IPE 500. (elaboración propia)

4.3.3 | Correas

Las correas están formadas por perfiles UPN 100 y se disponen tal y como se muestra en la imagen 48.

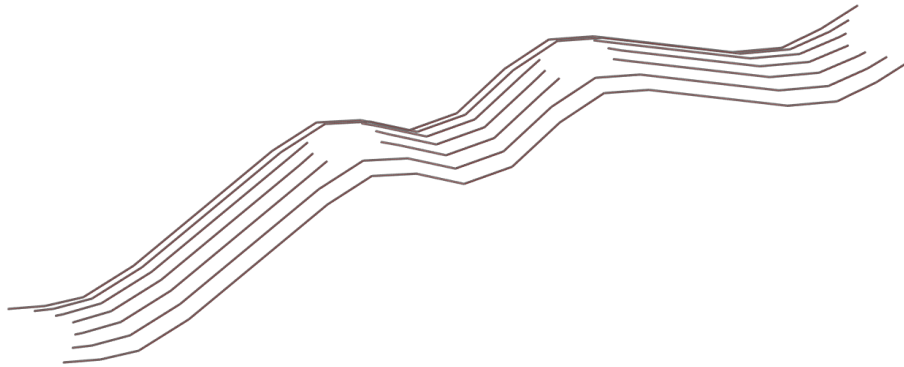


Imagen 48 | Captura de SAP2000: Correas. (elaboración propia)

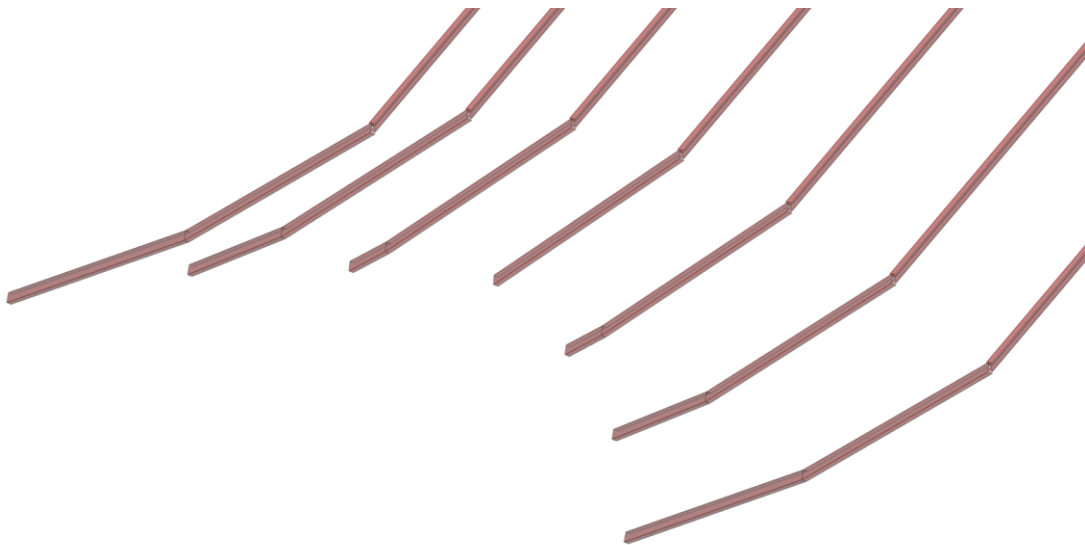


Imagen 49 | Captura de SAP2000: Detalle de las correas. (elaboración propia)

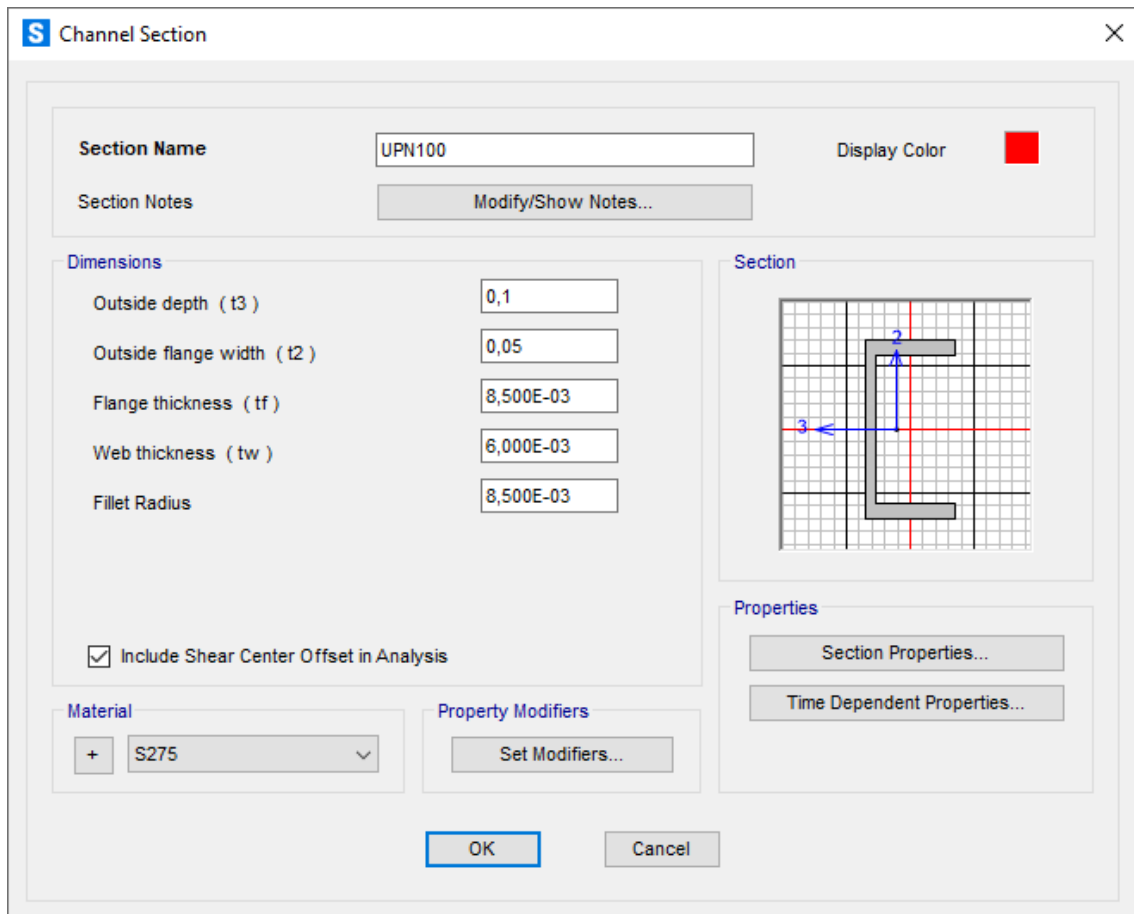


Imagen 50 | Captura de SAP2000: Propiedades del perfil UPN 100. (elaboración propia)

4.3.4 | Perfiles perimetrales

Los perfiles perimetrales están formados por secciones compuestas por un tubo circular unido a un perfil en T. Estos perfiles se disponen tal y como se muestra en la imagen 51.

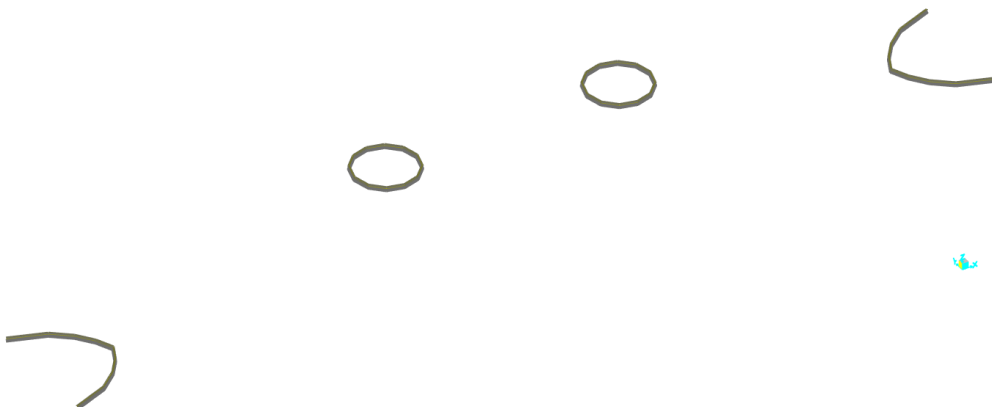


Imagen 51 | Captura de SAP2000: Perfiles perimetrales. (elaboración propia)

Dado que se trata de perfiles singulares que no están definidos en el programa, para su elaboración, es necesario utilizar la herramienta "Section Designer" de SAP2000, tal y como se muestra en las imágenes 53 y 54.

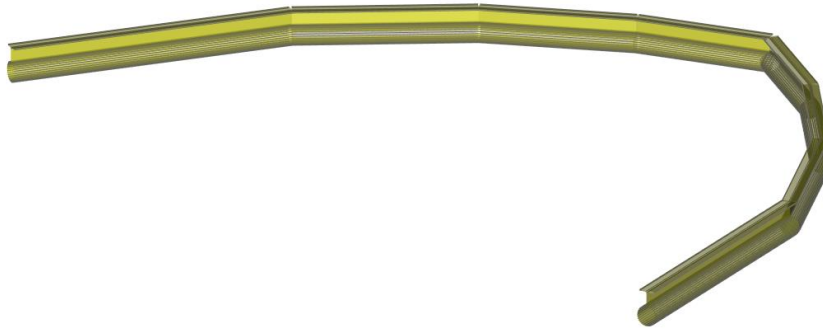


Imagen 52 | Captura de SAP2000: Detalle de los perfiles perimetrales. (elaboración propia)

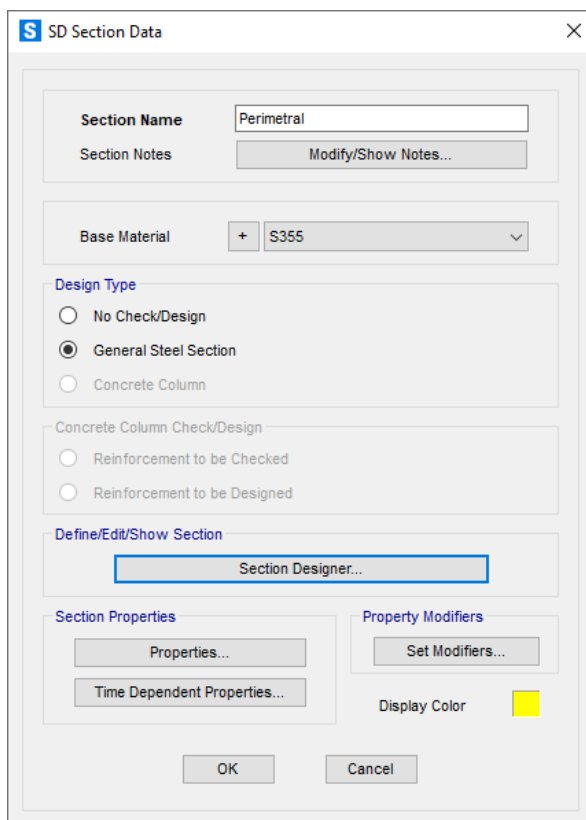


Imagen 53 | Captura de SAP2000: Propiedades del perfil perimetral. (elaboración propia)

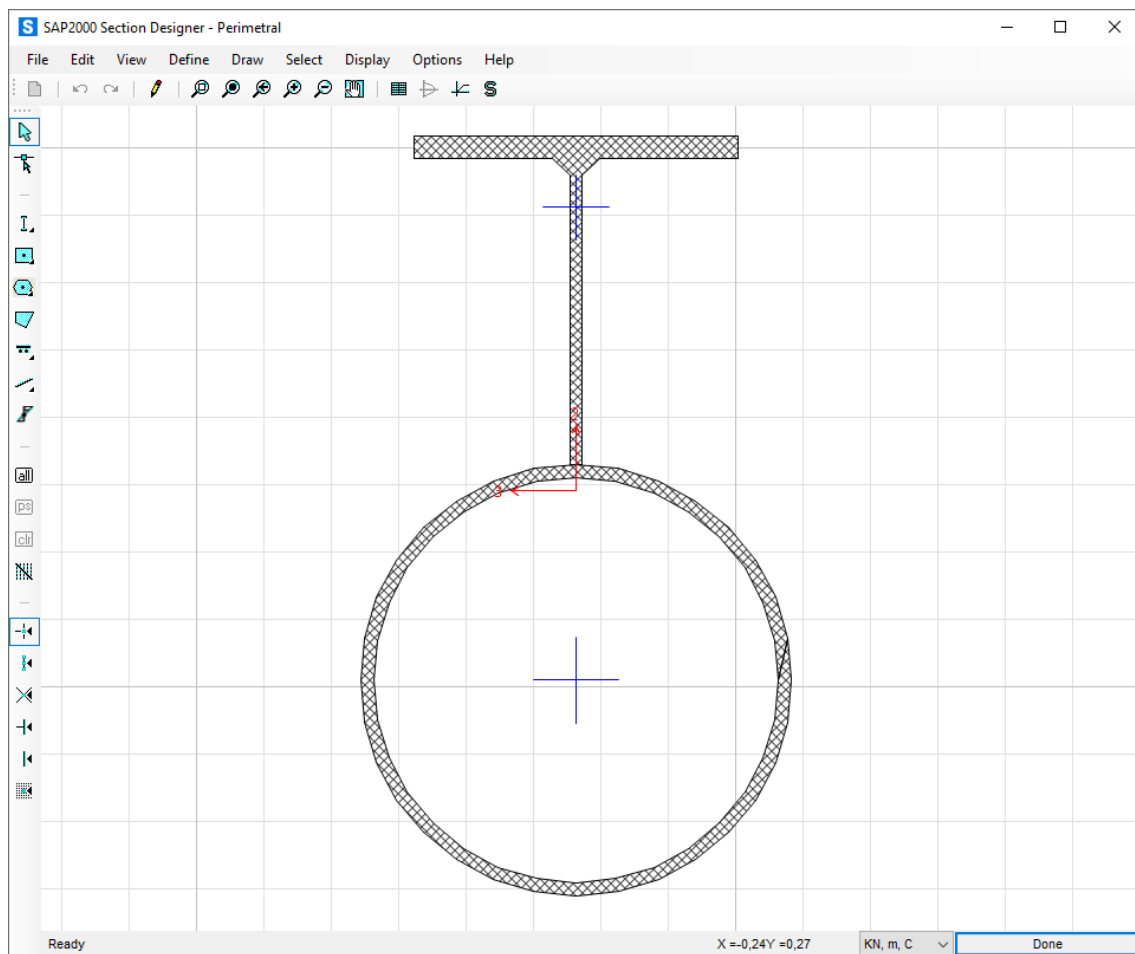


Imagen 54 | Captura de SAP2000: Section Designer. (elaboración propia)

4.3.5 | Cubierta

La cubierta está formada por un panel sándwich con un espesor total de 305 mm que se dispone tal y como se muestra en la imagen 55.

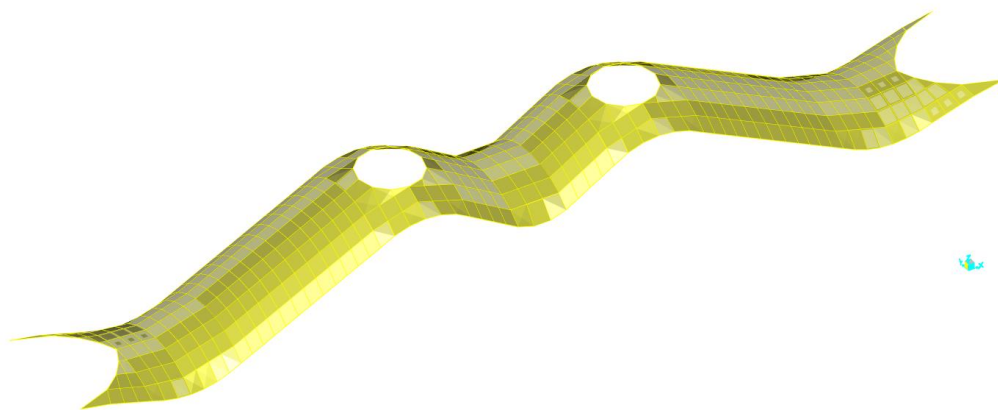


Imagen 55 | Captura de SAP2000: Cubierta. (elaboración propia)

Para obtener los datos necesarios del panel sándwich, se utiliza la tabla 2.

EQUIVALENCIA PANEL SÁNDWICH - LOSA (MATERIAL ACERO S235)			
DECK (305x1,05)	CANTO TOTAL PANEL	305,00	mm
	ESPESOR CHAPA SUP. E INF.	1,05	mm
LOSA MACIZA	MEMBRANE (AREA)	0,0022	m
	BENDING (INERCIA)	0,0835	m
PROPERTY MODIFIER	FLEXIÓN SECUNDARIA (M22, V23)	0,2500	
	AXIL SECUNDARIO (F22)	0,2500	

Tabla 2 | Tabla Excel de equivalencia de panel sándwich. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis)

Como se observa en la imagen 56, los datos obtenidos en la tabla 2 se introducen en SAP2000.

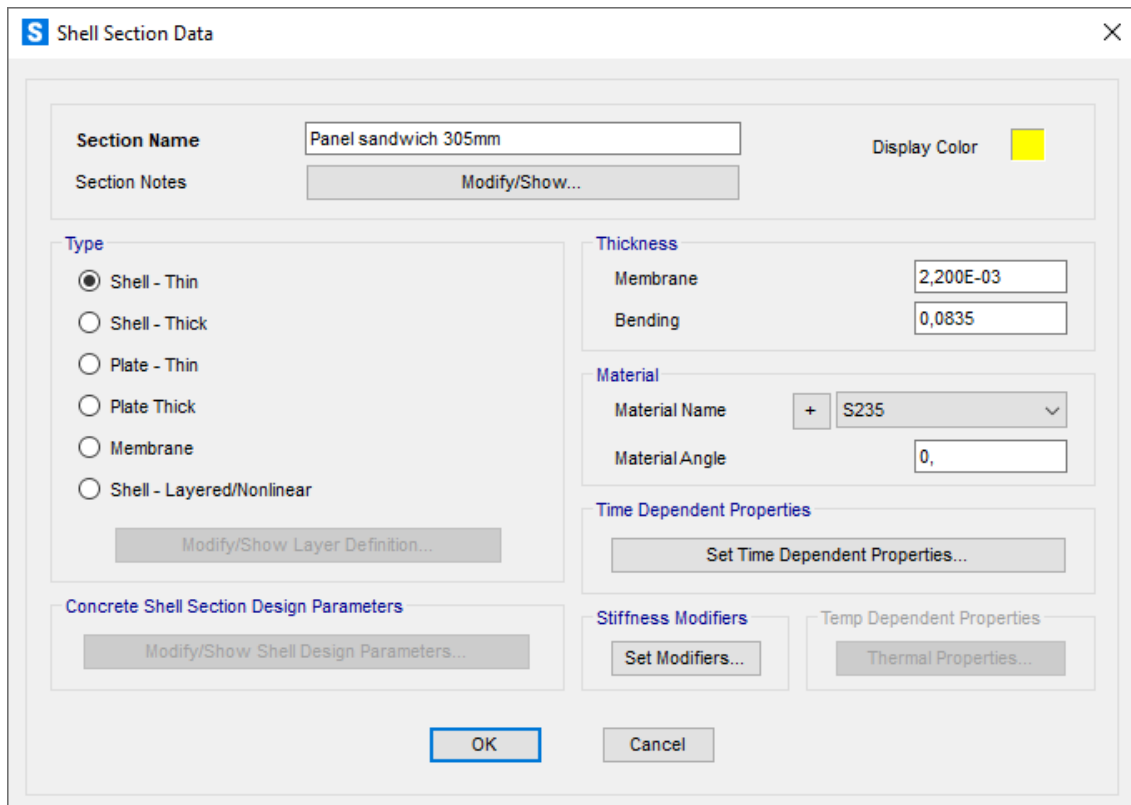


Imagen 56 | Captura de SAP2000: Propiedades del panel sándwich. (elaboración propia)

4.3.6 | Pilares "V"

Los pilares en forma de "V" están formados por perfiles tubulares circulares de canto variable y se disponen tal y como se muestra en la imagen 57.

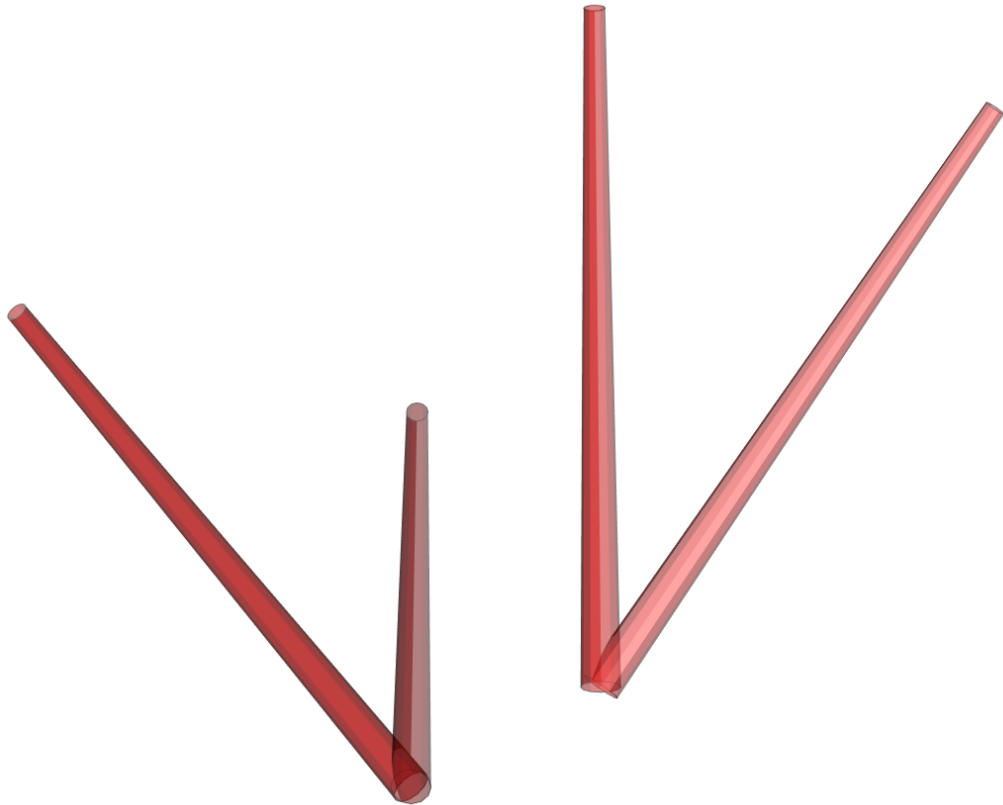


Imagen 57 | Captura de SAP2000: Pilares "V". (elaboración propia)

4.3.7 | Pilares “Y”

Los pilares en forma de “Y” están formados por perfiles tubulares elípticos. Estos pilares se disponen tal y como se muestra en la imagen 58.



Imagen 58 | Captura de SAP2000: Pilares “Y”. (elaboración propia)

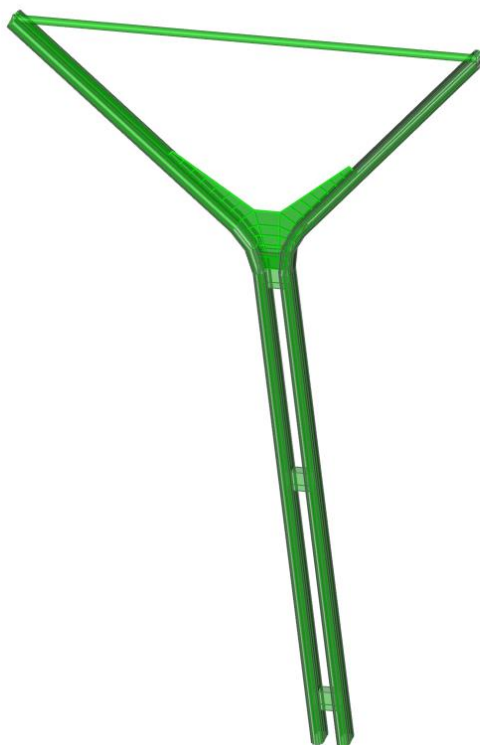


Imagen 59 | Captura de SAP2000: Detalle de un pilar “Y”. (elaboración propia)

De igual manera que en el apartado 4.3.4, este tipo de perfiles tampoco están definidos en SAP2000, por lo que, como se observa en las imágenes 60 y 61, se utiliza la herramienta “Section Designer” para diseñar dichos perfiles.

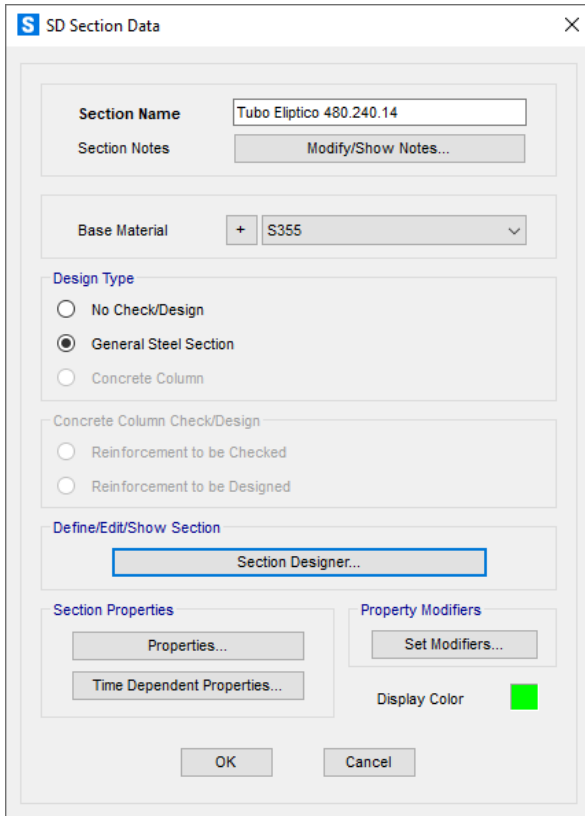


Imagen 60 | Captura de SAP2000: Propiedades del perfil tubular elíptico. (elaboración propia)

Con el fin de simplificar el diseño de los perfiles, en lugar de utilizar las dimensiones originales de la elipse, se opta por representarlos tal y como se muestra en la imagen 61.

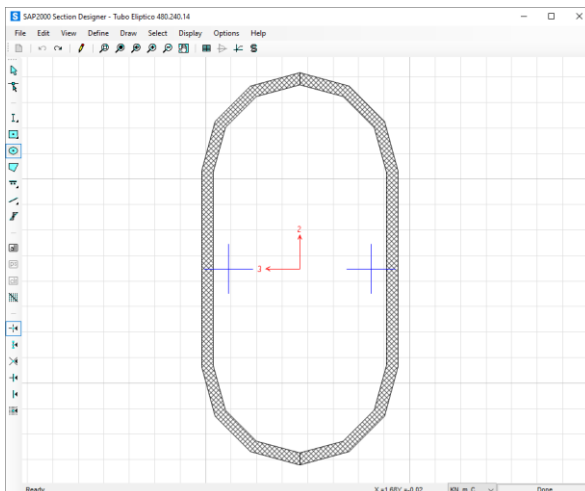


Imagen 61 | Captura de SAP2000: Section Designer. (elaboración propia)

4.3.8 | Pilares interiores de hormigón armado

Los pilares interiores de la parte inferior de la terminal están formados por hormigón HA-50 y tienen un espesor de 100 cm. Estos pilares se disponen tal y como se muestra en la imagen 62.

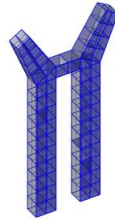


Imagen 62 | Captura de SAP2000: Pilares interiores de hormigón armado. (elaboración propia)

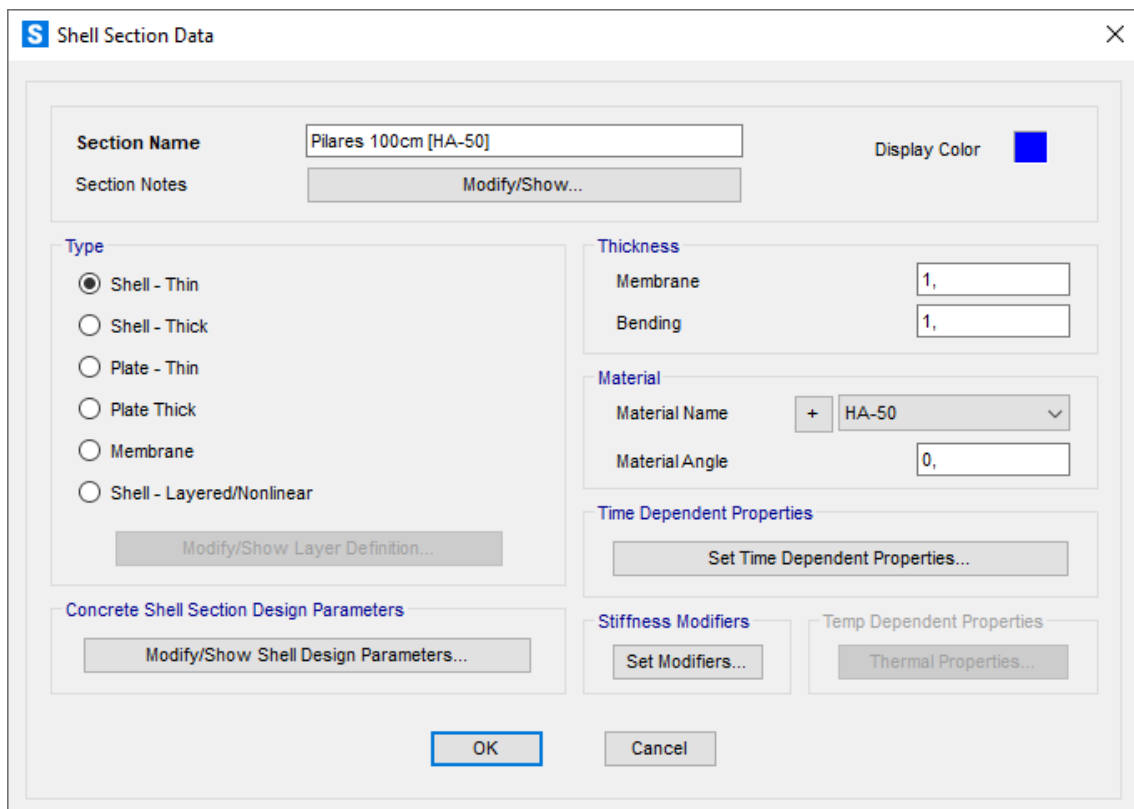


Imagen 63 | Captura de SAP2000: Propiedades de los pilares interiores de hormigón armado. (elaboración propia)

4.3.9 | Pilares exteriores de hormigón armado

Los pilares exteriores de la parte inferior de la terminal están formados por hormigón HA-50 y tienen un espesor de 75 cm. Estos pilares se disponen tal y como se muestra en la imagen 64.



Imagen 64 | Captura de SAP2000: Pilares exteriores de hormigón armado. (elaboración propia)

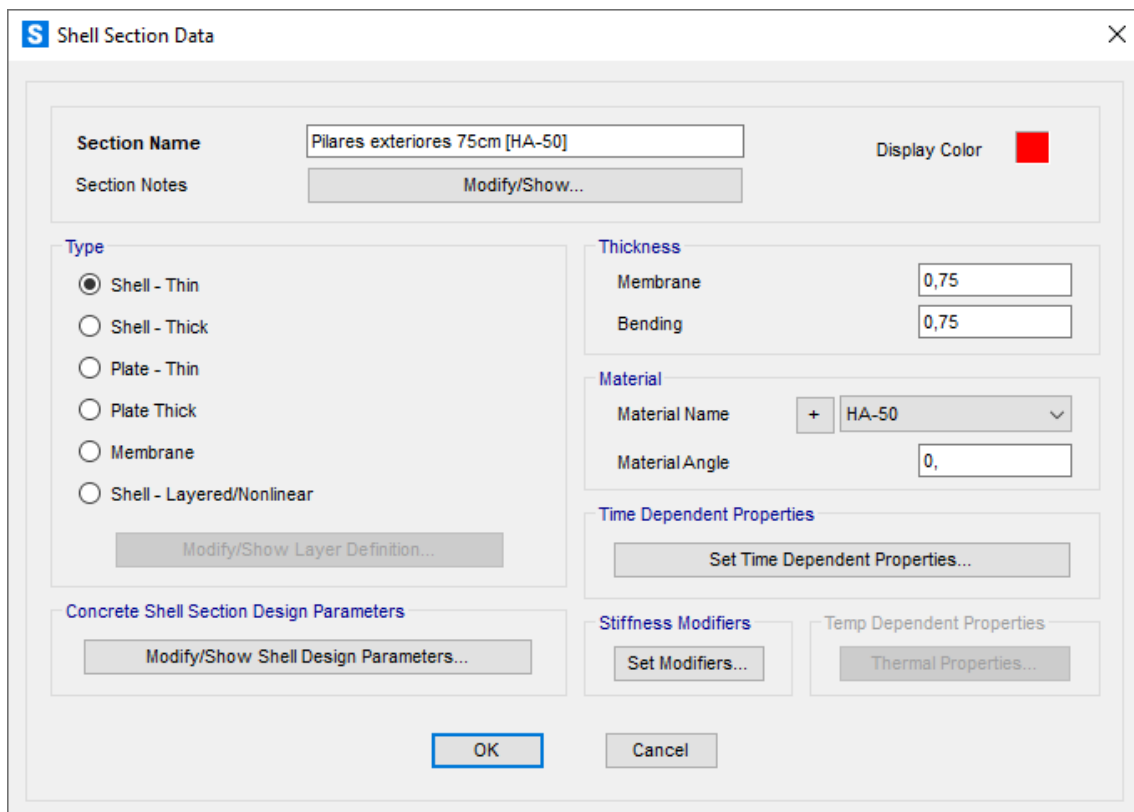


Imagen 65 | Captura de SAP2000: Propiedades de los pilares exteriores de hormigón armado. (elaboración propia)

4.4 | Cargas

En SAP2000 se definen primero las **hipótesis básicas de carga** y las **combinaciones de carga**, para finalmente poder realizar la **asignación de cargas** en el modelo.

4.4.1 | Hipótesis básicas de carga

Las cargas se agrupan en **hipótesis básicas de carga** (Load Patterns en SAP2000), estas hipótesis están definidas en la tabla 3.

HIPÓTESIS BÁSICAS DE CARGA	
DEAD	Peso propio de los elementos estructurales
CMP	Cargas muertas permanentes ⁵
SCU	Sobrecarga de uso
SCN	Sobrecarga de nieve
SCVx	Sobrecarga de viento en dirección x
SCVy	Sobrecarga de viento en dirección y
SISx	Sismo en dirección x
SISy	Sismo en dirección y
TMP	Carga de temperatura

Tabla 3 | Tabla de hipótesis básicas de carga. (elaboración propia)

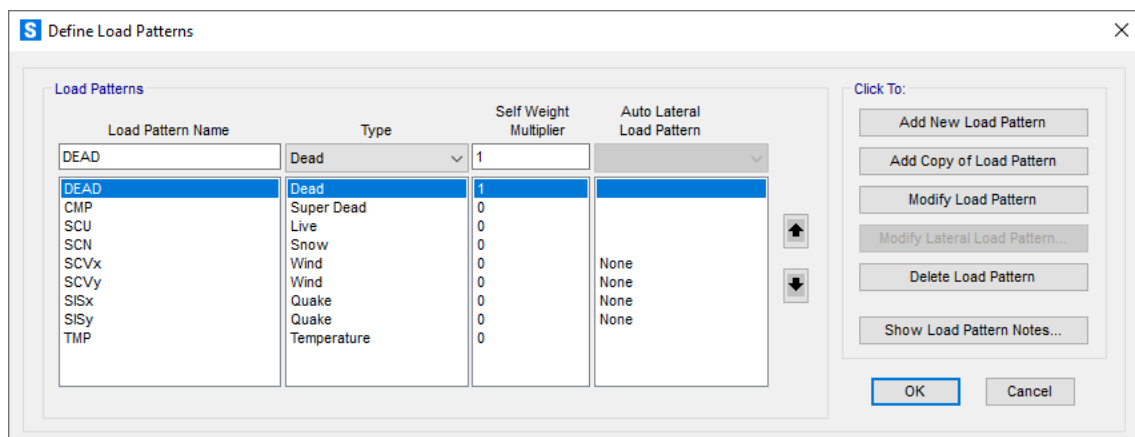


Imagen 66 | Captura de SAP2000: Load Patterns. (elaboración propia)

4.4.2 | Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga (Load Combinations en SAP2000) se dividen en las combinaciones de los estados límite de servicio (ELS) y las combinaciones de los estados límite últimos (ELU).

⁵ Las cargas muertas permanentes son todas las cargas permanentes que no forman parte de la estructura: pavimentos, falsos techos, instalaciones, tabiquería, etc.

En las combinaciones de los ELS se consideran todas las **cargas sin mayorar** por lo que, tanto el coeficiente parcial de seguridad de las cargas permanentes (γ_G) como el de las cargas variables (γ_Q) equivalen a 1.

Además de los coeficientes parciales de seguridad (γ), también hay que considerar los coeficientes de simultaneidad (ψ) a la hora de definir las combinaciones de carga.

En la imagen 67 se observan estos coeficientes de simultaneidad.

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)		(1)	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

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

Imagen 67 | Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ). (CTE DBSE)

En la tabla 4 se muestran las combinaciones de carga de los ELS.

ELS	γ_G	γ_G	γ_Q
ELSp	CMP: 1	DEAD: 1	
ELSqpu	CMP: 1	DEAD: 1	SCU: 0,6 ⁶
ELSVx+	CMP: 1	DEAD: 1	SCVx: 1
ELSVx-	CMP: 1	DEAD: 1	SCVx: -1
ELSVy+	CMP: 1	DEAD: 1	SCVy: 1
ELSVy-	CMP: 1	DEAD: 1	SCVy: -1
ELSn	CMP: 1	DEAD: 1	SCN: 1
ELSu	CMP: 1	DEAD: 1	SCU: 1
ELSintcon	CMP: 1	SCU: 1	

Tabla 4 | Tabla de combinaciones de carga de los ELS. (elaboración propia)

⁶ En el caso del ELSqpu, se multiplica la SCU por su coeficiente de simultaneidad casi permanente (ψ_2), el cual en este caso, al tratarse la terminal de una zona destinada al público, equivale a 0,6.

En el caso de las combinaciones de los ELU se consideran todas las **cargas mayoradas** por sus respectivos coeficientes parciales de seguridad (γ). El coeficiente de las cargas permanentes (γ_G)=1,35 mientras que el de las cargas variables (γ_Q)=1,5 tal y como se observa en la imagen 68.

Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

Tipo de verificación ⁽¹⁾	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
Estabilidad		desestabilizadora	estabilizadora
	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

⁽¹⁾ Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno se establecen en el DB-SE-C

Imagen 68 | Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad (γ). (CTE DBSE)

El motivo por el cual la mayoración de las cargas permanentes es inferior a la de las cargas variables, se debe a que estas últimas son más susceptibles de experimentar variaciones que incrementen su valor a lo largo de la vida útil del edificio.

En la tabla 5 se muestran las combinaciones de carga de los ELU⁷.

ELU	γ_G	γ_G	γ_Q	$\gamma_Q \cdot \psi_0$	$\gamma_Q \cdot \psi_0$
ELUp	CMP: 1,35	DEAD: 1,35			
ELUqpu ⁸	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCU: 0,9		
ELUu	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCU: 1,5		
ELUn	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCN: 1,5		
ELUvx+	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCVx: 1,5		
ELUvx-	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCVx: -1,5		
ELUvy+	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCVy: 1,5		
ELUvy-	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCVy: -1,5		
ELUunvx+	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCU: 1,5	SCVx: 0,9	SCN: 0,75
ELUunvx-	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCU: 1,5	SCVx: -0,9	SCN: 0,75
ELUnvx+	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCN: 1,5	SCU: 0	SCVx: 0,9
ELUnvx-	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCN: 1,5	SCU: 0	SCVx: -0,9
ELUvx+un	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCVx: 1,5	SCU: 0	SCN: 0,75
ELUvx-un	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCVx: -1,5	SCU: 0	SCN: 0,75
ELUvy+un	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCVy: 1,5	SCU: 0	SCN: 0,75
ELUvy-un	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCVy: -1,5	SCU: 0	SCN: 0,75
ELUunvy+	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCU: 1,5	SCN: 0,75	SCVy: 0,9
ELUunvy-	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCU: 1,5	SCN: 0,75	SCVy: -0,9
ELUnvy+	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCN: 1,5	SCU: 0	SCVy: 0,9
ELUnvy-	CMP: 1,35	DEAD: 1,35	SCN: 1,5	SCU: 0	SCVy: -0,9
ELUsisx+	CMP: 1	DEAD: 1	SISx: 1	SCU: 0,6	SISy: 0,3
ELUsisx-	CMP: 1	DEAD: 1	SISx: -1	SCU: 0,6	SISy: -0,3
ELUsisy+	CMP: 1	DEAD: 1	SISy: 1	SCU: 0,6	SISx: 0,3
ELUsisy-	CMP: 1	DEAD: 1	SISy: -1	SCU: 0,6	SISx: -0,3
ELUsim	CMP: 1	DEAD: 1	SIMxyz: 1	SCU: 0,6	

Tabla 5 | Tabla de combinaciones de carga de los ELU. (elaboración propia)

4.4.3 | Asignación de cargas

A la hora de asignar las cargas a la estructura de la terminal, se tienen en cuenta varias cuestiones.

En primer lugar, no se aplica la carga correspondiente al peso propio de los elementos estructurales (DEAD), ya que SAP2000 calcula esta carga automáticamente una vez definidos los materiales y las secciones de los elementos.

⁷ Los valores de γ_G , γ_Q , $\gamma_Q \cdot \psi_0$ no son aplicables en las combinaciones de carga de sismo (ELUsis y ELUsim). Esto se debe a que las cargas sísmicas no son ni permanentes ni variables, sino accidentales.

⁸ En el caso del ELUqpu, se multiplica la SCU no solo por su coeficiente parcial de seguridad (γ_Q), sino también por su coeficiente de simultaneidad casi permanente (ψ_2), el cual equivale a 0,6.

Por otro lado, debido a la presencia de elementos metálicos sometidos a la acción directa del sol, podría llegar a ser necesario la aplicación de la carga de temperatura (TMP). Para ello, es conveniente realizar un estudio de dinámica de fluidos. En dicho estudio, se detectan las concentraciones de temperaturas más relevantes y se determina con exactitud la carga de temperatura que hay que introducir en el programa.

Teniendo en cuenta la complejidad que tiene la realización de dicho estudio, en el presente trabajo se decide no aplicar la carga de temperatura (TMP) a la estructura.

4.4.3.1 | Cargas muertas permanentes

A partir de la documentación recopilada acerca de la terminal, se extraen los datos que permiten realizar una aproximación de las cargas muertas permanentes.

Mediante la tabla 6, se obtiene un valor total de **cargas muertas permanentes (CMP)** de **1,8 kN/m²**.

CMP	kN/m ²
Acabados de la cubierta	0,3
Falsos techos e instalaciones	1,5
TOTAL	1,8

Tabla 6 | Tabla de cargas muertas permanentes. (elaboración propia)

El valor obtenido en la tabla 6 se introduce en SAP2000 tal y como se muestra en las imágenes 69 y 70.

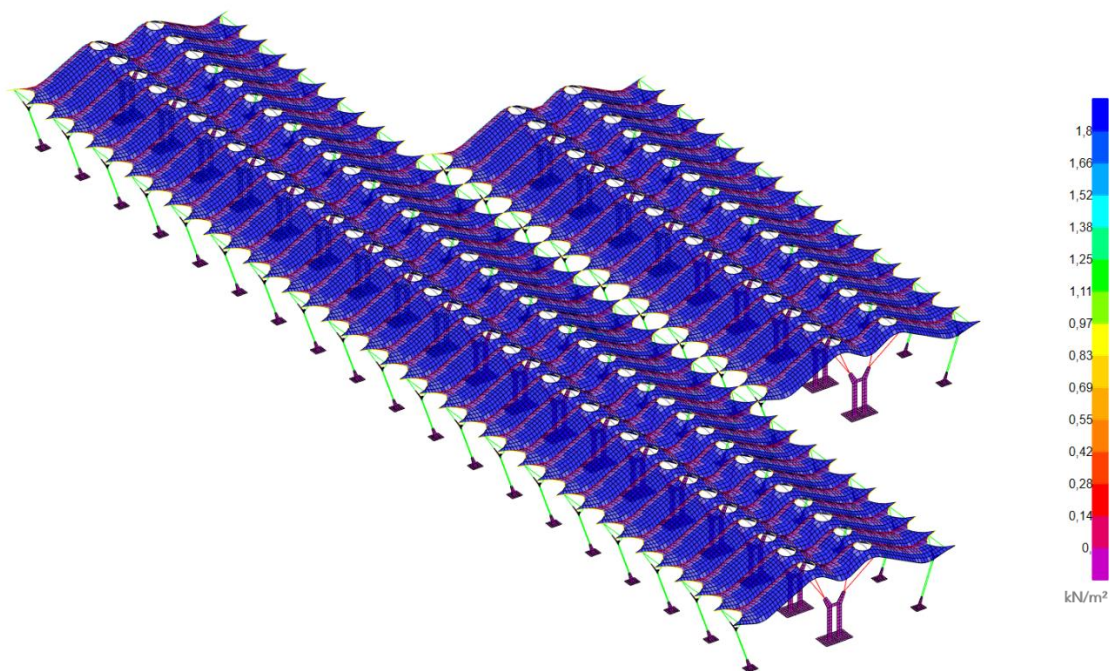


Imagen 69 | Captura de SAP2000: CMP aplicadas en la cubierta. (elaboración propia)

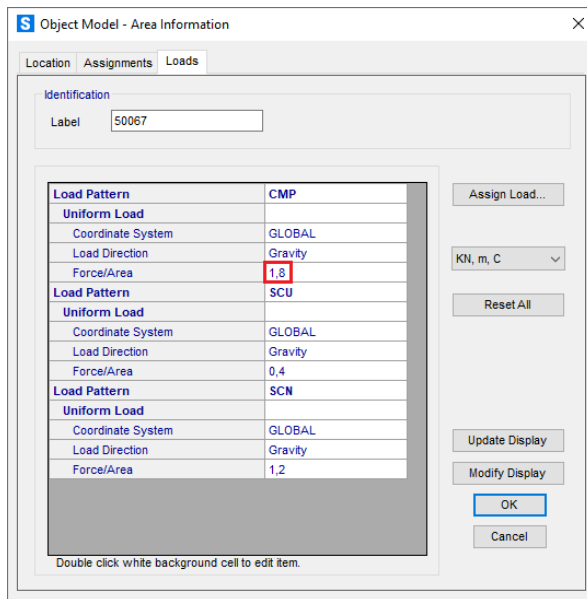


Imagen 70 | Captura de SAP2000: Valor de las CMP. (elaboración propia)

4.4.3.2 | Sobrecarga de uso

Atendiendo a la imagen 71, la cubierta de la terminal pertenece a la subcategoría de uso G1: Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado), con lo que se obtiene una sobrecarga de uso (SCU) de 0,4 kN/m².

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) ⁽⁵⁾	0,4 ⁽⁴⁾	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Imagen 71 | Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso. (CTE DBSE-AE)

Los 0,4 kN/m² obtenidos en la imagen 71, se introducen en el programa tal y como se muestra en las imágenes 72 y 73.

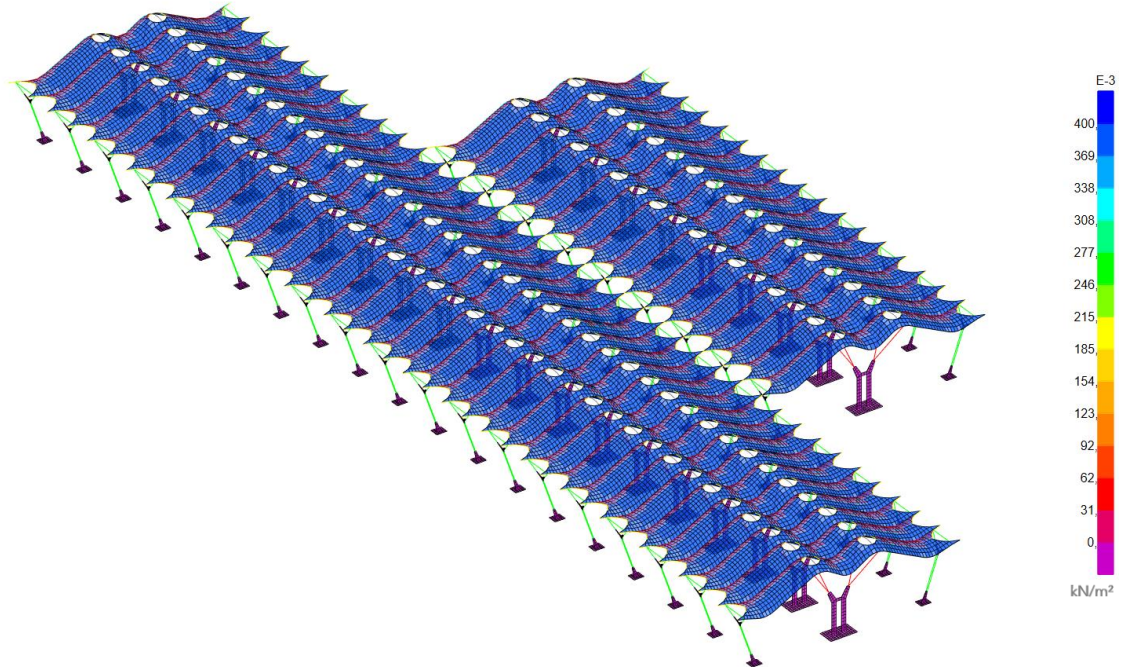


Imagen 72 | Captura de SAP2000: SCU aplicada en la cubierta. (elaboración propia)

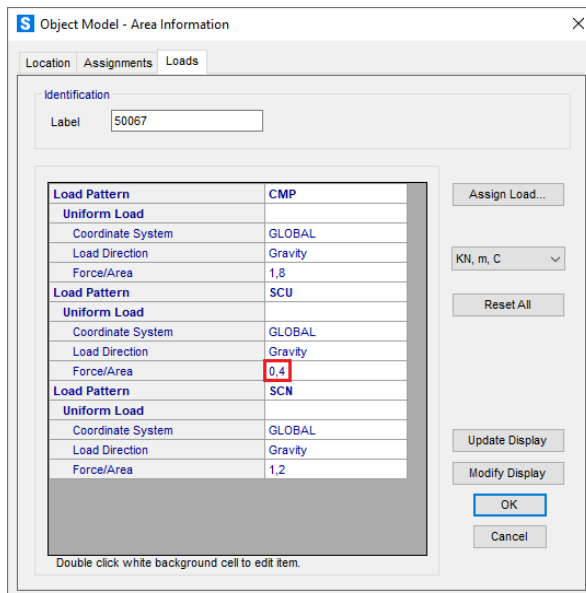


Imagen 73 | Captura de SAP2000: Valor de la SCU. (elaboración propia)

4.4.3.3 | Sobrecarga de nieve

Para determinar la sobrecarga de nieve se utiliza la fórmula: $q_n = \mu \cdot s_k$ (apartado 3.5.1 del CTE DBSE-AE).

Al existir un impedimento al deslizamiento de la nieve debido a la geometría de la cubierta, se asigna un valor de 2 al coeficiente de forma de la cubierta (μ), quedando así del lado de la seguridad.

En cuanto al valor de la sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal (s_k), tal y como se observa en la imagen 74, se obtienen 0,6 kN/m² al tratarse de un proyecto situado en la Comunidad de Madrid.

Tabla 3.8 Sobrecarga de nieve en capitales de provincia y ciudades autónomas

Capital	Altitud m	s_k kN/m ²	Capital	Altitud m	s_k kN/m ²	Capital	Altitud m	s_k kN/m ²
Albacete	690	0,6	Guadalajara	680	0,6	Pontevedra	0	0,3
Alicante / Alacant	0	0,2	Huelva	0	0,2	Salamanca	780	0,5
Almería	0	0,2	Huesca	470	0,7	SanSebas- tián/Donostia	0	0,3
Ávila	1.130	1,0	Jaén	570	0,4	Santander	1.000	0,3
Badajoz	180	0,2	León	820	1,2	Segovia	10	0,7
Barcelona	0	0,4	Lérida / Lleida	150	0,5	Sevilla	1.090	0,2
Bilbao / Bilbo	0	0,3	Logroño	380	0,6	Soria	0	0,9
Burgos	860	0,6	Lugo	470	0,7	Tarragona	0	0,4
Cáceres	440	0,4	Madrid	660	0,6	Tenerife	950	0,2
Cádiz	0	0,2	Málaga	0	0,2	Teruel	550	0,9
Castellón	0	0,2	Murcia	40	0,2	Toledo	0	0,5
Ciudad Real	640	0,6	Orense / Ourense	130	0,4	Valencia/València	690	0,2
Córdoba	100	0,2	Oviedo	230	0,4	Valladolid	520	0,4
Coruña / A Coruña	0	0,3	Palencia	740	0,5	Vitoria / Gasteiz	650	0,7
Cuenca	1.010	1,0	Palma de Mallorca	0	0,4	Zamora	210	0,4
Gerona / Girona	70	0,4	Palmas, Las	0	0,2	Zaragoza	210	0,5
Granada	690	0,5	Pamplona/Iruña	450	0,2	Ceuta y Melilla	0	0,2

Imagen 74 | Tabla 3.8 Sobrecarga de nieve en capitales de provincia y ciudades autónomas. (CTE DBSE-AE)

Con estos datos, al completar la fórmula, la sobrecarga de nieve (SCN) obtenida es de 1,2 kN/m². Este valor se introduce en el programa tal y como se observa en las imágenes 75 y 76.

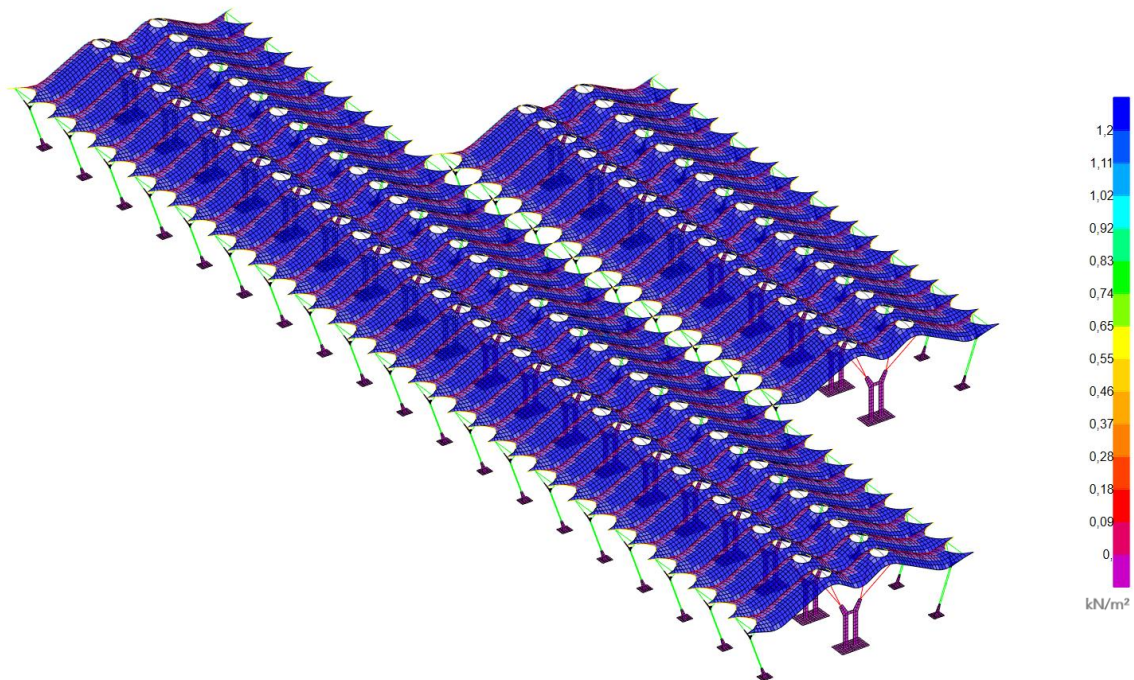


Imagen 75 | Captura de SAP2000: SCN aplicada en la cubierta. (elaboración propia)

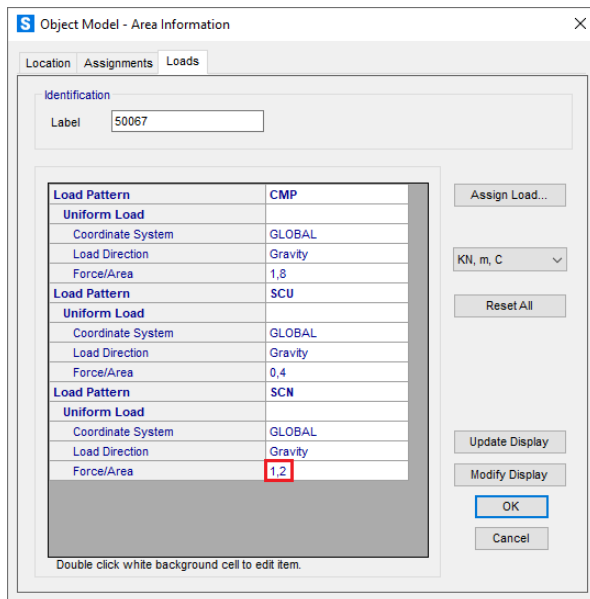


Imagen 76 | Captura de SAP2000: Valor de la SCN. (elaboración propia)

4.4.3.4 | Sobrecarga de viento

A la hora de analizar la sobrecarga de viento, se diferencian las dos direcciones principales en las que el viento incide sobre la terminal.

La sobrecarga de viento que incide en **dirección transversal** a la terminal (eje "x" en SAP2000) se denomina **SCVx**, mientras que la que incide en **dirección longitudinal** (eje "y" en SAP2000) recibe el nombre de **SCVy**.

Para determinar la sobrecarga de viento se utiliza la fórmula: $q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$ (apartado 3.3.2 del CTE DBSE-AE).

El valor de la **presión dinámica del viento** (q_b) es de **0,42 kN/m²** (apartado D.1 y figura D.1 del CTE DBSE-AE).

En cuanto al **coeficiente de exposición** (c_e), se obtiene un valor de **3,3** según la imagen 77.

Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición c_e

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
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	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

Imagen 77 | Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición c_e . (CTE DBSE-AE)

El entorno en el que se encuentra la terminal tiene un grado de aspereza tipo II y una altura máxima de 24 m. Estos datos se utilizan de manera constante, independientemente del punto considerado, asegurando de esta manera que los cálculos estén del lado de la seguridad.

A partir de la imagen 78, se establece el **coeficiente eólico** (c_p).

La esbeltez obtenida en la **dirección transversal** del edificio es de 0,5, por lo que el coeficiente eólico de presión en este caso es de **0,7** y el de succión de **0,4**.

En cuanto a la **dirección longitudinal**, la esbeltez es inferior a 0,25 en cualquiera de sus puntos, siendo el coeficiente eólico de presión de **0,7** y el de succión de **0,3**.

Tabla 3.5. Coeficiente eólico en edificios de pisos

	Esbeltez en el plano paralelo al viento					
	< 0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	≥ 5,00
Coeficiente eólico de presión, c_p	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Coeficiente eólico de succión, c_s	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7

Imagen 78 | Tabla 3.5. Coeficiente eólico en edificios de pisos. (CTE DBSE-AE)

Completando la fórmula, para la **SCVx** en dirección transversal al edificio, se obtiene un valor final de **presión** de **0,98 kN/m²** y de **succión** de **0,56 kN/m²**. Estos valores se introducen en el programa tal y como se muestra en las imágenes 79, 80 y 81.

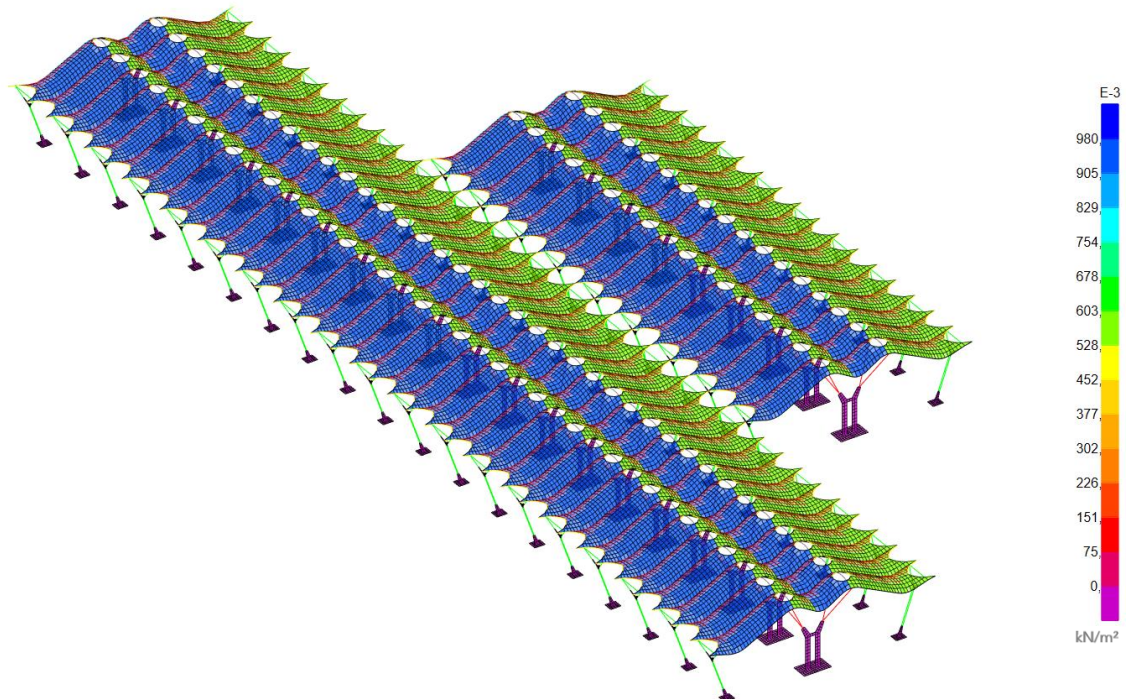


Imagen 79 | Captura de SAP2000: SCVx aplicada en la cubierta. (elaboración propia)

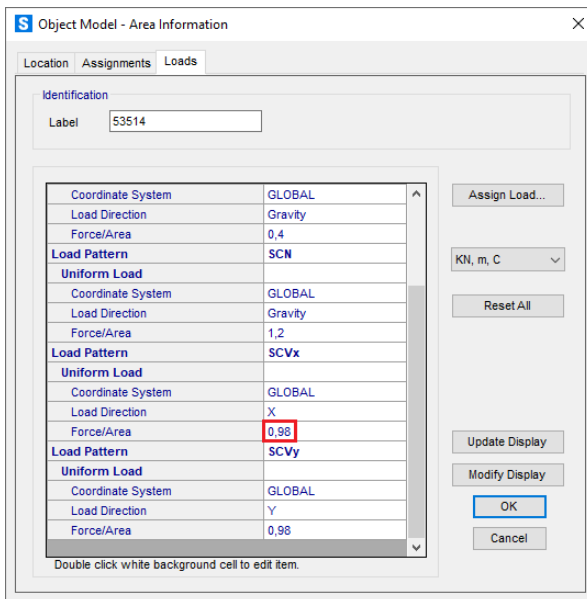


Imagen 80 | Captura de SAP2000: Valor de presión de la SCVx. (elaboración propia)

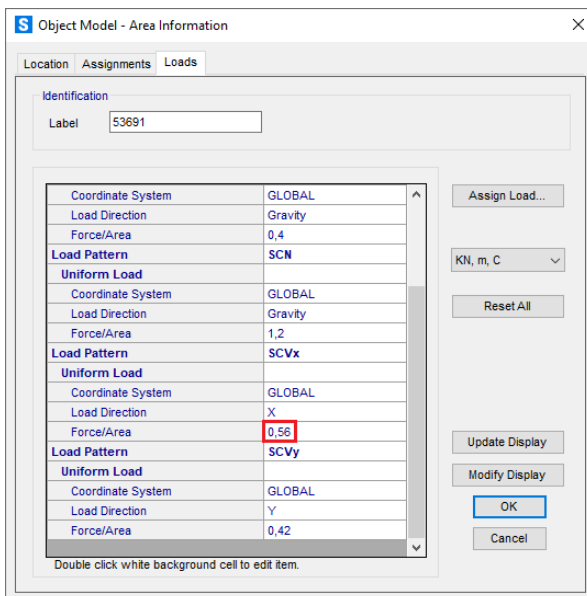


Imagen 81 | Captura de SAP2000: Valor de succión de la SCVx. (elaboración propia)

Además de la sobrecarga aplicada en la cubierta, también se aplica la resultante de la sobrecarga de viento transmitida por los muros cortina a los elementos estructurales de la terminal.

Como se observa en la imagen 82, esta resultante afecta tanto a la presión como a la succión e incide de manera puntual sobre las vigas principales en ambos casos.

En las vigas que soportan la carga resultante de un único módulo, los valores de **presión** y **succión** son de **48,5 kN** y **27,72 kN**, respectivamente.

Por otro lado, en las vigas que soportan la resultante de dos módulos contiguos, estos valores de **presión** y **succión** pasan a ser de **97 kN** y **55,44 kN**, respectivamente.

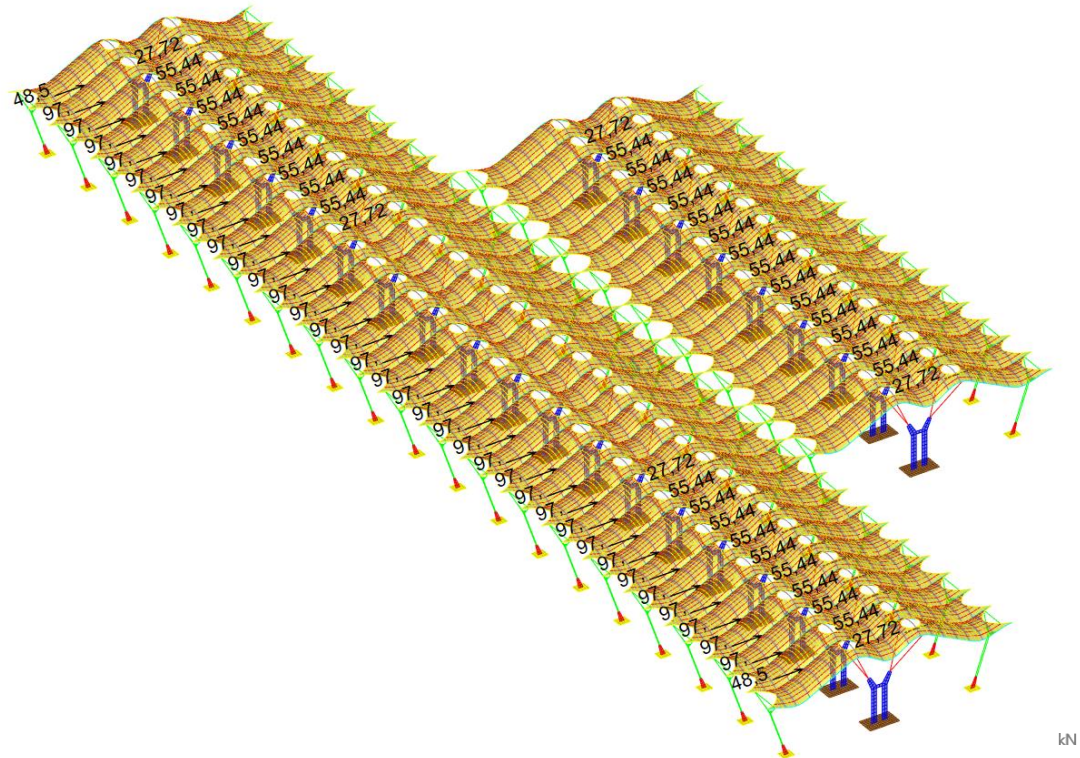


Imagen 82 | Captura de SAP2000: Resultante de la SCVx transmitida por los muros cortina. (elaboración propia)

Por lo que respecta a la **SCVy** en dirección longitudinal, se obtiene un valor de **presión** de **0,98 kN/m²** y de **succión** de **0,42 kN/m²**. Estos valores se introducen en SAP2000 tal y como se observa en las imágenes 83, 84 y 85.

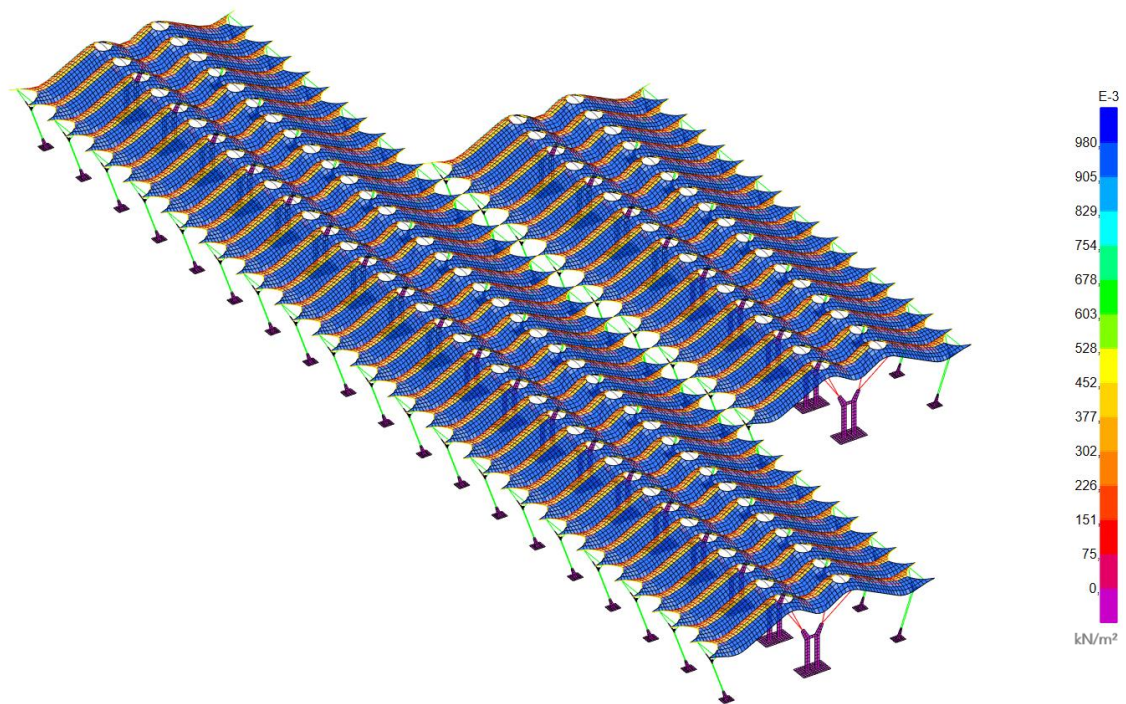


Imagen 83 | Captura de SAP2000: SCVy aplicada en la cubierta. (elaboración propia)

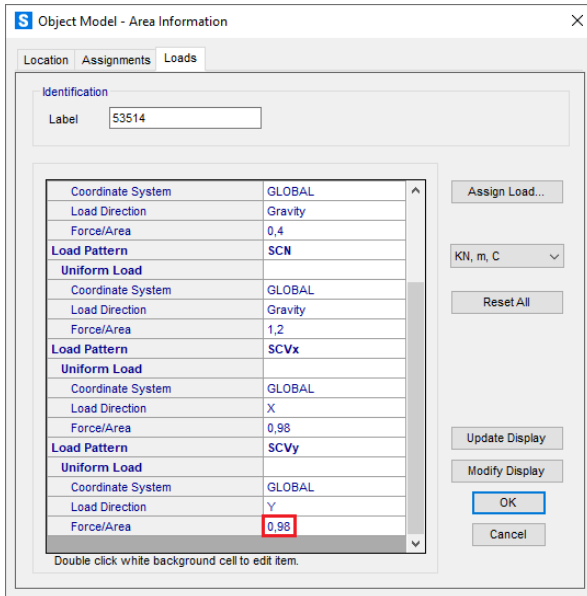


Imagen 84 | Captura de SAP2000: Valor de presión de la SCVy. (elaboración propia)

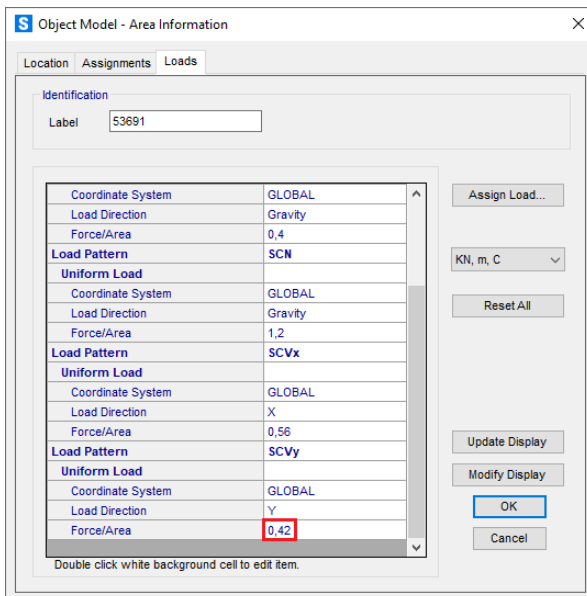


Imagen 85 | Captura de SAP2000: Valor de succión de la SCVy. (elaboración propia)

De igual manera que en la SCVx, en la SCVy también se aplica la resultante de la sobrecarga de viento transmitida por los muros cortina.

Como se observa en las imágenes 86 y 87, esta resultante afecta tanto a la presión como a la succión e incide de manera lineal sobre las vigas principales situadas en los extremos de la terminal.

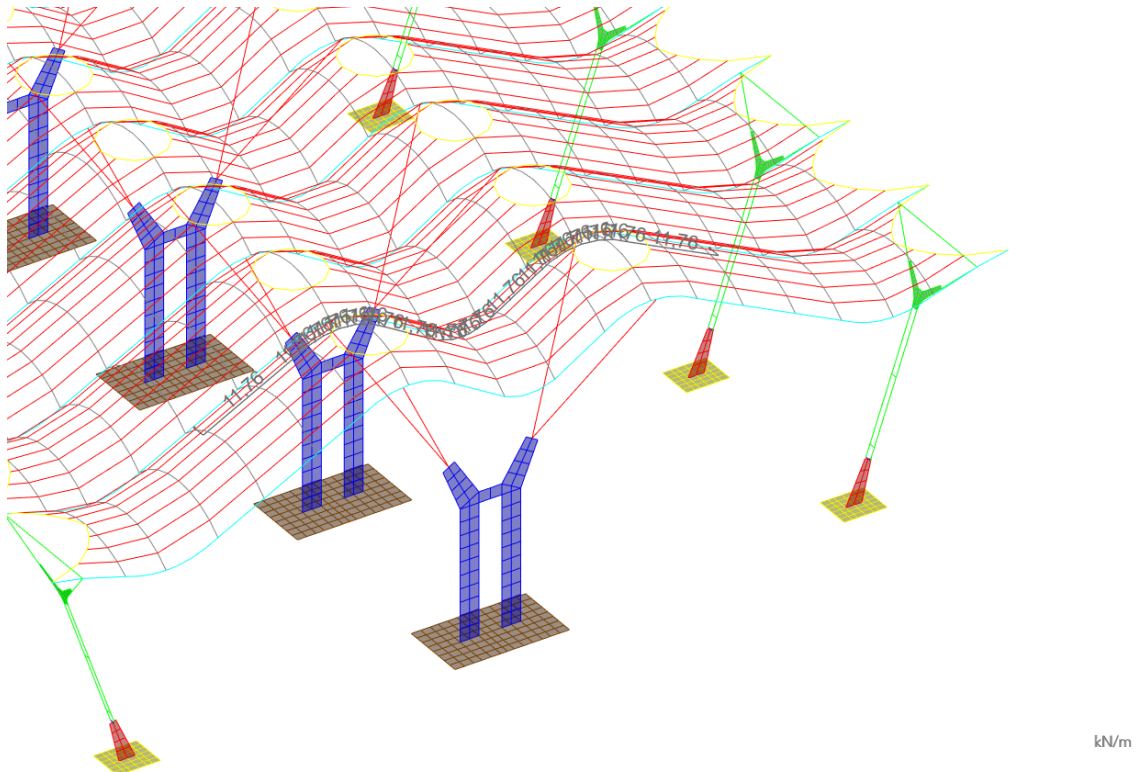


Imagen 86 | Captura de SAP2000: Resultante de presión en la SCVy transmitida por los muros cortina. (elaboración propia)

El valor de la resultante de **presión** en la SCVy es de **11,76 kN/m**.

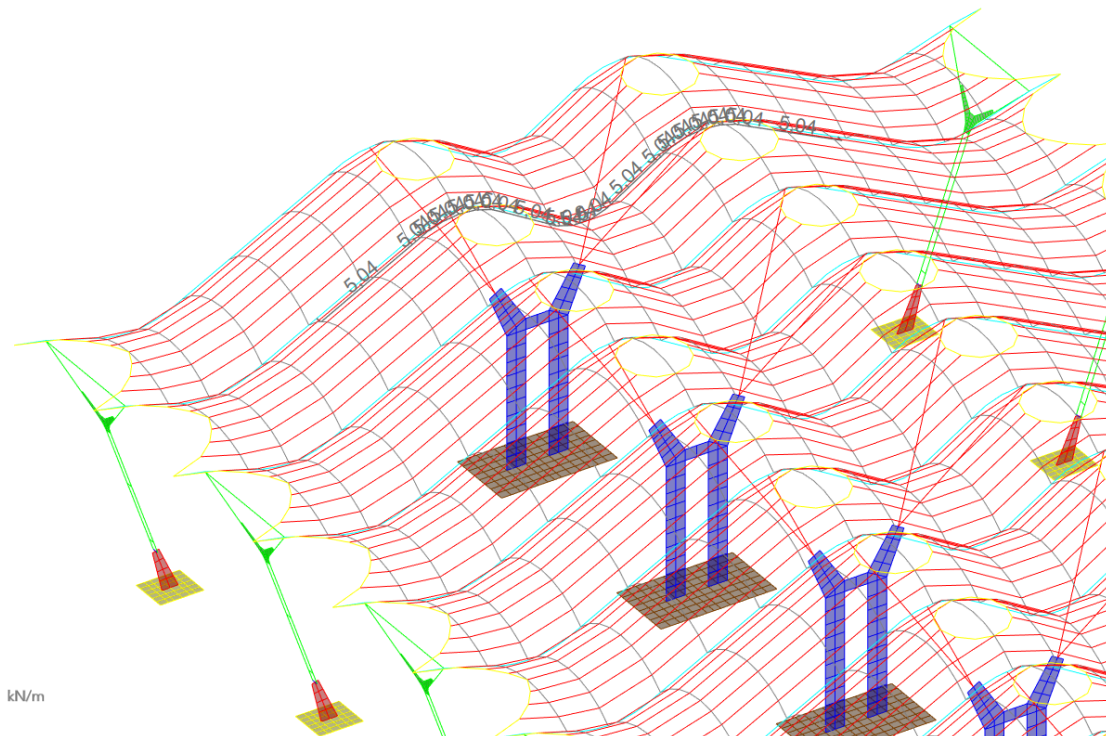


Imagen 87 | Captura de SAP2000: Resultante de succión en la SCVy transmitida por los muros cortina. (elaboración propia)

El valor de la resultante de **succión** en la SCVy es de **5,04 kN/m**.

4.4.3.5 | Sismo

En el presente trabajo, se realiza el análisis del sismo mediante el **método modal espectral** a partir de lo establecido en la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02). En este método se analizan los modos de vibración de la estructura para averiguar su oscilación, la cual depende de su masa y su rigidez.

Los datos necesarios para poder realizar el análisis del sismo mediante el método modal espectral son los siguientes:

(K): coeficiente de contribución

(a_b/g): aceleración sísmica básica / aceleración de la gravedad

(μ): coeficiente de comportamiento por ductilidad

(C): coeficiente del terreno

(ρ): coeficiente adimensional de riesgo

(Ω): porcentaje de amortiguamiento

Debido a que Barajas no se encuentra en el anejo 1 de la NCSE-02, al **coeficiente de contribución (K)** se le asigna un valor de **1**, estando así del lado de la seguridad.

De igual manera que sucede con el coeficiente de contribución, del lado de la seguridad, se le asigna un valor de **0,04** a a_b/g .

Dado que la terminal no se encuentra en una zona sísmica de gran relevancia, al **coeficiente de comportamiento por ductilidad (μ)** se le asigna un valor de **2**, simplificando así las comprobaciones a realizar.

Teniendo en cuenta que no se dispone de un estudio geotécnico que aporte datos suficientemente precisos acerca del terreno, al **coeficiente del terreno (C)** se le asigna un valor medio de **1,6** tal y como se muestra en la imagen 88.

TABLA 2.1.
Coeficientes del terreno

Tipo de terreno	Coeficiente C
I	1,0
II	1,3
III	1,6
IV	2,0

Imagen 88 | Tabla 2.1. Coeficiente del terreno. (NCSE-02)

Considerando a la terminal como una construcción de importancia especial, se le asigna al **coeficiente adimensional de riesgo (ρ)** un valor de **1,3**.

La estructura de la terminal es tanto de hormigón armado como de acero y la compartimentación de las plantas se puede considerar diáfana. Por estos motivos y debido a que previamente se ha considerado que $\mu=2$, el **porcentaje de amortiguamiento (Ω)** tiene un valor de **4** tal y como se observa en la imagen 89.

TABLA 3.1.
Valores del coeficiente de respuesta β

Tipo de estructura	Compartimentación de las plantas	Ω (%)	Coeficiente de comportamiento por ductilidad			Sin ductilidad ($\mu = 1$)
			$\mu = 4$	$\mu = 3$	$\mu = 2$	
Hormigón armado o acero laminado	Diáfana	4	0,27	0,36	0,55	1,09
	Compartimentada	5	0,25	0,33	0,50	1,00
Muros y tipo similares	Compartimentada	6	—	—	0,46	0,93

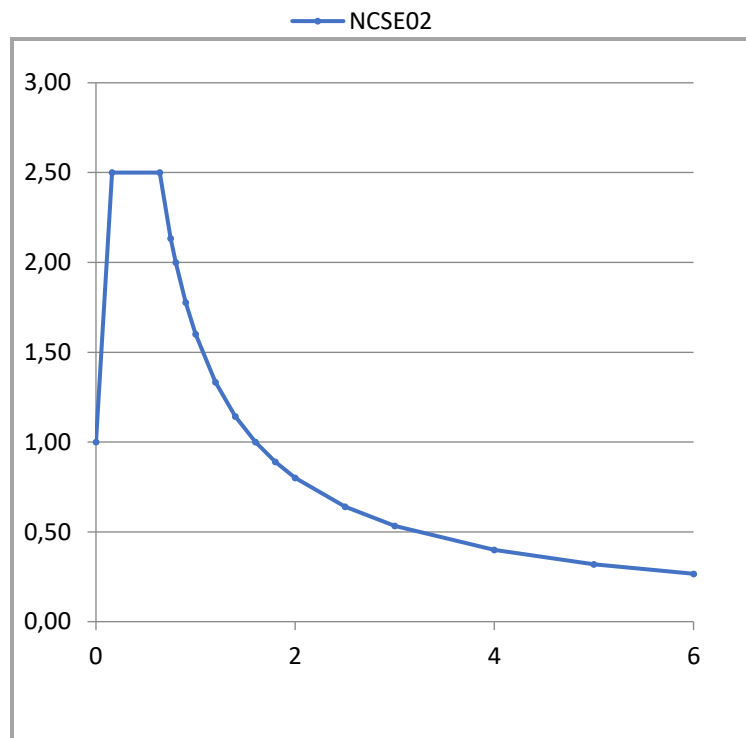
Imagen 89 | Tabla 3.1. Porcentaje de amortiguamiento. (NCSE-02)

Una vez obtenidos estos valores, se introducen en la tabla 7.

K	1	a_b/g	0,04	μ	2
C	1,6	ρ	1,3	Ω	4
T_A	0,16	S	1,28	ν	1,09336207
T_B	0,64	a_c/g	0,06656	β	0,54668104

T	$\alpha(T)$
0	1,00
0,16	2,50
0,64	2,50
0,75	2,13
0,8	2,00
0,9	1,78
1	1,60
1,2	1,33
1,4	1,14
1,6	1,00
1,8	0,89
2	0,80
2,5	0,64
3	0,53
4	0,40
5	0,32
6	0,27

SAP X Y	0,35695735	SAP Z	0,24987015
---------	------------	-------	------------



USO		Damping Ratio	
Edificios públicos		0,04	
Masa	ELU		
0,6	0,6		

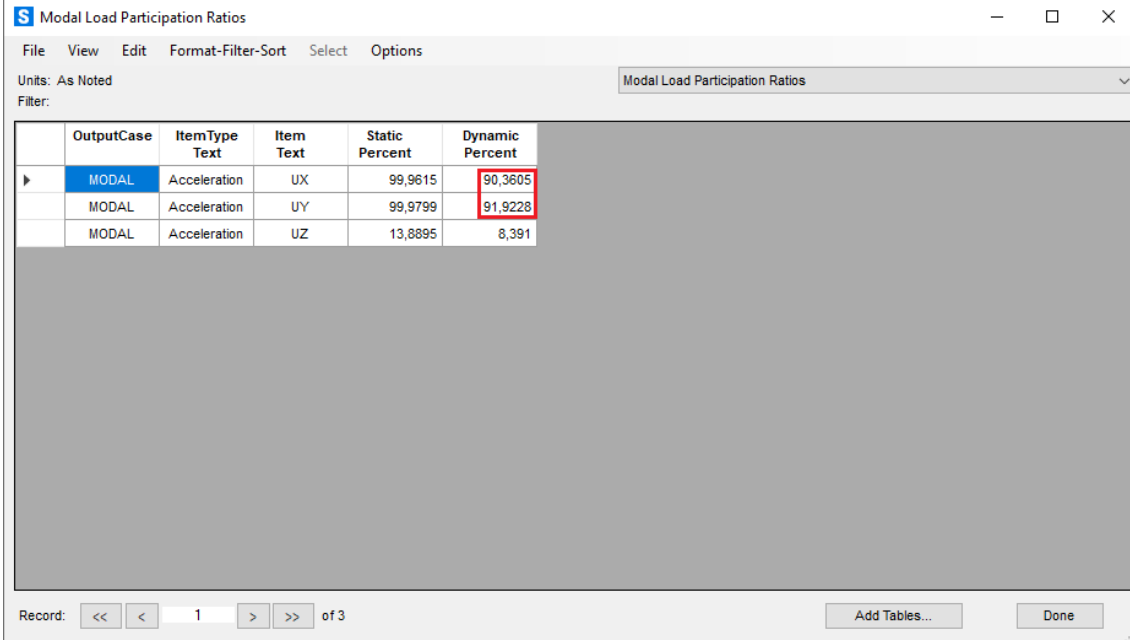
Tabla 7 | Tabla Excel del método modal espectral. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis)

Tras aplicar los valores de la tabla 7 en el programa, se obtienen los datos (Mass Source, Response Spectrum, Load Cases y Load Combination en SAP2000) que permiten realizar el análisis del sismo mediante el método modal espectral.

Una vez obtenidos estos datos, se comprueba cuantos modos de vibración son necesarios para cumplir las exigencias de la normativa.

El porcentaje dinámico de masa que se debe movilizar según la normativa ha de ser como mínimo del 90%, tanto en la dirección del eje "x" en SAP2000 como en la dirección del eje "y".

Estos valores están representados en la imagen 90 y se obtienen al alcanzar 50 modos de vibración.



	OutputCase	ItemType Text	Item Text	Static Percent	Dynamic Percent
▶	MODAL	Acceleration	UX	99,9615	90,3605
	MODAL	Acceleration	UY	99,9799	91,9228
	MODAL	Acceleration	UZ	13,8895	8,391

Imagen 90 | Captura de SAP2000: Porcentajes dinámicos de masa. (elaboración propia)

Una vez alcanzados los valores necesarios, se calculan las deformaciones de la estructura en el módulo más desfavorable de la terminal. Para ello, se consideran las dos direcciones principales (eje "x" y eje "y" en SAP2000), las cuales presentan los valores más desfavorables para el sismo.

Los cálculos se realizan a partir de las situaciones de análisis (Load Cases en SAP2000) que se generan tras aplicar los valores de la tabla 7 en el programa. En la dirección correspondiente al eje "x" se realizan los cálculos con la situación de análisis SIMx, mientras que en la dirección correspondiente al eje "y" se realizan los cálculos con la situación de análisis SIMy.

De esta manera, tal y como se muestra en la imagen 91, se obtiene el desplazamiento más desfavorable para el sismo en la dirección del eje "x", el cual equivale a 3,61 cm.

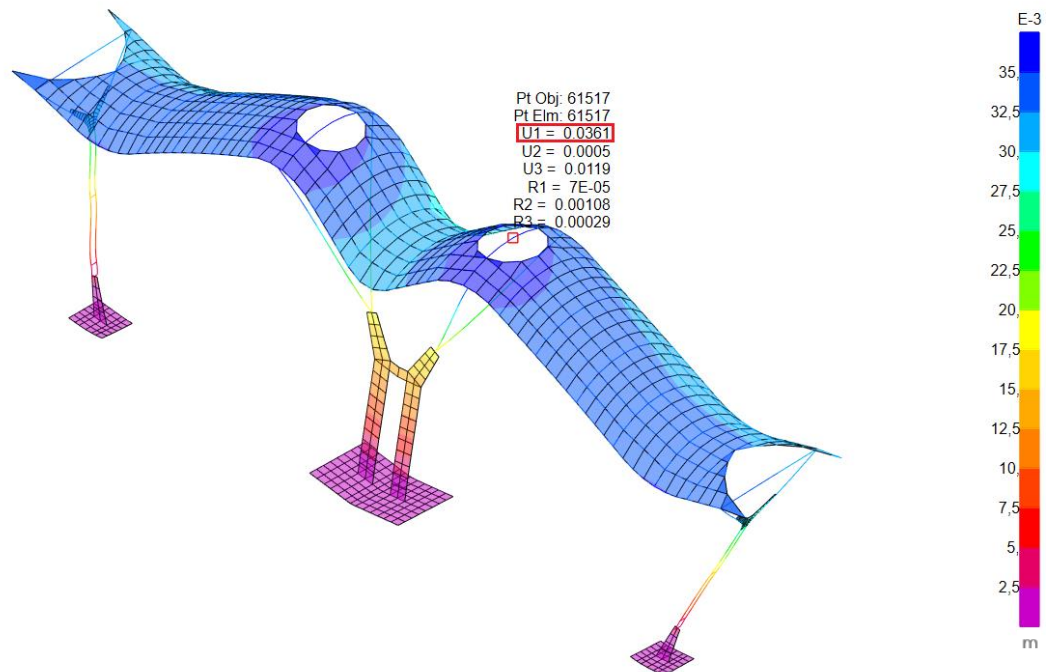


Imagen 91 | Captura de SAP2000: Deformaciones en la situación de análisis SIMx. (elaboración propia)

Siguiendo lo establecido en la NCSE-02, al multiplicar el desplazamiento más desfavorable en la dirección del eje "x" (3,61 cm) por el coeficiente de comportamiento por ductilidad (μ)=2, se obtiene el desplazamiento real a considerar: $3,61 \times 2 = 7,22$ cm

Por otro lado, tal y como se muestra en la imagen 92, se obtiene el desplazamiento más desfavorable para el sismo en la dirección del eje "y", el cual equivale a 3,02 cm.

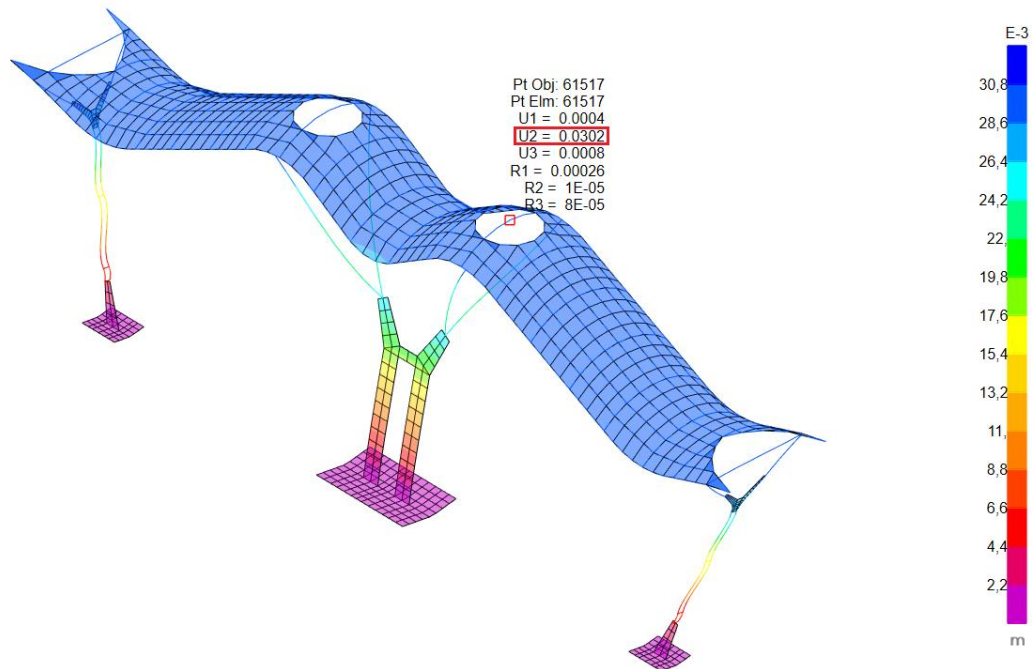


Imagen 92 | Captura de SAP2000: Deformaciones en la situación de análisis SIMy. (elaboración propia)

En este caso, al multiplicar el desplazamiento más desfavorable en la dirección del eje "y" (3,02 cm) por el coeficiente de comportamiento por ductilidad (μ)=2, se obtiene el desplazamiento real a considerar: $3,02 \times 2 = 6,04$ cm

4.5 | Enlaces

Los enlaces se diferencian en dos tipos, los externos y los internos. Los enlaces externos están relacionados con los **apoyos** de la estructura en el terreno, mientras que los enlaces internos hacen referencia a las **desconexiones** entre elementos estructurales.

4.5.1 | Apoyos

Para conocer de manera aproximada los asientos que experimenta la terminal, se incluye su cimentación en el modelo. Esta cimentación está formada por zapatas, las cuales se representan mediante elementos finitos en los puntos de apoyo de la estructura.

Posteriormente, se introducen muelles (Area Springs en SAP2000) en la cimentación que permiten conocer tanto las deformaciones de las zapatas como los asientos de la terminal, obteniendo así una aproximación del comportamiento real de dicha cimentación.

Las zapatas de los pilares interiores de hormigón armado (imagen 93) tienen un ancho de 5 m, una longitud de 8,50 m y un canto de 1,70 m.

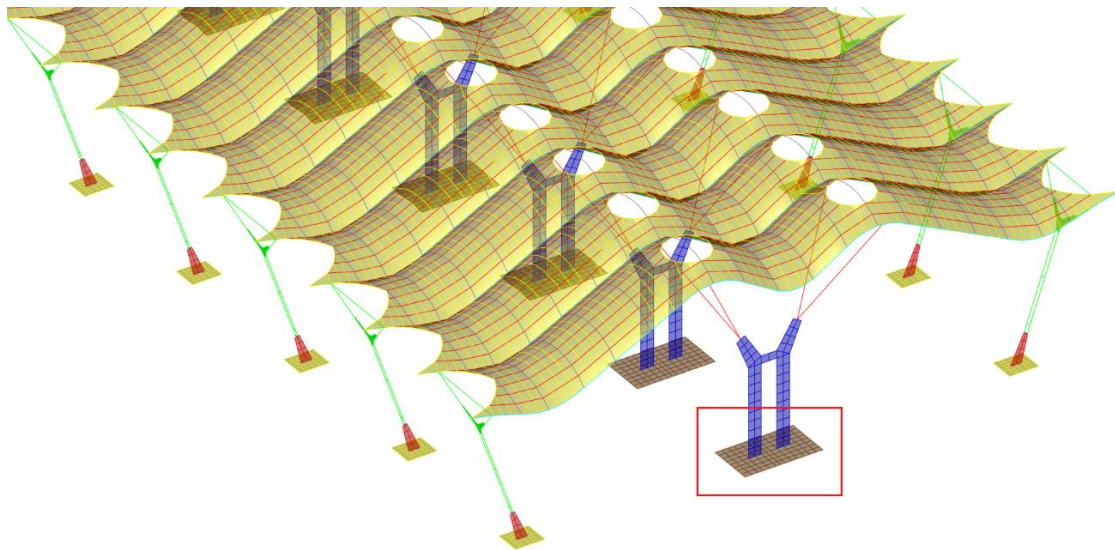


Imagen 93 | Captura de SAP2000: Zapatas de los pilares interiores de hormigón armado. (elaboración propia)

En la tabla 8, teniendo en cuenta que no se dispone de un estudio geotécnico, se introducen datos orientativos que permiten obtener el valor final de rigidez que hay que introducir en el programa.

ADAPTACIÓN DEL MÓDULO DE BALASTO DE UNA PLACA DE CARGA DE 30x30 cm.
PARA MODELO WINKLER DE LOSA FLEXIBLE SOBRE SUELO ELÁSTICO

Geometría de la losa:	Rectangular	Longitud =	8,50	metros
		Ancho =	5,00	metros

Tipo de terreno:	Mixto	Arenas (%):	50
$K_{30} =$	4,0 kp/cm^3	Arcillas (%):	50

$K_{\text{arenoso}} =$	kp/cm^3	t/m^3	kN/m^3
$K_{\text{arcilloso}} =$	kp/cm^3	t/m^3	kN/m^3
$K_{\text{mixto}} =$	0,588 kp/cm^3	588,22 t/m^3	5.882,2 kN/m^3

Tabla 8 | Tabla Excel del módulo de Balasto para las zapatas de los pilares interiores de hormigón armado. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis)

Los 5.882,2 kN/m^3 obtenidos en la tabla 8, se redondean debido a la inexactitud de los datos considerados en dicha tabla. De esta manera, el valor a considerar es de **6.000 kN/m^3** .

Como se observa en la imagen 94, los 6.000 kN/m^3 se introducen en el programa para poder asignar los muelles a las zapatas.

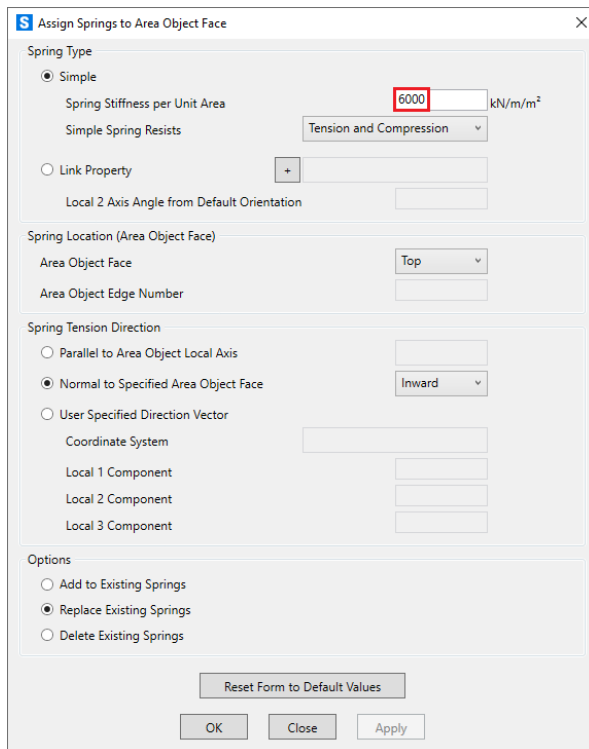


Imagen 94 | Captura de SAP2000: Introducción del resultado de la tabla 8 en el programa. (elaboración propia)

De esta manera, cada elemento finito tiene un muelle con una rigidez de 6.000 kN/m³, tal y como se observa en la imagen 95.

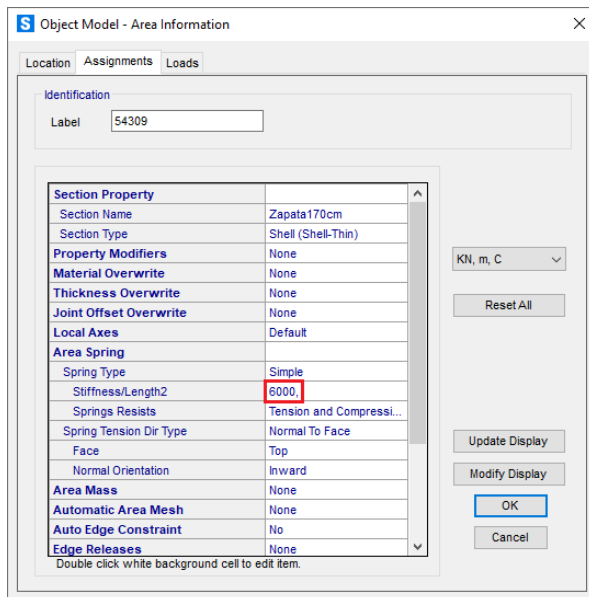


Imagen 95 | Captura de SAP2000: Rigidez de los muelles de las zapatas. (elaboración propia)

Los muelles que se introducen solo actúan en perpendicular al elemento finito, por lo que afectan únicamente a los movimientos verticales. Por ello, para que la terminal no sea inestable lateralmente, como se observa en la imagen 96, se impiden los desplazamientos laterales en cada uno de los nudos de las zapatas.

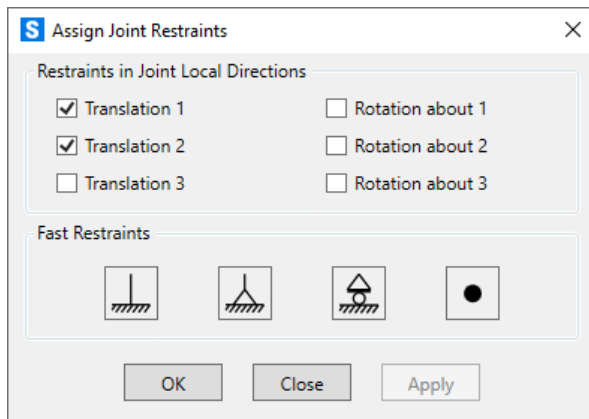


Imagen 96 | Captura de SAP2000: Restricción de los movimientos laterales en los nudos de las zapatas. (elaboración propia)

Al impedir estos desplazamientos, se representa de manera aproximada el efecto que tiene el terreno sobre la cimentación.

Por otro lado, se sigue el mismo procedimiento en las zapatas de los pilares exteriores de hormigón armado (imagen 97), las cuales tienen un ancho de 2,75 m, una longitud de 3,20 m y un canto de 1,50 m.

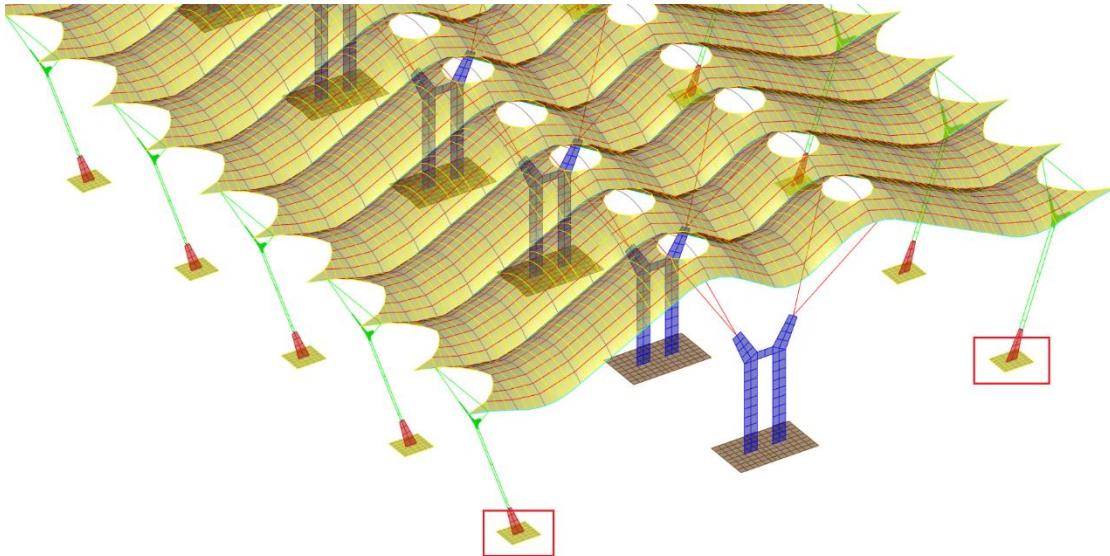


Imagen 97 | Captura de SAP2000: Zapatas de los pilares exteriores de hormigón armado. (elaboración propia)

A partir de la tabla 9 se obtiene el valor final de rigidez que hay que introducir en el programa.

ADAPTACIÓN DEL MÓDULO DE BALASTO DE UNA PLACA DE CARGA DE 30x30 cm.
PARA MODELO WINKLER DE LOSA FLEXIBLE SOBRE SUELO ELÁSTICO

Geometría de la losa:	Rectangular	Longitud =	3,20	metros
		Ancho =	2,75	metros

Tipo de terreno:	Mixto	Arenas (%):	50
$K_{30} =$	4,0 kp/cm ³	Arcillas (%):	50

$K_{arenoso} =$		kp/cm ³	t/m ³	kN/m ³
$K_{arcilloso} =$		kp/cm ³	t/m ³	kN/m ³
$K_{mixto} =$	0,794	kp/cm ³	794,17	t/m ³
				7.941,7 kN/m ³

Tabla 9 | Tabla Excel del módulo de Balasto para las zapatas de los pilares exteriores de hormigón armado. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis)

Los 7.941,7 kN/m³ obtenidos en la tabla 9, se redondean a **8.000 kN/m³**, siendo este último el valor a considerar.

Como se observa en la imagen 98, los 8.000 kN/m³ se introducen en el programa para poder asignar los muelles a las zapatas.

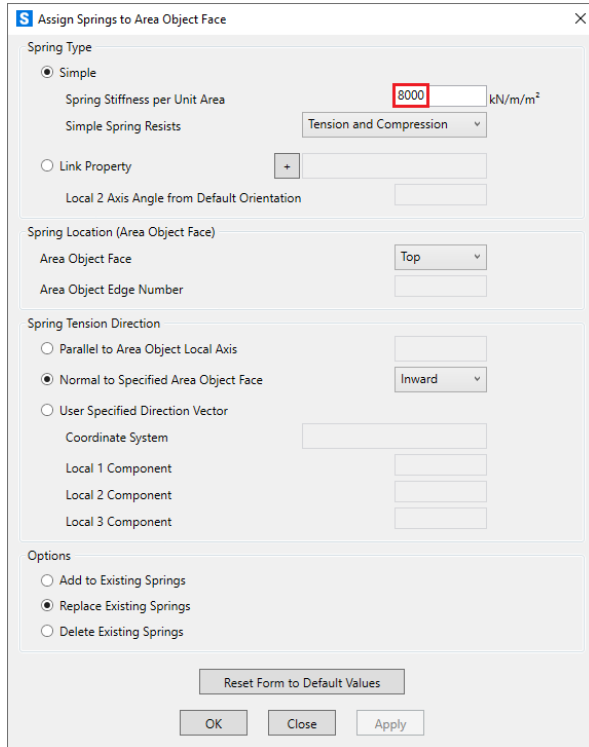


Imagen 98 | Captura de SAP2000: Introducción del resultado de la tabla 9 en el programa. (elaboración propia)

De esta manera, cada elemento finito tiene un muelle con una rigidez de 8.000 kN/m³, tal y como se observa en la imagen 99.

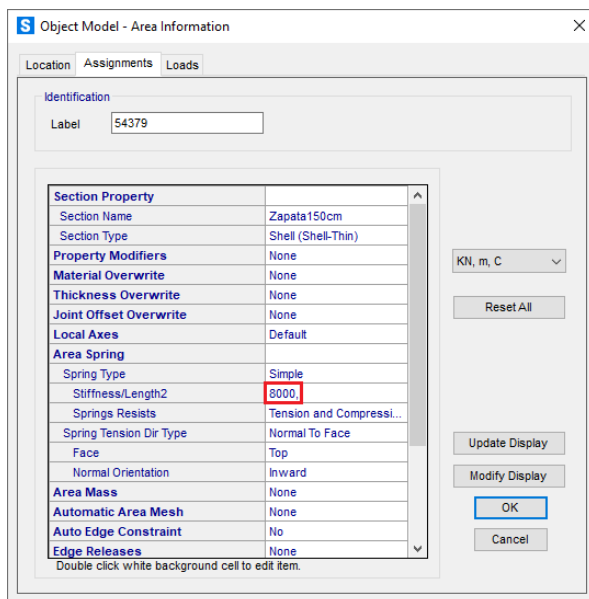


Imagen 99 | Captura de SAP2000: Rigidez de los muelles de las zapatas. (elaboración propia)

De forma análoga a lo que sucede en las zapatas interiores, en las zapatas exteriores, tal y como se observa en la imagen 100, también se impiden los desplazamientos laterales en cada uno de sus nudos.

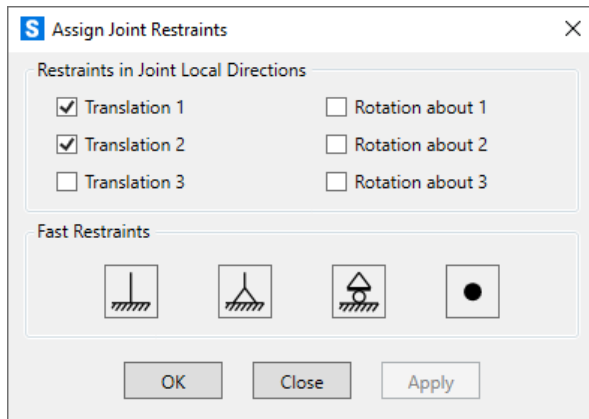


Imagen 100 | Captura de SAP2000: Restricción de los movimientos laterales en los nudos de las zapatas. (elaboración propia)

Por último, se aísla el pórtico más desfavorable y se considera un valor orientativo de 200 kN/m^2 para la tensión admisible del terreno.

Como se observa en la imagen 101, bajo la combinación de cargas más desfavorable (ELSintcon), las presiones de las zapatas no generan valores de compresión superiores a la tensión admisible ni valores de tracción en ningún punto. Por ello, se considera que las zapatas son admisibles.



Imagen 101 | Captura de SAP2000: Presiones de las zapatas. (elaboración propia)

4.5.2 | Desconexiones

Las desconexiones de extremo de barra están relacionadas con las uniones entre elementos estructurales y se realizan con la finalidad de representar, de la manera más precisa posible, el comportamiento estructural de la terminal.

En el presente trabajo, todas las desconexiones que se realizan son de giro y corresponden con el plano de mínima inercia de los perfiles (Moment 22 (Minor) en SAP2000).

En primer lugar, los pilares en forma de “Y” presentan desconexiones tanto en sus extremos inferiores como en los superiores.

En la imagen 102 se observan las uniones de los pilares en forma de “Y” con los pilares exteriores de hormigón armado.



Imagen 102 | Uniones de los pilares en forma de “Y” con los pilares exteriores de hormigón armado. (RSHP)

En estas uniones, las desconexiones corresponden con el extremo de barra inicial (End-I en SAP2000) de cada elemento estructural, tal y como se muestra en las imágenes 103 y 104.

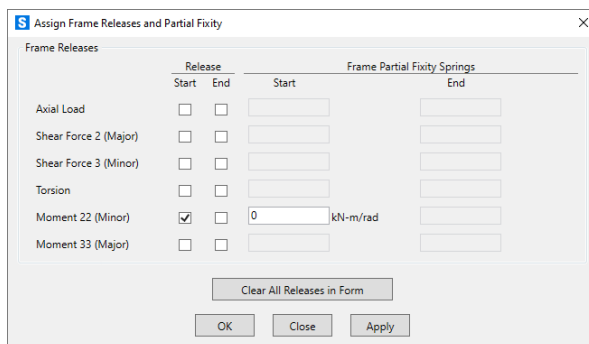


Imagen 103 | Captura de SAP2000: Desconexiones en los extremos de barra iniciales. (elaboración propia)

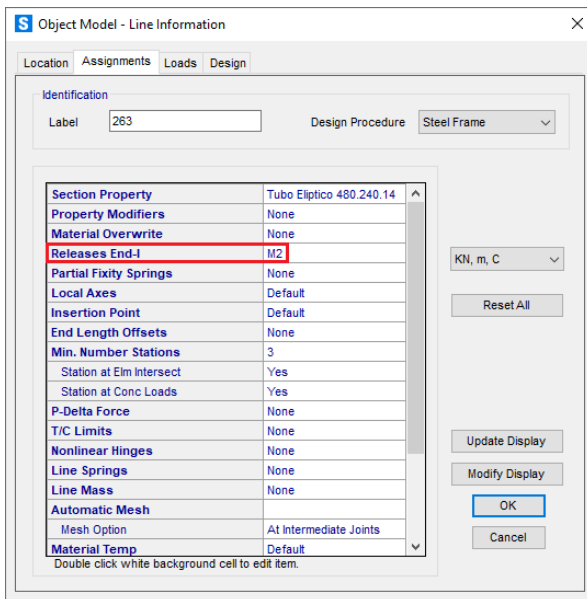


Imagen 104 | Captura de SAP2000: Características de las desconexiones inferiores de los pilares en forma de "Y". (elaboración propia)

En la imagen 105 se observan las uniones de los pilares en forma de "Y" con las vigas principales.



Imagen 105 | Uniones de los pilares en forma de "Y" con las vigas principales. (RSHP)

En estas uniones, las desconexiones corresponden con el extremo de barra final (End-J en SAP2000) de cada elemento estructural, tal y como se muestra en las imágenes 106 y 107.

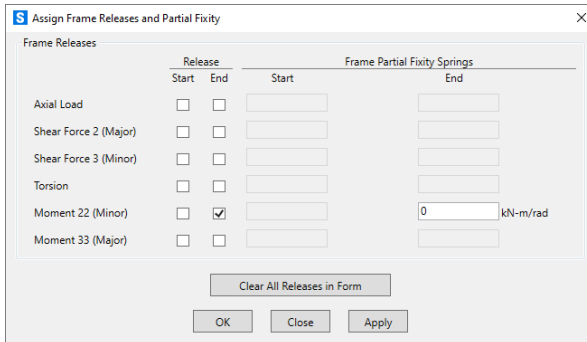


Imagen 106 | Captura de SAP2000: Desconexiones en los extremos de barra finales. (elaboración propia)

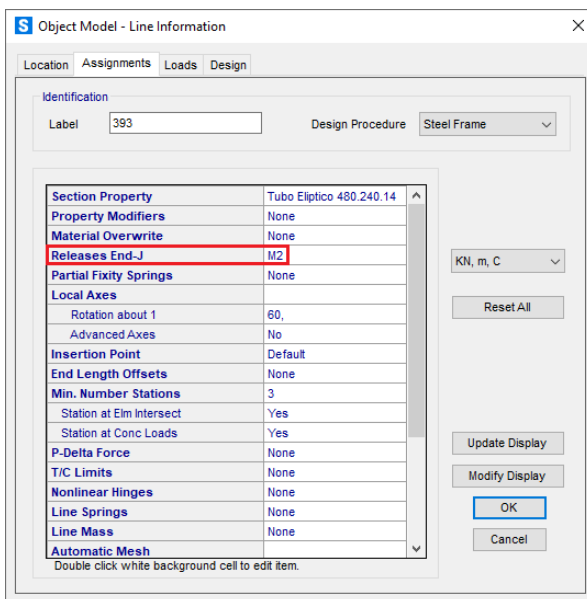


Imagen 107 | Captura de SAP2000: Características de las desconexiones superiores de los pilares en forma de "Y". (elaboración propia)

Por otro lado, los pilares en forma de "V" presentan desconexiones únicamente en sus extremos superiores.

En la imagen 108 se observan las uniones de los pilares en forma de "V" con las vigas principales.

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

DIEGO COLL MARTÍNEZ



Imagen 108 | Uniones de los pilares en forma de "V" con las vigas principales. (Estudio Lamela)

En estas uniones, las desconexiones corresponden con el extremo de barra final (End-J en SAP2000) de cada elemento estructural, tal y como se muestra en las imágenes 109 y 110.

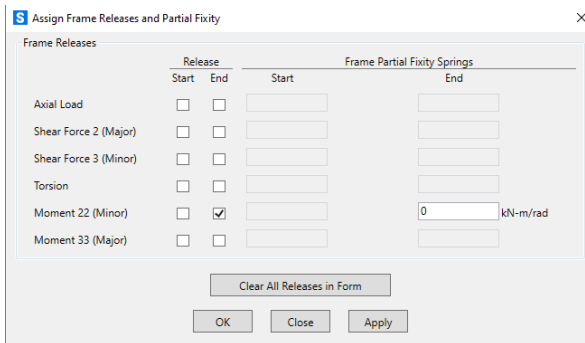


Imagen 109 | Captura de SAP2000: Desconexiones en los extremos de barra finales. (elaboración propia)

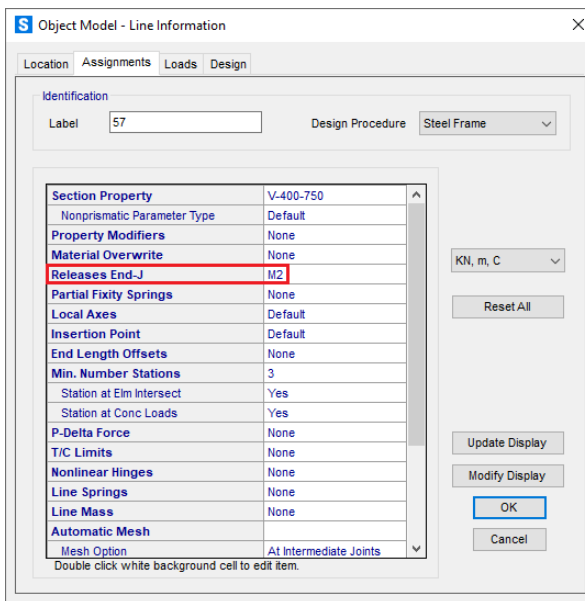


Imagen 110 | Captura de SAP2000: Características de las desconexiones de los pilares en forma de "V". (elaboración propia)

Por último, las vigas principales presentan desconexiones en los encuentros transversales de los módulos, en la zona central de la terminal.

En la imagen 111 se observan las uniones de las vigas principales de los distintos módulos.



Imagen 111 | Uniones de las vigas principales de diferentes módulos. (RSHF)

En estas uniones, las desconexiones corresponden con el extremo de barra final (End-J en SAP2000) de cada elemento estructural, tal y como se muestra en las imágenes 112 y 113.

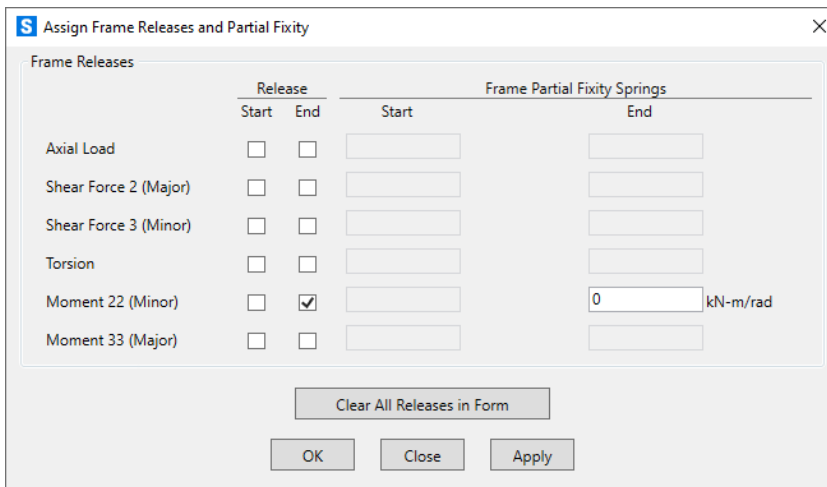


Imagen 112 | Captura de SAP2000: Desconexiones en los extremos de barra finales. (elaboración propia)

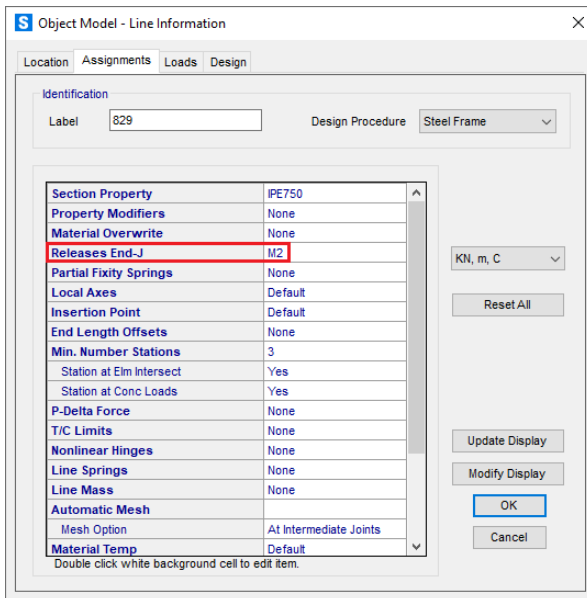


Imagen 113 | Captura de SAP2000: Características de las desconexiones de las vigas principales. (elaboración propia)

En la imagen 114 se muestran todas las desconexiones nombradas en el presente apartado.

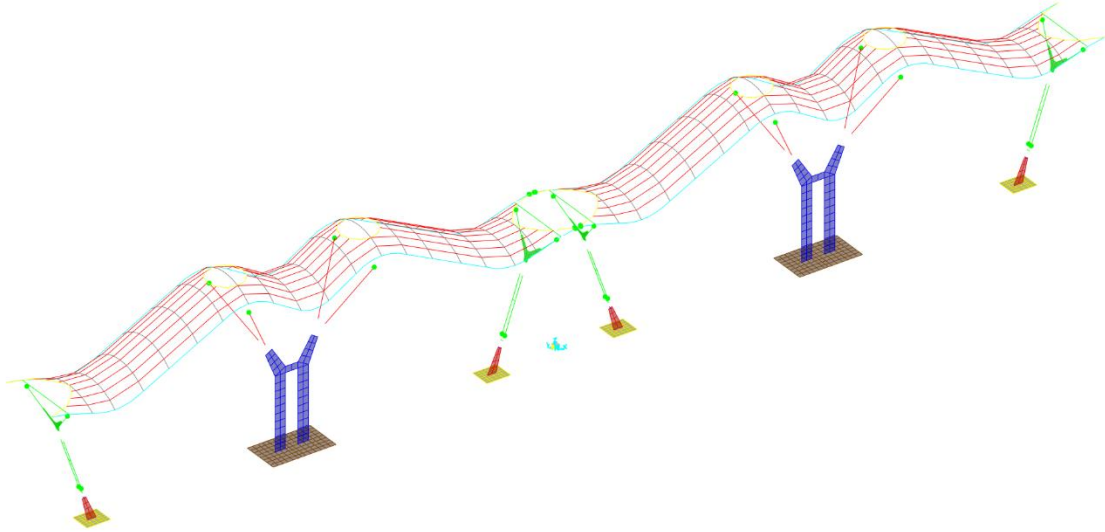


Imagen 114 | Captura de SAP2000: Desconexiones de los elementos estructurales de la terminal. (elaboración propia)

5 | Interpretación de los resultados

Tras haber modelizado la estructura y aplicado las cargas correctamente en el modelo, se interpretan los resultados obtenidos en SAP2000.

Para analizar si la estructura de la terminal cumple los requisitos establecidos por la normativa, se comprueban las limitaciones de los **estados límite de servicio** y de los **estados límite últimos**.

Las comprobaciones de los estados límite de servicio y de los estados límite últimos se realizan considerando tanto las cargas permanentes (G) como las cargas variables (Q), aplicando diferentes combinaciones de acciones en cada caso.

5.1 | Estados límite de servicio

Los estados límite de servicio (ELS), de ser superados, pueden afectar tanto al correcto funcionamiento del edificio como a su apariencia, además de al confort y bienestar de los usuarios.

En la comprobación de los ELS se utilizan diferentes combinaciones de acciones, según las características de las acciones a considerar en cada caso. En cada una de las combinaciones se diferencian los siguientes valores:

($G_{k,j}$): cargas permanentes

(P): carga permanente debida al pretensado (despreciable en el presente trabajo)

($Q_{k,1}$): carga variable principal

($Q_{k,i}$): resto de cargas variables

(ψ): coeficientes de simultaneidad

Los efectos causados por las acciones de corta duración, con carácter irreversible, se determinan mediante la **combinación de acciones característica**, la cual se expresa de la siguiente manera:

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

Los efectos causados por las acciones de corta duración, con carácter reversible, se determinan mediante la **combinación de acciones frecuente**, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Los efectos causados por las acciones de larga duración se determinan mediante la **combinación de acciones casi permanente**, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

En los ELS se comprueban las deformaciones, tanto los **desplazamientos verticales** como los **desplazamientos horizontales**, además de las vibraciones.

A causa de la ligereza de la parte superior de la estructura y de los elementos de la cubierta, podría llegar a ser necesario la comprobación de las vibraciones. En cualquier caso, en el presente trabajo se comprueban únicamente los desplazamientos verticales y horizontales, considerándolos como las comprobaciones más relevantes para este caso en particular.

Tanto las comprobaciones de los desplazamientos verticales como las de los desplazamientos horizontales se realizan aislando el pórtico más desfavorable.

5.1.1 | Desplazamientos verticales

Para los desplazamientos verticales (flechas), siguiendo el procedimiento establecido por el CTE DBSE, se consideran las comprobaciones de **integridad constructiva**, **confort de los usuarios** y **apariencia de la obra**, con sus respectivas limitaciones.

Una vez aislado el pórtico que presenta mayores deformaciones, se comprueba la flecha relativa del elemento estructural más desfavorable, en este caso una correa.

Para la obtención de la flecha relativa de la correa, la limitación correspondiente se verifica entre dos puntos diferentes, los cuales muestran la mayor diferencia de desplazamientos verticales del elemento estructural.

El punto 1 y el punto 2 corresponden con el menor y el mayor desplazamiento vertical, respectivamente. A su vez, los desplazamientos verticales corresponden con el valor **U3** en SAP2000.

5.1.1.1 | Integridad constructiva

En la comprobación de la integridad constructiva, se admite que la estructura es suficientemente rígida si, ante las combinaciones de acciones características, la flecha relativa es menor que 1/500 en pisos con tabiques frágiles o pavimentos rígidos sin juntas, 1/400 en pisos con tabiques ordinarios o pavimentos rígidos con juntas y 1/300 en el resto de los casos. En este caso, se realiza la comprobación con la limitación de flecha relativa de **1/500** para estar del lado de la seguridad.

En la integridad constructiva, solo se contemplan las deformaciones que se producen después de la puesta en obra del elemento constructivo a considerar. Dicho elemento es el cerramiento de muro cortina, debido a que es el más susceptible de soportar estas deformaciones.

Al no disponer de suficientes datos para saber en qué momento de la obra se construyó el muro cortina, del lado de la seguridad, se considera que el elemento constructivo tuvo que soportar las deformaciones de todas las cargas permanentes, excluyendo el peso propio de la estructura metálica, el cual ya causó deformaciones con anterioridad a la puesta en obra del muro cortina. Por estos motivos, en esta comprobación se utiliza la combinación de cargas **ELSintcon**, considerando la totalidad de las cargas muertas permanentes (CMP) y de la sobrecarga de uso (SCU).

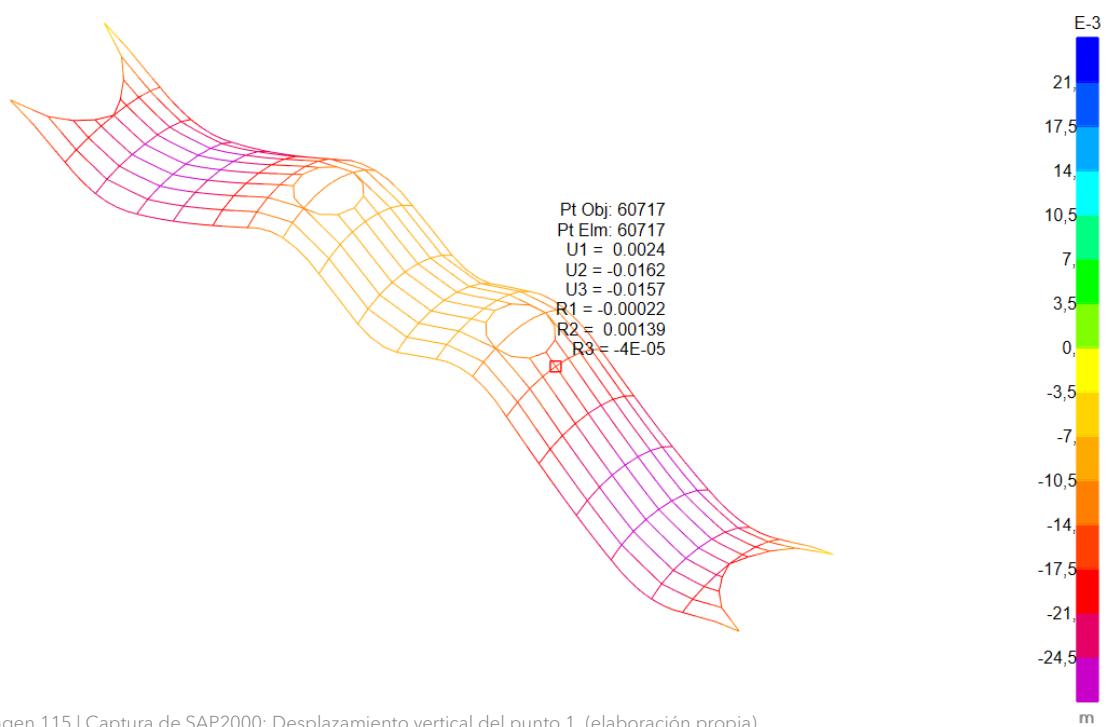


Imagen 115 | Captura de SAP2000: Desplazamiento vertical del punto 1. (elaboración propia)

En la imagen 115 se muestra el valor del desplazamiento vertical del punto 1 de la correa. Tal y como se observa, el punto 1 experimenta un descenso de **15,7 mm**.

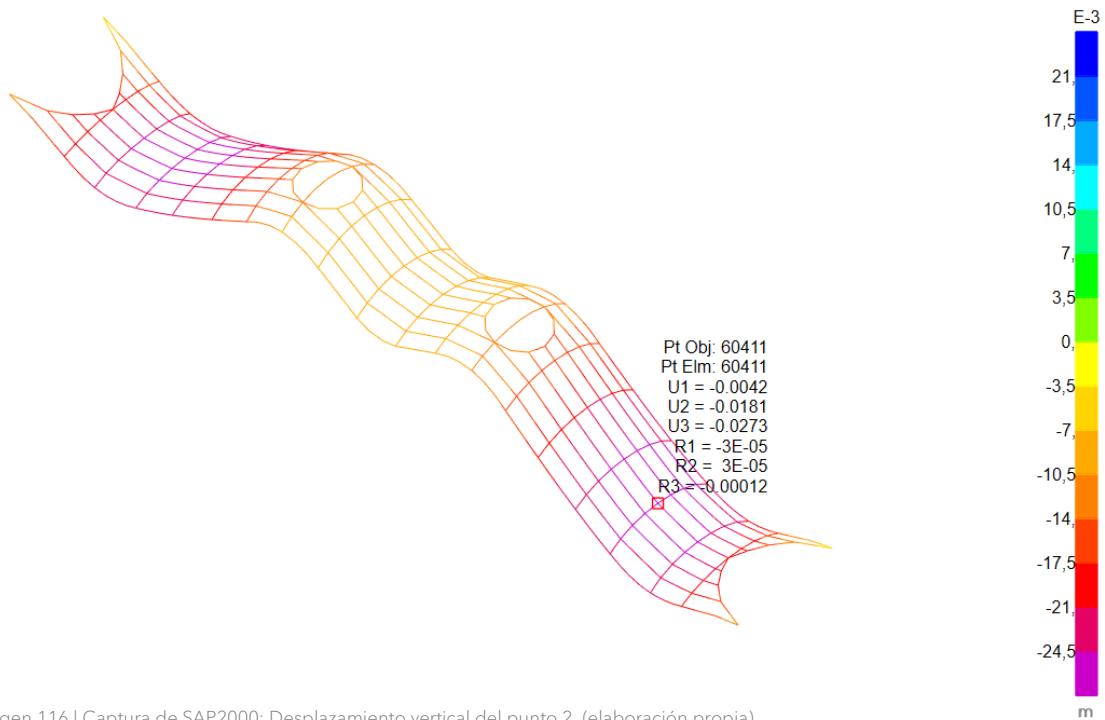


Imagen 116 | Captura de SAP2000: Desplazamiento vertical del punto 2. (elaboración propia)

En la imagen 116 se observa que el punto 2 experimenta un descenso de **27,3 mm**.

5.1.1.2 | Confort de los usuarios

En la comprobación del confort de los usuarios, se admite que la estructura es suficientemente rígida si, ante las combinaciones de acciones características, la flecha relativa es menor que **1/350**.

Para esta comprobación, se consideran únicamente las acciones de corta duración: sobrecarga de uso (SCU) y sobrecarga de viento (SCV). En este caso, la comprobación se realiza con la sobrecarga de uso (SCU), al ser la más desfavorable de las dos acciones.

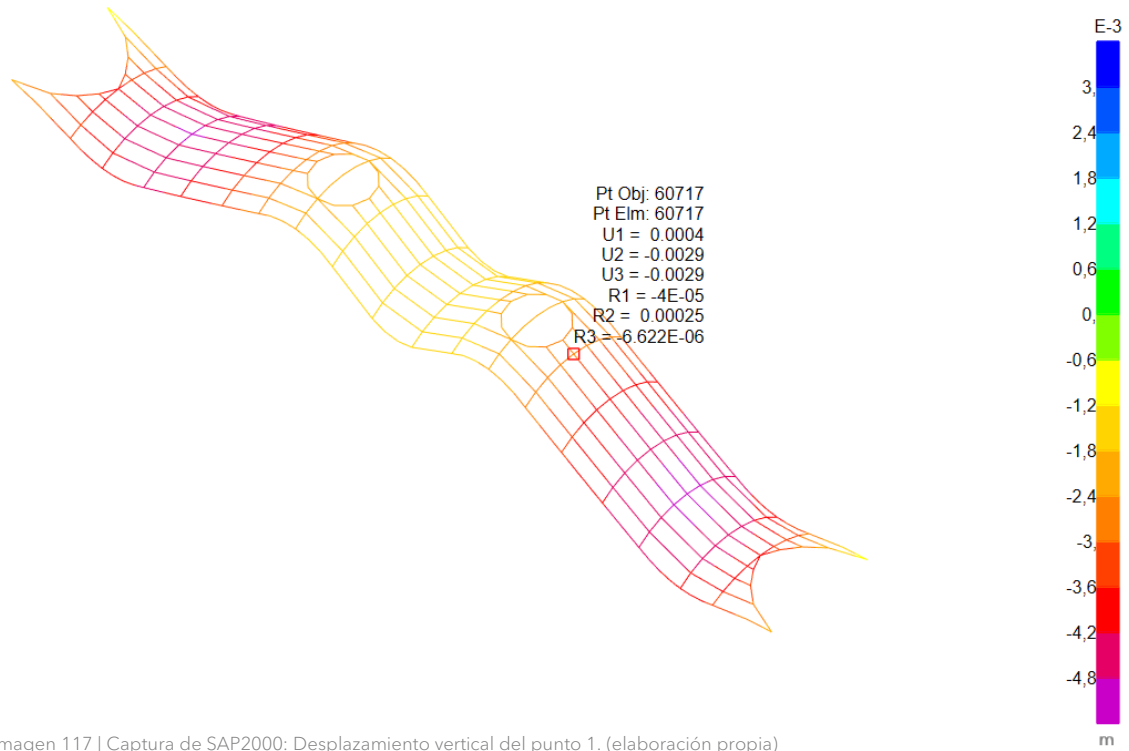


Imagen 117 | Captura de SAP2000: Desplazamiento vertical del punto 1. (elaboración propia)

En la imagen 117 se observa un descenso de **2,9 mm** en el punto 1.

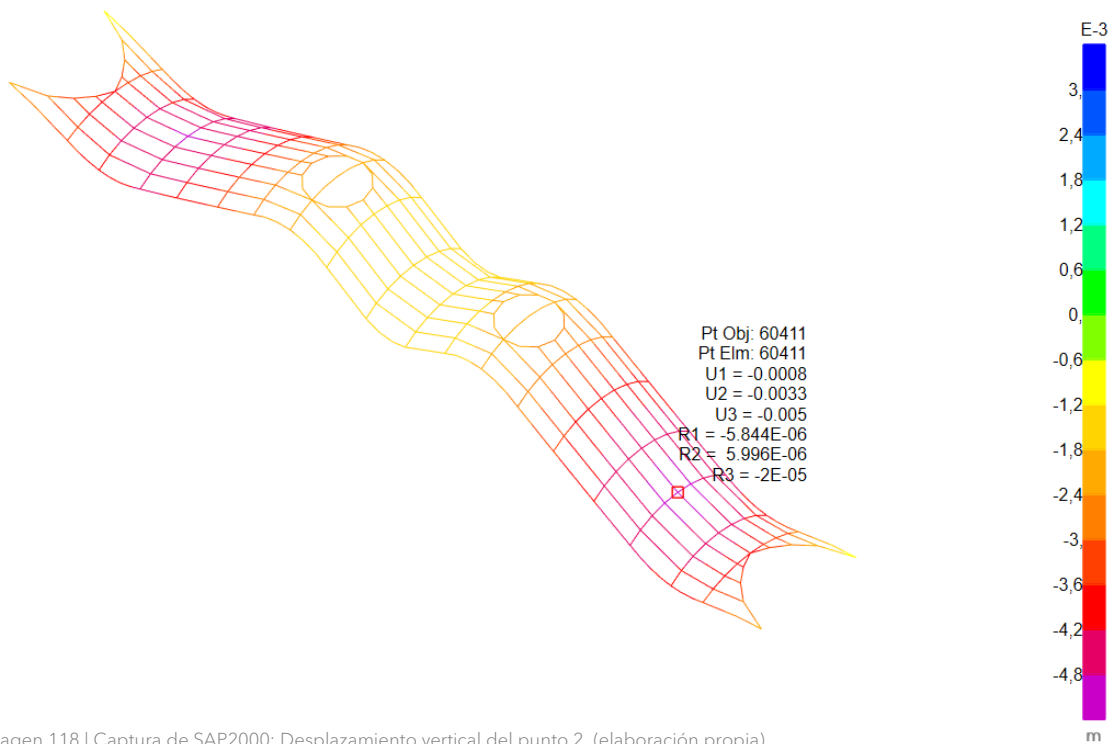


Imagen 118 | Captura de SAP2000: Desplazamiento vertical del punto 2. (elaboración propia)

El punto 2 experimenta un descenso de **5 mm** tal y como se muestra en la imagen 118.

5.1.1.3 | Apariencia de la obra

En la comprobación de la apariencia de la obra, se admite que la estructura es suficientemente rígida si, ante las combinaciones de acciones casi permanentes, la flecha relativa es menor que 1/300.

Para esta comprobación, se utiliza la combinación de cargas casi permanente (ELS_{qpu}).

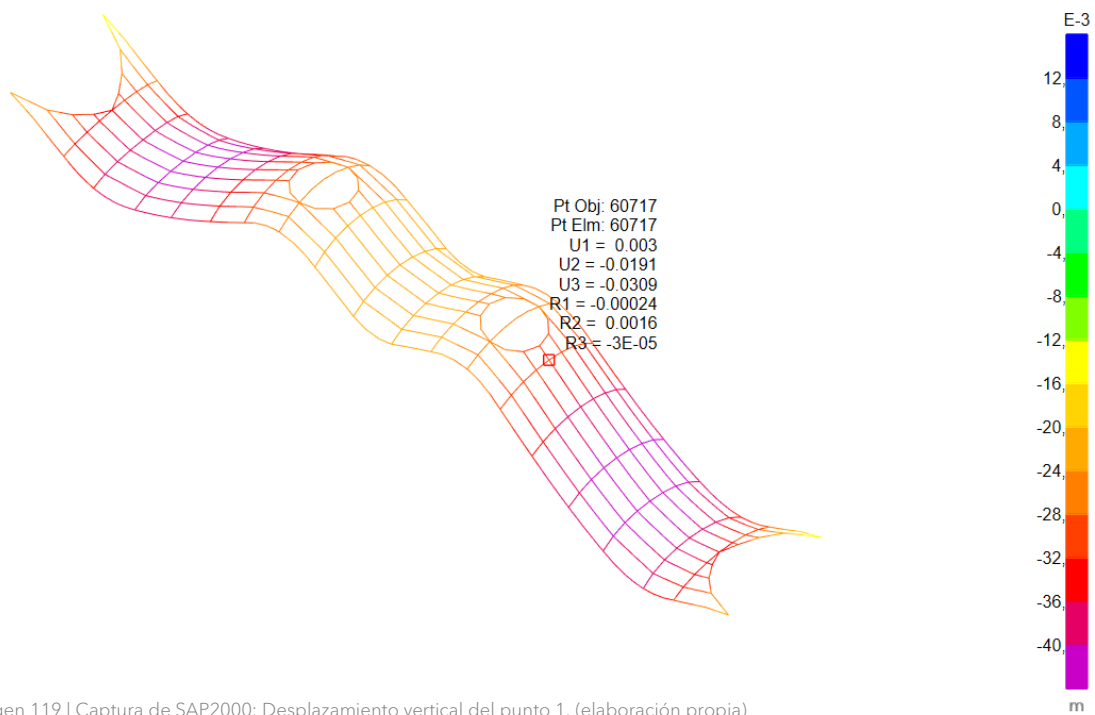


Imagen 119 | Captura de SAP2000: Desplazamiento vertical del punto 1. (elaboración propia)

En la imagen 119 se muestra el descenso que experimenta el punto 1. Este descenso tiene un valor de 30,9 mm.

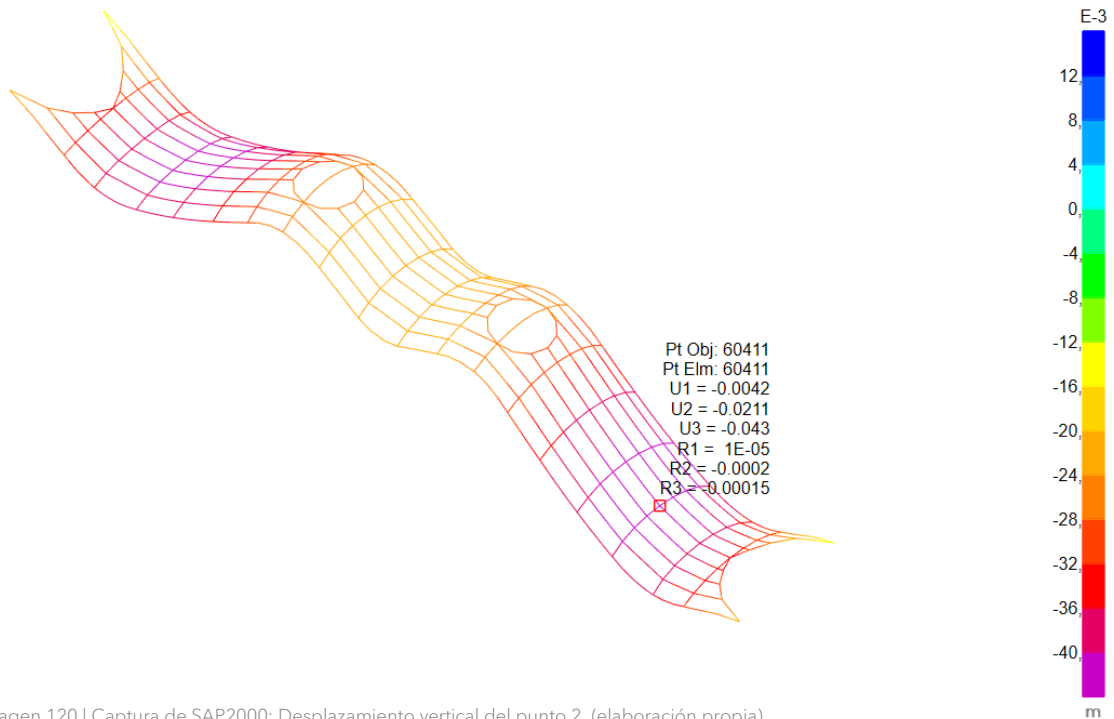


Imagen 120 | Captura de SAP2000: Desplazamiento vertical del punto 2. (elaboración propia)

En la imagen 120 se observa un descenso de **43 mm** en el punto 2.

Una vez obtenidos los valores de las comprobaciones de la integridad constructiva, el confort de los usuarios y la apariencia de la obra, se introducen en la tabla 10. Dicha tabla muestra los resultados de las flechas relativas en las tres comprobaciones, los cuales cumplen ampliamente las limitaciones.

MATERIAL		INT. CONST.	CONF. USU.	APAR. OBRA
ACERO		ELSintcon	SCU	ELSqpu
		500	350	300
dz1 (U3 del punto 1)	[mm]	15,7	2,9	30,9
dz2 (U3 del punto 2)	[mm]	27,3	5,0	43,0
Delta_dz	[mm]	11,6	2,1	12,1
Delta_dz (con factor material)	[mm]	11,6	2,1	12,1
Distancia entre el punto 1 y 2	[m]	11,98	11,98	11,98
Flecha relativa	[L/]	2066	11410	1980
		24%	3%	15%

Tabla 10 | Tabla Excel de comprobación de flechas. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis)

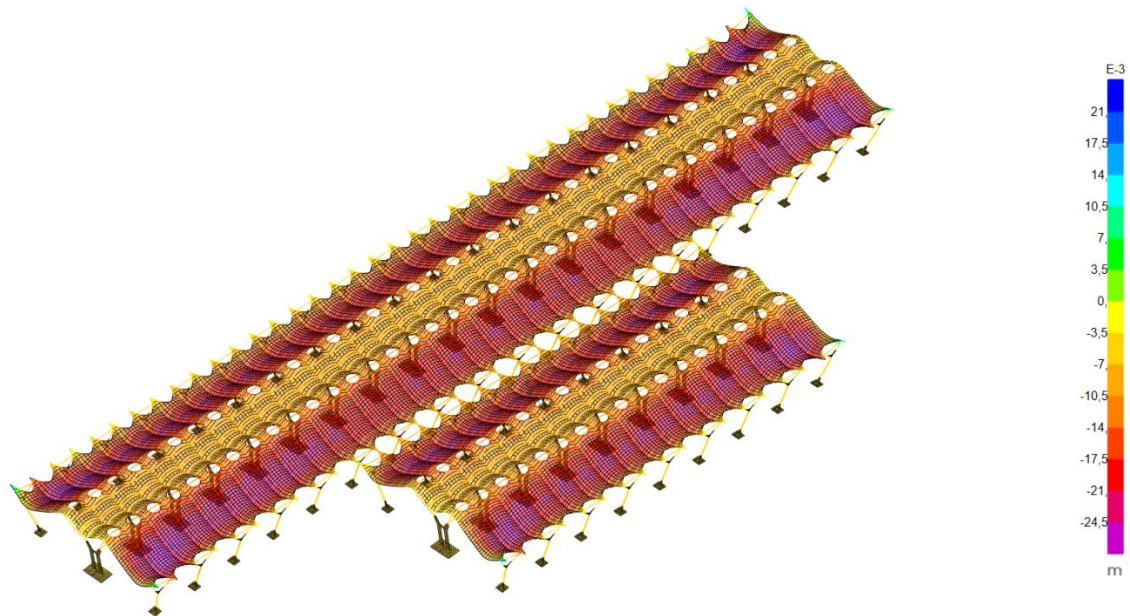


Imagen 121 | Captura de SAP2000: Deformaciones en la combinación de cargas EL Sintcon. (elaboración propia)

En la imagen 121 se observan las deformaciones de la estructura en la combinación de cargas EL Sintcon, la cual, como se ha comprobado, es la combinación más desfavorable en la comprobación de flechas. Estas deformaciones están ampliadas por un factor de escala de 100.

5.1.2 | Desplazamientos horizontales

En los desplazamientos horizontales (desplomes), según lo establecido por el CTE DBSE, se consideran las comprobaciones de la integridad constructiva y la apariencia de la obra, con sus respectivas limitaciones.

En este caso en particular y siempre del lado de la seguridad, se realizan una serie de simplificaciones con el fin de facilitar el proceso de cálculo.

Por un lado, se considera que la terminal tiene una sola planta con una altura máxima de 24 m.

Por otro lado, se comprueba únicamente la **integridad constructiva**, al tener unas limitaciones más restrictivas que la comprobación de la apariencia de la obra.

Además, se considera la combinación de cargas **EL Sv_x+**, por ser la combinación con la cual se obtienen los valores más desfavorables. En dicha combinación, los desplazamientos horizontales a considerar corresponden con el valor **U1** en SAP2000.

En cuanto a los apoyos, se han sustituido las zapatas con muelles por empotramientos. De esta manera, se obtienen resultados que reflejan con mayor precisión los efectos del viento en los desplomes.

Finalmente, al considerar los valores de viento del apartado 4.4.3.4, tal y como se observa en la imagen 122, se obtienen las deformaciones de la estructura en la combinación de cargas ELSvx+. Estas deformaciones están ampliadas por un factor de escala de 100.

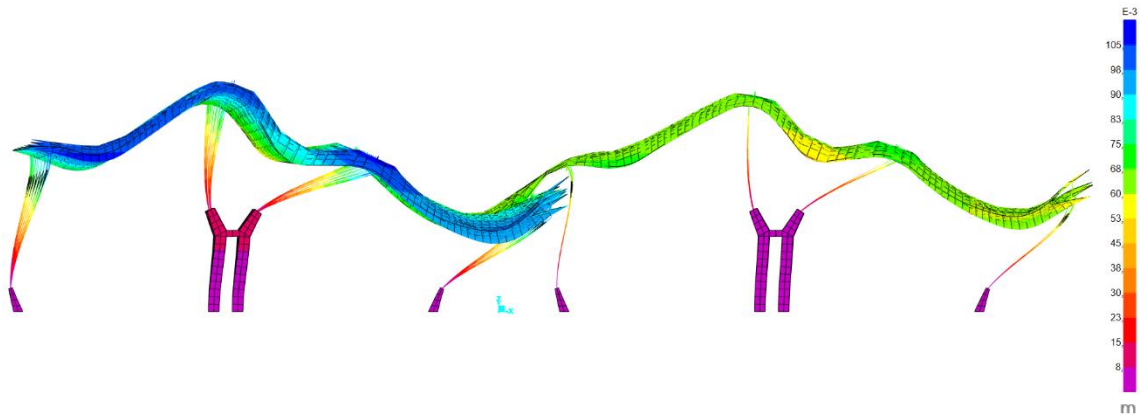


Imagen 122 | Captura de SAP2000: Deformaciones en la combinación de cargas ELSvx+ considerando las cargas del apartado 4.4.3.4. (elaboración propia)

Las deformaciones que se muestran en la imagen 122 son excesivas y están lejos de cumplir las limitaciones de la normativa.

Por este motivo, considerando que la terminal está en uso en la actualidad y no presenta problemas significativos relacionados con el viento, se deduce que, a la hora de analizar el comportamiento estructural de la terminal, se debió realizar un análisis de túnel de viento que permitiera reducir las cargas obtenidas mediante el procedimiento del CTE DBSE-AE, las cuales generan estas deformaciones excesivas.

Para realizar el apartado 5.1.2.1, con el fin de aproximarse a los posibles resultados que se obtendrían al realizar el análisis de túnel de viento y siguiendo las indicaciones de David Gallardo Llopis, se reducen las cargas del apartado 4.4.3.4 hasta obtener valores que cumplan las exigencias de la normativa.

5.1.2.1 | Integridad constructiva

En la comprobación de la integridad constructiva, se admite que la estructura tiene suficiente rigidez lateral si, ante las combinaciones de acciones características, el desplome total es menor que 1/500 de la altura total del edificio y si el desplome local es menor que 1/250 de la altura de cualquiera de sus plantas.

Al considerar una única planta en la terminal, se realizan las comprobaciones con la limitación más restrictiva (1/500).

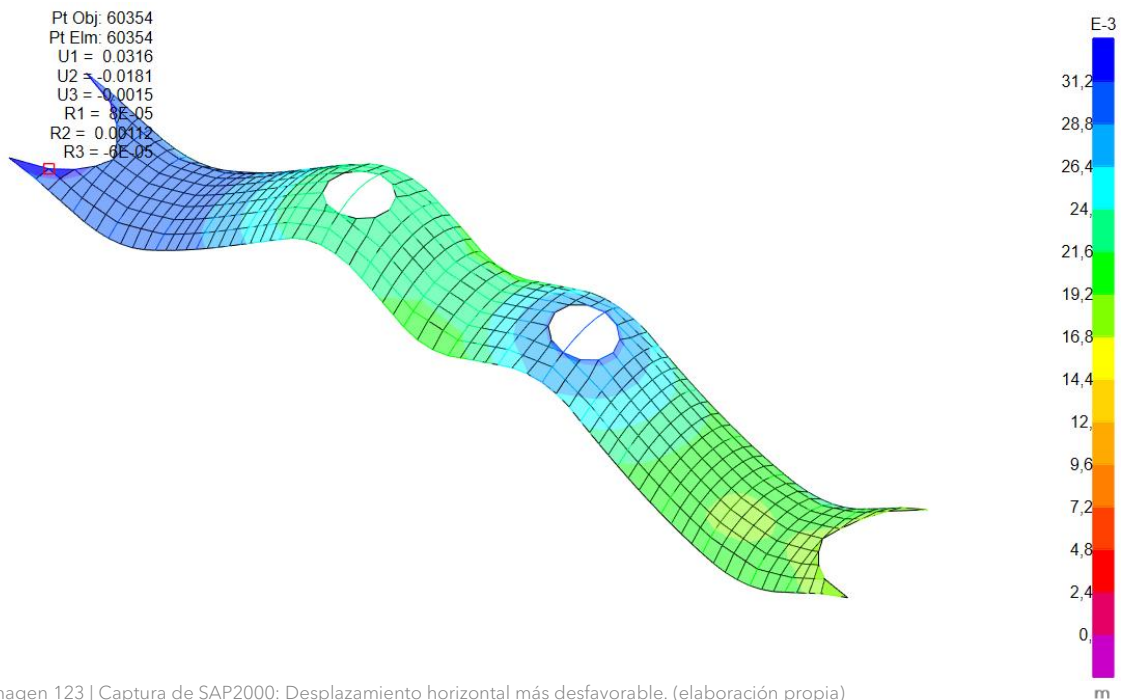


Imagen 123 | Captura de SAP2000: Desplazamiento horizontal más desfavorable. (elaboración propia)

En la imagen 123 se observa que el valor del desplome más desfavorable es de **31,60 mm**.

Debido a la compleja geometría de la terminal, es razonable considerar la altura del punto analizado (18 m) en lugar de los 24 m de altura total del edificio, asegurando así que los cálculos estén del lado de la seguridad.

Al dividir la altura del punto considerado (18 m) entre 500, se obtiene el desplome máximo que cumple la limitación: $(18 \times 1000) / 500 = 36 \text{ mm}$.

Obteniendo un desplome máximo admisible de **36 mm**, se demuestra que el desplome más desfavorable de la terminal, el cual equivale a **31,60 mm**, se encuentra dentro de los valores permitidos.

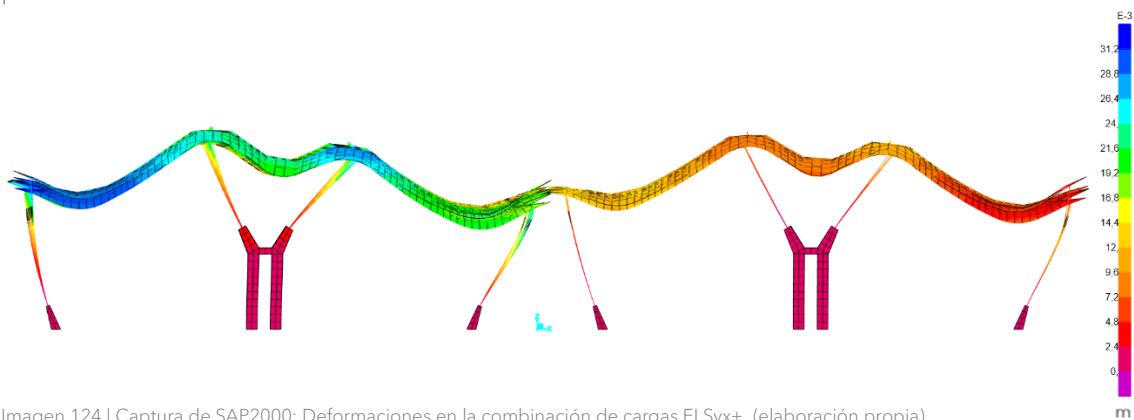


Imagen 124 | Captura de SAP2000: Deformaciones en la combinación de cargas ELSvx+. (elaboración propia)

En la imagen 124 se observan las deformaciones de la estructura en la combinación de cargas ELSvx+. Estas deformaciones están ampliadas por un factor de escala de 100.

5.2 | Estados límite últimos

Los estados límite últimos (ELU), de ser superados, constituyen un riesgo para la seguridad de las personas debido al colapso o a una puesta fuera de servicio del edificio.

En los ELU se considera la **combinación de acciones persistente o transitoria**, la cual se expresa de la siguiente manera:

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

Diferenciando los siguientes valores:

$(\gamma_{G,j} \cdot G_{k,j})$: cargas permanentes mayoradas

$(\gamma_P \cdot P)$: carga permanente debida al pretensado mayorada (despreciable en el presente trabajo)

$(\gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1})$: carga variable principal mayorada

$(\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i})$: resto de cargas variables mayoradas

La parte superior de la estructura de la terminal es de acero, mientras que la parte inferior es de hormigón armado. En consecuencia, cada parte de la estructura se analiza por separado y de manera distinta, diferenciando las comprobaciones que se realizan en los **perfiles metálicos** de las que se realizan en los **pilares de hormigón armado**.

5.2.1 | Perfiles metálicos

Tanto los pilares interiores en forma de “V” y los pilares exteriores en forma de “Y”, como cada uno de los perfiles que conforman la cubierta, forman parte de la estructura superior de acero de la terminal. Para aproximarse todo lo posible al comportamiento real de dicha estructura metálica, se decide representar todos estos elementos mediante líneas, tal y como se muestra en el apartado 4.1.

En primer lugar, antes de proceder a realizar la peritación de los perfiles metálicos frente a los ELU en SAP2000, se analiza el comportamiento global de la estructura. De esta manera, se conocen las condiciones en las que está trabajando dicha estructura, lo que permite introducir datos al programa de la manera más precisa posible.

En cuanto a la traslacionalidad de la estructura, se sabe que el desplazamiento lateral es importante debido a la gran sobrecarga de viento que soporta la terminal. Además, el arriostamiento lateral y la rigidez de los pilares inferiores de hormigón armado, no son suficientes como para contrarrestar la flexibilidad que los perfiles metálicos aportan al conjunto estructural. Por estos motivos, es conveniente considerar que el comportamiento de la estructura es traslacional.

Por otro lado, todos los elementos de la cubierta están conectados y arriostados entre sí, por lo que se considera que el pandeo está impedido en cada uno de ellos.

Una vez asumidas estas consideraciones, se procede a realizar la peritación de los perfiles metálicos en SAP2000.

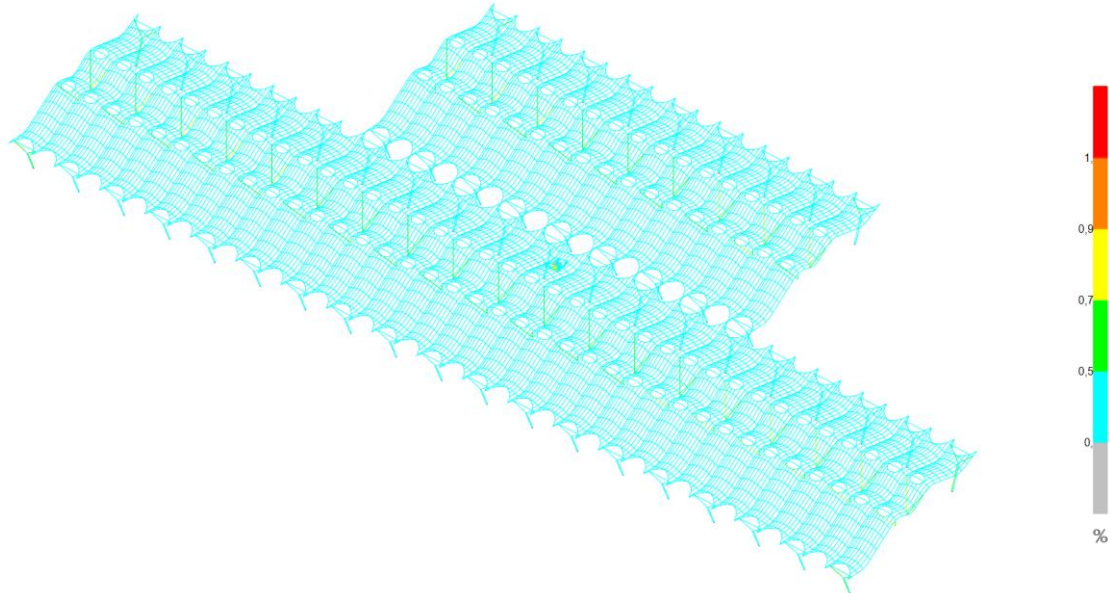


Imagen 125 | Captura de SAP2000: Peritación de los perfiles metálicos. (elaboración propia)

Tal y como se observa en la imagen 125, los elementos de la cubierta están trabajando por debajo del 50% de su capacidad, lo cual era de esperar teniendo en cuenta que tanto la sobrecarga de uso como el peso propio de la cubierta presentan valores reducidos.

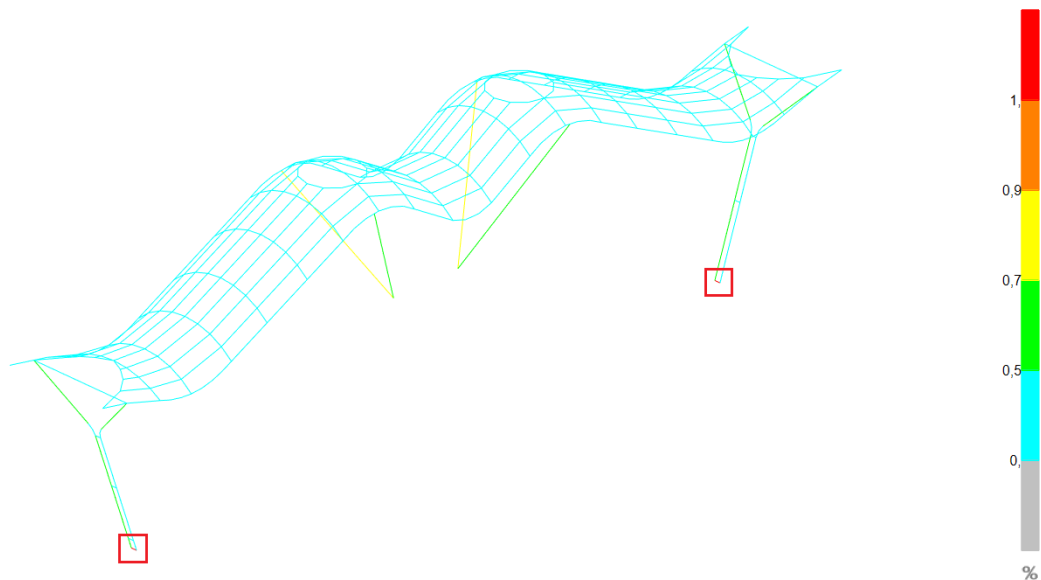


Imagen 126 | Captura de SAP2000: Pórtico más desfavorable para los perfiles metálicos. (elaboración propia)

Para mostrar los resultados obtenidos, como se observa en la imagen 126, se aísla el pórtico más desfavorable para los perfiles metálicos. Los únicos elementos que están trabajando por encima de sus capacidades mecánicas son las bielas rígidas que se indican en la imagen 126. A estas bielas se les ha asignado una rigidez que tiende a infinito, con el fin de que sirvan

únicamente de elemento conector entre el pilar exterior de hormigón armado y el pilar en forma de "Y". Por este motivo, los resultados obtenidos en dichas bielas se consideran despreciables.

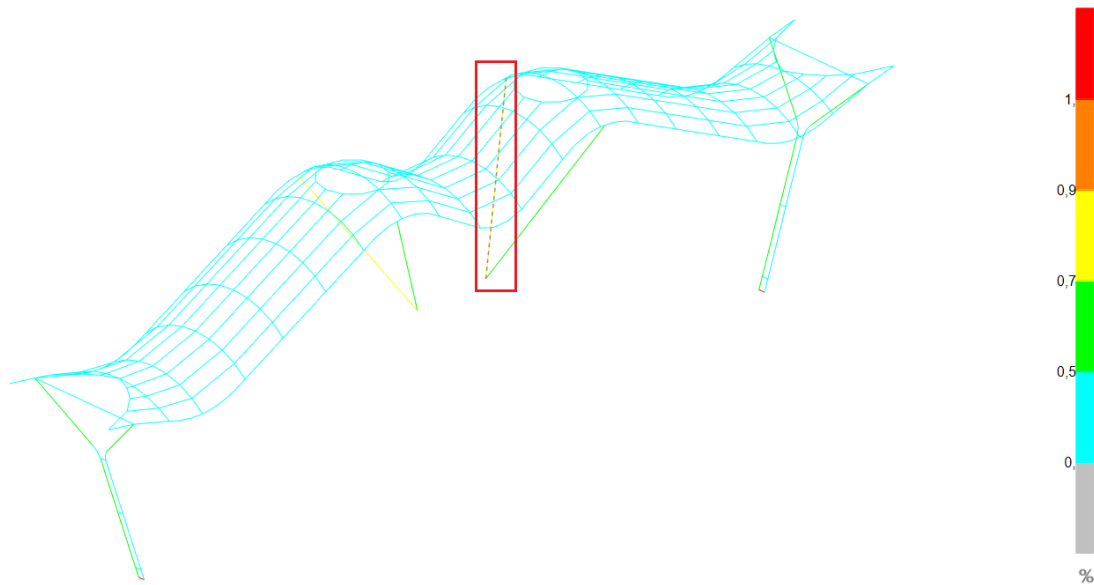


Imagen 127 | Captura de SAP2000: Perfil más desfavorable. (elaboración propia)

En la imagen 127 se indica el perfil más desfavorable, una vez seleccionado se muestran las comprobaciones realizadas por SAP2000 en dicho perfil. Como se puede observar en la imagen 128, el elemento está trabajando al **87,3%** de su capacidad mecánica y está saturado al 55,9% por axil, siendo este el esfuerzo más desfavorable. Las comprobaciones también muestran que la combinación más desfavorable en este perfil es la que considera la sobrecarga de nieve como carga variable principal (ELUnvuy-t).

S Steel Stress Check Information (Eurocode 3-2005)

Frame ID: 28670 Analysis Section: V-400-750
 Design Code: Eurocode 3-2005 Design Section: V-400-750

COMBO ID	STATION LOC	MOMENT RATIO	INTERACTION CHECK	2-SHR RATIO	3-SHR RATIO
ELUnvuy+t	13,02	0,742 (C)	= 0,513 + 0,008 + 0,229	0,004	0,007
ELUnvuy-t	0,	0,311 (C)	= 0,122 + 0,139 + 0,128	0,008	0,005
ELUnvuy-t	6,51	0,358 (C)	= 0,246 + 0,091 + 0,063	0,007	0,006
ELUnvuy-t	13,02	0,873 (C)	= 0,559 + 0,013 + 0,313	0,007	0,009
ELUvy+unt	0,	0,193 (C)	= 0,09 + 0,078 + 0,067	0,006	0,002
ELUvy+unt	6,51	0,235 (C)	= 0,182 + 0,043 + 0,032	0,004	0,003
ELUvy+unt	13,02	0,56 (C)	= 0,411 + 0,003 + 0,149	0,002	0,005

Modify/Show Overwrites: Overwrites
 Display Details for Selected Item: Summary, Flexure, Envelope
 Display Complete Details: Tabular Data
 Strength (selected) / Deflection
 OK, Cancel, Table Format File, Stylesheet: Default

Imagen 128 | Captura de SAP2000: Comprobaciones del perfil más desfavorable. (elaboración propia)

5.2.2 | Pilares de hormigón armado

La parte inferior de la estructura de la terminal está formada por **pilares interiores** y **pilares exteriores** de hormigón armado. Teniendo en cuenta la geometría y las dimensiones de estos pilares, se opta por representarlos mediante elementos finitos, tal y como se muestra en el apartado 4.1.

En SAP2000, la comprobación de elementos finitos frente a los ELU no se puede realizar por peritación directa como en el caso de los perfiles metálicos del apartado 5.2.1. Por este motivo, los elementos finitos se analizan mediante SAP2000 y se comprueba que cumplan las exigencias de la normativa mediante la documentación facilitada por David Gallardo Llopis.

Las comprobaciones que se muestran a continuación en los pilares de hormigón armado corresponden con el pórtico más desfavorable de la terminal. A su vez, la combinación de cargas más desfavorable para los pilares es la que considera la sobrecarga de nieve como única carga variable (**ELUn**). Por este motivo, siguiendo la normativa, todas las comprobaciones del presente apartado se realizan con esta combinación de cargas.

Tanto para los pilares interiores como para los exteriores, se analizan los esfuerzos correspondientes a las fuerzas F11 y F22. Por un lado, las fuerzas F11 son paralelas al eje 1 en SAP2000 (eje rojo), y la armadura encargada de soportar los esfuerzos correspondientes a estas fuerzas es la armadura horizontal. Por otro lado, las fuerzas F22 son paralelas al eje 2 en SAP2000 (eje verde), y en este caso la armadura encargada de soportar los esfuerzos correspondientes a estas fuerzas es la armadura vertical. Para ello, se utilizan tablas que permiten saber cuántos kN son capaces de soportar los pilares por cada metro de ancho, tanto a compresión como a tracción.

5.2.2.1 | Pilares interiores

En primer lugar, se obtienen los esfuerzos correspondientes a las **fuerzas F11**.

Para averiguar la armadura horizontal necesaria para soportar estos esfuerzos, se utiliza la tabla 11, la cual muestra los valores máximos de compresión y tracción para el caso de una armadura de Ø16 cada 20 cm.

ARMADO HORIZONTAL (simétrico en ambas caras)		
Armadura horizontal - fuerzas F11 [kN/m.a.]		
Diámetro de base horizontal	16	mm
Distancia vertical entre barras	20	cm
Diámetro de refuerzo horizontal		mm
Distancia vertical entre barras refuerzo	20	cm
Máxima compresión hormigón	28.333,33	kN/m.a.
Máxima compresión acero	804,25	kN/m.a.
Máxima compresión	-29.138	kN/m.a.
Máxima tracción	874	kN/m.a.

Tabla 11 | Tabla Excel de armadura horizontal de los pilares interiores. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis)

S Display Shell Stresses

Case/Combo
Case/Combo Name:

Component Type
 Resultant Forces Shell Layer Stresses
 Shell Stresses Shell Layer Strains
 Shell Strains

Multivalued Options
 Envelope Max
 Envelope Min
 Step

Contour Range
 Automatic Contour Range User Defined Contour Range
 Minimum Value for User Contour Range: kN/m
 Maximum Value for User Contour Range: kN/m

Stress Averaging
 None
 At All Joints
 Over Objects and Group:

Miscellaneous Options
 Show Deformed Shape
 Show Continuous Contours (Enhanced Graphics)

Imagen 129 | Captura de SAP2000: Introducción de los datos de la tabla 11 en el programa. (elaboración propia)

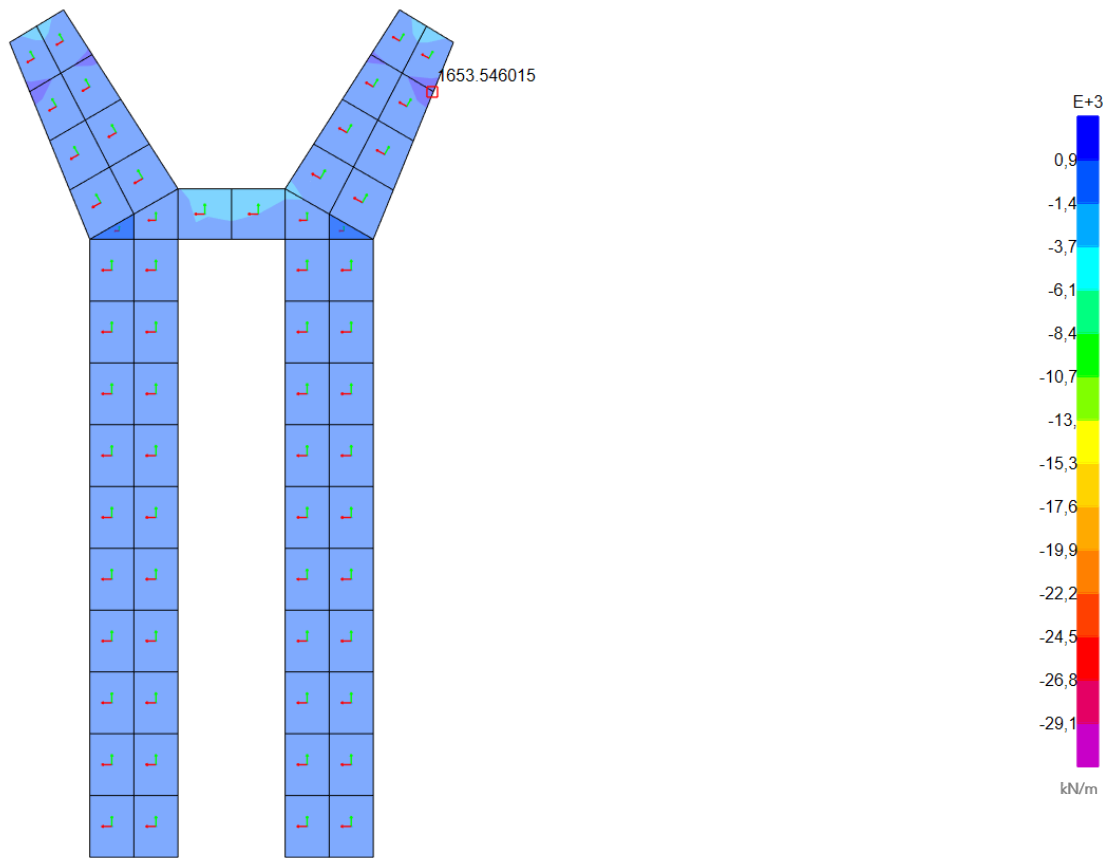


Imagen 130 | Captura de SAP2000: Esfuerzos correspondientes a las fuerzas F11. (elaboración propia)

Tal y como se puede observar en la imagen 130, los valores de compresión que están soportando los pilares en estas condiciones, son mucho menores que los 29.138 kN/m que son capaces de soportar. En cuanto a la tracción, el valor máximo que están soportando es de 1653,55 kN/m, siendo este superior a los 874 kN/m que son capaces de soportar los pilares con esta armadura.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que para que los pilares sean capaces de resistir los esfuerzos a los que están siendo sometidos, es necesario disponer de armaduras de refuerzo en las zonas indicadas en la imagen 131, donde los valores son superiores a la máxima tracción que son capaces de soportar los pilares con una armadura horizontal de $\varnothing 16$ cada 20 cm.

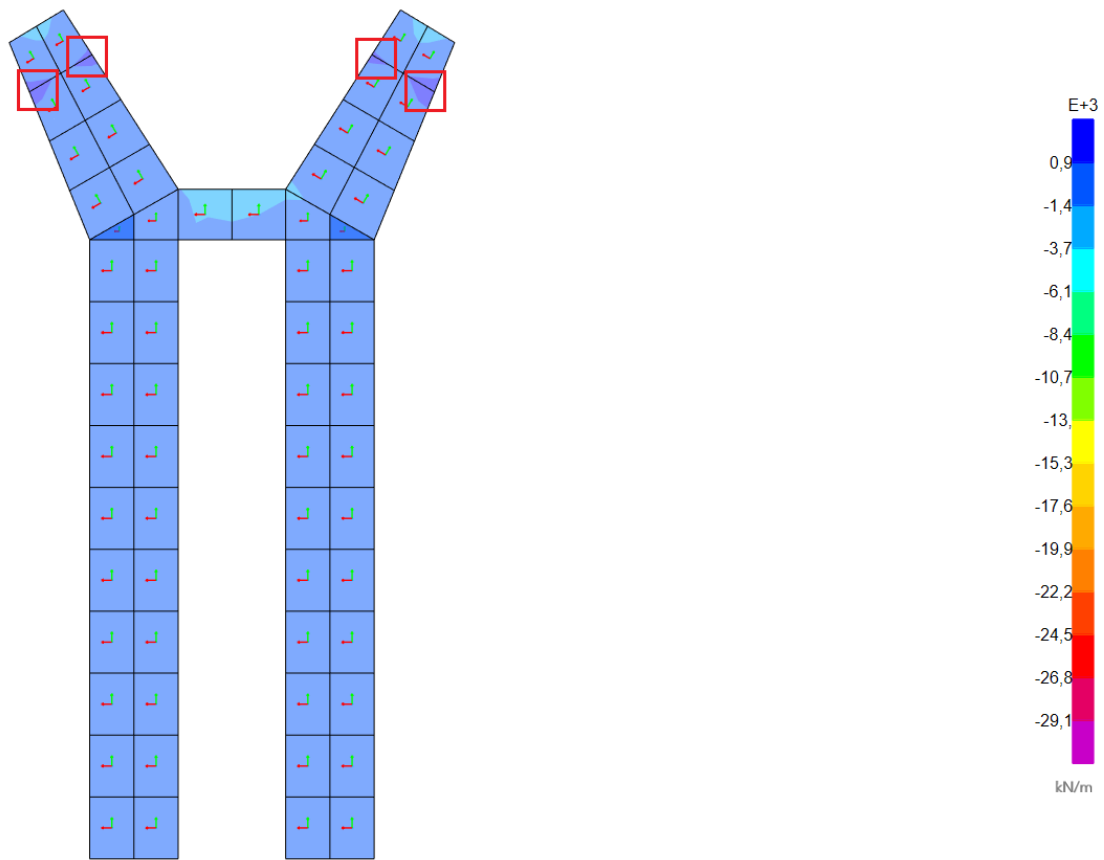


Imagen 131 | Captura de SAP2000: Zonas donde se necesitan armaduras de refuerzo para los esfuerzos correspondientes a las fuerzas F11. (elaboración propia)

En cuanto a los esfuerzos correspondientes a las **fuerzas F22**, para averiguar la armadura vertical necesaria, se utiliza la tabla 12, la cual muestra los valores máximos de compresión y tracción para el caso de una armadura de $\varnothing 16$ cada 20 cm.

ARMADO VERTICAL (simétrico en ambas caras)		
Armadura vertical - fuerzas F22 [kN/m.a.]		
Díámetro de base vertical	16	mm
Distancia horizontal entre barras	20	cm
Díámetro de refuerzo vertical		mm
Distancia horizontal entre barras refuerzo	20	cm
Máxima compresión hormigón	28.333,33	kN/m.a.
Máxima compresión acero	804,25	kN/m.a.
Máxima compresión	-29.138	kN/m.a.
Máxima tracción	874	kN/m.a.

Tabla 12 | Tabla Excel de armadura vertical de los pilares interiores. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis)

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

DIEGO COLL MARTÍNEZ

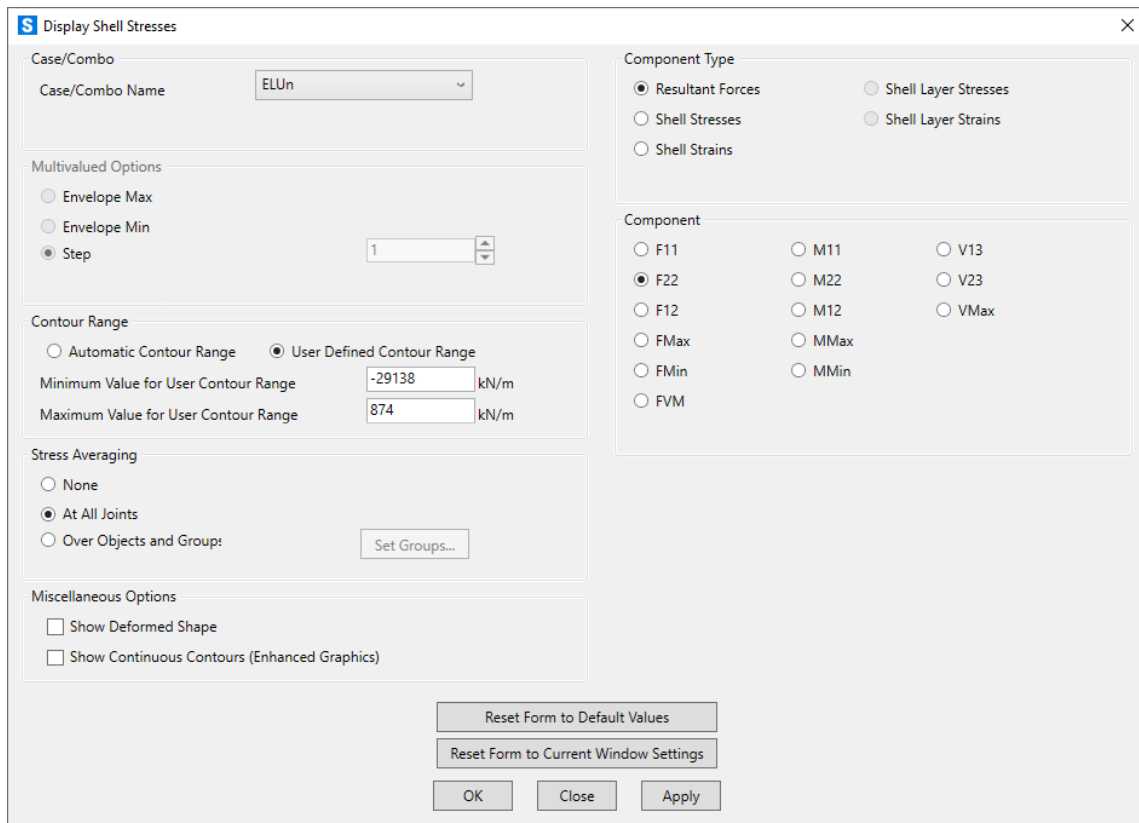


Imagen 132 | Captura de SAP2000: Introducción de los datos de la tabla 12 en el programa. (elaboración propia)

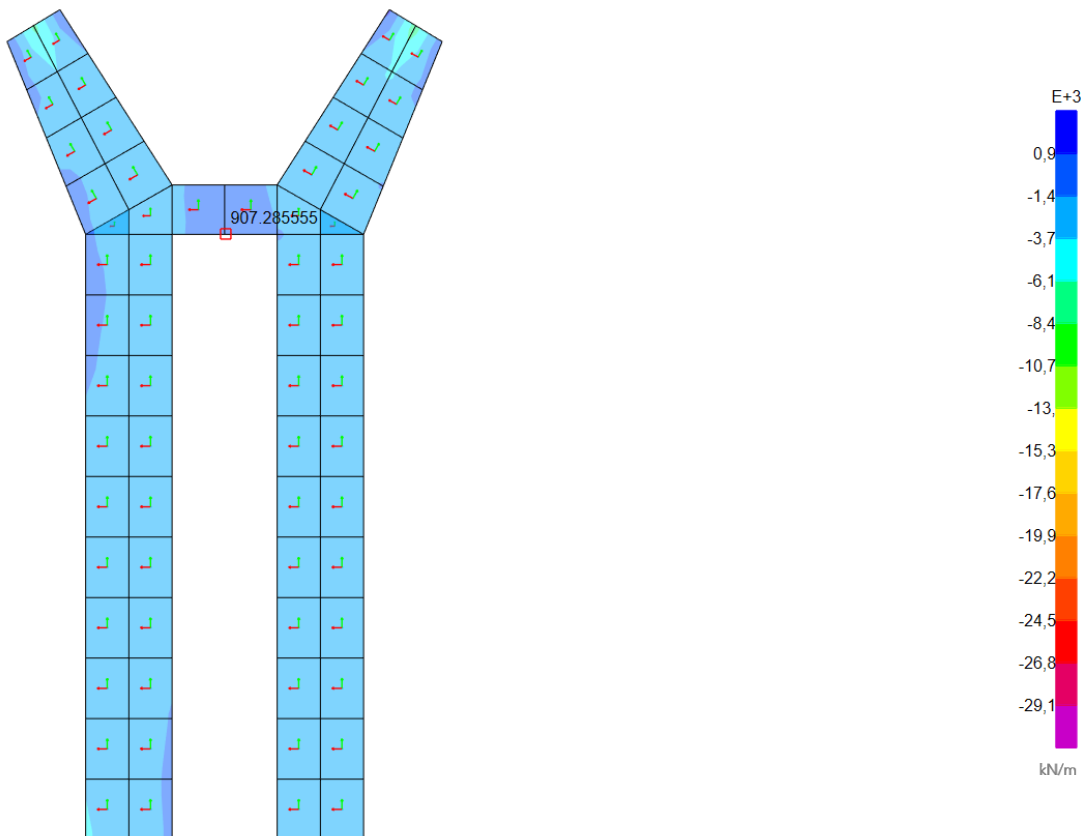


Imagen 133 | Captura de SAP2000: Esfuerzos correspondientes a las fuerzas F22. (elaboración propia)

En el caso de los esfuerzos correspondientes a las fuerzas F22 que se muestran en la imagen 133, de igual manera que ocurría en los esfuerzos correspondientes a las fuerzas F11, los valores de compresión son mucho menores que el valor máximo de 29.138 kN/m que son capaces de soportar los pilares. Sin embargo, el valor máximo de tracción que están soportando es de 907,29 kN/m, el cual es superior a los 874 kN/m que son capaces de soportar los pilares con esta armadura.

En definitiva, se observa que para que los pilares sean capaces de resistir los esfuerzos a los que están siendo sometidos, es necesario disponer de armaduras verticales de refuerzo en la zona indicada en la imagen 134, donde el valor es superior a la máxima tracción que son capaces de soportar los pilares con una armadura vertical de $\varnothing 16$ cada 20 cm.

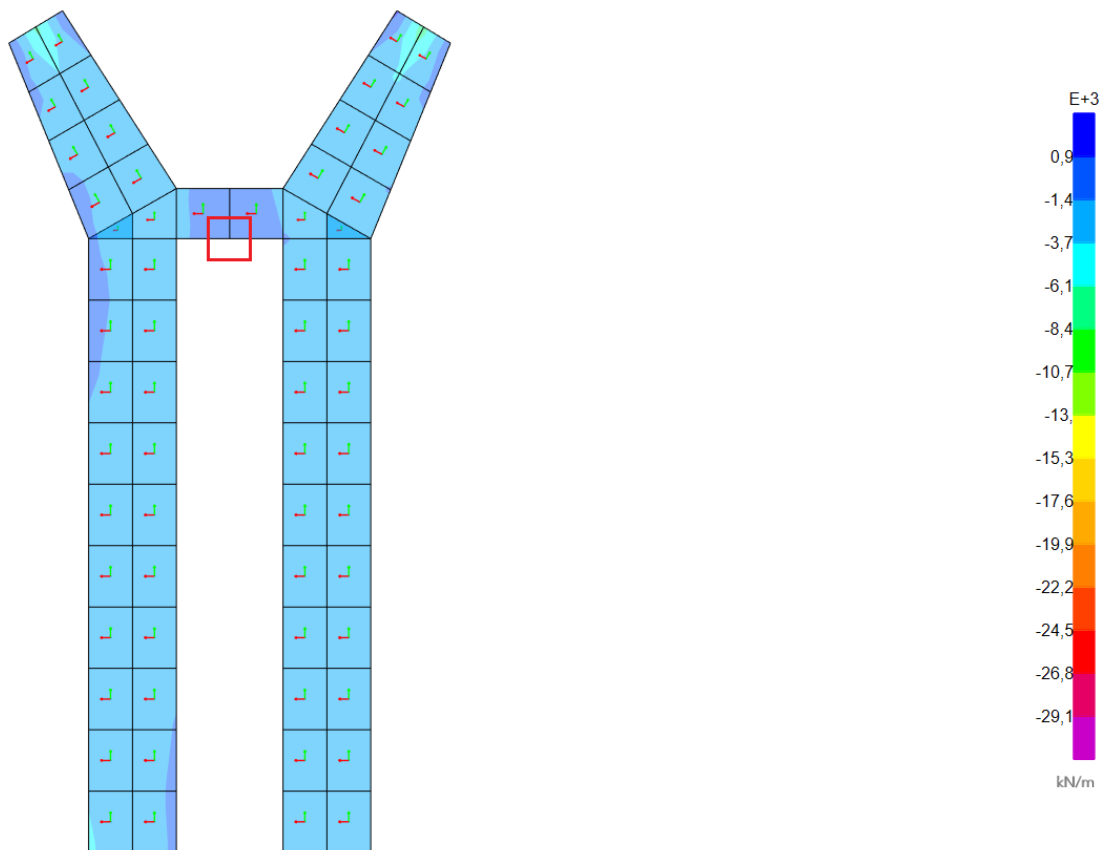


Imagen 134 | Captura de SAP2000: Zona donde se necesita armaduras de refuerzo para los esfuerzos correspondientes a las fuerzas F22. (elaboración propia)

5.2.2.2 | Pilares exteriores

De los dos pilares exteriores del pórtico aislado, se analiza únicamente el pilar más desfavorable, realizando el mismo procedimiento que en los pilares interiores del apartado 5.2.2.1.

Primero, se obtienen los esfuerzos correspondientes a las **fuerzas F11**.

Para averiguar la armadura horizontal necesaria para soportar estos esfuerzos, se utiliza la tabla 13, la cual muestra los valores máximos de compresión y tracción para el caso de una armadura de Ø12 cada 20 cm.

ARMADO HORIZONTAL (simétrico en ambas caras)		
Armadura horizontal - fuerzas F11 [kN/m.a.]		
Diámetro de base horizontal	12	mm
Distancia vertical entre barras	20	cm
Diámetro de refuerzo horizontal		mm
Distancia vertical entre barras refuerzo	20	cm
Máxima compresión hormigón	20.966,67	kN/m.a.
Máxima compresión acero	452,39	kN/m.a.
Máxima compresión	-21.419	kN/m.a.
Máxima tracción	492	kN/m.a.

Tabla 13 | Tabla Excel de armadura horizontal de los pilares exteriores. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis)

Imagen 135 | Captura de SAP2000: Introducción de los datos de la tabla 13 en el programa. (elaboración propia)

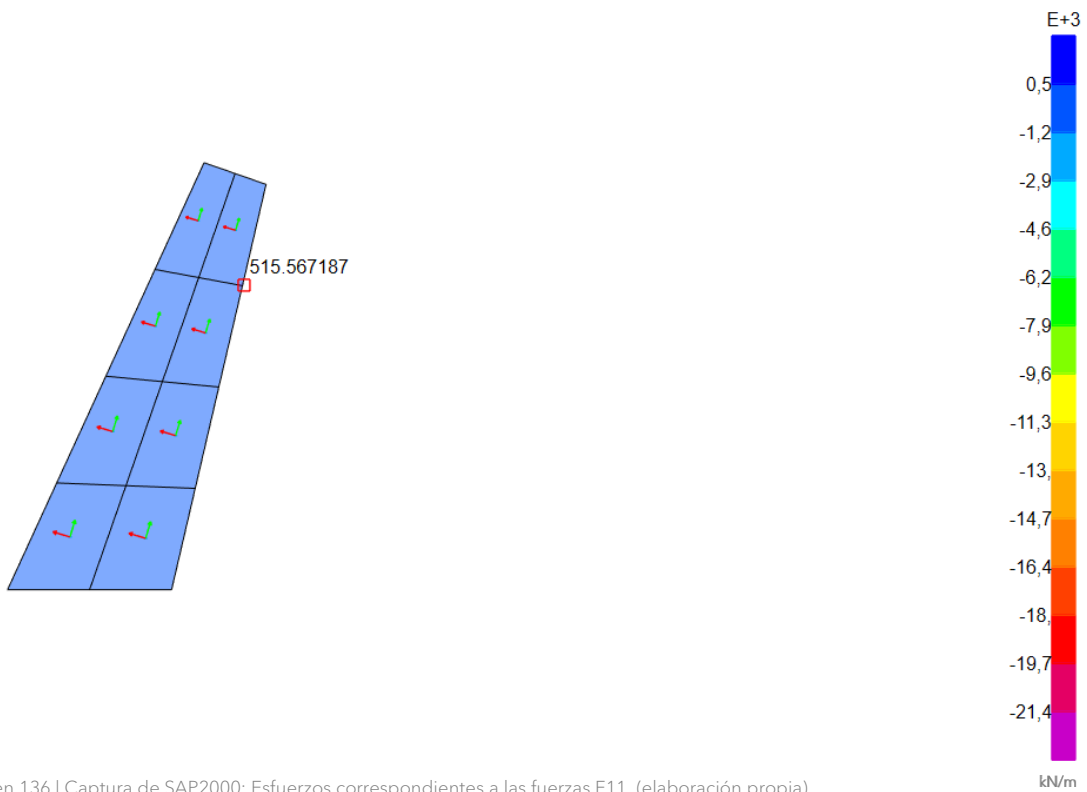


Imagen 136 | Captura de SAP2000: Esfuerzos correspondientes a las fuerzas F11. (elaboración propia)

Como se muestra en la imagen 136, los valores de compresión que está soportando el pilar en estas condiciones, son mucho menores que los 21.419 kN/m que es capaz de soportar. En cuanto a la tracción, el valor máximo que está soportando es de 515,57 kN/m, siendo este ligeramente superior a los 492 kN/m que es capaz de soportar el pilar con esta armadura.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que, tanto la diferencia entre el valor máximo de tracción que es capaz de soportar el pilar y el valor máximo que realmente está soportando, como la zona donde se encuentra este valor, son suficientemente pequeñas como para considerarlas despreciables. De esta manera, se considera que la armadura horizontal de Ø12 cada 20 cm es suficiente para que el pilar sea capaz de soportar los esfuerzos a los que está siendo sometido.

En cuanto a los esfuerzos correspondientes a las **fuerzas F22**, para averiguar la armadura vertical necesaria, se utiliza la tabla 14, la cual muestra los valores máximos de compresión y tracción para el caso de una armadura de Ø12 cada 20 cm.

ARMADO VERTICAL (simétrico en ambas caras)		
Armadura vertical - fuerzas F22 [kN/m.a.]		
Diámetro de base vertical	12	mm
Distancia horizontal entre barras	20	cm
Diámetro de refuerzo vertical		mm
Distancia horizontal entre barras refuerzo	20	cm
Máxima compresión hormigón	20.966,67	kN/m.a.
Máxima compresión acero	452,39	kN/m.a.
Máxima compresión	-21.419	kN/m.a.
Máxima tracción	492	kN/m.a.

Tabla 14 | Tabla Excel de armadura vertical de los pilares exteriores. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis)

S Display Shell Stresses

Case/Combo
Case/Combo Name: ELUn

Component Type
 Resultant Forces
 Shell Stresses
 Shell Strains
 Shell Layer Stresses
 Shell Layer Strains

Multivalued Options
 Envelope Max
 Envelope Min
 Step: 1

Contour Range
 Automatic Contour Range
 User Defined Contour Range
 Minimum Value for User Contour Range: -21419 kN/m
 Maximum Value for User Contour Range: 492 kN/m

Stress Averaging
 None
 At All Joints
 Over Objects and Group: Set Groups...

Miscellaneous Options
 Show Deformed Shape
 Show Continuous Contours (Enhanced Graphics)

Component
 F11
 F22
 F12
 FMax
 FMin
 FVM
 M11
 M22
 M12
 MMax
 MMin
 V13
 V23
 VMax

Reset Form to Default Values
 Reset Form to Current Window Settings
 OK Close Apply

Imagen 137 | Captura de SAP2000: Introducción de los datos de la tabla 14 en el programa. (elaboración propia)

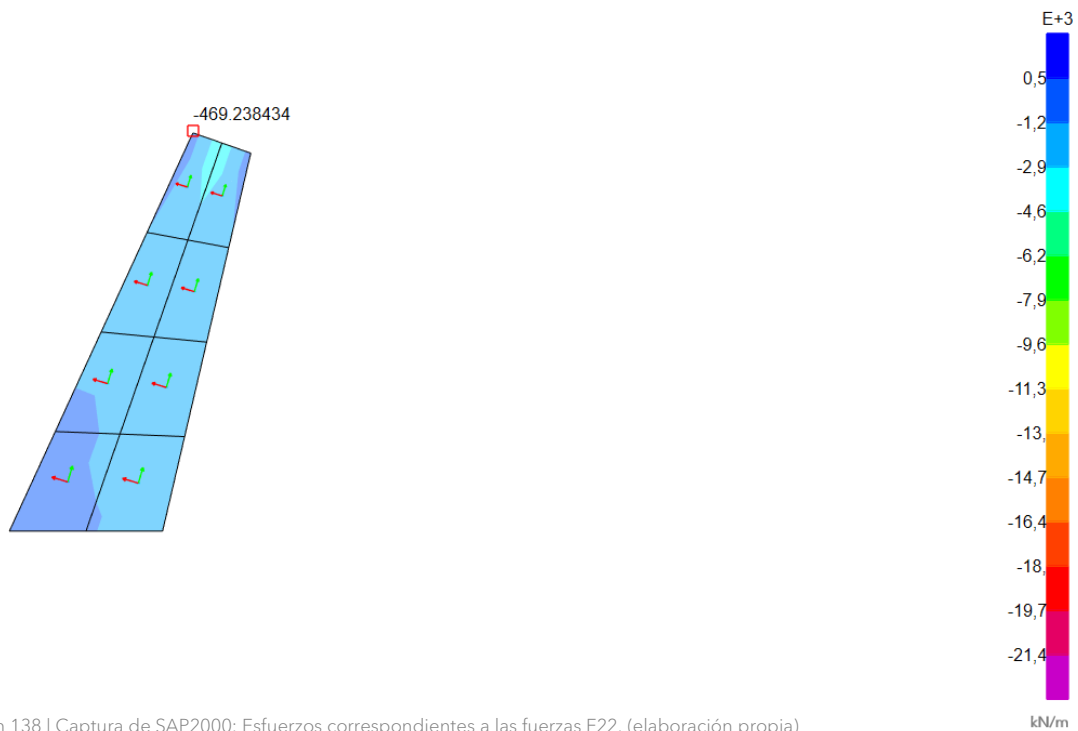


Imagen 138 | Captura de SAP2000: Esfuerzos correspondientes a las fuerzas F22. (elaboración propia)

En el caso de los esfuerzos correspondientes a las fuerzas F22 que se muestran en la imagen 138, todos los valores obtenidos son de compresión. Estos valores son mucho menores que el valor máximo de 21.419 kN/m que es capaz de soportar el pilar, siendo el valor mínimo de compresión más cercano a la tracción de 469,24 kN/m.

De esta manera, se demuestra que la armadura vertical de $\varnothing 12$ cada 20 cm, es más que suficiente para que el pilar sea capaz de soportar los esfuerzos a los que está siendo sometido.

En este caso la solución más adecuada, al no existir esfuerzos de tracción para las fuerzas F22, es optar por considerar los valores mínimos de armadura vertical establecidos por la normativa.

6 | Conclusiones

La elaboración del presente trabajo me ha permitido ampliar los conocimientos adquiridos durante el grado acerca del diseño y análisis estructural. Además, he podido comprobar la importancia que tienen las estructuras en la arquitectura, y cómo el dominio del diseño y cálculo estructural permite sobrepasar límites que en un primer momento parecen no ser posibles de alcanzar.

La terminal T4S es un edificio único que presenta formas complejas y una estructura singular que le dotan de un gran valor arquitectónico. Es precisamente la singularidad de estas formas lo que dificulta el diseño y la modelización de su estructura. No obstante, su sistema constructivo modular contrarrestó la complejidad del proyecto y agilizó el proceso.

En primer lugar, al analizar la historia de los dos estudios de arquitectura encargados de desarrollar la terminal (Estudio Lamela y RSHP), he podido comprender sus intenciones y objetivos a la hora de realizar el proyecto.

Por otro lado, la gran cantidad de información recopilada me ha permitido reducir el número de suposiciones a la hora de modelizar el edificio y de aplicar los parámetros necesarios al modelo. En consecuencia, mediante dicho modelo ha sido posible obtener, de la manera más precisa posible, el comportamiento estructural de la terminal.

Por último, SAP2000 ha demostrado ser un programa idóneo para el análisis y el cálculo de estructuras singulares, ya que la complejidad estructural de la terminal no ha sido un impedimento para que el programa sea capaz de obtener resultados precisos y fieles a la realidad.

7 | Listado de imágenes

Imagen 1 Antonio Lamela. (Arquitectura Viva).....	8
Imagen 2 Hotel Meliá Madrid Princesa. (Estudio Lamela).....	9
Imagen 3 Torres de Colón. (Estudio Lamela)	10
Imagen 4 Carlos Lamela. (Estudio Lamela).....	10
Imagen 5 Ampliación del Estadio Santiago Bernabéu. (Estudio Lamela)	11
Imagen 6 Intervención en la grada del tercer anfiteatro del Lateral Este del Estadio Santiago Bernabéu. (Estudio Lamela)	11
Imagen 7 Ampliación del Aeropuerto de Gran Canaria. (Estudio Lamela).....	12
Imagen 8 Ampliación del Aeropuerto Chopin de Varsovia. (Estudio Lamela)	12
Imagen 9 Richard Rogers. (ROOM Diseño).....	13
Imagen 10 Centro Nacional de Arte y Cultura Georges Pompidou. (RSHP)	14
Imagen 11 Edificio Lloyd's. (Architecture Today).....	15
Imagen 12 Edificio Leadenhall. (Building Centre).....	16
Imagen 13 Terminal T5 del Aeropuerto de Heathrow. (RSHP).....	17
Imagen 14 Ampliación de la terminal 1 del Aeropuerto de Lyon-Saint Exupéry. (RSHP).....	17
Imagen 15 Sección transversal de la zona central de la terminal. (TC Cuadernos)	20
Imagen 16 Sección longitudinal y sección transversal del extremo de la terminal. (TC Cuadernos).....	21
Imagen 17 Alzado acotado de una viga principal. (TC Cuadernos).....	22
Imagen 18 Alzado y planta acotados de una viga secundaria. (TC Cuadernos).....	22
Imagen 19 Planta, alzado lateral y alzado frontal acotados de un pilar en forma de "V". (TC Cuadernos).....	23
Imagen 20 Alzado frontal y alzado lateral acotados de un pilar en forma de "Y". (TC Cuadernos).....	24
Imagen 21 Esquema de un cañón de la zona central de la terminal. (TC Cuadernos)	25
Imagen 22 Axonometría de la cubierta. (TC Cuadernos).....	25
Imagen 23 Detalles constructivos de la cubierta. (TC Cuadernos).....	26
Imagen 24 Detalle constructivo de la cubierta. (TC Cuadernos)	27
Imagen 25 Vista exterior del extremo de la terminal en construcción. (Horta Coslada).....	28
Imagen 26 Vista exterior de la parte superior de la estructura de la terminal. (Horta Coslada) ..	28
Imagen 27 Vigas principales. (RSHP)	29

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL
T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

DIEGO COLL MARTÍNEZ

Imagen 28 Vista interior de la terminal en construcción. (Horta Coslada).....	29
Imagen 29 Vista interior de la zona central de la terminal en construcción. (Horta Coslada).	30
Imagen 30 Vista exterior del extremo de la terminal. (Estudio Lamela).....	31
Imagen 31 Vista exterior del lateral de la terminal. (Estudio Lamela).....	31
Imagen 32 Vista interior de la zona central de la terminal. (Estudio Lamela).....	32
Imagen 33 Falso techo. (Estudio Lamela)	33
Imagen 34 Lucernario de la cubierta. (RSHP).....	34
Imagen 35 (izquierda) Limahoyas de la cubierta. (Estudio Lamela)	34
Imagen 36 (derecha) Canalón de la cubierta. (RSHP).....	34
Imagen 37 Captura de AutoCAD: Modelización de los elementos lineales. (elaboración propia).....	35
Imagen 38 Captura de AutoCAD: Modelización de los elementos finitos. (elaboración propia).....	36
Imagen 39 Captura de AutoCAD: Modelización de un módulo completo de la terminal. (elaboración propia)	36
Imagen 40 Captura de AutoCAD: Modelización de la terminal. (elaboración propia).....	37
Imagen 41 Captura de AutoCAD: Modelización de la terminal reducida. (elaboración propia)	37
Imagen 42 Captura de SAP2000: Modelización de la terminal reducida. (elaboración propia)	38
Imagen 43 Captura de SAP2000: Elementos estructurales. (elaboración propia).....	39
Imagen 44 Captura de SAP2000: Vigas principales. (elaboración propia)	40
Imagen 45 Captura de SAP2000: Vigas secundarias. (elaboración propia)	40
Imagen 46 Captura de SAP2000: Detalle de las vigas secundarias. (elaboración propia).....	41
Imagen 47 Captura de SAP2000: Propiedades del perfil IPE 500. (elaboración propia)	41
Imagen 48 Captura de SAP2000: Correas. (elaboración propia)	42
Imagen 49 Captura de SAP2000: Detalle de las correas. (elaboración propia).....	42
Imagen 50 Captura de SAP2000: Propiedades del perfil UPN 100. (elaboración propia).....	43
Imagen 51 Captura de SAP2000: Perfiles perimetrales. (elaboración propia).....	43
Imagen 52 Captura de SAP2000: Detalle de los perfiles perimetrales. (elaboración propia)	44
Imagen 53 Captura de SAP2000: Propiedades del perfil perimetral. (elaboración propia)...	44
Imagen 54 Captura de SAP2000: Section Designer. (elaboración propia).....	45
Imagen 55 Captura de SAP2000: Cubierta. (elaboración propia).....	45

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL
T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

DIEGO COLL MARTÍNEZ

Imagen 56 Captura de SAP2000: Propiedades del panel sándwich. (elaboración propia)....	46
Imagen 57 Captura de SAP2000: Pilares "V". (elaboración propia).....	47
Imagen 58 Captura de SAP2000: Pilares "Y". (elaboración propia).....	48
Imagen 59 Captura de SAP2000: Detalle de un pilar "Y". (elaboración propia)	48
Imagen 60 Captura de SAP2000: Propiedades del perfil tubular elíptico. (elaboración propia)	49
Imagen 61 Captura de SAP2000: Section Designer. (elaboración propia).....	49
Imagen 62 Captura de SAP2000: Pilares interiores de hormigón armado. (elaboración propia).....	50
Imagen 63 Captura de SAP2000: Propiedades de los pilares interiores de hormigón armado. (elaboración propia)	50
Imagen 64 Captura de SAP2000: Pilares exteriores de hormigón armado. (elaboración propia).....	51
Imagen 65 Captura de SAP2000: Propiedades de los pilares exteriores de hormigón armado. (elaboración propia)	51
Imagen 66 Captura de SAP2000: Load Patterns. (elaboración propia).....	52
Imagen 67 Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ). (CTE DBSE)	53
Imagen 68 Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad (γ). (CTE DBSE)	54
Imagen 69 Captura de SAP2000: CMP aplicadas en la cubierta. (elaboración propia).....	56
Imagen 70 Captura de SAP2000: Valor de las CMP. (elaboración propia).....	57
Imagen 71 Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso. (CTE DBSE-AE).....	57
Imagen 72 Captura de SAP2000: SCU aplicada en la cubierta. (elaboración propia).....	58
Imagen 73 Captura de SAP2000: Valor de la SCU. (elaboración propia)	58
Imagen 74 Tabla 3.8 Sobrecarga de nieve en capitales de provincia y ciudades autónomas. (CTE DBSE-AE).....	59
Imagen 75 Captura de SAP2000: SCN aplicada en la cubierta. (elaboración propia).....	59
Imagen 76 Captura de SAP2000: Valor de la SCN. (elaboración propia)	60
Imagen 77 Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición c_e . (CTE DBSE-AE)	60
Imagen 78 Tabla 3.5. Coeficiente eólico en edificios de pisos. (CTE DBSE-AE)	61
Imagen 79 Captura de SAP2000: SCVx aplicada en la cubierta. (elaboración propia).....	61
Imagen 80 Captura de SAP2000: Valor de presión de la SCVx. (elaboración propia).....	62
Imagen 81 Captura de SAP2000: Valor de succión de la SCVx. (elaboración propia).....	62
Imagen 82 Captura de SAP2000: Resultante de la SCVx transmitida por los muros cortina. (elaboración propia)	63

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL
T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

DIEGO COLL MARTÍNEZ

Imagen 83 Captura de SAP2000: SCVy aplicada en la cubierta. (elaboración propia).....	63
Imagen 84 Captura de SAP2000: Valor de presión de la SCVy. (elaboración propia).....	64
Imagen 85 Captura de SAP2000: Valor de succión de la SCVy. (elaboración propia).....	64
Imagen 86 Captura de SAP2000: Resultante de presión en la SCVy transmitida por los muros cortina. (elaboración propia).....	65
Imagen 87 Captura de SAP2000: Resultante de succión en la SCVy transmitida por los muros cortina. (elaboración propia).....	65
Imagen 88 Tabla 2.1. Coeficiente del terreno. (NCSE-02)	66
Imagen 89 Tabla 3.1. Porcentaje de amortiguamiento. (NCSE-02).....	67
Imagen 90 Captura de SAP2000: Porcentajes dinámicos de masa. (elaboración propia)	69
Imagen 91 Captura de SAP2000: Deformaciones en la situación de análisis SIMx. (elaboración propia)	70
Imagen 92 Captura de SAP2000: Deformaciones en la situación de análisis SIMy. (elaboración propia)	71
Imagen 93 Captura de SAP2000: Zapatas de los pilares interiores de hormigón armado. (elaboración propia)	72
Imagen 94 Captura de SAP2000: Introducción del resultado de la tabla 8 en el programa. (elaboración propia)	73
Imagen 95 Captura de SAP2000: Rigidez de los muelles de las zapatas. (elaboración propia)	73
Imagen 96 Captura de SAP2000: Restricción de los movimientos laterales en los nudos de las zapatas. (elaboración propia).....	74
Imagen 97 Captura de SAP2000: Zapatas de los pilares exteriores de hormigón armado. (elaboración propia)	74
Imagen 98 Captura de SAP2000: Introducción del resultado de la tabla 9 en el programa. (elaboración propia)	76
Imagen 99 Captura de SAP2000: Rigidez de los muelles de las zapatas. (elaboración propia)	76
Imagen 100 Captura de SAP2000: Restricción de los movimientos laterales en los nudos de las zapatas. (elaboración propia).....	77
Imagen 101 Captura de SAP2000: Presiones de las zapatas. (elaboración propia).....	77
Imagen 102 Uniones de los pilares en forma de “Y” con los pilares exteriores de hormigón armado. (RSHP).....	78
Imagen 103 Captura de SAP2000: Desconexiones en los extremos de barra iniciales. (elaboración propia)	78
Imagen 104 Captura de SAP2000: Características de las desconexiones inferiores de los pilares en forma de “Y”. (elaboración propia)	79

Imagen 105 Uniones de los pilares en forma de "Y" con las vigas principales. (RSHP).....	79
Imagen 106 Captura de SAP2000: Desconexiones en los extremos de barra finales. (elaboración propia)	80
Imagen 107 Captura de SAP2000: Características de las desconexiones superiores de los pilares en forma de "Y". (elaboración propia)	80
Imagen 108 Uniones de los pilares en forma de "V" con las vigas principales. (Estudio Lamela)	81
Imagen 109 Captura de SAP2000: Desconexiones en los extremos de barra finales. (elaboración propia)	81
Imagen 110 Captura de SAP2000: Características de las desconexiones de los pilares en forma de "V". (elaboración propia)	81
Imagen 111 Uniones de las vigas principales de diferentes módulos. (RSHP).....	82
Imagen 112 Captura de SAP2000: Desconexiones en los extremos de barra finales. (elaboración propia)	83
Imagen 113 Captura de SAP2000: Características de las desconexiones de las vigas principales. (elaboración propia).....	83
Imagen 114 Captura de SAP2000: Desconexiones de los elementos estructurales de la terminal. (elaboración propia).....	84
Imagen 115 Captura de SAP2000: Desplazamiento vertical del punto 1. (elaboración propia)	87
Imagen 116 Captura de SAP2000: Desplazamiento vertical del punto 2. (elaboración propia)	88
Imagen 117 Captura de SAP2000: Desplazamiento vertical del punto 1. (elaboración propia)	89
Imagen 118 Captura de SAP2000: Desplazamiento vertical del punto 2. (elaboración propia)	89
Imagen 119 Captura de SAP2000: Desplazamiento vertical del punto 1. (elaboración propia)	90
Imagen 120 Captura de SAP2000: Desplazamiento vertical del punto 2. (elaboración propia)	91
Imagen 121 Captura de SAP2000: Deformaciones en la combinación de cargas ELSintcon. (elaboración propia)	92
Imagen 122 Captura de SAP2000: Deformaciones en la combinación de cargas ELSvx+ considerando las cargas del apartado 4.4.3.4. (elaboración propia).....	93
Imagen 123 Captura de SAP2000: Desplazamiento horizontal más desfavorable. (elaboración propia)	94
Imagen 124 Captura de SAP2000: Deformaciones en la combinación de cargas ELSvx+. (elaboración propia)	94

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LA TERMINAL
T4S DEL AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID-BARAJAS, MEDIANTE SAP2000

DIEGO COLL MARTÍNEZ

Imagen 125 Captura de SAP2000: Peritación de los perfiles metálicos. (elaboración propia) ...	96
Imagen 126 Captura de SAP2000: Pórtico más desfavorable para los perfiles metálicos. (elaboración propia)	96
Imagen 127 Captura de SAP2000: Perfil más desfavorable. (elaboración propia).....	97
Imagen 128 Captura de SAP2000: Comprobaciones del perfil más desfavorable. (elaboración propia)	97
Imagen 129 Captura de SAP2000: Introducción de los datos de la tabla 11 en el programa. (elaboración propia)	99
Imagen 130 Captura de SAP2000: Esfuerzos correspondientes a las fuerzas F11. (elaboración propia).....	100
Imagen 131 Captura de SAP2000: Zonas donde se necesitan armaduras de refuerzo para los esfuerzos correspondientes a las fuerzas F11. (elaboración propia).....	101
Imagen 132 Captura de SAP2000: Introducción de los datos de la tabla 12 en el programa. (elaboración propia)	102
Imagen 133 Captura de SAP2000: Esfuerzos correspondientes a las fuerzas F22. (elaboración propia).....	102
Imagen 134 Captura de SAP2000: Zona donde se necesita armaduras de refuerzo para los esfuerzos correspondientes a las fuerzas F22. (elaboración propia).....	103
Imagen 135 Captura de SAP2000: Introducción de los datos de la tabla 13 en el programa. (elaboración propia)	104
Imagen 136 Captura de SAP2000: Esfuerzos correspondientes a las fuerzas F11. (elaboración propia).....	105
Imagen 137 Captura de SAP2000: Introducción de los datos de la tabla 14 en el programa. (elaboración propia)	106
Imagen 138 Captura de SAP2000: Esfuerzos correspondientes a las fuerzas F22. (elaboración propia).....	107

8 | Listado de tablas

Tabla 1 Tabla de las secciones de los elementos estructurales. (elaboración propia).....	39
Tabla 2 Tabla Excel de equivalencia de panel sándwich. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis).....	46
Tabla 3 Tabla de hipótesis básicas de carga. (elaboración propia).....	52
Tabla 4 Tabla de combinaciones de carga de los ELS. (elaboración propia).....	53
Tabla 5 Tabla de combinaciones de carga de los ELU. (elaboración propia).....	55
Tabla 6 Tabla de cargas muertas permanentes. (elaboración propia).....	56
Tabla 7 Tabla Excel del método modal espectral. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis).....	68
Tabla 8 Tabla Excel del módulo de Balasto para las zapatas de los pilares interiores de hormigón armado. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis).....	72
Tabla 9 Tabla Excel del módulo de Balasto para las zapatas de los pilares exteriores de hormigón armado. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis).....	75
Tabla 10 Tabla Excel de comprobación de flechas. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis).....	91
Tabla 11 Tabla Excel de armadura horizontal de los pilares interiores. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis).....	99
Tabla 12 Tabla Excel de armadura vertical de los pilares interiores. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis).....	101
Tabla 13 Tabla Excel de armadura horizontal de los pilares exteriores. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis).....	104
Tabla 14 Tabla Excel de armadura vertical de los pilares exteriores. (elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis).....	106

9 | Bibliografía

- Arquitectura Viva. (s.f.). *Ampliación del aeropuerto de Barajas, Madrid*.
<https://arquitecturaviva.com/obras/ampliacion-del-aeropuerto-barajas>
- Arquitectura Viva. (2018). *Antonio Lamela*.
<https://arquitecturaviva.com/articulos/antonio-lamela>
- Building Centre. (2015). *Leadenhall building*.
<https://www.buildingcentre.co.uk/news/articles/leadenhall-building>
- Carabalí Balanta, I. D. (2021-2022). *Santiago Calatrava: Entre los límites de la Estética y la Eficacia Estructural* (Trabajo de Fin de Máster, Universidad Politécnica de Valencia).
- Estudio Lamela. (s.f.). *Ampliación del Estadio Santiago Bernabéu*.
<https://www.lamela.com/proyectos/ampliacion-del-estadio-santiago-bernabeu/>
- Estudio Lamela. (s.f.). *Ampliación del Aeropuerto de Gran Canaria*.
<https://www.lamela.com/proyectos/ampliacion-del-aeropuerto-de-gran-canaria/>
- Estudio Lamela. (s.f.). *Ampliación del Aeropuerto Chopin de Varsovia*.
<https://www.lamela.com/proyectos/aeropuerto-chopin-de-varsovia/>
- Estudio Lamela. (s.f.). *Estudio Lamela Arquitectos*.
<https://www.lamela.com/>
- Estudio Lamela. (s.f.). *Estadio Santiago Bernabéu*.
<https://www.lamela.com/proyectos/estadio-de-futbol-bernabeu/>
- Estudio Lamela. (s.f.). *Meliá Princesa*.
<https://www.lamela.com/proyectos/melia-princesa/>
- Estudio Lamela. (s.f.). *Torres Colón*.
<https://www.lamela.com/proyectos/torres-colon/>
- Estudio Lamela. (s.f.). *T4 Aeropuerto de Madrid- Barajas*.
<https://www.lamela.com/proyectos/terminal-t4-aeropuerto-de-madrid-barajas/>
- Faerna, J. M. (2021). *Richard Rogers: La tecnología pop de un italiano en Londres*. ROOM Diseño. <https://roomdiseno.com/richard-rogers-la-tecnologia-pop-de-un-italiano-en-londres/>
- Gallardo Llopis, D. (2015). *INTRODUCCIÓN A SAP2000 PARA ARQUITECTURA*. Universitat Politècnica de València.
- Horta Coslada. (s.f.). *Madrid Barajas Airport Terminal 4*.
<https://www.hortacoslada.com/projects/barajas-terminal-4/>
- Hulej, D. (2021-2022). *Estudio, modelización y análisis de la estructura de las Torres de Colón mediante SAP2000* (Trabajo Fin de Grado, Universitat Politècnica de València).
- Larraz Sancho-Tello, B. E. (2020-2021). *ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DEL RASCACIELOS 432 DE PARK AVENUE DE RAFAEL VIÑOLY, MEDIANTE SAP2000* (Trabajo Final de Grado, Universitat Politècnica de València).

- Ministerio de Fomento. (2009). *Código Técnico de la Edificación: Documento Básico de Seguridad Estructural - Acciones en la Edificación (DBSE-AE)*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf
- Ministerio de Fomento. (2019). *Código Técnico de la Edificación: Documento Básico de Seguridad Estructural (DBSE)*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE.pdf
- Ministerio de Fomento. (2009). *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02)*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/0820200.pdf
- RSHP. (s.f.). *Centre Pompidou*.
<https://rshp.com/projects/culture-and-leisure/centre-pompidou/>
- RSHP. (s.f.). *Rogers Stirk Harbour + Partners*.
<https://rshp.com/>
- RSHP. (s.f.). *Terminal 4, Barajas Airport*.
<https://rshp.com/projects/transport/terminal-4-barajas-airport/>
- RSHP. (s.f.). *Terminal 5, Heathrow Airport*.
<https://rshp.com/projects/transport/terminal-5-heathrow-airport/>
- RSHP. (s.f.). *Terminal 1, Lyon-Saint Exupéry Airport*.
<https://rshp.com/projects/transport/terminal-1-lyon-saint-exup%C3%A9ry-airport/>
- Sanchis Llopis, E. (2016-2017). *Estudio, análisis y modelización mediante SAP2000 de la estructura del Ginásio do Clube Atlético Paulistano - Paulo Mendes da Rocha* (Trabajo final de grado, Universitat Politècnica de València).
- TC Cuadernos. (2007). *Nueva Área Terminal T4 del Aeropuerto Madrid-Barajas: Estudio Lamela y Richard Rogers Partnership*.
<https://www.tccuadernos.com/blog/recursos/terminal-4-lamela-rogers/>
- Volner, I., & Soar, T. (s.f.). *Still standing: Lloyd's of London, 1986*. Architecture Today.
<https://architecturetoday.co.uk/still-standing-lloyds-of-london/>
- Zazo Gómez, I. (2019-2020). *ESTUDIO, ANÁLISIS Y MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL INSTITUTO DEL PATRIMONIO CULTURAL DE ESPAÑA, MEDIANTE SAP2000* (Trabajo Final de Grado, Universitat Politècnica de València).