UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y cálculo de cubierta mediante membranas tensadas para la plaza de toros de Málaga

Autor:
Luis Miguel Maldonado Guillén

Tutor:
D. José Sandino Egea

Información académica:
Grado en Ingeniería Mécanica

Málaga 22 de mayo de 2025

"Los científicos investigan lo que ya es,
los ingenieros crean lo que nunca ha sido."
Albert Einstein

RESUMEN

En el presente Trabajo de Fin de Grado para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería Mecánica se presenta una propuesta de elaboración de una cubierta ligera para la Plaza de Toros de Málaga (La Malagueta). Dicha cubierta está constituida por cables de acero y membrana, los cuales en su conjunto están dispuestos de tal forma que proporcionen sombra a los espectadores y algo de protección frente a posibles lluvias. Se trata de un diseño minimalista pero complejo a su vez pensado para no afectar la estética de la mencionada Plaza de Toros.

El desarrollo del proyecto se basa en el estudio de estructuras tensadas, caracterizadas por su ligereza y eficiencia en la transmisión de cargas mediante esfuerzos axiales. Se ha analizado distintas configuraciones geométricas, de las cuales se ha elegido la presentada en este proyecto por su adecuado equilibrio entre estabilidad estructural, eficiencia material y mínima interferencia visual con el entorno. Además, se han evaluado diferentes materiales con el objetivo de optimizar la resistencia de la cubierta frente a cargas de viento, peso propio y otras acciones externas.

Para la modelización y el análisis estructural, se ha empleado el software RFEM 6 de Dlubal, permitiendo la simulación del comportamiento mecánico del sistema bajo diversas combinaciones de carga. Se han obtenido los esfuerzos en los cables, las tensiones en la membrana y las deformaciones globales, verificando el cumplimiento de los criterios de seguridad y normativa aplicable.

Los resultados demuestran la viabilidad técnica de la solución propuesta, garantizando un adecuado comportamiento estructural sin interferir en la identidad arquitectónica de la plaza. En conclusión, este trabajo plantea una alternativa innovadora y funcional para mejorar las condiciones de confort en La Malagueta, integrando principios de eficiencia estructural, diseño ligero y respeto patrimonial.

PALABRAS CLAVE

Estructura, Cubierta, Cables, Membrana, DLUBAL, RFEM6

ABSTRACT

In this Bachelor's Thesis for the attainment of the Degree in Mechanical Engineering, a proposal is presented for the development of a lightweight roof for the Málaga Bullring (La Malagueta). This roof consists of steel cables and membrane, which together are arranged in such a way as to provide shade for spectators and some protection against possible rain. It is a minimalist yet complex design, intended to preserve the aesthetic of the aforementioned bullring.

The project development is based on the study of tensile structures, characterized by their lightness and efficiency in load transmission through axial forces. Various geometric configurations have been analyzed, from which the one presented in this project was selected for its optimal balance between structural stability, material efficiency, and minimal visual interference with the surroundings. Additionally, different materials have been evaluated to optimize the roof's resistance to wind loads, self-weight, and other external forces.

For modeling and structural analysis, the RFEM 6 software by Dlubal was used, enabling the simulation of the mechanical behavior of the system under various load combinations. The forces in the cables, stresses in the membrane, and global deformations were obtained, ensuring compliance with safety standards and applicable regulations.

The results demonstrate the technical feasibility of the proposed solution, guaranteeing proper structural performance without compromising the architectural identity of the bullring. In conclusion, this project presents an innovative and functional alternative to improve spectator comfort in La Malagueta, integrating principles of structural efficiency, lightweight design, and heritage preservation.

KEY WORDS

Structure, Roof, Cables, Membrane, DLUBAL, RFEM6

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que me han acompañado y apoyado durante este tiempo.

En primer lugar, a mi familia, por estar siempre a mi lado, brindándome su apoyo incondicional, confianza y ánimo en cada etapa de este camino. Sin ellos, nada de esto habría sido posible.

También quiero agradecer a mis compañeros, por compartir conmigo no solo conocimientos, sino también momentos de compañerismo, esfuerzo y superación. Gracias a ellos, los retos han sido más llevaderos y las satisfacciones más grandes. El trabajo en equipo y el apoyo mutuo han sido clave en este proceso.

Especial mención merece mi tutor, **José Sandino Egea**, por su paciencia, implicación, y por todos los buenos consejos que me ha ofrecido durante este ultimo año. Siempre ha estado dispuesto a ayudarme en todos los aspectos del proyecto, y le debo una parte fundamental de este trabajo. Más que un profesor y tutor, lo considero un amigo y un verdadero mentor, cuya guía y confianza han sido esenciales para poder llevar a cabo este proyecto con seguridad y motivación.

A todos, gracias de corazón.

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

ACUERDO DE CONFIDENCIALIDAD

1. La totalidad de la memoria del Proyecto/Trabajo Fin de Estudios D. **Luis Miguel Maldonado Guillén** contiene datos confidenciales de la empresa **UMA**, que sólo podrán ser utilizados en los procedimientos de evaluación y defensa del PFE/TFE. Los contenidos del PFE/TFE serán sólo accesibles al tutor académico y a los miembros del tribunal evaluador. El uso del PFE/TFE en el marco de conferencias o charlas no estará permitido sin el consentimiento por escrito de la empresa.

2. La información confidencial no podrá, ya sea en su totalidad o en parte, publicada, reproducida o revelada a terceros a menos que se haya obtenido el consentimiento expreso y por escrito de la empresa.

3. La privacidad se observará, asimismo, con respecto a todos los asuntos corporativos y operaciones de la empresa **UMA** y sus empresas afiliadas que no sean conocidos públicamente y que – en forma oral o escrita – haya podido obtener el estudiante durante su tutorización por parte de

4. La declaración de privacidad y confidencialidad entrará en vigor una vez que se haya firmado este acuerdo y tendrá un periodo de validez de 3 años.

MALDONADO GUILLEN LUIS MIGUEL - 77669192D

Firmado digitalmente por MALDONADO GUILLEN LUIS MIGUEL - 77669192D
Fecha: 2025.05.22 19:19:42 +02'00'

Málaga, 22 de mayo de 2025

VºBº tutor:	En nombre de la Empresa Firma y sello:	En nombre de la Universidad de Málaga Firma y sello:

Nombre: Nombre y cargo: Dr.D. Presidente CTFE de la EII

Índice

Índice de figuras

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

I MEMORIA

Diseño y cálculo de cubierta mediante membranas tensadas para la plaza de toros de Málaga

Autor:

Luis Miguel Maldonado Guillén

Tutor:

D. José Sandino Egea

Información académica:

Grado en Ingeniería Mecánica

Málaga, 22 de mayo de 2025

1 Objeto

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo el diseño y cálculo estructural de una cubierta ligera compuesta por cables y membrana para la plaza de toros de Málaga, considerando las condiciones arquitectónicas, funcionales y normativas requeridas para este tipo de estructuras.

Adicionalmente, este trabajo tiene como finalidad demostrar que el autor es capaz de aplicar de manera efectiva los conocimientos adquiridos durante su formación en el Grado de Ingeniería Mecánica, así como su interés y especialización en el cálculo de estructuras.

Se busca desarrollar una solución que combine eficiencia estructural, estética y sostenibilidad, proporcionando un diseño que garantice la seguridad, estabilidad y funcionalidad de la estructura. Para ello, se utilizarán herramientas avanzadas de modelado y análisis estructural, concretamente el software Dlubal RFEM6, que permitirá simular y validar el comportamiento estructural de la cubierta bajo diversas combinaciones de carga.

El trabajo incluye:

- **Análisis del entorno y condicionantes del proyecto**, como el clima, las dimensiones de la plaza y las necesidades de los usuarios.
- **Selección de materiales y configuración estructural**, priorizando soluciones ligeras y resistentes.
- **Cálculo y diseño detallado** de los elementos estructurales, garantizando el cumplimiento de las normativas vigentes.
- **Evaluación del comportamiento de la estructura** frente a cargas gravitatorias y de viento, así como de posibles deformaciones o vibraciones excesivas.

Este proyecto no solo busca resolver una necesidad técnica, sino también contribuir al desarrollo de estructuras innovadoras que respeten la arquitectura original de la plaza de toros, integrándose de manera armónica en su entorno, mientras pone en valor la preparación técnica y profesional del autor en este área de la ingeniería.

2 Antecedentes

La plaza de toros de Málaga, conocida como la Malagueta, es un referente arquitectónico y cultural de la ciudad, inaugurada en 1876. Este espacio ha sido históricamente utilizado no solo para eventos taurinos, sino también para actividades culturales, deportivas, y de entretenimiento, consolidándose como un punto emblemático para malagueños y visitantes.

En los últimos años, las cubiertas ligeras de cables y membranas han ganado popularidad en el ámbito de la ingeniería estructural, debido a su capacidad para cubrir grandes luces con soluciones estéticas, económicas y eficientes. Este tipo de estructuras se caracterizan por ser ligeras, flexibles y adaptables a distintas configuraciones arquitectónicas, permitiendo integrar diseños innovadores sin comprometer la funcionalidad ni la estética del entorno.

La necesidad de dotar a La Malagueta de una cubierta responde a diversos objetivos:

- **Mejorar la funcionalidad del recinto**, permitiendo su uso en condiciones climáticas adversas.
- **Conservar y realzar el valor arquitectónico** del edificio histórico mediante una solución que respete su diseño original.
- **Modernizar el espacio**, fomentando un uso mas versátil y atractivo para una mayor variedad de eventos.

Este proyecto tiene un enfoque personal y profesional, ya que su autor, tras cursar diversas asignaturas relacionadas con el cálculo de estructuras, pretende continuar avanzando en este campo y ejercer su profesión en este ámbito. El desarrollo del trabajo no solo responde una necesidad técnica, sino que también es una oportunidad para profundizar en el uso de herramientas modernas de análisis y diseño estructural, demostrando su preparación e interés por esta especialización.

El uso de cubiertas tensadas en este proyecto permite abordar los retos de diseño y cálculo de una forma innovadora, ofreciendo ventajas como:

- Reducción de peso estructural.
- Mayor sostenibilidad en la construcción.
- Un diseño visualmente atractivo que armoniza con el entorno.

En definitiva, este trabajo busca integrar los avances de la ingeniería estructural moderna con el respeto al patrimonio arquitectónico de La Malagueta, mientras refuerza el compromiso del autor con su desarrollo profesional en este campo.

3 Adquisición de documentación

Para la elaboración del presente Trabajo de Fin de Grado, ha sido necesario recopilar diversa documentación técnica y normativa que permita el desarrollo del diseño estructural de la cubierta para la Plaza de Toros de Málaga.

La obtención de esta información ha sido clave para garantizar la viabilidad del proyecto, asegurando que el diseño propuesto se adapte a las condiciones existentes y cumpla con los requisitos estructurales y normativos.

En primer lugar, se contactó con la Diputación de Málaga, organismo responsable de la gestión de la plaza, con el objetivo de obtener los planos mas recientes del edificio, correspondientes a su ultima modificación. Esta documentación es fundamental para conocer con precisión las dimensiones, geometría y características estructurales actuales, lo que me ha permitido analizar la viabilidad de la implantación de la cubierta sin comprometer la estabilidad ni la funcionalidad de la construcción existente.

Disponer de estos planos ha facilitado la elaboración del modelo estructural en el software de cálculo, asegurando que las condiciones de apoyo y las interacciones con la estructura sean correctas.

Los planos de los que se hablan, se podrán consultar en el anexo de planos en la **página 210**.

A su vez, dado que el diseño y análisis de la cubierta se ha desarrollado mediante el software de Dlubal RFEM6, ha sido imprescindible recopilar información técnica sobre su uso y aplicación para este tipo de estructuras. Para ello, se ha recurrido a diversos recursos proporcionados por la plataforma oficial de Dlubal, incluyendo manuales técnicos, tutoriales en vídeo y contacto directo con el departamento de asistencia técnica vía e-mail.

Este proceso de documentación ha permitido comprender en profundidad las herramientas de modelado y análisis necesarias para definir la cubierta con precisión, abordando aspectos como la interacción entre los cables y la membrana, la distribución de cargas y la respuesta estructural ante distintas condiciones de servicio.

Además de la documentación específica sobre la plaza y el software de cálculo, he consultado normativa vigente aplicable al diseño de estructuras ligeras y cubiertas tensadas ya que no existe normativa específica como tal para este tipo de estructuras, se detallaran en el **Capítulo 5**, asegurando así que el modelo propuesto cumpla con los requisitos de seguridad y funcionalidad.

En conjunto, toda la documentación recopilada ha servido como base para la correcta definición del modelo estructural, proporcionando la información necesaria para un análisis riguroso y permitiendo la toma de decisiones fundamentadas en cada fase del desarrollo del proyecto.

4 Situación y emplazamiento

La Plaza de Toros se encuentra en el distrito Este de la ciudad, concretamente en el barrio que lleva el mismo nombre que esta: La Malagueta. Está situada en un entorno privilegiado, cercana al Paseo Marítimo y una de las zonas emblemáticas de la ciudad como es el centro de esta misma.

Esta ubicada en una zona estratégica de la ciudad, rodeada de elementos de gran valor cultural, históricos y paisajísticos. Al oeste se encuentra el centro histórico de Málaga, con edificios emblemáticos como la Catedral y el Museo Picasso. A menos de 300 metros se encuentra la Playa de la Malagueta, una de las mas conocidas de la ciudad.

Está rodeada por elementos naturales y culturales como el Monte de Gibralfaro al norte de esta junto con su castillo, ofreciendo vistas de la ciudad y de la Plaza de Toros.

Está bien comunicada mediante transporte público, con paradas de autobús y acceso cercano al puerto. La Avenida de Cánovas del Castillo y el Paseo de Reding facilitan el acceso a pie o en vehículo.

La dirección exacta es Paseo de Reding, 6, 29016 Málaga. La referencia catastral de la plaza es 4149101UF7644N0001DA, consta de una superficie construida de 9421 m^2.

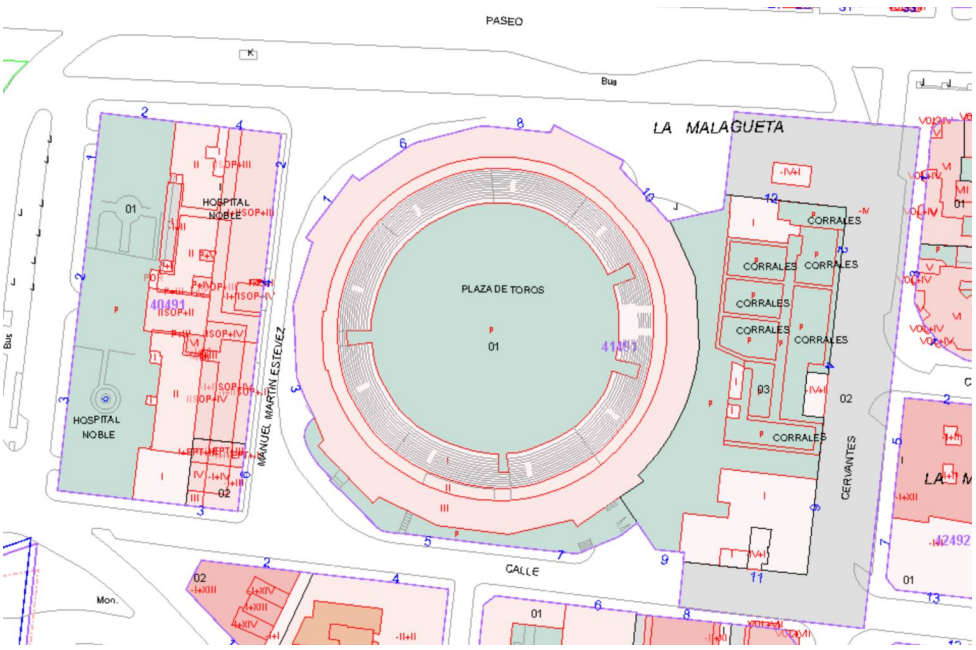


Figura 4.1: Croquis de la parcela. Catastro España.

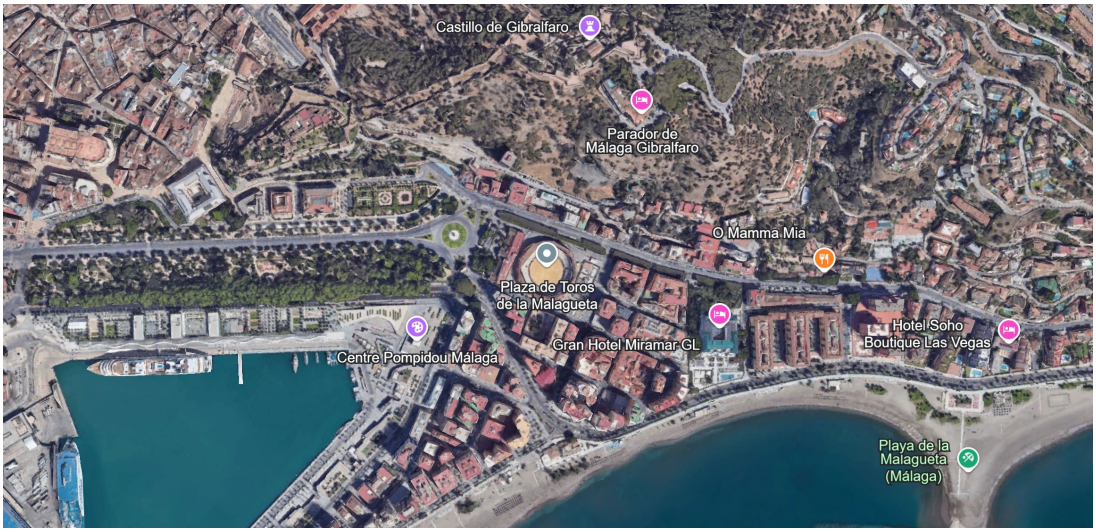


Figura 4.2: Ubicación de la Plaz de Toros. Google Earth.

Figura 4.3: Vista más detallada de La Malagueta. Google Earth.

5 Normativa aplicada

- **CTE**, Código Técnico de la Edificación. Real Decreto 314/2006.
- **DB-SE-AE**, (Documento Básico de Seguridad Estructural en Acciones en la Edificación).
- **UNE-EN 1991 CEN 2015-09**
- **Eurocodigo** (EN-1993).
- **UNE | 2016-02**, Anejo Nacional.
- **UNE | 2019-04**, Anejo Nacional.

6 Definiciones y referencias

- **CTE**: Código Técnico de la Edificación.
- **DLUBAL**: Software de analisis estructural.
- **RFEM 6**: La sexta generación del software de análisis por elementos finitos de Dlubal.
- **RWIND 3**: Program (tunel de viento digital) para la simulación numérica de flujos de viento alrededor de cualquier geometría.
- **DB**: Documento Básico.
- **UNE**: Una Norma Española.
- **CEN**: Comité Europeo de Normalización.
- **Tensegridad**: Integridad Tensional.

7 Metodología y programas utilizados

La metodología de trabajo seguida en este proyecto ha sido la siguiente.

1. Adquisición de documentación.
2. Revisión de la normativa actual y procedimientos de actuación.
3. Comprensión de los conceptos de Cubierta Tensada.
4. Estudio de la geometría de la Plaza de Toros.
5. Disposición de apoyos de la Cubierta sobre la estructura.
6. Modelado plano de una sección de la Cubierta.
7. Modelado espacial de esta.
8. Aplicación de cargas sobre la estructura.
9. Uso de RWIND3 para introducir simulación de viento.
10. Análisis de estabilidad y comportamiento de la Cubierta.
11. Comprobación de los resultados obtenidos y ajustes necesarios.
12. Anexos de manual y planos obtenidos.

Durante el desarrollo de este trabajo, se han hecho uso de diversos programas como:

- **RFEM 6**
- **RWIND 3**
- **AutoCAD 2024**
- **Overleaf LaTeX**

8 Justificación y conceptos de la cubierta tensada

Como ya se ha mencionado anteriormente, se ha optado por una cubierta ligera circular constituida por cables de acero y membrana de PES-PVC-Tipo III. Se ha escogido este diseño que se fundamenta en el concepto de Tensegridad debido a la necesidad de satisfacer los requerimientos técnicos, funcionales y estéticos que este tipo de edificación exige.

A continuación, se detallará tanto el fundamento del concepto como las razones principales que justifican su elección:

8.1 En que se basa el concepto de tensegridad

El término tensegridad o tensegrity en Inglés, proviene de la combinación de las palabras 'tensil - integrity' o 'integridad tensional', describe un sistema estructural basado en el equilibrio entre fuerzas de tracción y compresión. En este concepto:

- Los **elementos traccionados** (como cables y membranas) están pretensados y distribuyen las cargas a través de toda la estructura.
- Los **elementos en compresión** (como las barras) están aisladas entre sí, soportando las cargas transmitidas por el conjunto de cables y lona.

Este equilibrio da lugar a estructuras autoestables, ligeras y eficientes, capaces de cubrir grandes luces sin necesidad de soportes rígidos tradicionales.

8.2 Razones para escoger este tipo de cubierta

1. **Cobertura de grades luces sin obstáculo.**
   La geometría circular de la plaza de toros exige una solución estructural que permita cubrir grandes áreas sin interrumpir la visibilidad del ruedo. Este tipo de cubierta tensada logra este objetivo al utilizar elementos tensados que abarcan grandes espacios, sin necesidad de soportes centrales.

2. **Ligereza estructural y eficiencia material.**
   La tensegridad permite construcciones ligeras y eficientes, optimizando el uso de materiales como cables de acero y lonas tensadas. Este enfoque minimiza el peso de

la cubierta, y por ende, las cargas transmitidas a los apoyos (estructura perimetral de la plaza de toros) reduciendo costos y el impacto ambiental y estético del proyecto.

3. **Resistencia y estabilidad frente a cargas externas.**
   Este tipo de cubiertas son especialmente eficaces frente a cargas dinámicas, como viento o lluvia. Su diseño distribuye las fuerzas de manera uniforme, garantizando una alta estabilidad estructural.
   Además, el pretensado de los cables de acero, les otorga capacidad para absorber esfuerzos adicionales sin comprometer la forma o funcionalidad de la cubierta. Es decir, de estas cubiertas se podrían suspender diferentes equipos de gran peso distribuidos y sujetos de manera correcta sin que se viese afectada la misma.
   Su forma geométrica podría variar insignificantemente, pero esta es una de las cualidades de este tipo de cubiertas, su capacidad de adaptación.

4. **Flexibilidad y estética arquitectónica.**
   Este diseño ofrece gran versatilidad para crear formas geométricas atractivas y dinámicas. En este caso, se puede lograr una cubierta que combine la funcionalidad con un diseño arquitectónico llamativo que integre tradición e innovación, destacando como un elemento icónico de la plaza de toros.

5. **Optimización económica y sostenibilidad.**
   El uso eficiente de materiales permite reducir los costos de construcción y transporte. Además, la ligereza y simplicidad de este sistema contribuye a un menor impacto ambiental, alineándose con criterios de sostenibilidad.

6. **Mantenimiento y durabilidad.**
   El sistema estructural de tensegridad es duradero y fácil de mantener. Los cables y membranas pueden inspeccionarse y sustituirse de manera sencilla, lo que garantiza la funcionalidad de la cubierta a lo largo del tiempo.

Una vez aclarado el concepto de tensegridad y justificar el por que se ha escogido este tipo de cubierta, se va a detallar a continuación el funcionamiento de esta y de donde surge este diseño.

8.3 Explicación detallada del funcionamiento del sistema de la cubierta

Si disponemos de una viga empotrada en voladizo como la de la **figura 8.1** con una carga en el extremo opuesto al empotramiento, esta carga genera un momento flector y

un cortante en dicho empotramiento. Esta viga trabaja a flexión. Como bien sabemos, la flexión penaliza mucho y no se aprovecha lo suficiente el material como para conducirnos a estructuras eficientes económicamente.

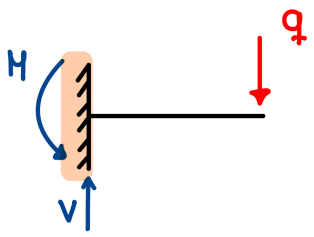


Figura 8.1: Viga empotrada. Fuente propia.

Este sistema estático se podría simplificar quitando el empotramiento de la izquierda, colocándole un brazo de palanca de forma que el momento se puede regular mediante un sistema de balancín superior e inferior y el cortante se entregaría en un apoyo fijo en el lugar que estaba el empotramiento, como se muestra a continuación en la siguiente **figura 8.2.**

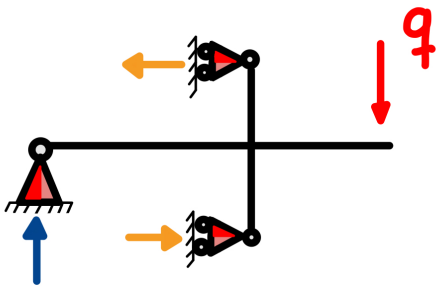


Figura 8.2: Sistema plano. Fuente propia.

Este sistema plano se puede generalizar al espacio obteniendo la siguiente **figura 8.3.**

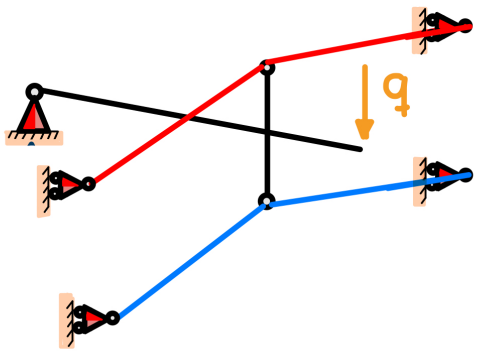


Figura 8.3: Sistema espacial. Fuente propia.

Como podemos ver, la forma de trabajar de este sistema con esa misma carga en voladizo, es recoger el momento que esta produce con la barra vertical de color negro, sometiendo esta a las barras de color rojo a compresión y las de color azul a tracción, de esta manera se entrega el flector a la estructura gracias a esta geometría que me otorga un anillo superior a compresión y el anillo inferior a tracción.

Si esta geometría la revolucionamos y sustituimos la barra negra horizontal por un sistema de cercha, obtenemos una forma conocida como rueda de bicicleta, **figura 8.4.**

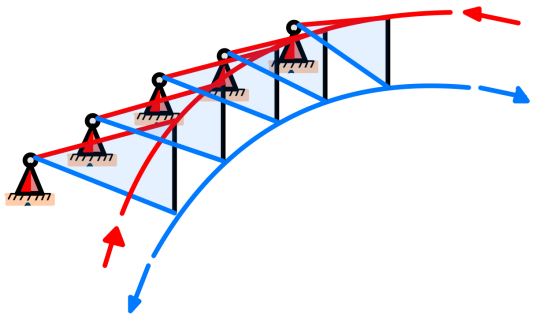


Figura 8.4: Sistema de rueda de bici. Fuente propia.

El equilibrio del momento, se está pasando al anillo superior en compresión y al anillo inferior en tracción.

Este sistema es muy empleado en grandes cubiertas de estadios de futbol como se muestra a continuación en las siguientes **figuras 8.5**, **8.6**, **8.7**. Con la diferencia de que

este sistema que siguen este tipo de cubiertas, ambos anillos tanto superior como inferior se encuentran a compresión (lo que seria la llanta de la rueda de una bici), ya que de estos anillos salen los cables tesados (radios), hacia el anillo interior, el cual es una estructura de cable pretensado que se encuentra a tracción, esto hace posible estructuras muy ligeras y vistosas.

Figura 8.5: Estadio de futbol del Levante CF. Foto de GrupoVía.

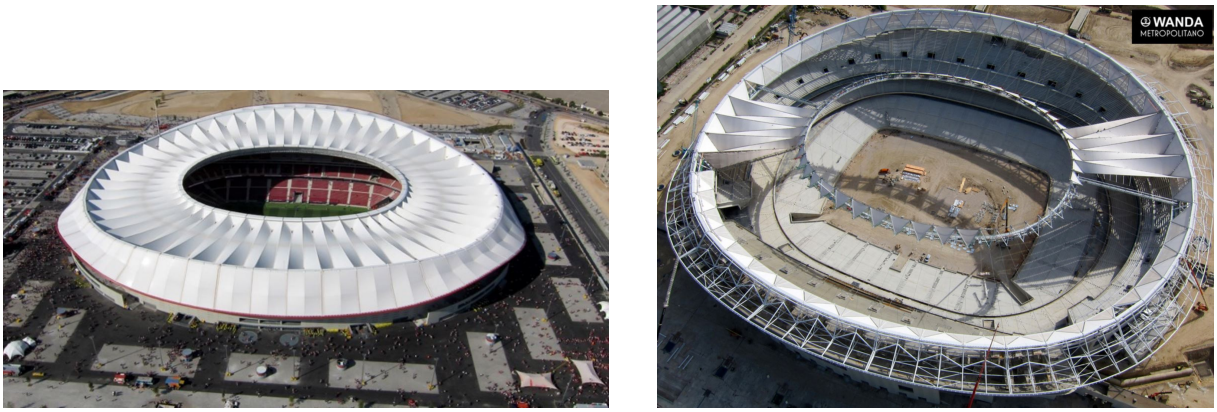


Figura 8.6: Estadio de futbol Wanda Metropolitano. Foto de Comunidad de Madrid.

Figura 8.7: Estadio Nuevo San Mamés. Foto de 365Architecture.

9 Diseño del modelo

9.1 Geometría y Dimensiones

La cubierta tendrá un diámetro exterior de 96 metros y en torno a 5 metros de altura.

Estará sustentada mediante 24 aparatos de apoyo diseñados para restringir los desplazamientos en todas las direcciones, permitiendo únicamente la rotación en los tres ejes principales. Estos apoyos estarán estratégicamente dispuestos sobre la estructura de hormigón armado que conforma la fachada de la plaza.

El muro de fachada, con un espesor de 70 cm, está diseñado para soportar no solo las cargas gravitatorias derivadas del peso propio de la cubierta, sino también las acciones horizontales y los momentos resultantes de la interacción estructural.

El anillo de apoyos servirá como punto de fijación para los cables estructurales de tipo Pfeifer con un diámetro de 28,6 mm. Estos cables estarán vinculados a un perfil tubular de acero S275-JR de sección CHS 200/10/H, el cual actuará como elemento de conexión con otros cables de tipo Pfeifer de 24,1 mm de diámetro. En su conjunto, esta disposición conformará una estructura de tipo cercha, similar a la representada en la figura **figura 8.4**.

Adicionalmente, la estructura se vinculará mediante dos cables Pfeifer de 20,5 mm de diámetro a un cable principal de 36,6 mm de diámetro, que conforma el anillo circular interior sometido a esfuerzos de tracción.

Las superficies delimitadas por esta configuración de cables y perfiles metálicos estarán recubiertas con una membrana de PES-PVC Tipo III, proporcionando cierre y protección a la estructura.

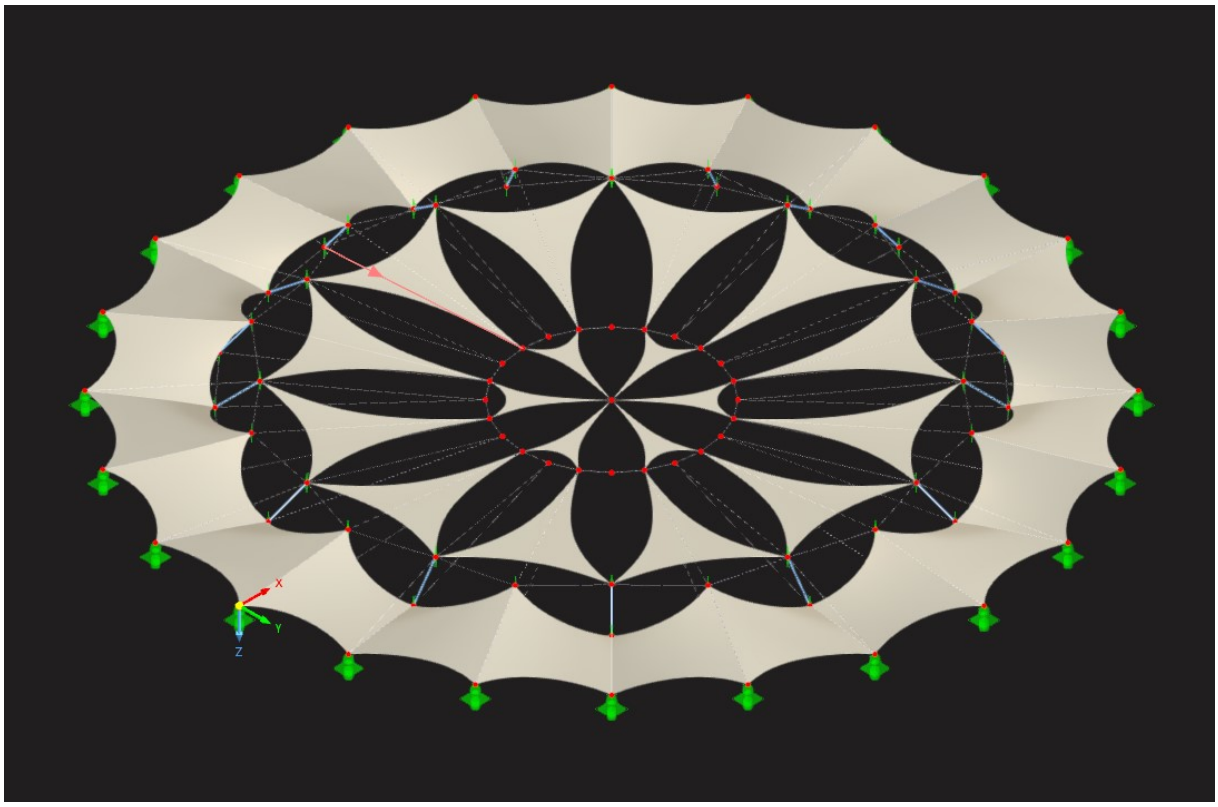


Figura 9.1: Geometría de la cubierta. Fuente propia.

9.2 Acciones que actúan sobre la estructura

A continuación se procederá a la definición de las acciones que actuaran sobre la estructura, de acuerdo al Código Técnico de la Edificación (CTE), el Documento Básico de Seguridad Estructural de Acciones en la Edificación (DB SE-AE) y el Eurocófigo.

La introducción de estas normas se realizará en el software de cálculo empleado, RFEM6 como se muestra en la siguiente **figura 9.2** en la pestaña de Normas 1.

Figura 9.2: Normas empleadas en RFEM6.

9.2.1 Acciones permanentes

La acciones permanentes son todas aquellas las cuales actúan de manera constante en la estructura. En este caso son el peso propio y el pretensado de los cables. No se tendrán en cuenta acciones del terreno puesto que la cubierta apoyará en la estructura de fachada de hormigón, la cual se supondrá infinitamente rígida y capaz de soportar las cargas y esfuerzos provocados por la cubierta.

9.2.1.1 Peso Propio

El peso propio considerado se determina a partir de la contribución de los distintos elementos estructurales que conforman la cubierta. Entre estos, destacan los cables de acero, la membrana de PVC y los perfiles tubulares de acero de sección CHS-200/10/H, además de los dispositivos de apoyo que transmiten las cargas a la estructura principal.

Adicionalmente, se contemplan cargas puntuales adicionales de 1 kN, dispuestas según la **figura 9.3**, con el propósito de prever la instalación futura de equipos suspendidos. Estas cargas se incorporan al modelo estructural para evaluar su impacto en el comportamiento global de la cubierta y garantizar su capacidad resistente frente a posibles incrementos de carga.

La combinación de estas acciones estructurales, incluyendo el peso propio de los elementos y las cargas adicionales, genera una carga total transmitida a la estructura de hormigón de aproximadamente 221,09 kN (22,1 toneladas). Esta carga global resulta sig-

nificativamente inferior a la de una cubierta con características equivalentes diseñada con perfiles laminados convencionales, lo que evidencia la optimización estructural lograda mediante el uso de cables, membranas y perfiles tubulares.

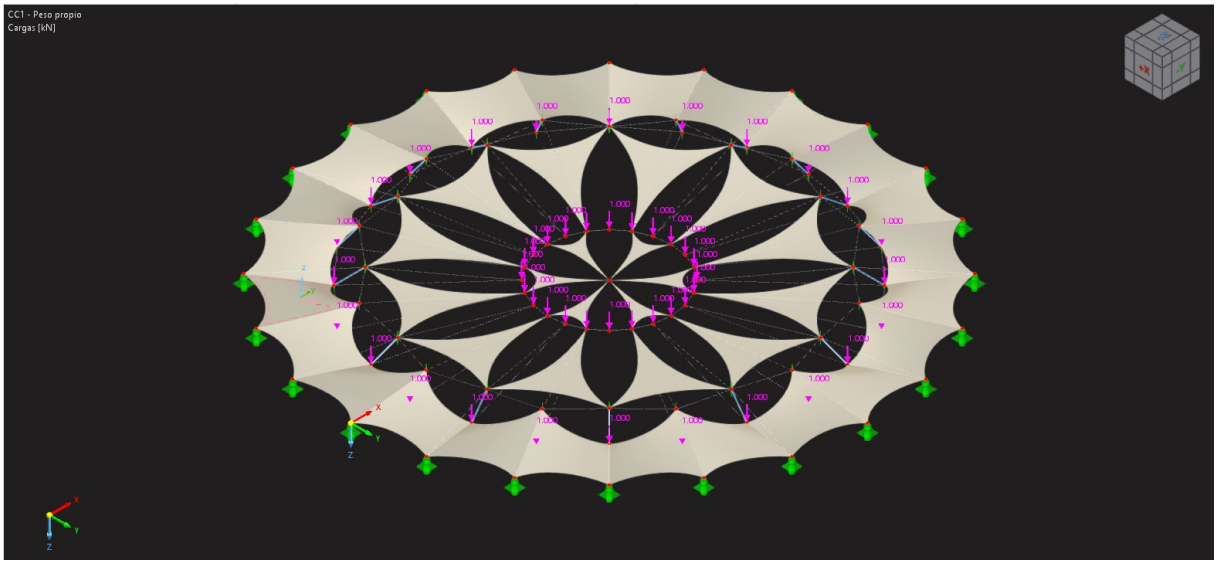


Figura 9.3: Distribución de cargas puntuales adicionales. Fuente propia.

9.2.1.2 Pretensado

El pretensado de los cables de la cubierta es una acción permanente fundamental para garantizar la estabilidad estructural y minimizar deformaciones no deseadas. Las magnitudes de pretensado se definirán según en función de las cargas de diseño, y las propiedades mecánicas de los cables. Se tendrán en cuenta los siguientes aspectos para definirlas:

- **Fuerza de pretensado inicial:** Se se establecerá en función del límite elástico del acero, asegurando que se mantenga dentro de un rango de seguridad.
- **Longitud de los cables:** La deformación debida al alargamiento elástico del acero se debe evaluar mediante la ley de Hooke.
- **Pérdidas de tesado:** Incluyen efectos como la relajación del material, variaciones térmicas y asentamientos en los puntos de anclaje.

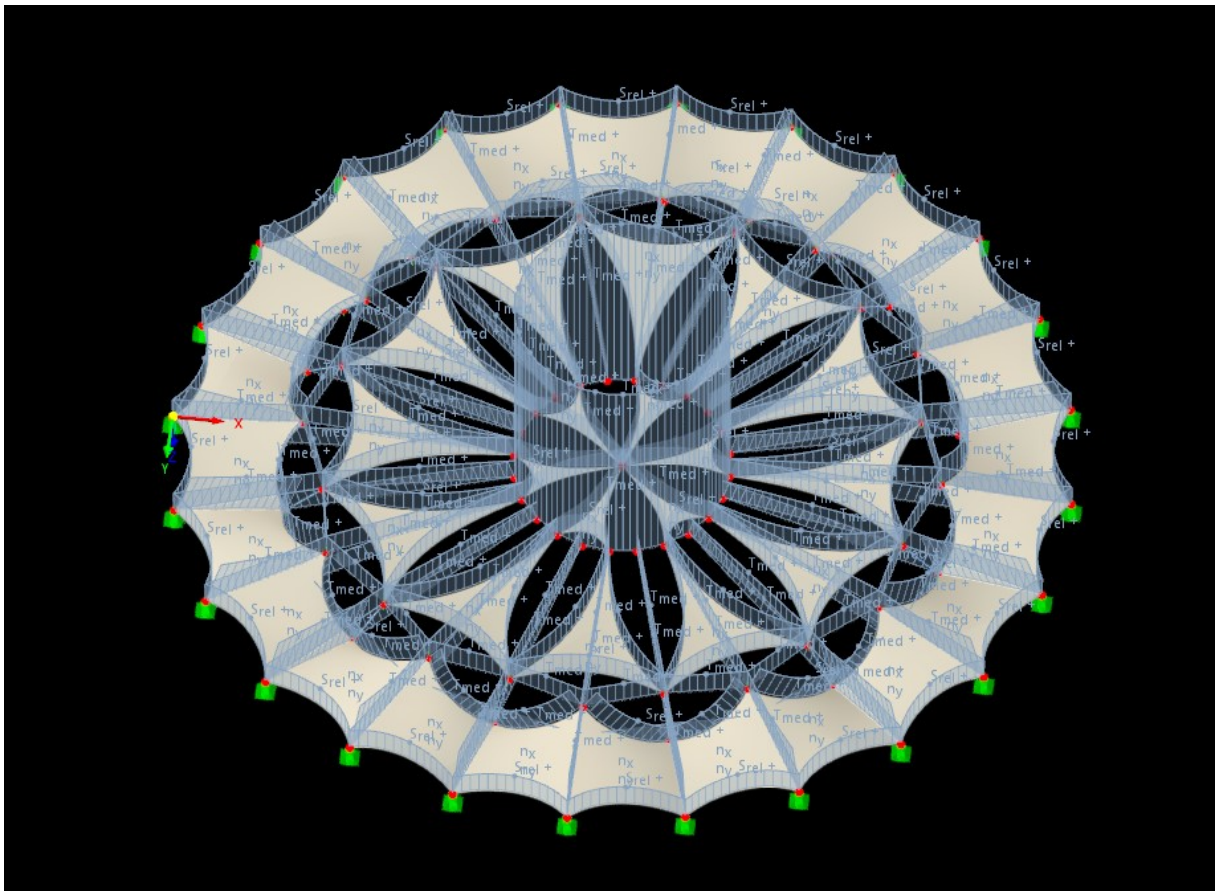


Figura 9.4: Geometría obtenida con el complemento búsqueda de forma.. RFEM 6

9.2.2 Acciones variables

Las acciones variables, también conocidas como cargas variables o cargas impuestas, son aquellas acciones que actúan sobre una estructura y cuya magnitud, distribución o punto de aplicación pueden cambiar con el tiempo debido a condiciones de uso, factores ambientales o eventos accidentales. A diferencia de las acciones permanentes, que se mantienen constantes durante la vida útil de la estructura, las acciones variables dependen de factores externos y pueden presentarse de manera ocasional, cíclica o aleatoria.

Para el caso de la cubierta se considerará la acción del viento y de la nieve, no se tendrá en cuenta la sobrecarga de uso, ya que esta no está diseñada para ser transitada, aunque si para que se puedan instalar equipos de sonido y pantallas, pero como se ha comentado anteriormente, estos elementos se consideraran como parte del peso propio dentro de las acciones permanentes.

9.2.2.1 Carga de viento

El viento es una acción relevante en la cubierta debido a la ligereza de los materiales empleados y a la posible succión o presión sobre la lona y los cables. La acción del viento o

una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto puede expresarse mediante el valor de la presión estática q_e:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p \tag{9.1}$$

Donde q_b es la presión dinámica del viento.Para obtener dicho valor de forma precisa se consultará en anejo D del DB-SE AE, en función del emplazamiento geográfico de la obra. El valor de q_b sigue la siguiente fórmula:

$$q_b = 0,5 \cdot \delta \cdot v_b^2 \tag{9.2}$$

siendo δ la densidad del aire la cual depende como factores de la altitud, temperatura ambiental y de la fracción de agua en suspensión. En general se adopta el valor de 1,25 kg/m^2 y v_b el valor básico de la velocidad del viento, que puede obtenerse del mapa de la **figura 9.5**.

Figura 9.5: Mapa zonas de velocidad media de viento. Fuente: Figura D.1 del DB-SE EA

Como podemos observar en la imagen del mapa, Málaga se encuentra en la zona A, luego el valor tomado para la velocidad del viento es de 26 m/s.

Por lo tanto se toma que la presión dinámica q_b es 0,42 kN/m^2.

Volviendo a la ecuación **9.1**, c_e es el coeficiente de exposición, variable con la altura del punto considerado, en función del grado de aspereza del entorno donde se encuentra ubicada la construcción.

En el caso de nuestra cubierta el valor de c_e se va a tomar como 3, ya que se va a considerar que la plaza de toros se encuentra ubicada en el borde del mar y que la altura

de la cubierta se encuentra aproximadamente a 9 metros de altura. Este valor ha sido obtenido de la tabla **9.6**.

	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

Figura 9.6: Tabla valores coeficientes de exposición. Fuente: Tabla 3.4 del DB-SE AE

C_p es el coeficiente eólico o de presión, dependiente de la forma y orientación de la superficie respecto al viento, y en su caso, de la situación del punto respecto a los bordes de esa superficie. Como la cubierta no se asemeja a ninguna propuesta por el CTE, se va a tomar la consideración de tomar como valor de $c_p = 1$, un valor bastante restrictivo en comparación con el resto de casos propuestos por el DB-SE AE.

Una vez expuestas las medidas a adoptar para considerar las cargas de viento sobre la estructura de manera teórica, se va a optar en este proyecto por la utilización de un modulo de software del programa Dlubal adicional a RFEM6, llamado RWIND 3. Se trata de un programa de cálculo el cual nos permitirá obtener las cargas de viento sobre la cubierta de la plaza de toros de una manera mas detallada y precisa, mediante la simulación computacional de un túnel de viento. Se profundizará más en detalle en el **Capítulo 12**

9.2.2.2 Carga de nieve

La distribución y la intensidad de la carga de nieve sobre un edificio, o en particular sobre una cubierta, depende del clima del lugar, del tipo de precipitación, del relieve del entorno, de la forma del edificio o de la cubierta, de los efectos del viento, y de los intercambios térmicos en los parámetros exteriores.

Como valor de carga de nieve por unidad de superficie en proyección horizontal, q_n, puede tomarse:

$$q_n = \mu \cdot s_k \tag{9.3}$$

siendo:
μ el coeficiente de forma según el apartado 3.5.3 del DB-SE AE.
s_k el valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal según la tabla del apartado 3.5.3 del DB-SE AE.

Dicha tabla es la de la figura **9.7**, de la cual tomaríamos el valor de $s_k = 0{,}2\ kN/m^2$ que corresponde a la ciudad de Málaga.

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

Figura 9.7: Sobrecarga de nieve en capitales de provincia. Fuente Tabla 3.8 DB-SE AE.

Pero para este proyecto despreciaremos la carga de nieve, lo cual justificaremos a continuación por los siguientes factores:

- **Tipo de cubierta:** La cubierta esta compuesta por cables y lona, materiales que no permiten la acumulación de nieve, ya que al ser flexibles, cualquier carga se redistribuye y desliza.
- **Inclinación y drenaje:** La lona estará montada de tal manera que tendrá una inclinación por alguno de sus lados, luego tanto la nieve como el agua deslizaran rápidamente sobre esta.
- **Coeficiente de forma μ:** Según el CTE, en cubiertas de membrana y tensadas el coeficiente μ puede ser muy bajo o incluso nulo, lo que implica que la carga de nieve aplicada a la estructura será despreciable.
- **Fusión rápida:** En Málaga, las temperaturas invernales rara vez permiten la acumulación prolongada de la nieve, debido al tipo de clima es complicado que esta 'cuaje' y permanezca en las superficies sobre las que ha caido.

10 Búsqueda de la forma de RFEM6

En este proyecto, se estudia el diseño de una cubierta ligera, compuesta por cables de acero y lona. Al tratarse de una estructura de membrana, su comportamiento es diferente al de las estructuras tradicionales, ya que los materiales utilizados solo trabajan a tracción y carecen de rigidez propia. Esto significa que la forma de la cubierta no puede definirse de manera arbitraria, sino que debe surgir a partir de un proceso de equilibrio estructural, para ello se aplicará los conceptos detallados en la **Sección 8.3** y se utilizará un procedimiento llamado "búsqueda de la forma"propio del programa de cálculo de RFEM6, que permite encontrar la configuración óptima de la membrana en función de las condiciones de contorno y el pretensado aplicado.

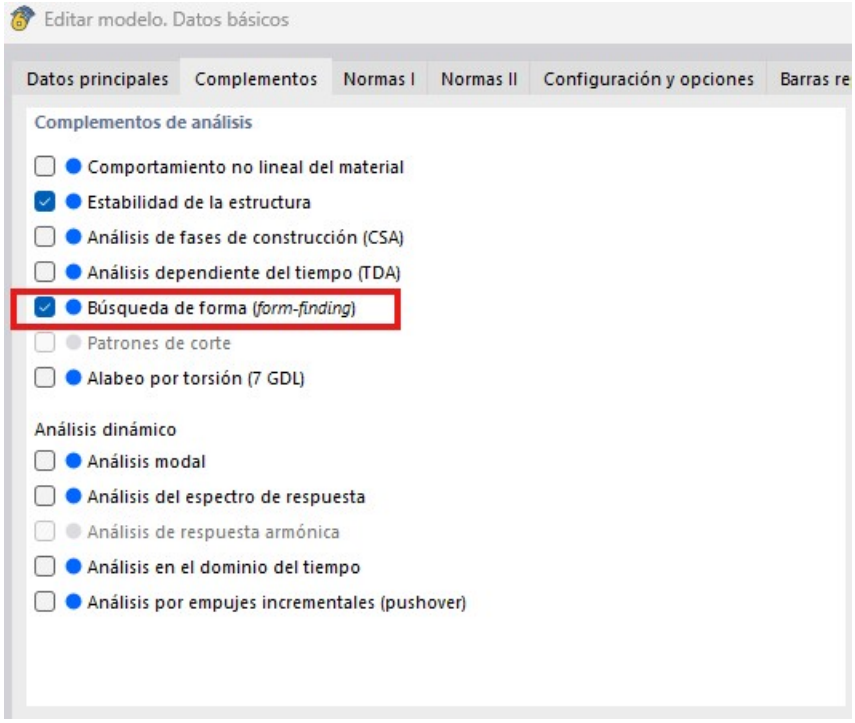


Figura 10.1: Datos básicos. Complemento "búsqueda de forma". RFEM 6.

10.1 ¿Qué es la búsqueda de la forma?

La búsqueda de la forma es un proceso fundamental que determina la geometría final de una estructura, en este caso de la cubierta. Como los elementos que constituyen esta no pueden resistir esfuerzos de compresión ni flexión, su estabilidad depende exclusivamente del pretensado, es decir, de la tensión que se aplica previamente en la estructura.

En términos sencillos, la búsqueda de la forma consiste en encontrar una geometría

equilibrada en la que la membrana y cables puedan mantenerse estable sin deformaciones no deseadas. Este proceso no solo define la apariencia de la cubierta, sino que también garantiza su resistencia y funcionalidad.

10.2 Métodos de búsqueda de forma en Dlubal RFEM6

El software Dlubal RFEM6, utilizado para la elaboración de la cubierta, permite realizar la búsqueda de forma mediante dos enfoques:

1. **Definir el pretensado y encontrar una forma de equilibrio.**
   - Se establece la tensión deseada en la membrana y se busca una forma que la mantenga en equilibrio.
   - Es útil cuando se quiere asegurar un nivel específico de pretensado en la estructura.
2. **Definir una forma y ajustar el pretensado necesario para equilibrarla.**
   - Se parte de una geometría inicial y se determina que pretensado es necesario para mantenerla en equilibrio.
   - Permite mayor control sobre la apariencia de la cubierta.

10.3 Características principales del proceso de búsqueda de la forma

Existe una correlación directa entre el pretensado y la forma de las estructuras de membrana. Las propiedades del textil que se utilizan carecen de relevancia. El proceso de búsqueda de forma es independiente del material.

Además de las condiciones de contorno y los pretensados, la forma de una estructura de membrana también puede verse afectada por las cargas. Por lo tanto, para membranas pretensadas, el programa busca la forma de equilibrio para el pretensado definido y la presión interior.

La carga debida al peso propio también puede influir en el proceso de búsqueda de forma. Es posible buscar una forma que corresponda al pretensado, peso propio y presión interna especificados, si es el caso. Sin embargo, el peso propio aplicado en el proceso de búsqueda de forma apenas influye en la forma y pretensado final, dado el poco peso propio que tiene el textil.

10.4 Métodos utilizados en RFEM6 para encontrar la forma

Dlubal ofrece dos técnicas principales para realizar la búsqueda de la forma:

1. **Método de proyección:**
   - Es adecuado para membranas cónicas o estructuras con curvatura.
   - Mantiene el equilibrio del pretensado en los ejes globales y busca la mejor distribución en el espacio.
   - Permite que la forma se ajuste manteniendo un pretensado uniforma en todas las direcciones.

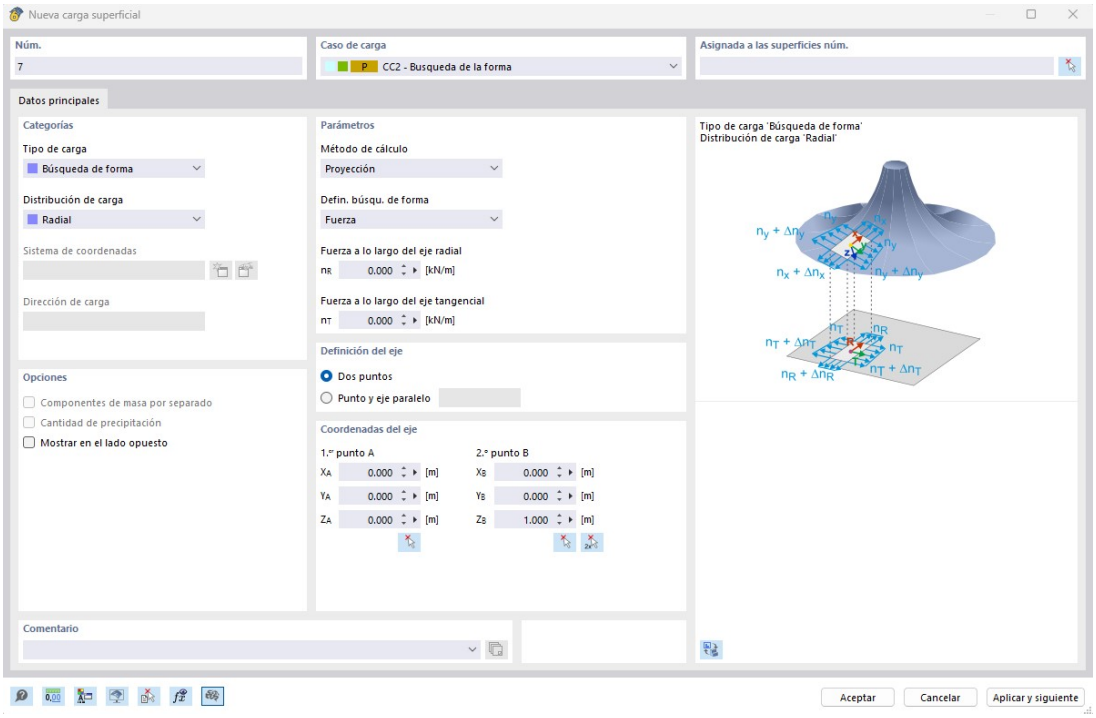


Figura 10.2: Método de proyección. RFEM 6.

2. **Método estándar:**
   - Se usa en membranas apoyadas en puntos o arcos, o en aquellas estabilizadas matemáticamente.
   - Permite mayor libertad en la distribución del pretensado y ajusta la forma en varias iteraciones hasta encontrar un equilibrio estable.
   - Es útil cuando el objetivo es obtener una forma específica sin modificar demasiado la estructura de la membrana.

Para este proyecto se ha utilizado el método estandar.

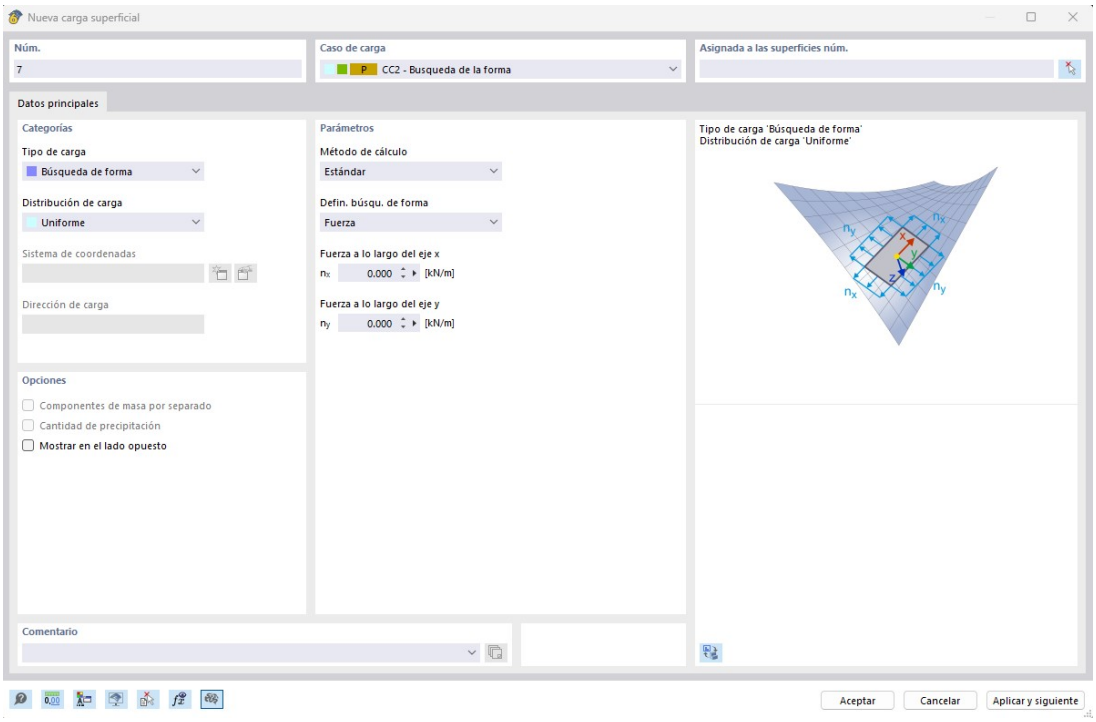


Figura 10.3: Método estandar. RFEM 6.

10.5 Búsqueda de forma en estructuras combinadas (membranas y cables)

En la gran mayoría de cubiertas de este tipo, las membranas no trabajan solas, sino que se combinan con otros elementos como cables y soportes rígidos. En estos casos la búsqueda de forma debe considerar la interacción entre todos los componentes para garantizar un equilibrio adecuado.

Dlubal permite definir si los elementos rígidos afectarán o no a la forma de la membrana durante el proceso de búsqueda de forma. Esto es útil cuando se quiere analizar diferentes escenarios estructurales, como el comportamiento de la cubierta antes y después de la instalación de ciertos elementos.

En conclusión, gracias a esta herramienta que nos ofrece este software de cálculo, podemos obtener una forma eficiente y estable que garantice el correcto funcionamiento de la estructura.

10.6 Ejemplo de búsqueda de forma

A continuación se procede a muestra como se lleva a cabo la búsqueda de forma mediante un sencillo ejemplo. Los pasos a seguir serán los siguientes:

10.6.1 Definición del modelo de ejemplo

1. Selección de los materiales que componen los elementos que se van a utilizar para elaborar la estructura. En este caso acero S235 JR y PES-PVC Tipo III.

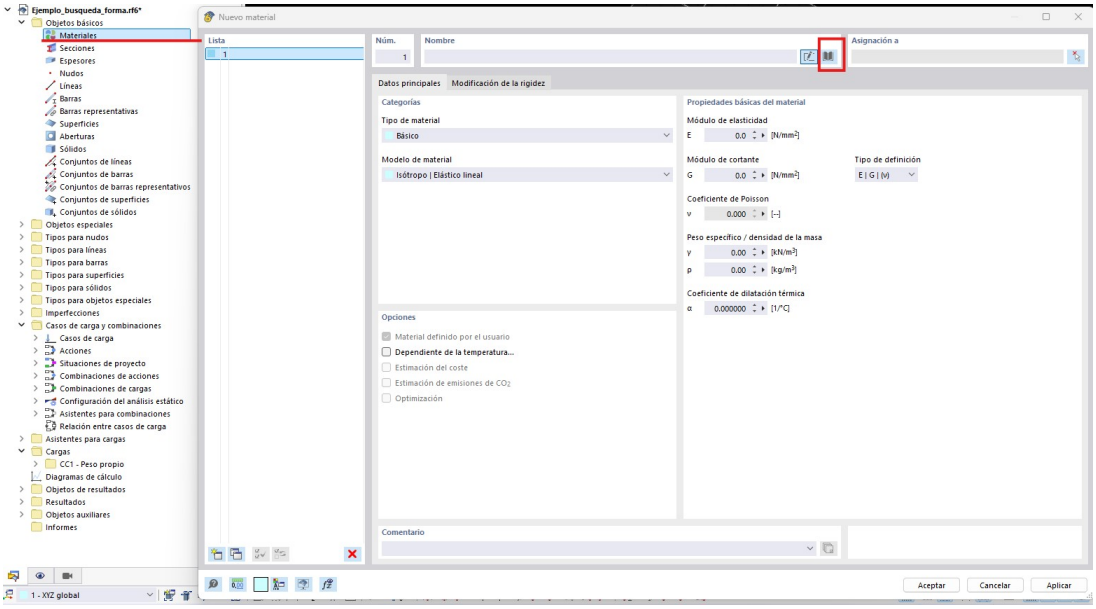


Figura 10.4: Ventana nuevo material. RFEM 6.

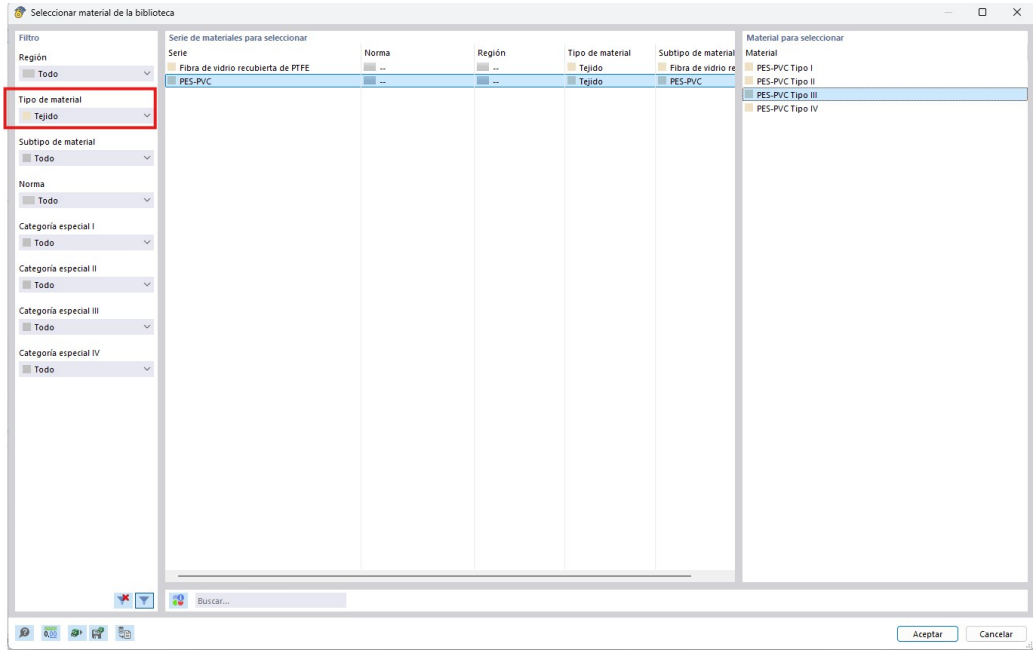


Figura 10.5: Ventana selección del material (tejido) de la biblioteca. RFEM 6.

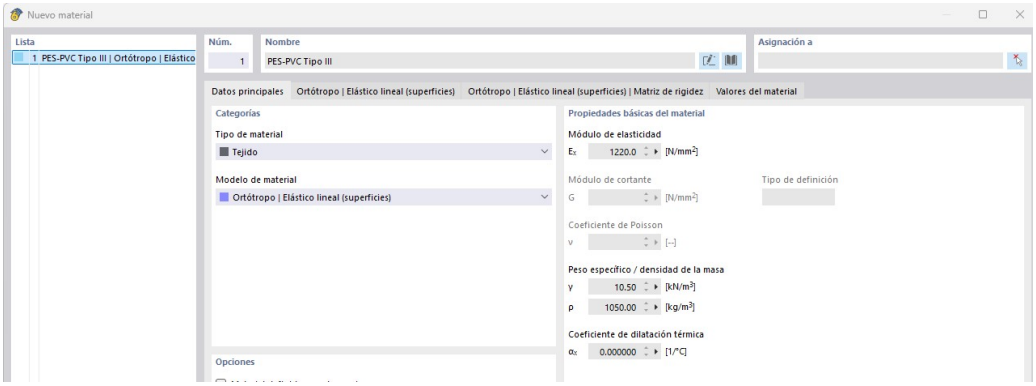


Figura 10.6: Ventana nuevo material actualizada. RFEM 6.

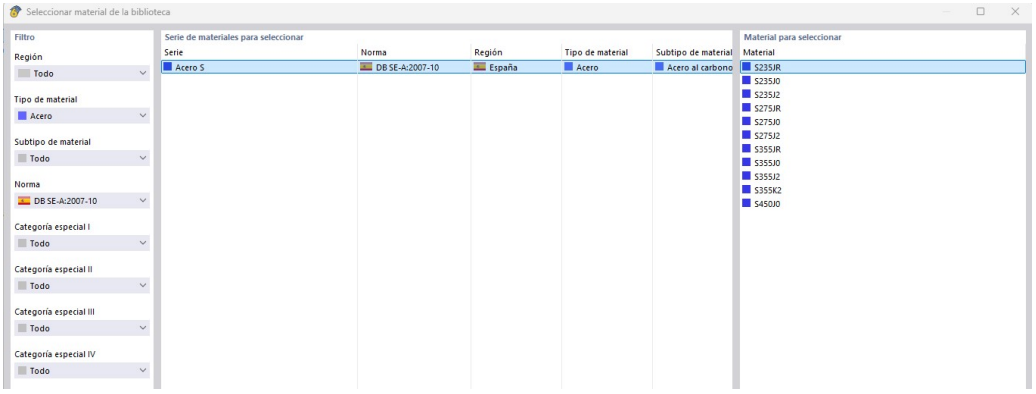


Figura 10.7: Ventana slección del material (acero). RFEM 6.

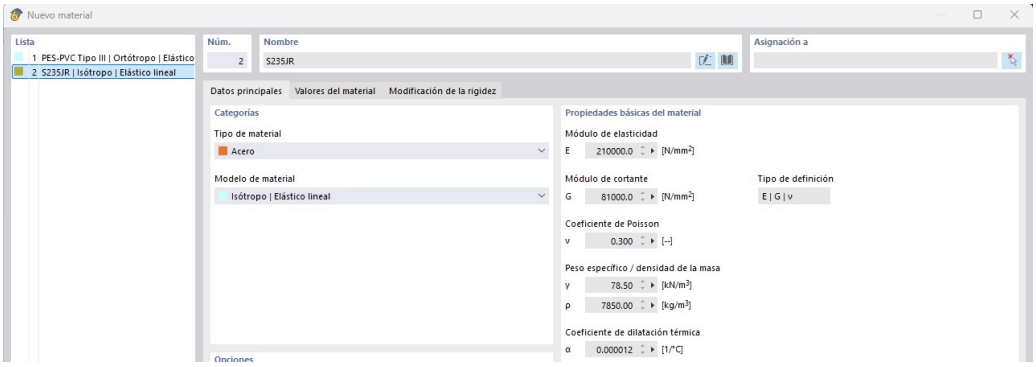


Figura 10.8: Ventana nuevo material actualizada. RFEM 6.

2. Selección de las secciones de esos elementos. HE 200 M, Cable PE 60 y CHS 120/5/H.

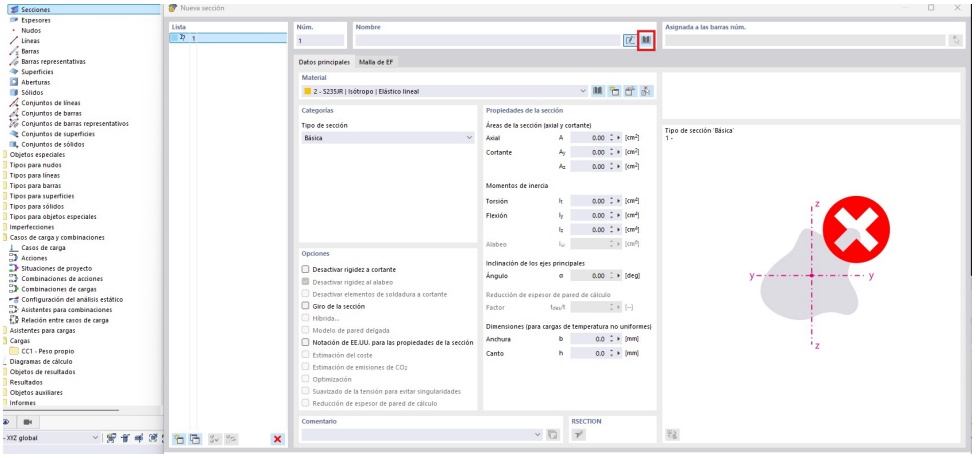


Figura 10.9: Ventana nuevo sección. RFEM 6.

Figura 10.10: Ventana seleccionar sección de la biblioteca. RFEM 6.

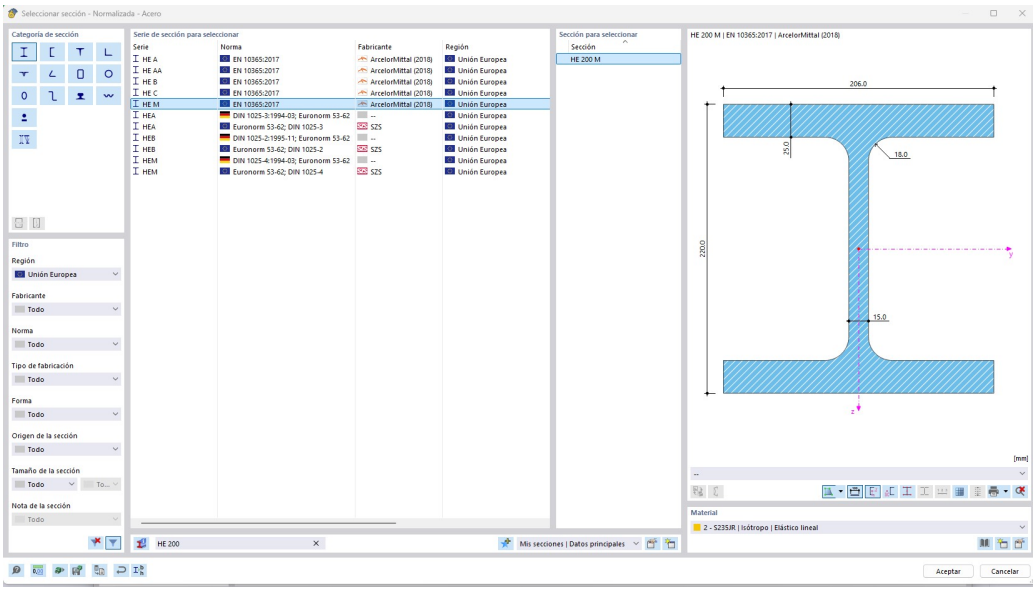


Figura 10.11: Ventana selección sección normalizada acero HE 200 M. RFEM 6.

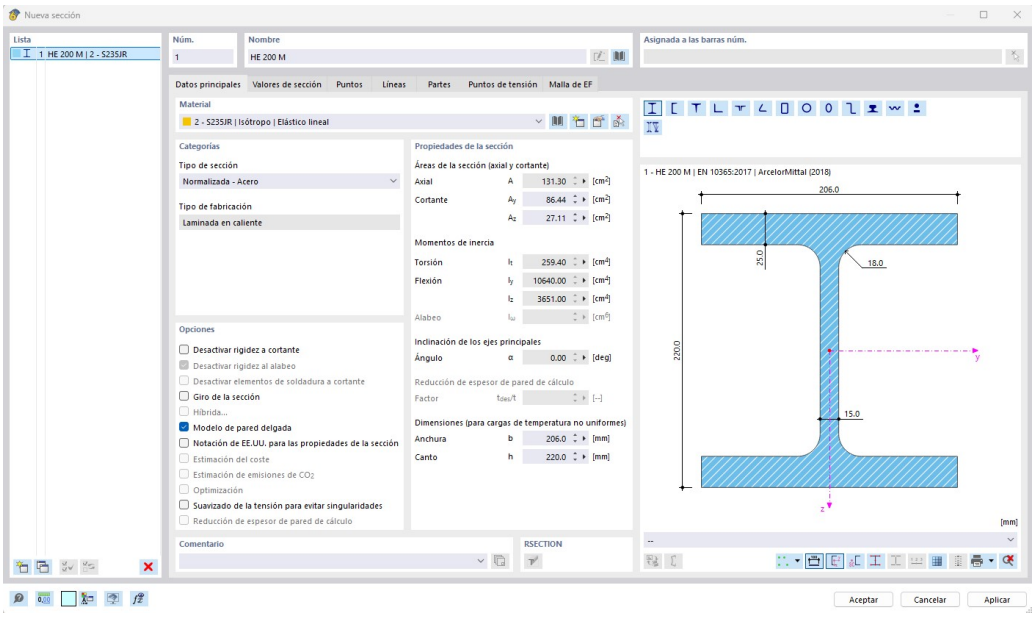


Figura 10.12: Ventana nueva sección actualizada. RFEM 6.

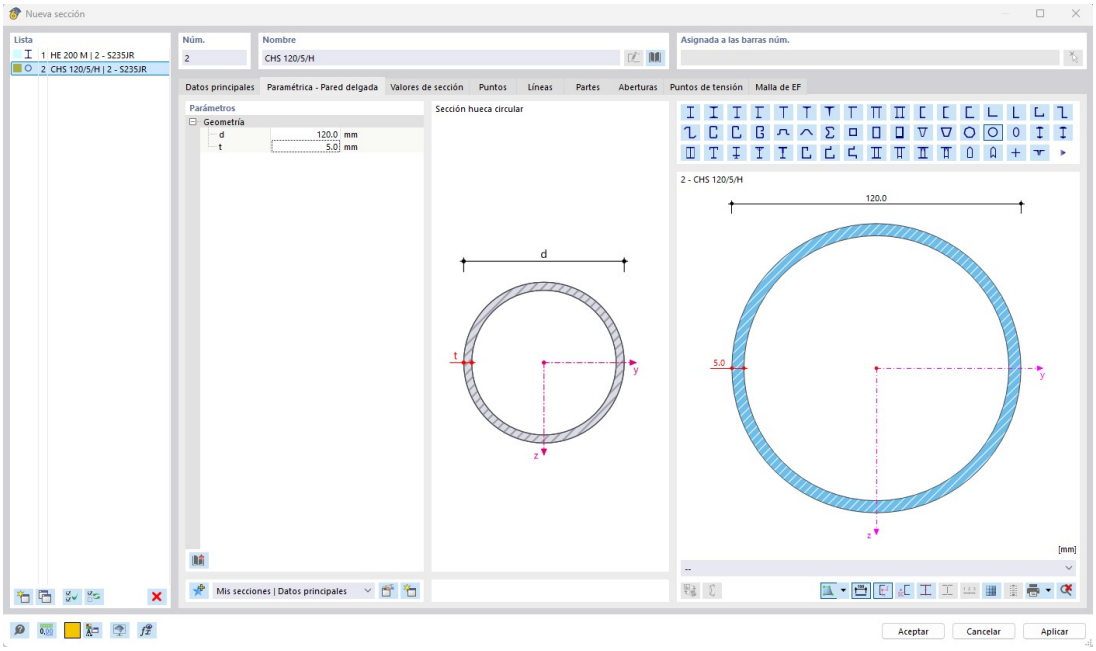


Figura 10.13: Ventana nueva sección paramétrica circular CHS 120/5/H. RFEM 6.

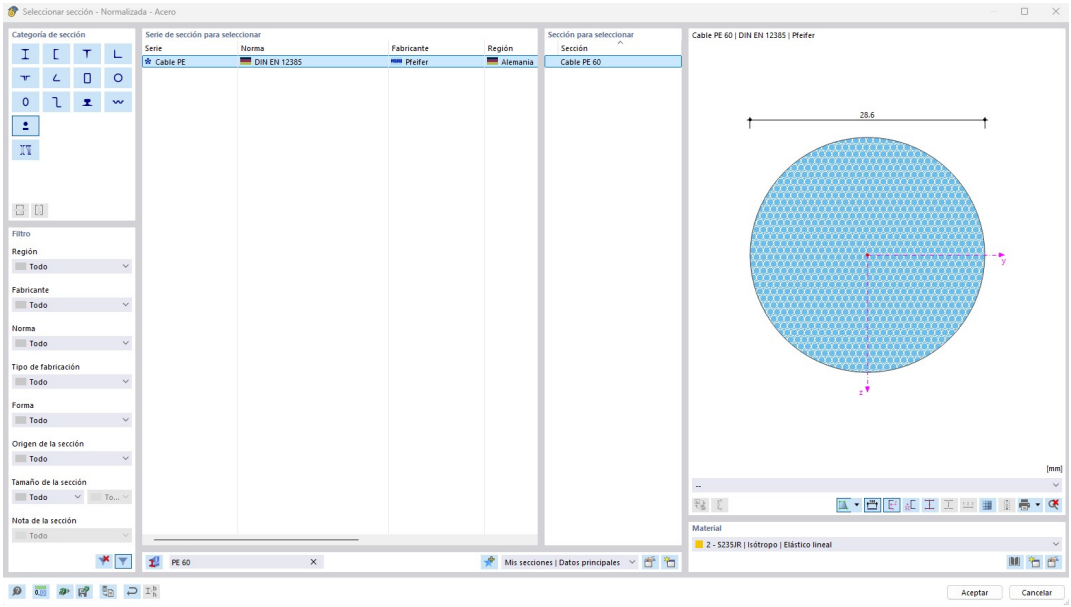


Figura 10.14: Ventana nueva sección normalizada acero cable PE 60. RFEM 6.

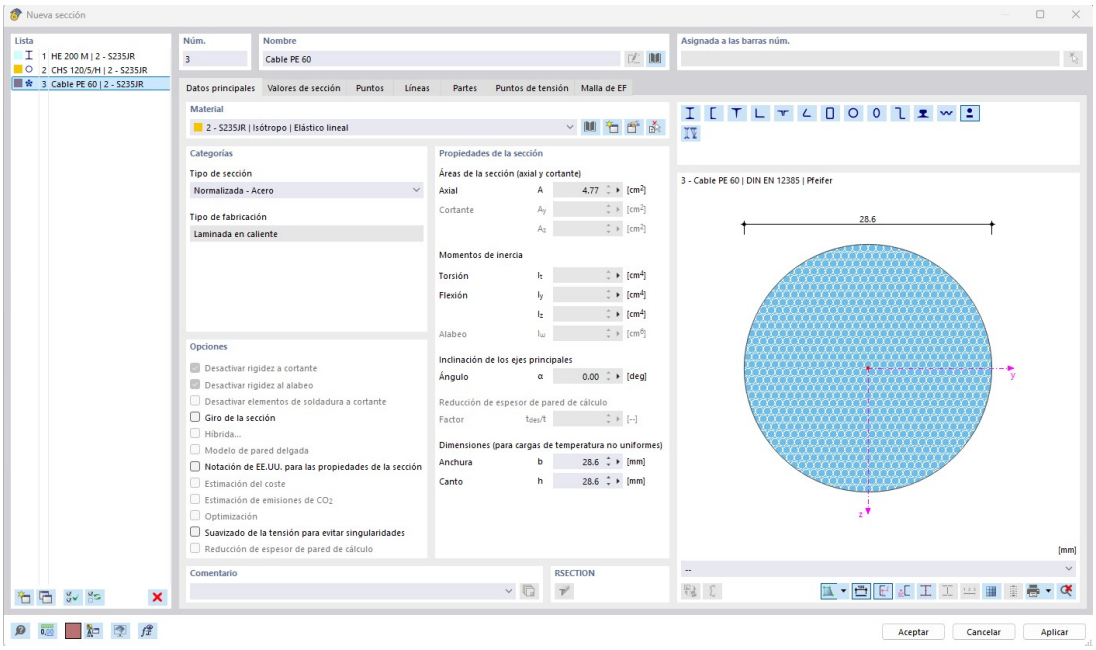


Figura 10.15: Ventana nueva sección actualizada con las 3 secciones. RFEM 6.

3. Modelado en 2D de la forma geométrica con lineas de contorno.

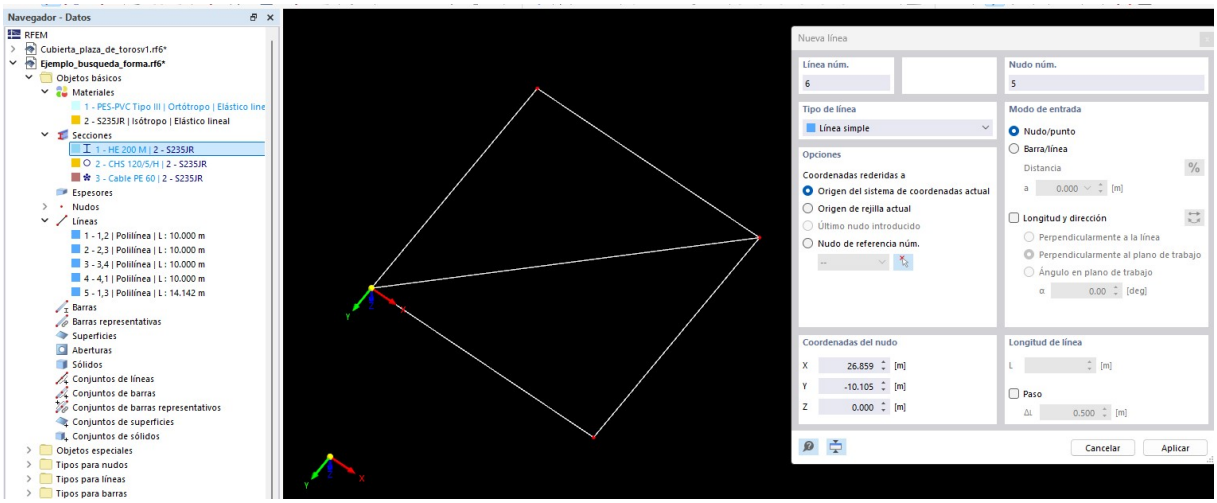


Figura 10.16: Modelado con líneas de contorno la forma geométrica. RFEM 6.

4. Definición de las superficies mediante espesores.

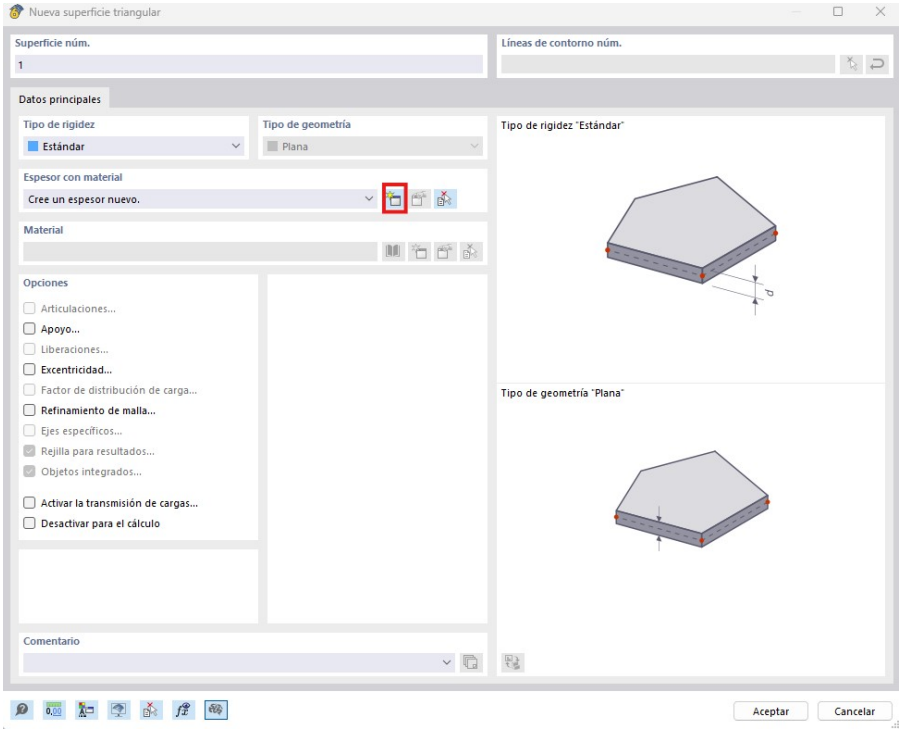


Figura 10.17: Ventana nueva superficie triangular. RFEM 6.

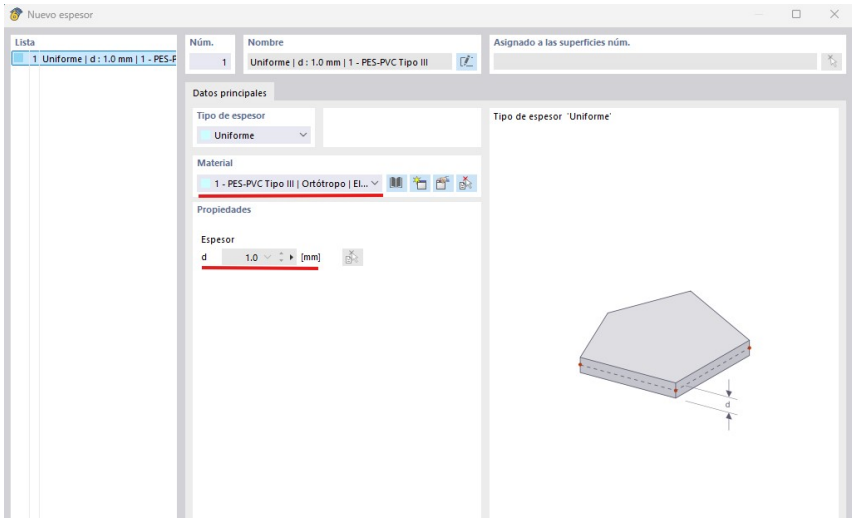


Figura 10.18: Selección del material y el espesor de esa superficie. RFEM 6.

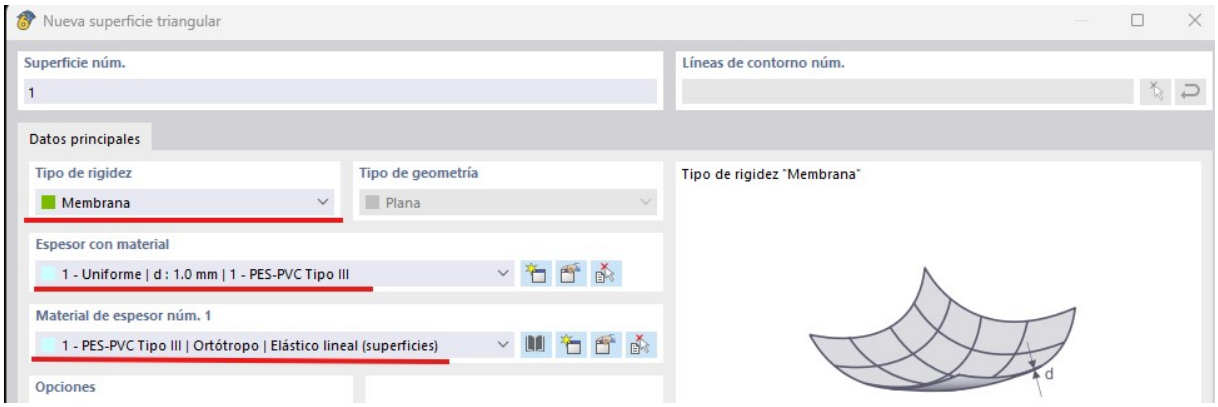


Figura 10.19: Asignación a las superficies del tipo de rigidez membrana. RFEM 6.

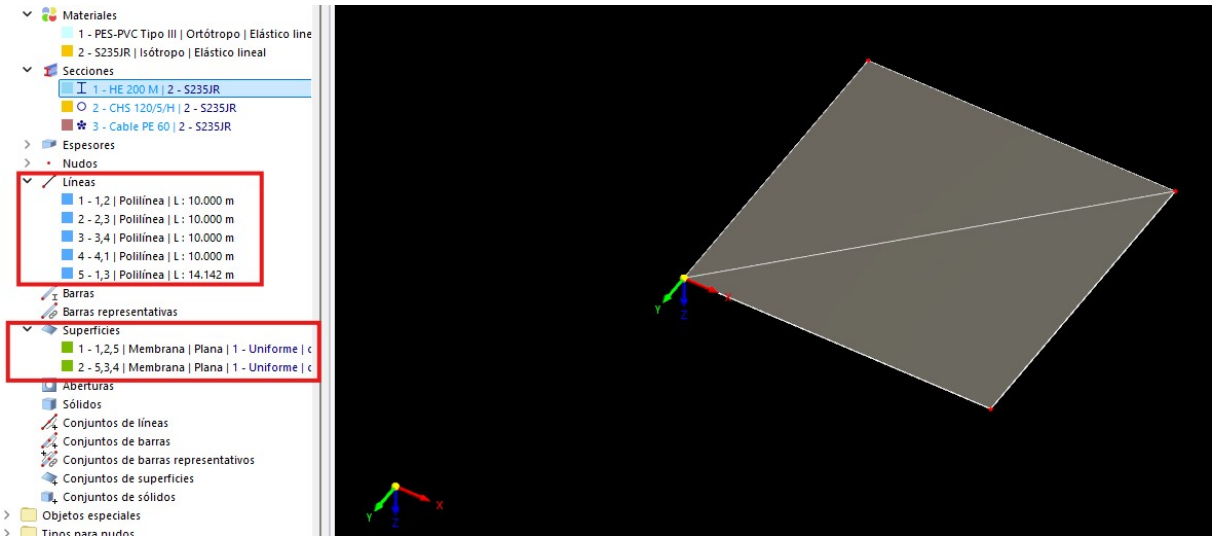


Figura 10.20: Resultado del modelado 2D de la superficie. RFEM 6.

5. Selección de dos de los nudos para elevarlos en altura.

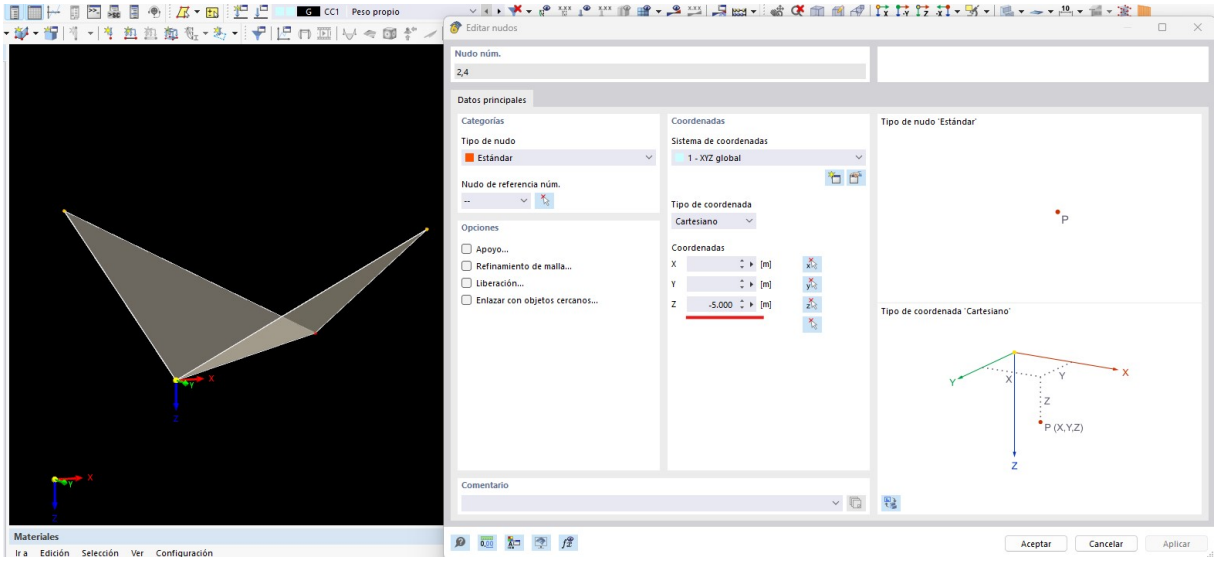


Figura 10.21: Elevación de dos de los nudos a una altura determinada. RFEM 6.

6. Adición de los pilares a estos nudos.

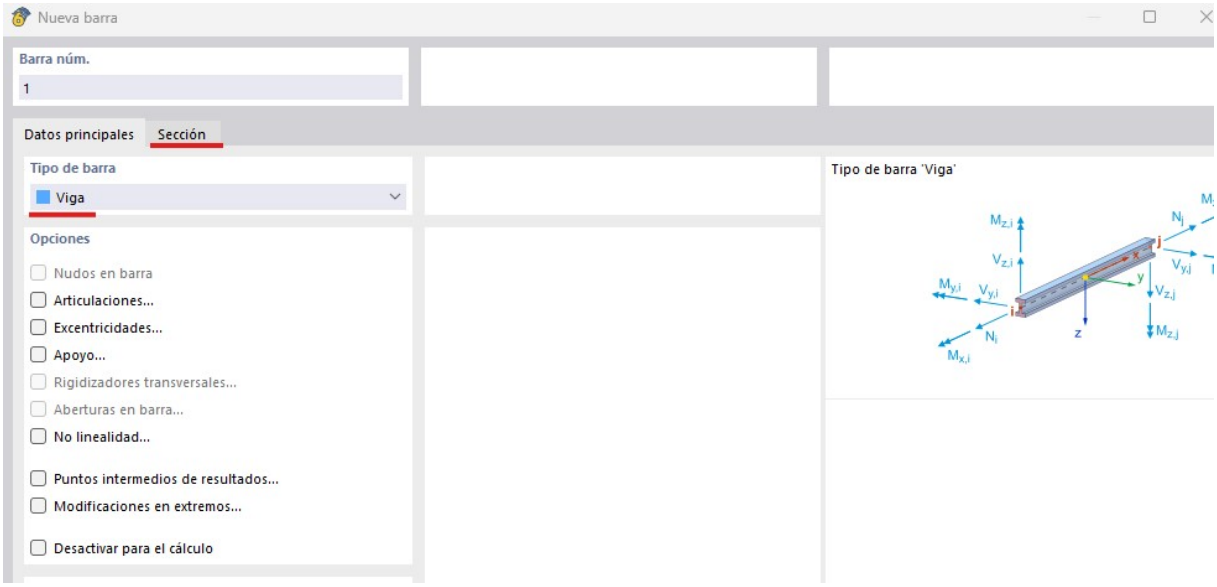


Figura 10.22: Ventana nueva barra, selección tipo viga. RFEM 6.

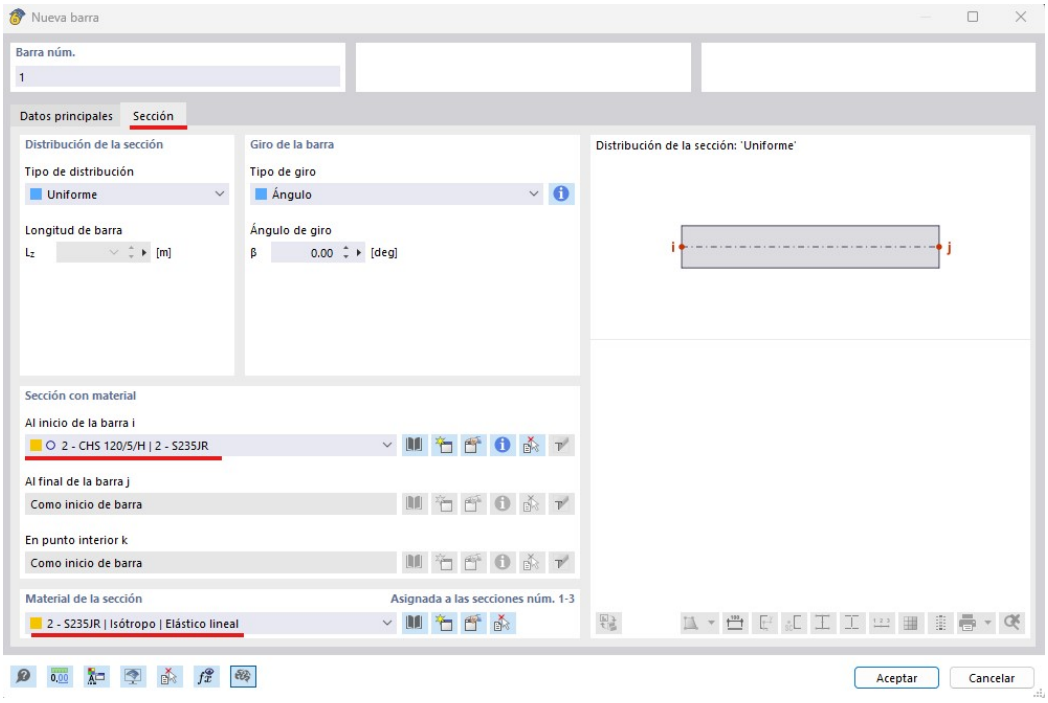


Figura 10.23: Selección del tipo de sección de la nueva barra. RFEM 6.

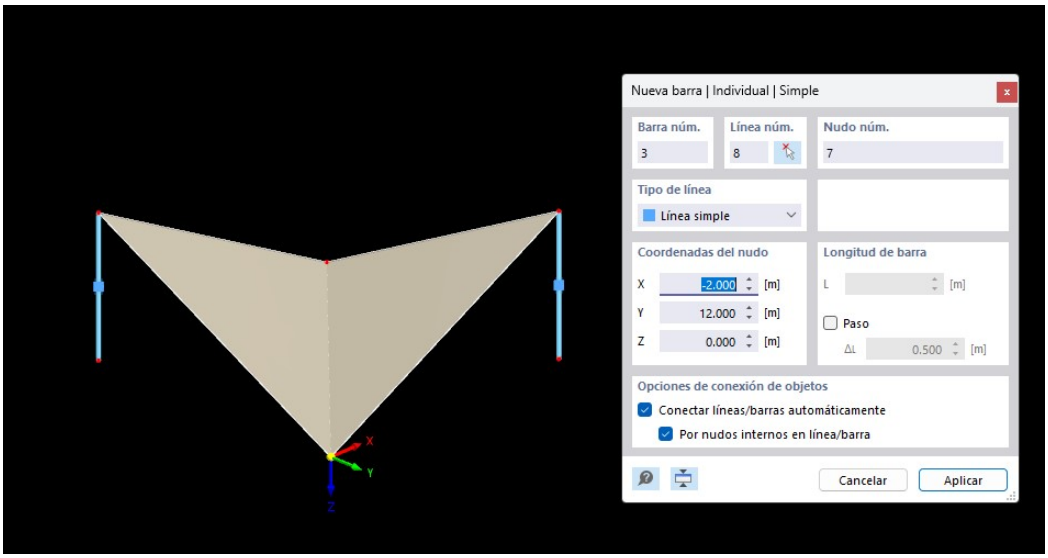


Figura 10.24: Asignación de las barras en su posición. RFEM 6.

7. Seguidamente se posicionan dos nudos junto a cada pilar, en estos irán los apoyos (anclajes) de los cuales saldrán los cables de acero a la parte superior de los pilares.

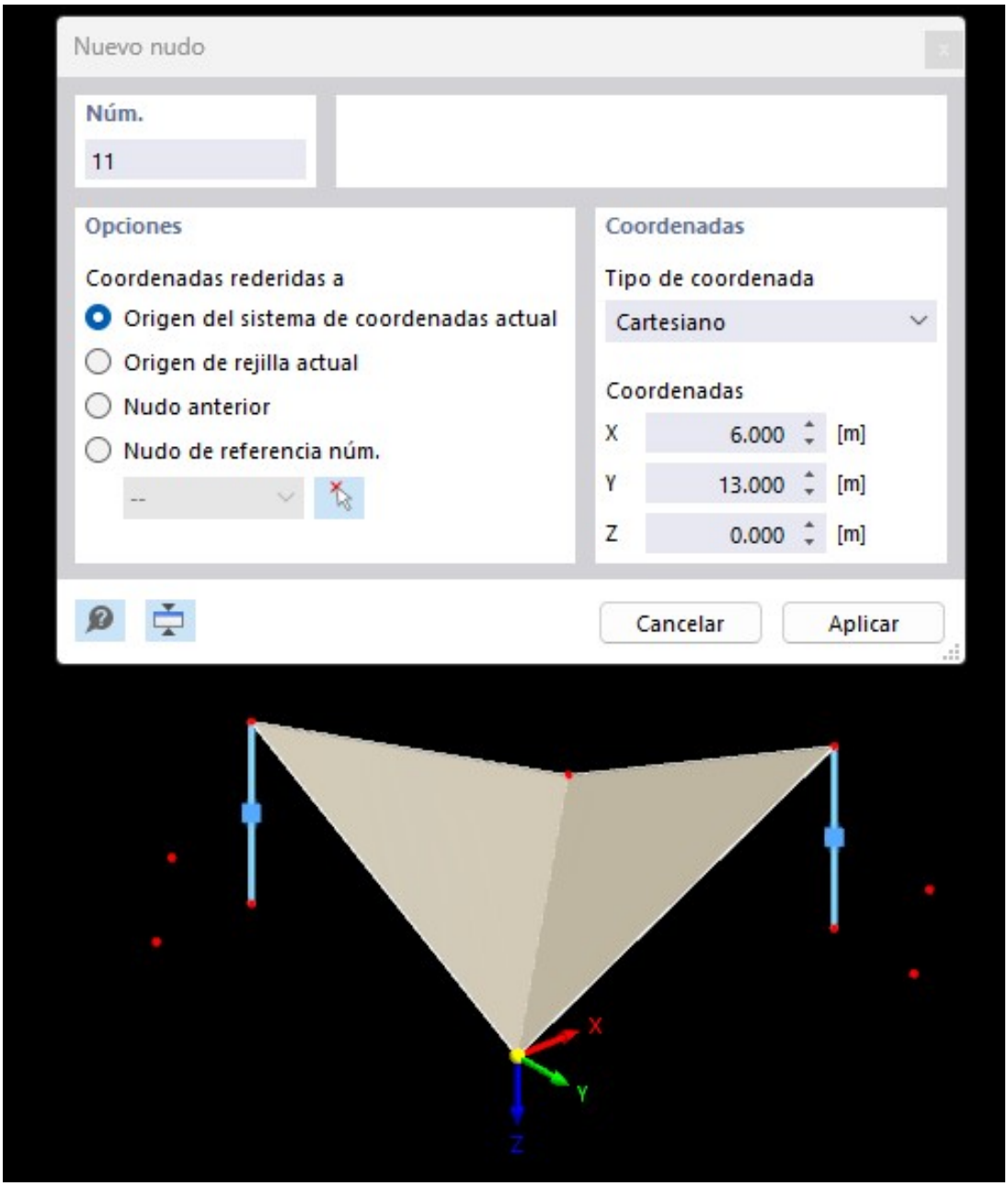


Figura 10.25: Colocación de los nudos donde irán los apoyos y de donde saldrán los cables. RFEM 6.

Figura 10.26: Selección de nueva barra del tipo cable. RFEM 6.

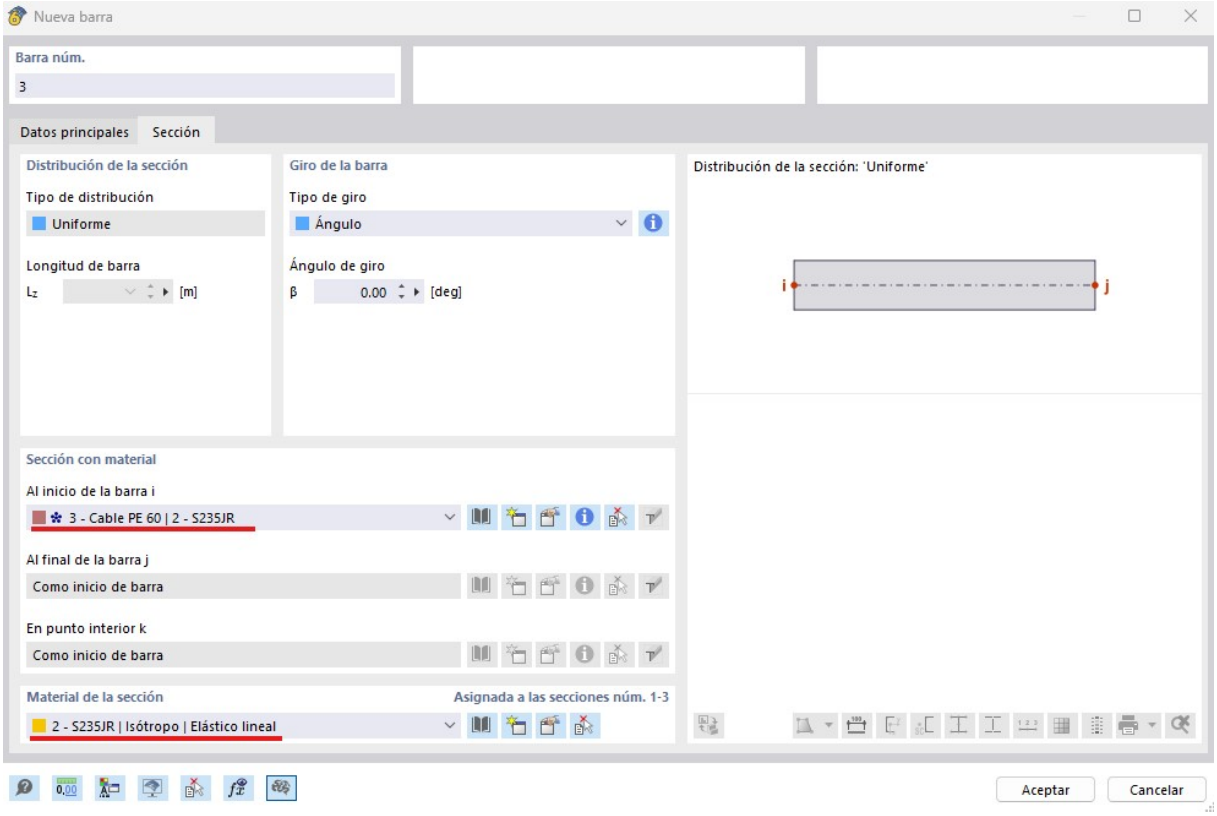


Figura 10.27: Asignación del tipo de sección y el material a la barra. RFEM 6.

8. Convertimos la lineas de contorno en barras de tipo cables.

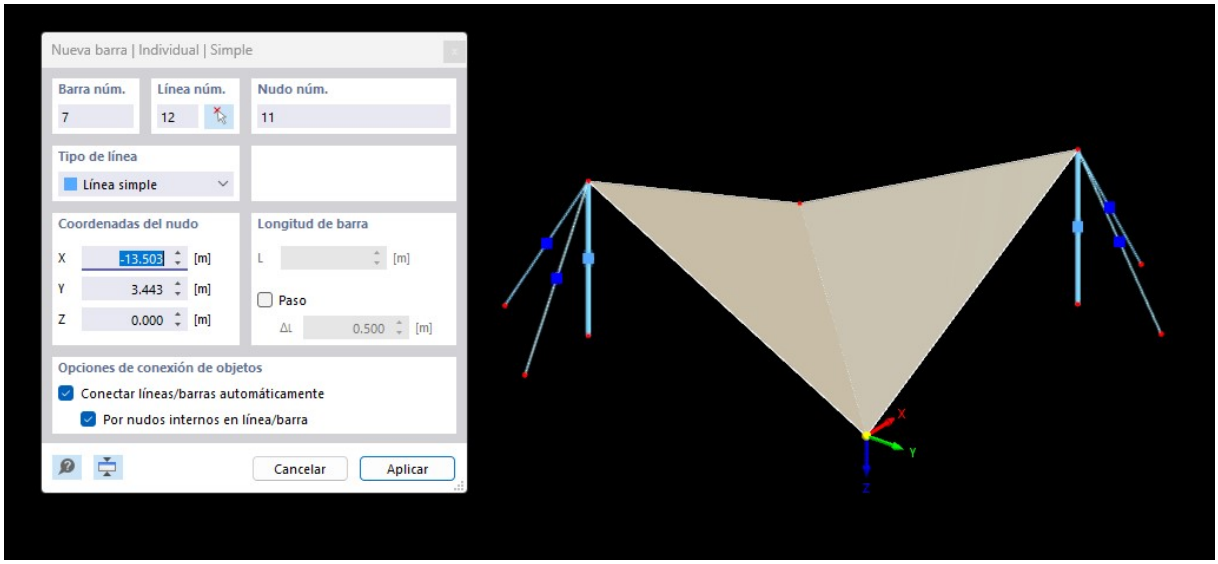


Figura 10.28: Asignación a las lineas de contorno el tipo de barra cable. RFEM 6.

9. Asignamos apoyos a la estructura que impiden el desplazamiento en los 3 ejes, pero no la rotación en estos.

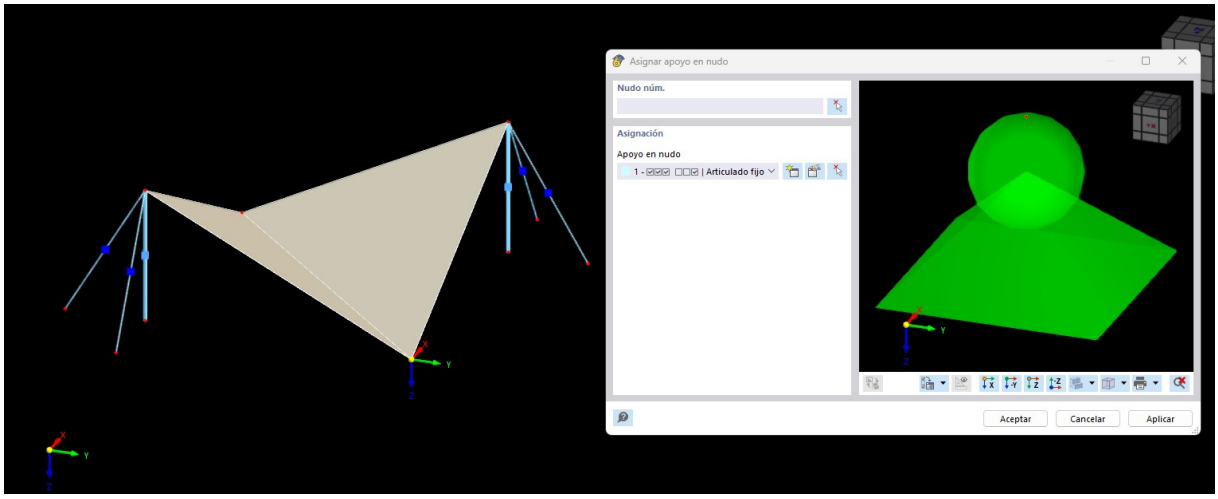


Figura 10.29: creación del tipo de apoyos. RFEM 6.

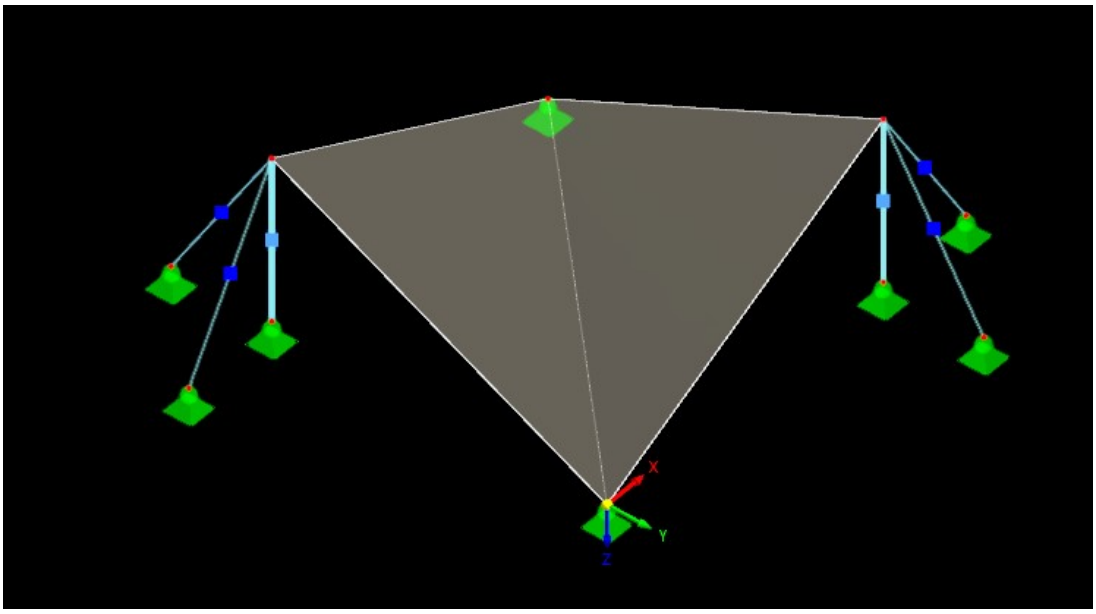


Figura 10.30: Asignación de apoyos y geometría final de la estructura. RFEM 6.

10.6.2 Definición y aplicación de búsqueda de forma

1. Creamos un nuevo caso de carga el cual llamaremos "Búsqueda de forma", tendrá una categoría de acción Pretensado y una configuración del análisis estático de Grandes deformaciones.

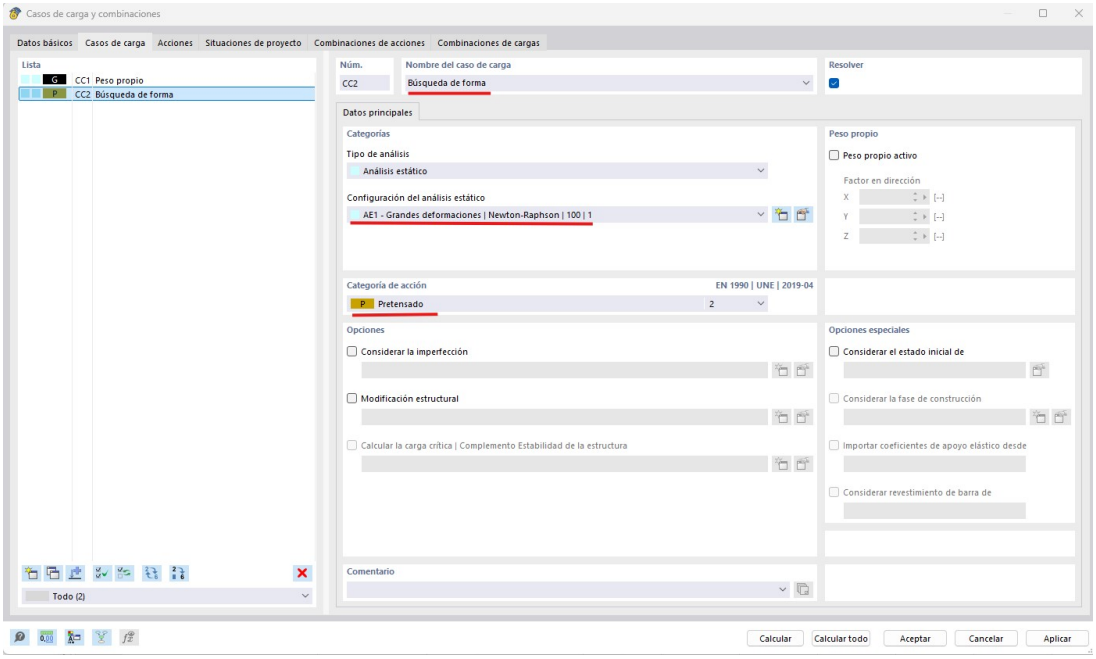


Figura 10.31: Ventana casos de carga y combinaciones. RFEM 6.

2. Asignamos una carga superficial del tipo "búsqueda de forma", con el método de cálculo mencionado anteriormente en el **punto 2.** de la **Sección 10.4**, estándar. Se definirá con un tipo fuerza, de 1 kN/m en ambas direcciones de los ejes.

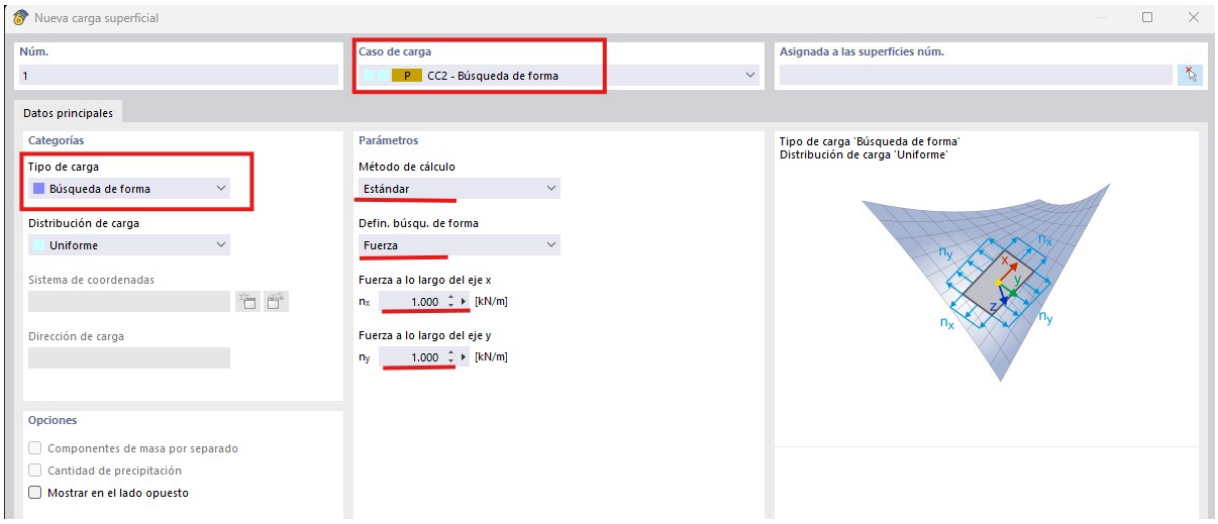


Figura 10.32: Asignación de los parámetros a la carga superficial. RFEM 6.

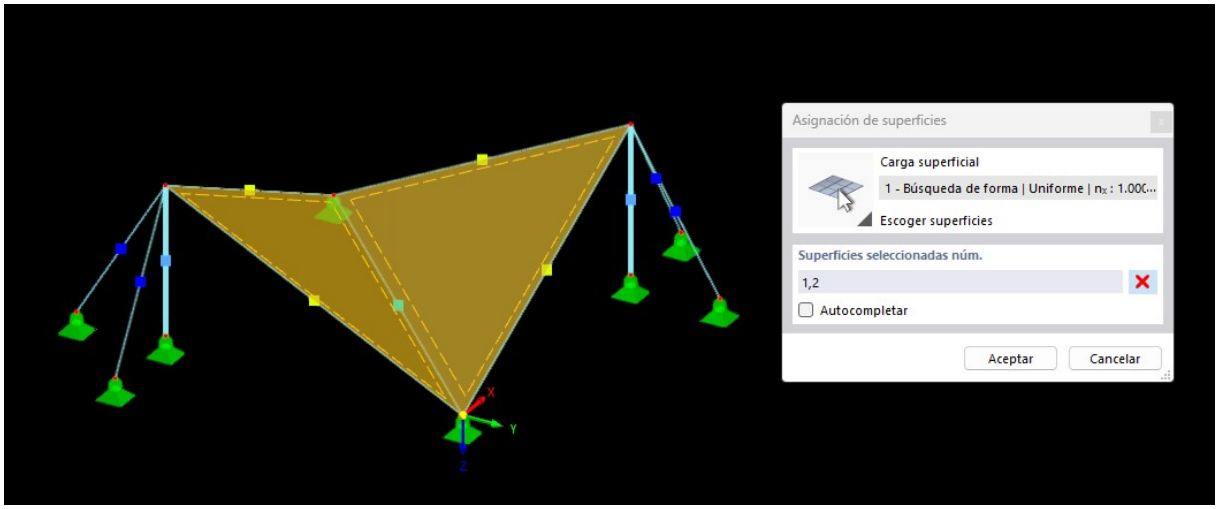


Figura 10.33: Selección de las superficies en las que queremos aplicar dicha carga. RFEM 6.

3. Añadiremos unas cargas lineales de pretensado a los cables que hacen de tensores. Siguiendo el anterior esquema, salvo que la carga que impondremos será de 10 kN en el sentido del eje de esta.

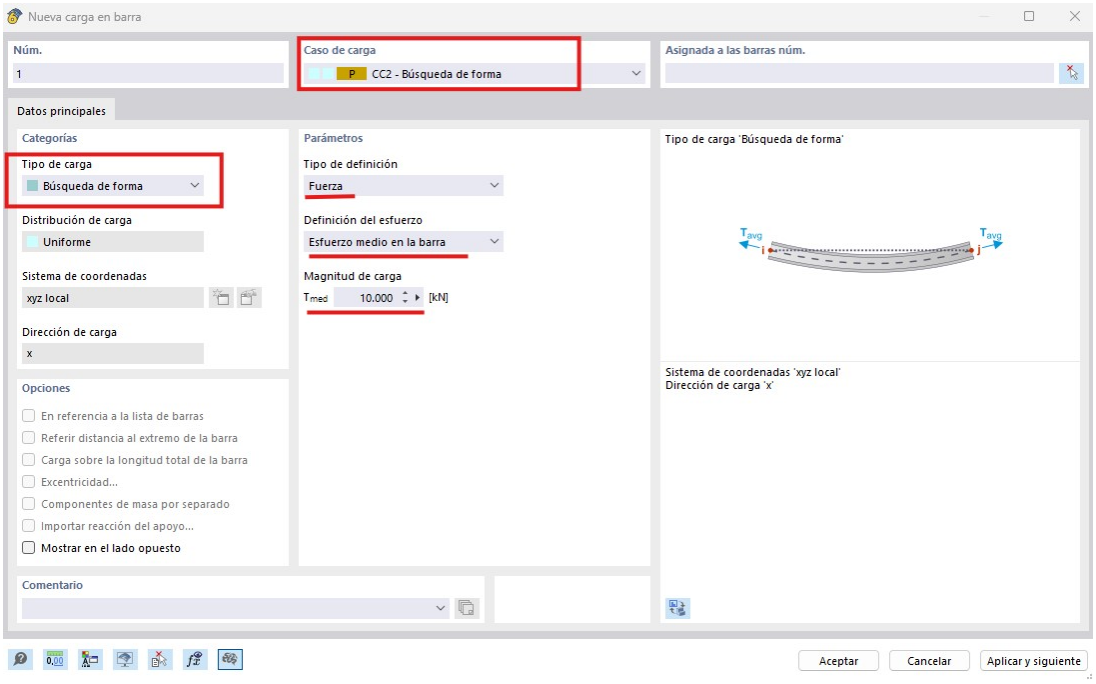


Figura 10.34: Ventana de nueva carga en barra. RFEM 6.

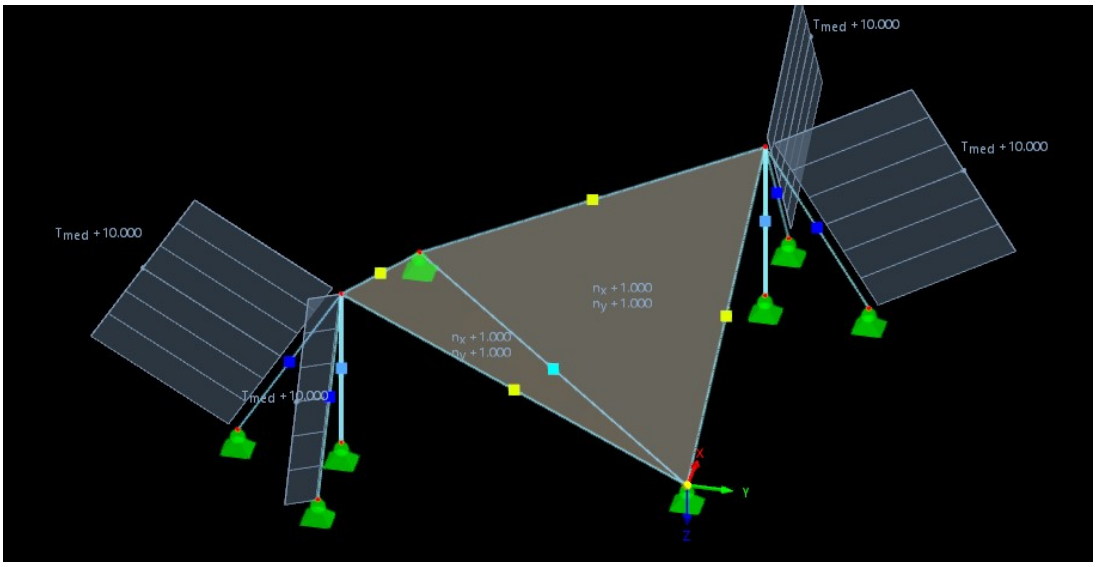


Figura 10.35: Asignación de las cargas a los cables. RFEM 6.

4. Una vez terminado de imponer estas condiciones, calculamos.

5. Como podemos observar, partimos de una forma inicial propuesta y el programa nos ofrece una solución óptima no muy alejada de esta, pero que cumple con los requisitos impuestos y garantiza la estabilidad geométrica del modelo, lo que no implica que sus elementos cumplan con un cálculo de acero, análisis de tensión-deformación, etc. Este ejemplo se ha limitado tan solo a la muestra del funcionamiento del complemento de "búsqueda de forma".

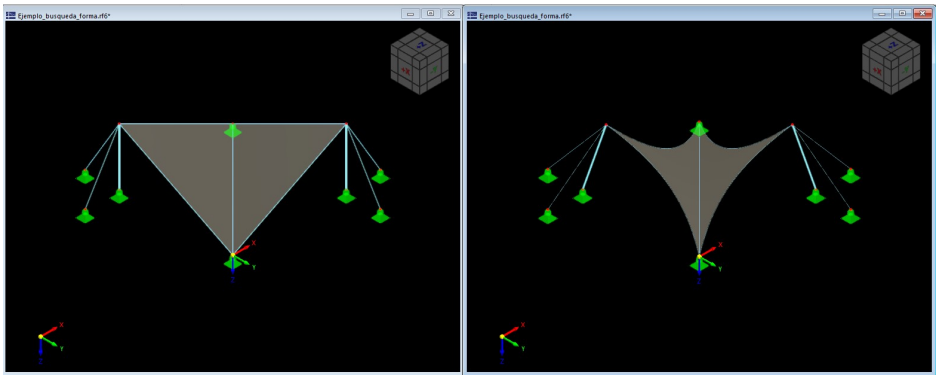


Figura 10.36: A izquierda forma geométrica creada, a derecha modelo propuesto. RFEM 6.

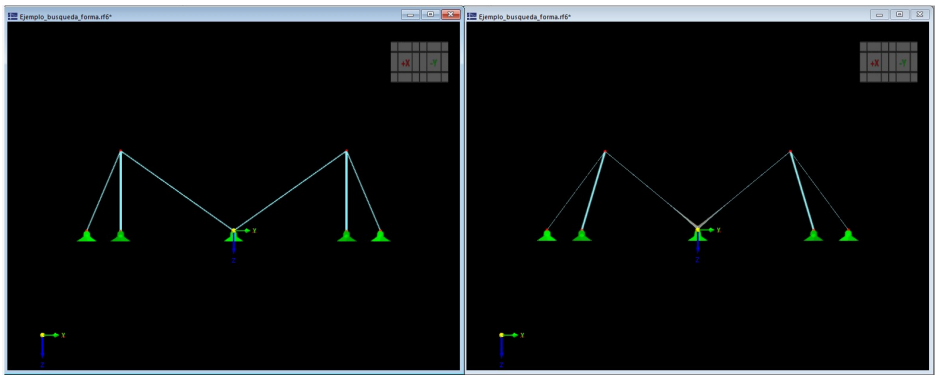


Figura 10.37: A izquierda forma geométrica creada, a derecha modelo propuesto. RFEM 6

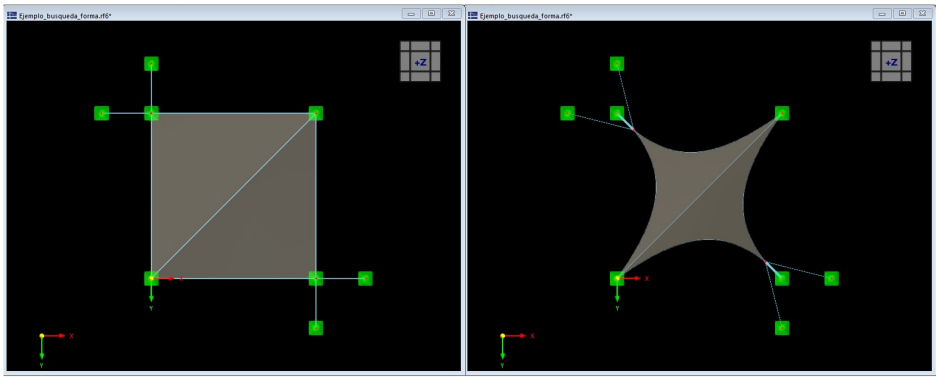


Figura 10.38: A izquierda forma geométrica creada, a derecha modelo propuesto. RFEM 6

11 Cálculo de la estructura

El diseño estructural de la cubierta de cables y membrana requiere un análisis avanzado debido a la naturaleza flexible y deformable de sus elementos. A diferencia de estructuras convencionales con elementos rígidos, las cubiertas tensadas experimentan grandes desplazamientos y efectos geométricos significativos, lo que hace necesario un cálculo en segundo orden (no lineal) en lugar de uno en primer orden (lineal).

Para llevar a cabo este análisis, se utilizará el software RFEM6 de Dlubal. Una herramienta especializada en el modelado y cálculo de estructuras complejas, incluyendo sistemas de cables y membranas.

Se ha descartado el cálculo en **primer orden** ya mencionado anteriormente debido a las limitaciones de este. Este cálculo asume pequeñas deformaciones y que la geometría de la estructura no cambia significativamente bajo cargas externas. Sin embargo, en cubiertas ligeras como la propuesta, esta suposición no es válida porque:

- **Los cables y lonas no pueden resistir compresión**, lo que provoca cambios significativos en la geometría bajo carga.
- **Los efectos geométricos predominan**, especialmente frente a cargas de viento, que pueden inducir grandes desplazamientos y cambios en la forma de la estructura..
- **La estabilidad estructural depende de la forma tensada**, lo que hace que la rigidez no sea constante y varíe con la carga aplicada.

El cálculo en **segundo orden**, considera la geometría deformada y permite un modelado mas realista de la cubierta. Sus ventajas son:

- **Simulación precisa de la geometría tensada de la cubierta**, teniendo en cuenta el pretensado de los cables y membranas para evaluar su influencia en la estabilidad.
- **Evaluación de la estabilidad estructural**, RFEM6 puede detectar la posible pérdida de tensión e algunos cables o lonas y evaluar el riesgo de inestabilidad.
- **Distribución realista de esfuerzos**, puesto que el programa de cálculo ya mencionado permite un cálculo iterativo, considerando la redistribución de fuerzas en la estructura a medida que cambian las condiciones de carga.

Una vez aclarado el tipo de cálculo que se va seguir, se procederá a la elaboración de la cubierta siguiendo los conceptos explicados en el **apartado 8.3** y **Capítulo 10** de este documento.

Se obviaran ciertos pasos ya realizados anteriormente como la selección de materiales, asignación de cargas y ventanas de acciones específicas las cuales se complementaran en el anexo manual de RFEM 6, **sección 15**.

11.1 Creación de la cubierta

Para la elaboración de esta, como se ha mencionado anteriormente comenzaremos aplicando lo explicado en el **apartado 8.3**, para ello partiremos de una viga empotrada de longitud 34 m, la cual estará sometida a una carga puntual de 10 kN en su extremo opuesto al empotramiento. En la siguientes imágenes se muestran los esfuerzos que esta carga somete a dicha sección.

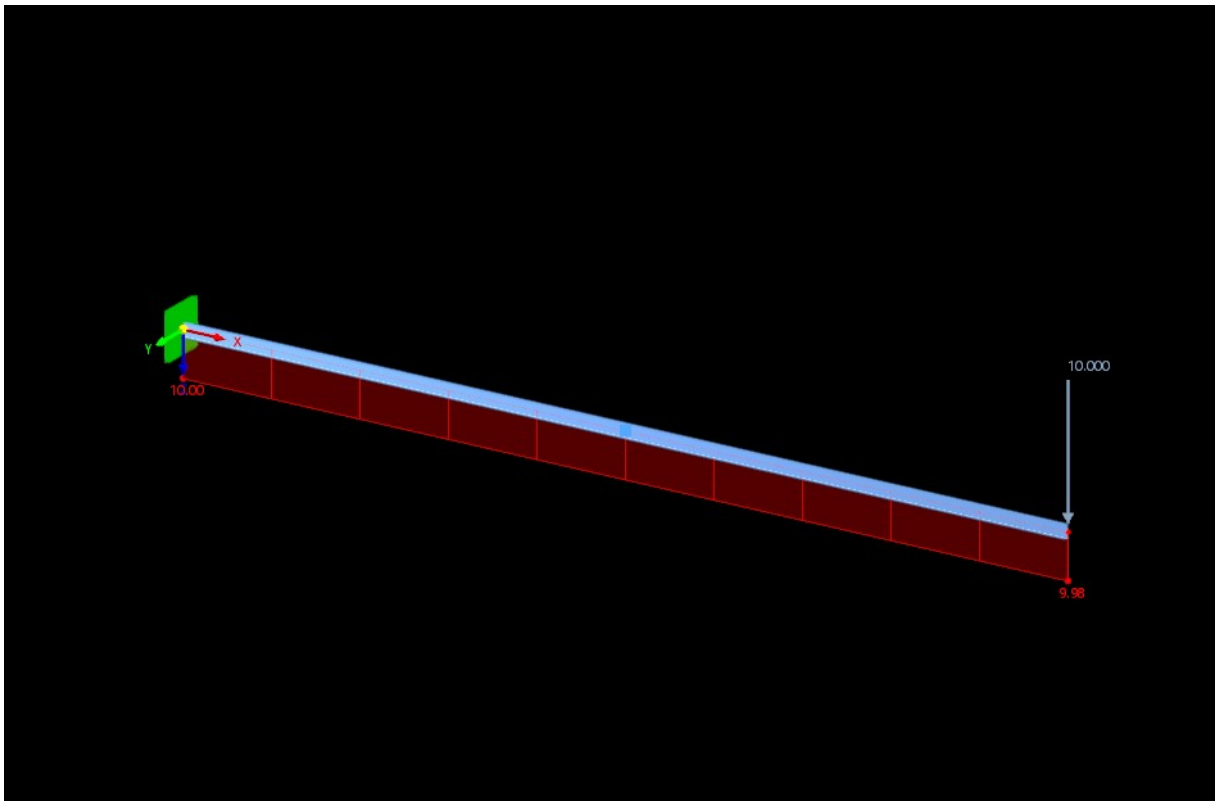


Figura 11.1: Esfuerzo cortante Vz (kN). RHEM 6

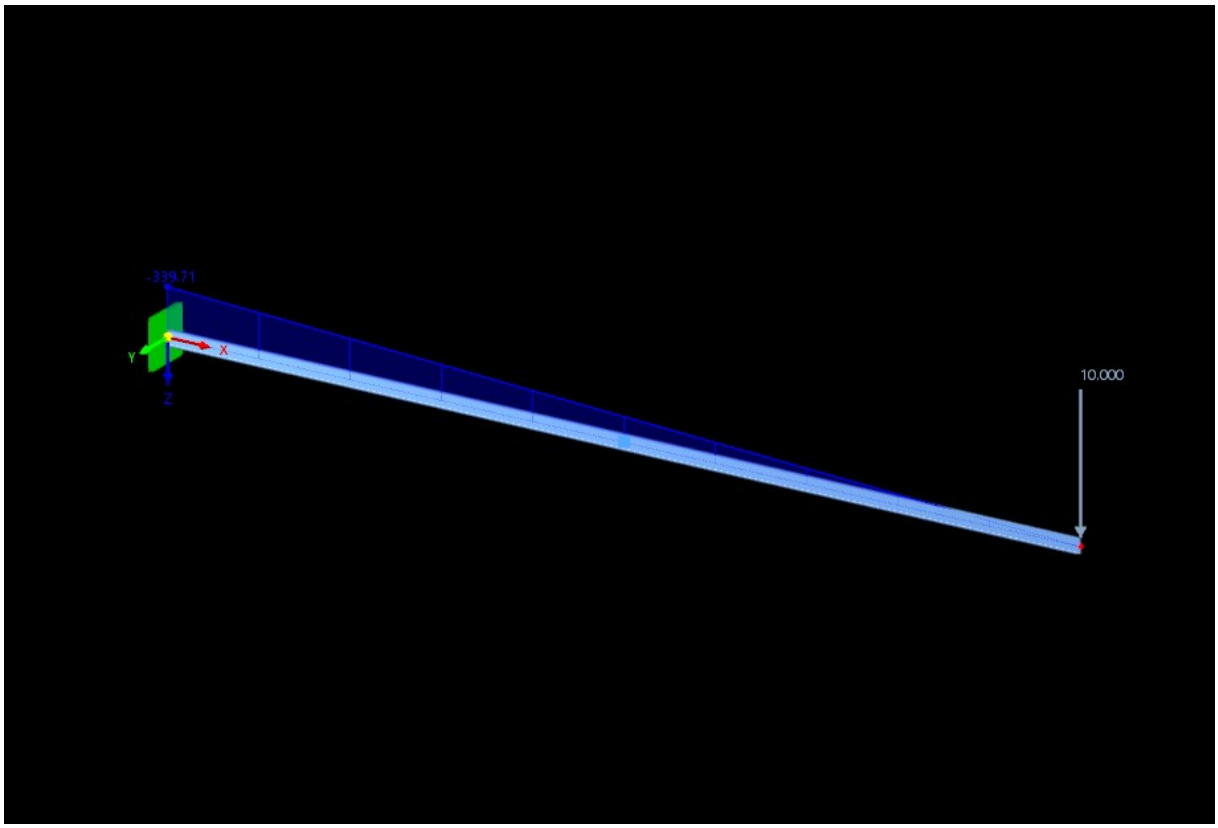


Figura 11.2: Momento flector My (kN/m). RFEM 6

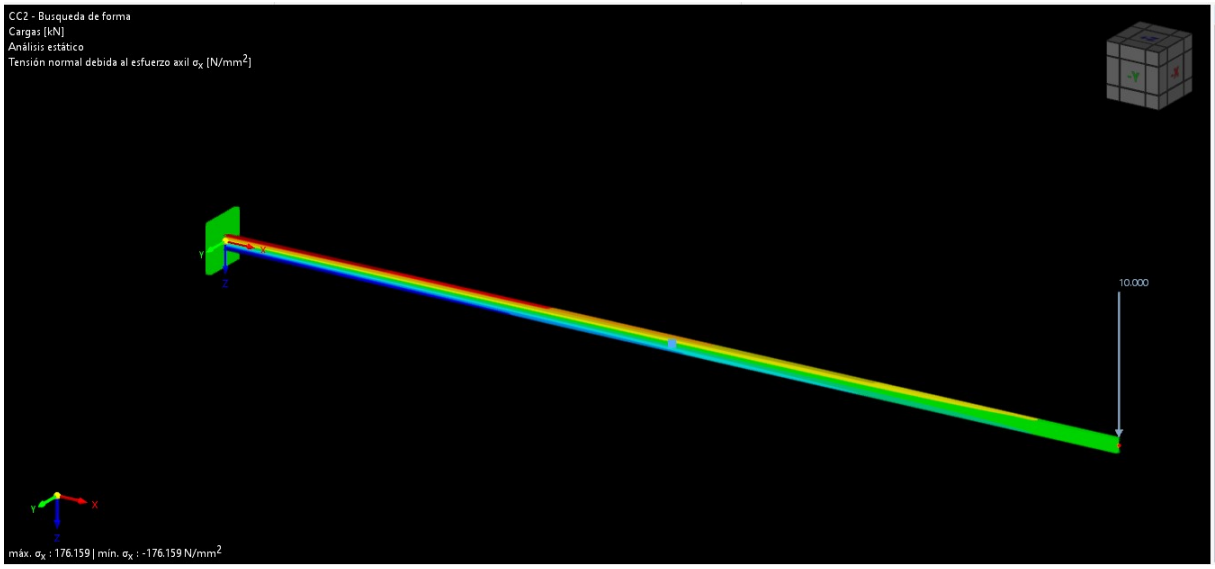


Figura 11.3: Distribución de tensiones σ_x (N/mm^2) en la dirección x de la sección. RFEM 6

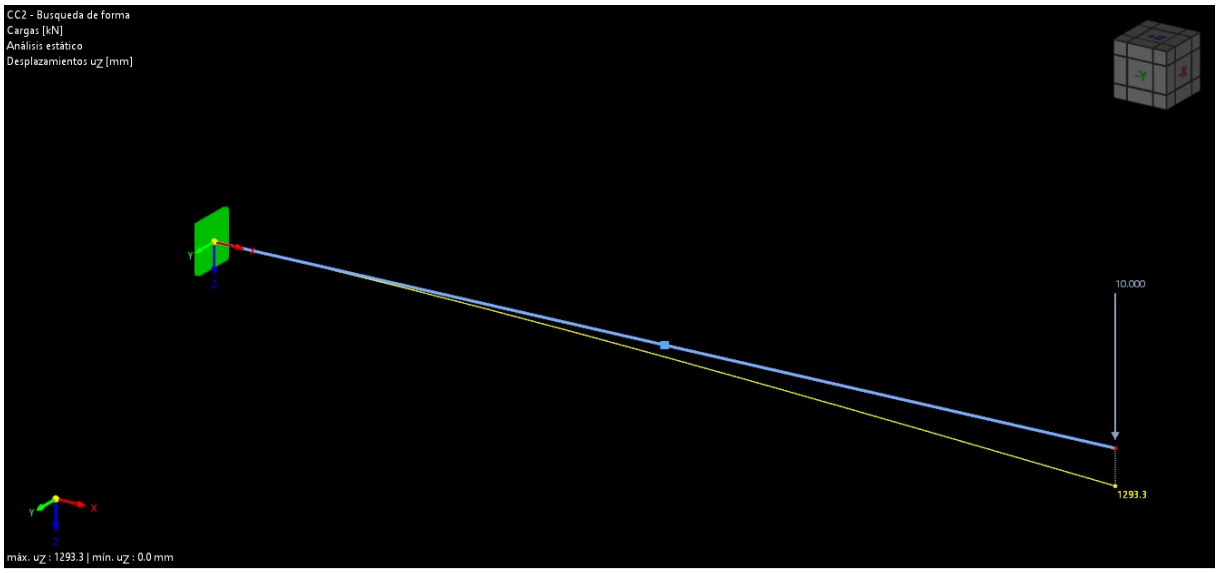


Figura 11.4: Flecha producida por la carga y peso propio, 1300 mm. RFEM 6

Obviando que se trata de una sección en voladizo extremadamente grande y que no tendría sentido proyectar algo así pues como podemos ver no estaríamos aprovechando el material de manera óptima. Se ha considerado que tenga esta longitud para facilitar el modelado de la estructura, pues dicha longitud es la diferencia de diámetros exterior (diámetro desde el muro de fachada) e interior (diámetro del anillo colector) de cable.

Con dichas imágenes se busca ilustrar y aclarar de forma más contundente el funcionamiento de la estructura ya expuesto anteriormente en el **apartado 8.3**, pues en esta sección seguiremos paso a paso dicho proceso.

Como se puede observar en la **figura 11.3** la distribución de tensiones como era de esperar es mayor en el arranque, traicionando en el ala superior y comprimiendo el ala inferior, esta tensión va disminuyendo según nos acercamos al punto de aplicación de la carga.

Seguidamente, vamos a recoger el momento producido por la carga en el empotramiento mediante un brazo de palanca.

Cambiamos el empotramiento por un apoyo que tan solo permite la rotación sobre el eje y, a una distancia de 14 m de este,sobre la sección implementamos una barra de longitud 5 m perpendicularmente a esta, apoyada en sus extremos sobre un apoyo que impide su desplazamiento en la dirección x. Tal y como muestra la siguiente imagen (se ha dispuesto en modelo alámbrico para una visualización más clara).

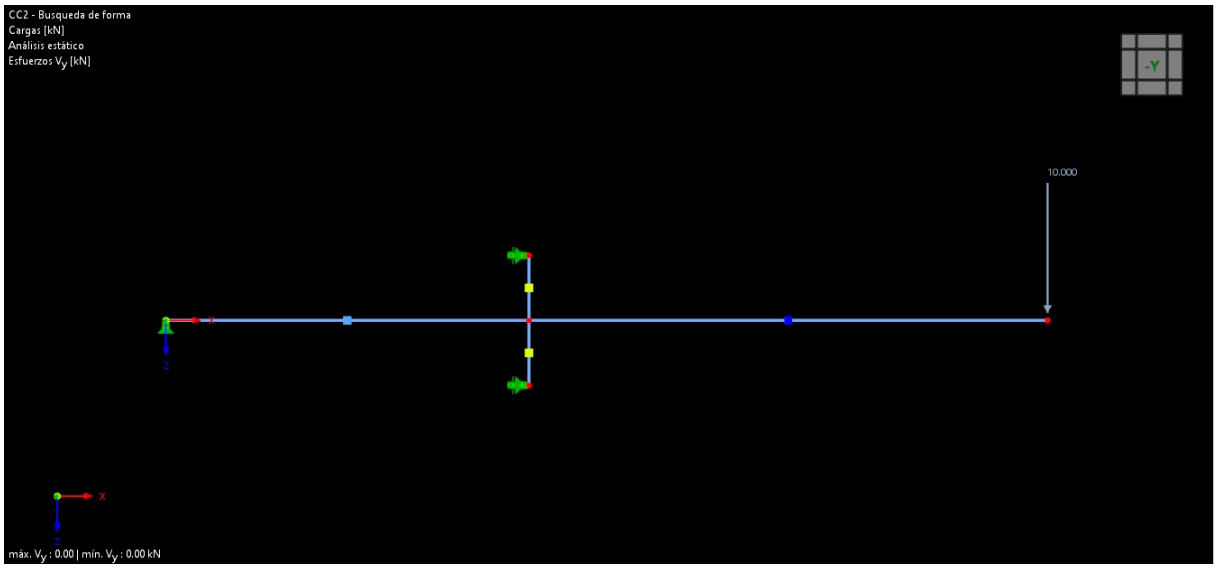


Figura 11.5: Adición del brazo de palanca. RFEM 6

Veamos a continuación como afectan los cambios realizados en el cálculo de esfuerzos.

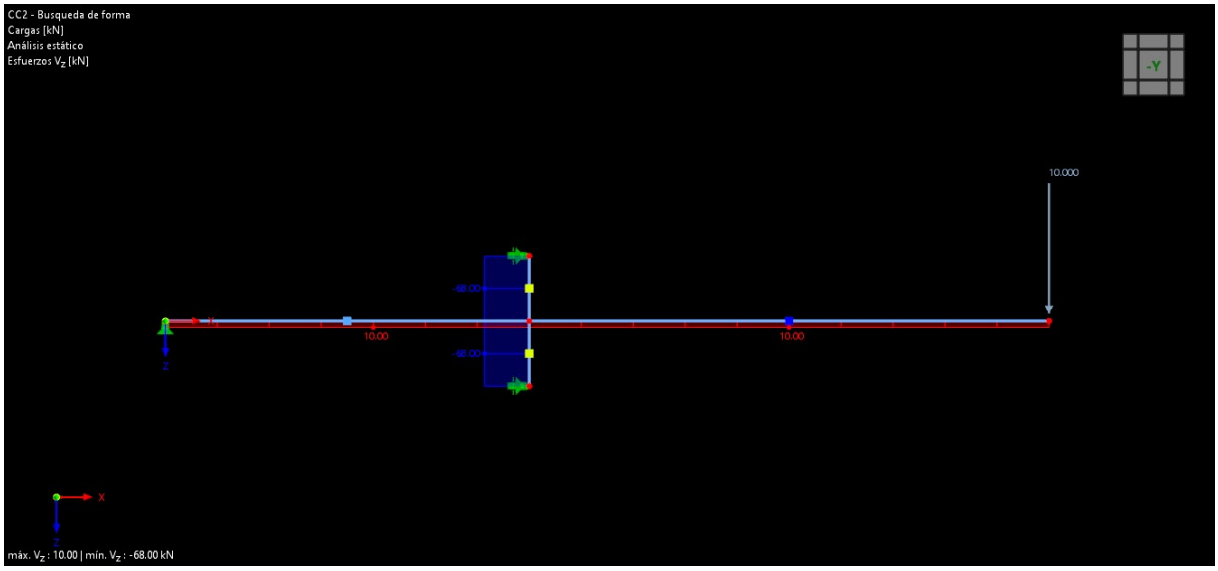


Figura 11.6: Esfuerzo cortante Vz (kN). RFEM 6

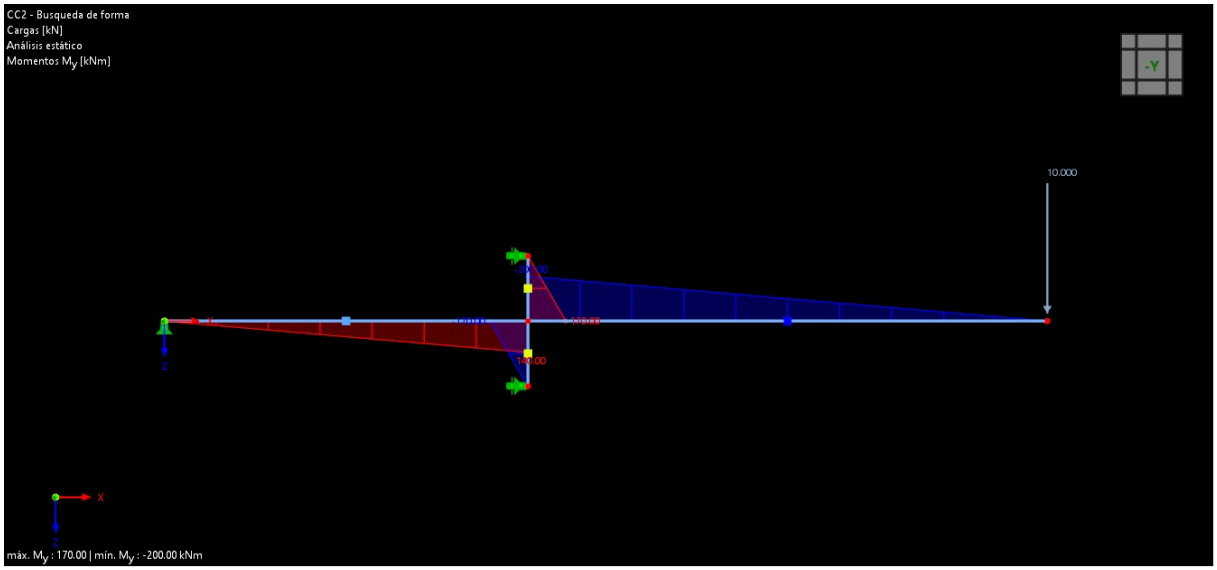


Figura 11.7: Momento flector My (kN·m). RFEM 6

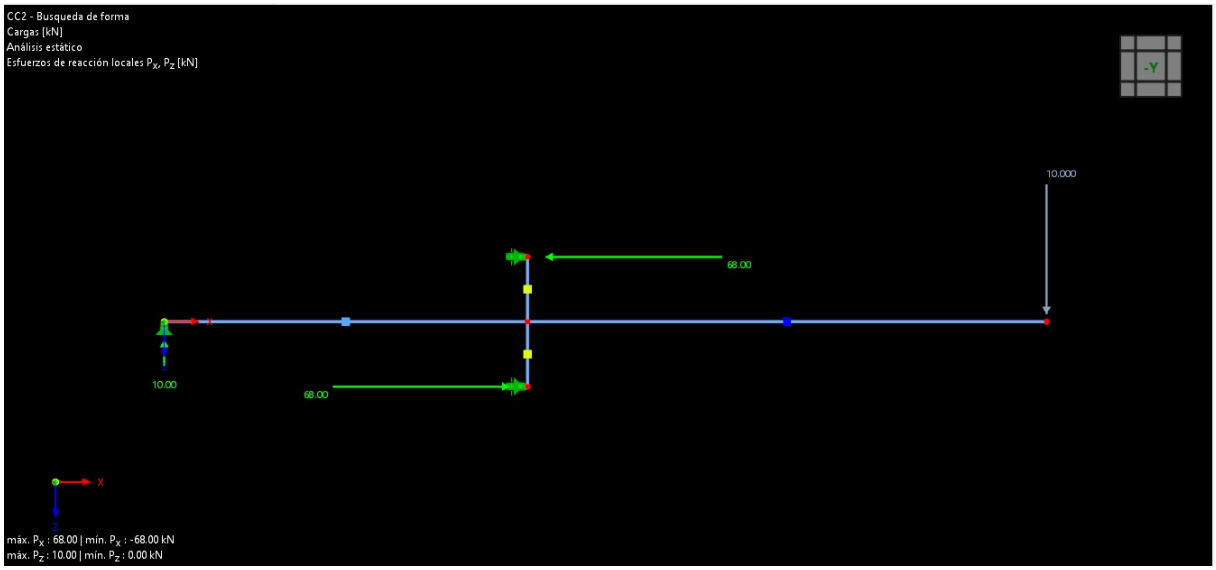


Figura 11.8: Reacciones sobre los apoyos (kN). RFEM 6

Como podemos ver en la **imagen 11.6** el diagrama de esfuerzo cortante Vz sigue siendo continuo a lo largo de toda la sección, sin embargo en la **figura 11.7** el My ya no es máximo en el extremo, sino en la posición en la que se ha añadido esa nueva barra biapoyada. Si nos fijamos en la **imagen 11.16** podemos ver más claro aun como el momento se reparte en el brazo de palanca.

Este momento flector My lo podemos recoger mediante un sistema de tipo cercha mediante dos secciones articuladas tanto en el principio como en el final de estas. Impediremos el desplazamiento en y mediante un apoyo en el extremo donde se unen estas dos secciones.

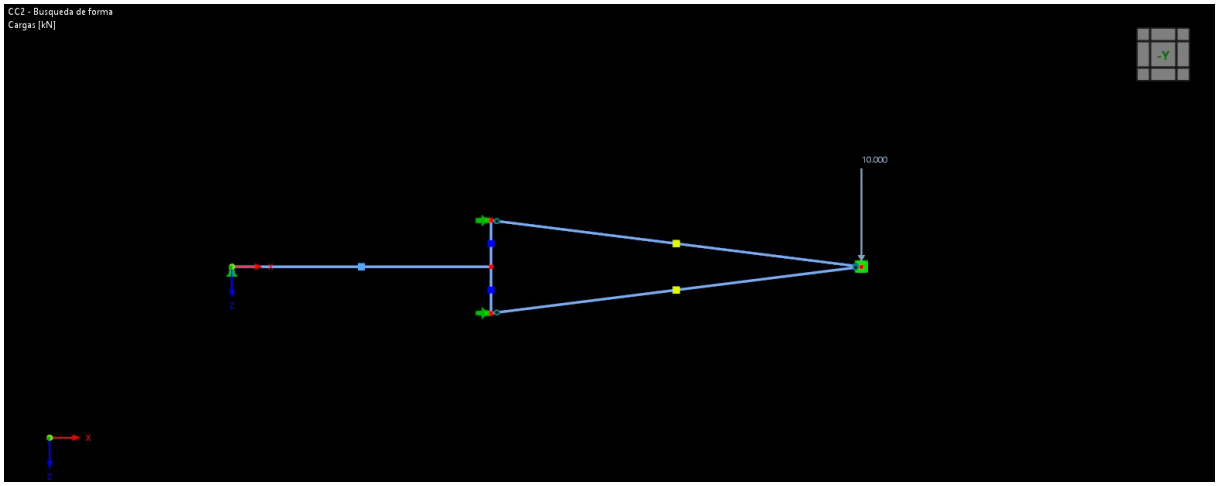


Figura 11.9: Geometría descrita. RFEM 6

Seguidamente calculamos y obtenemos los siguientes diagramas de esfuerzos.

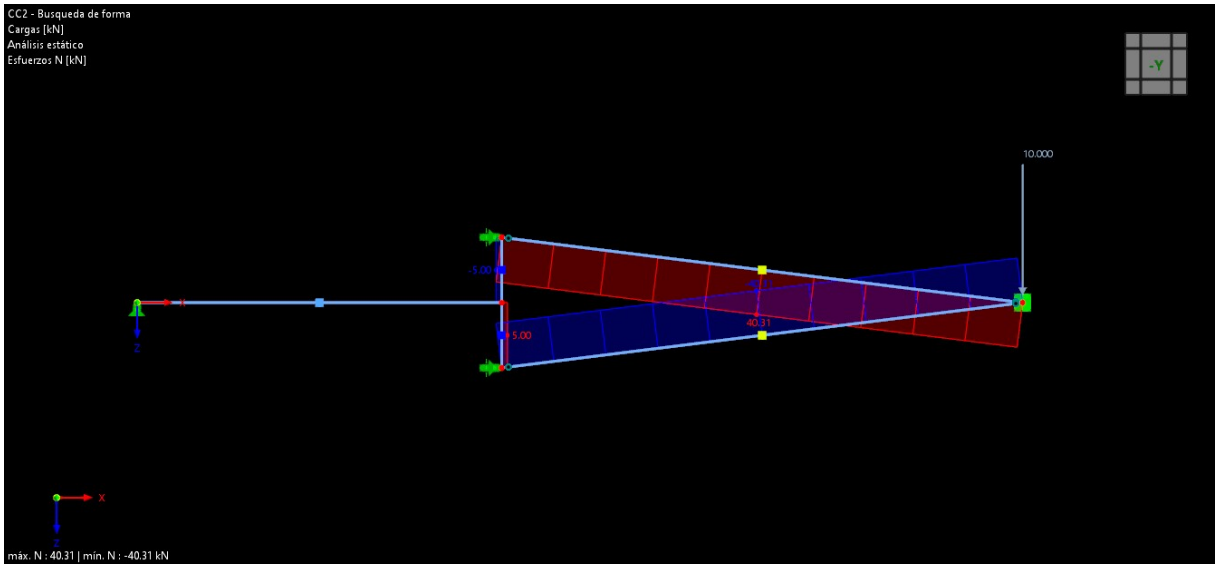


Figura 11.10: Diagramas de esfuerzos axiles N (kN). RFEM 6

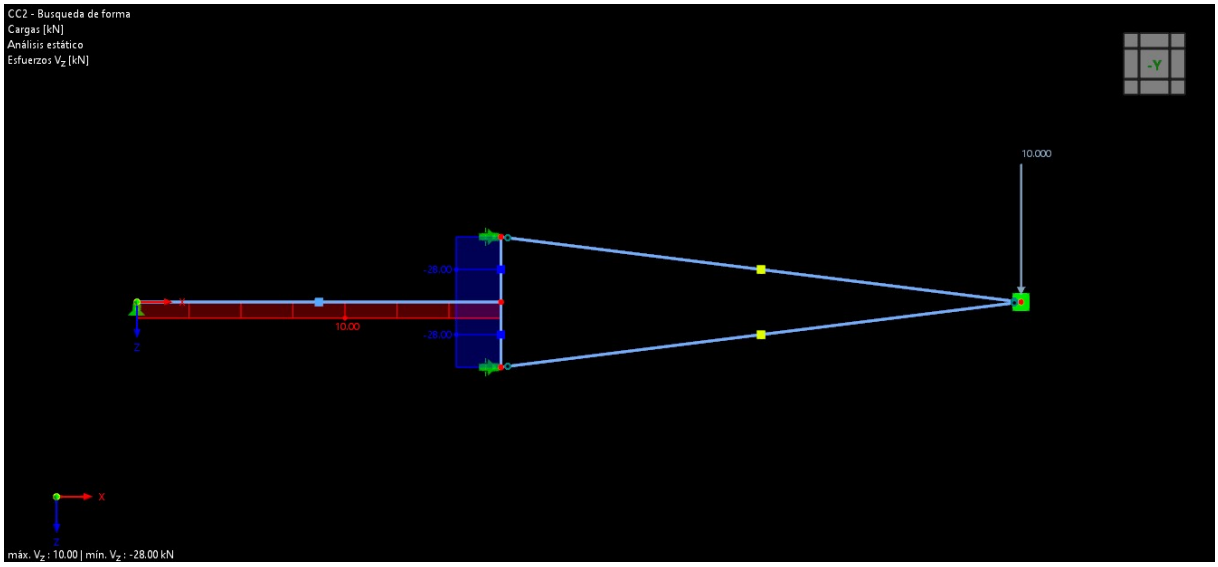


Figura 11.11: Diagramas de esfuerzos cortantes Vz (kN). RFEM 6

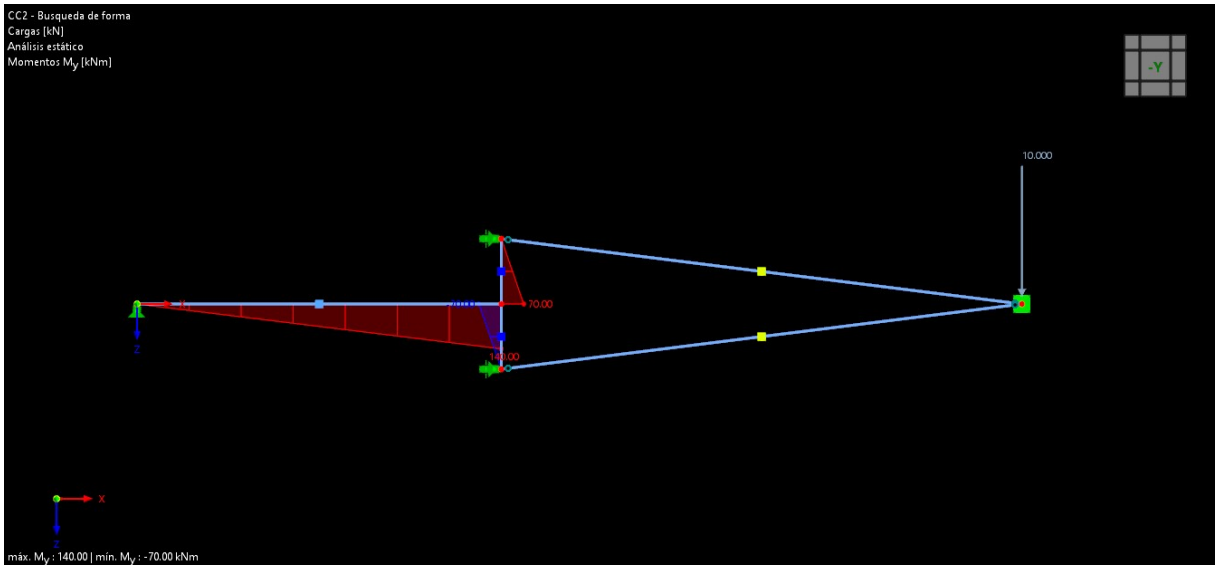


Figura 11.12: Diagramas de momentos My (kN·m). RFEM 6

Si comparamos las **figuras 11.10 y 11.12**, vemos claramente que lo que antes era una barra flectada, al sustituirla por estas dos secciones, transforman ese My en esfuerzos axiles, comprimiendo en este caso la barra inferior y traccionando la superior. A su vez, el cortante Vz **(imagen 11.11)** en la barra vertical biapoyada también se reduce si lo comparamos con la **figura 11.6**, esto es debido a la disposición de estas dos barras en ángulo.

De igual manera procederemos a sustituir el resto de la barra por otras dos dispuestas de esta forma.

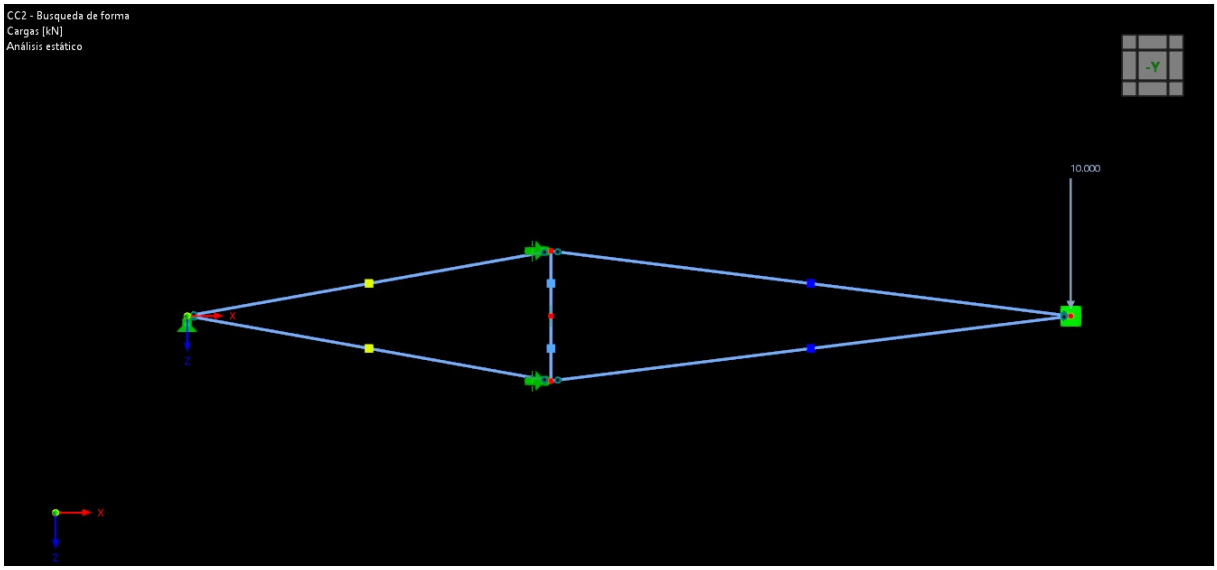


Figura 11.13: Geometría descrita. RFEM 6

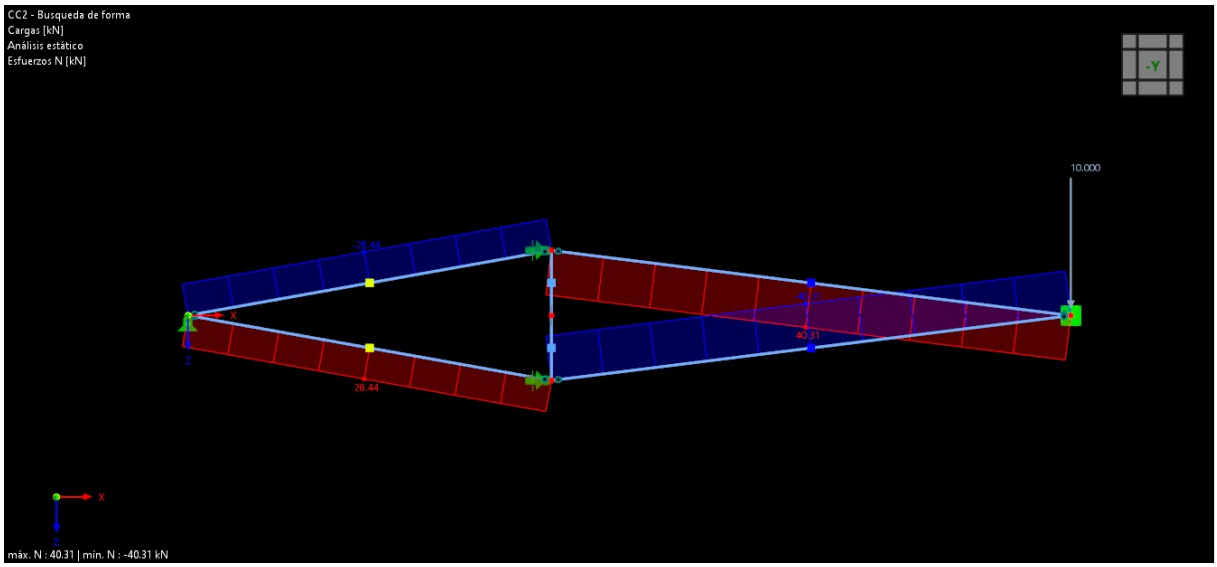


Figura 11.14: Diagramas de axiles (kN). RFEM 6

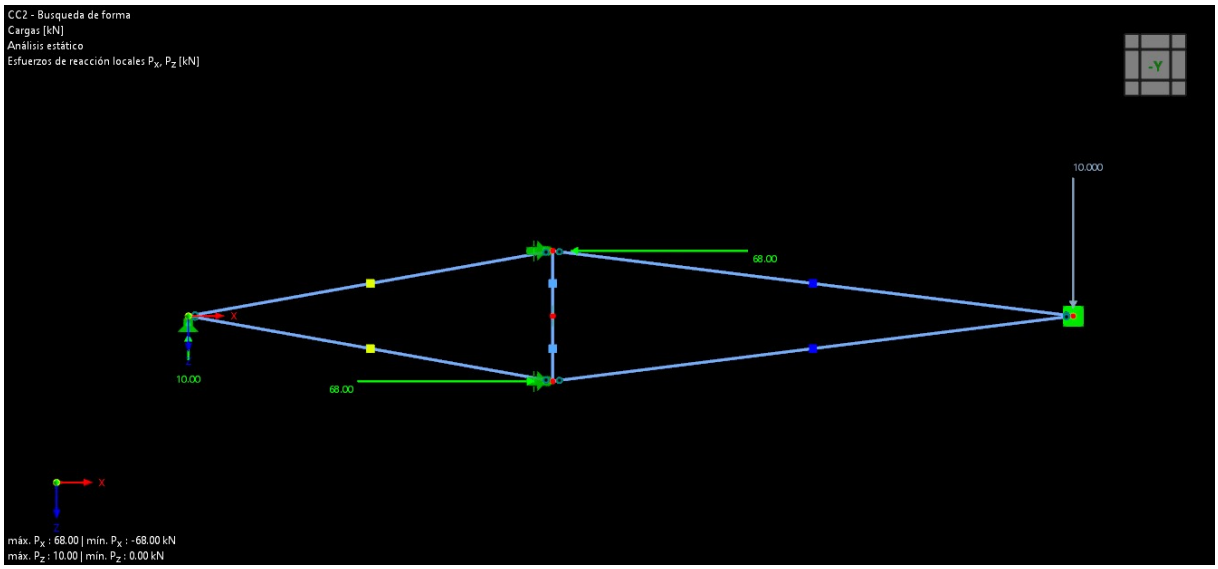


Figura 11.15: Reacciones sobre los apoyos (kN). RFEM 6

Así pues el resto del Momento My es recogido por estas barras en forma de axiles de compresión y tracción obteniendo el brazo de palanca.

A continuación, seleccionamos como caso de carga "Búsqueda de forma.[el] definido anteriormente en el **Capítulo 10** y sustituimos las barras por los cables de tipo Pfeifer de diferentes diámetros ya descritos en el **Capítulo 9**.

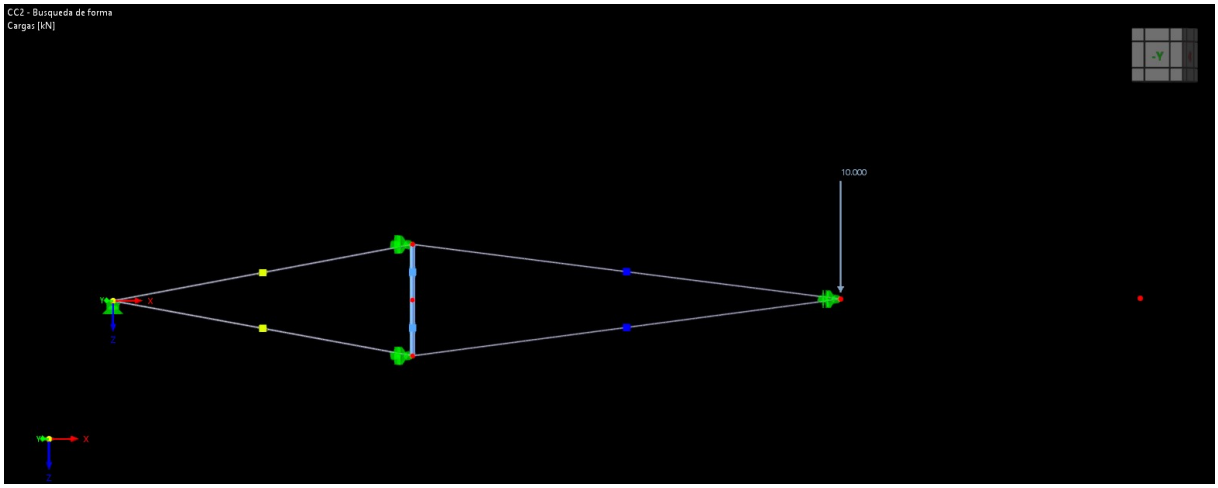


Figura 11.16: Geometría descrita. RFEM 6

Una vez obtenemos esta geometría, la seguimos modificando en este caso mediante la adición de nuevos cables. Dos de ellos saldrán del nudo superior de la sección circular y otros dos del nudo inferior de esta. La disposición de estos, queda definida mediante un ángulo de 15º girado respecto al nudo central. En sus extremos son fijados por apoyos que impiden el desplazamiento longitudinalmente en la dirección de estos.

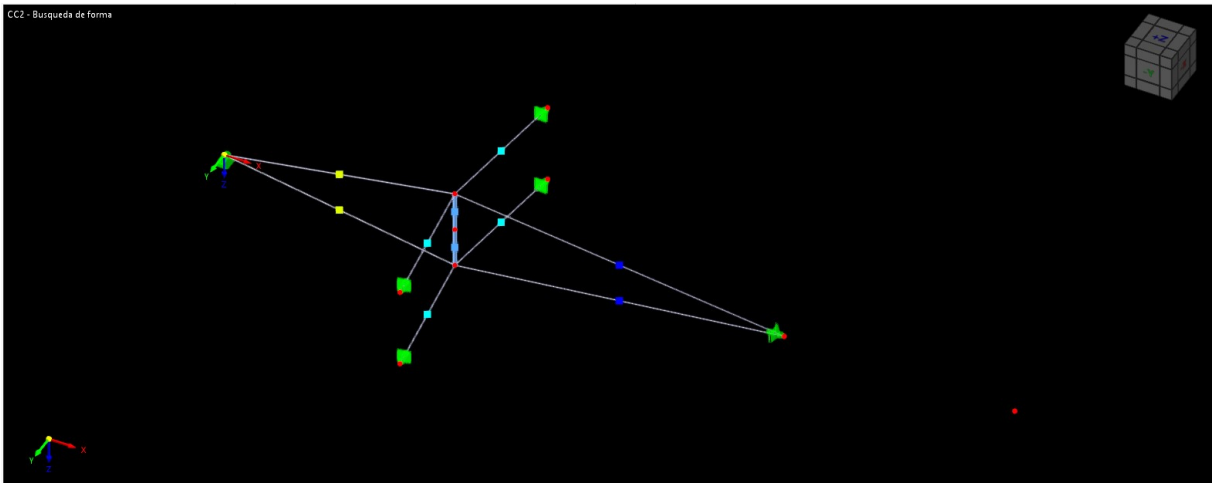


Figura 11.17: Geometría descrita. RFEM 6

Después de este paso se establecen las cargas de pretensados sobre los cables. El valor de estas se ha obtenido de manera experimental tras numerosas simulaciones para obtener la geometría deseada gracias al complemento búsqueda de forma. Pueden parecer algo exageradas dichas cargas, pero debemos recordar que esta cubierta tiene un diámetro de 96 m, y que esta geometría que se ha elaborado hasta ahora, forma como veremos posteriormente la corona circular de la cubierta, y tiene una dimensión de 34 m.

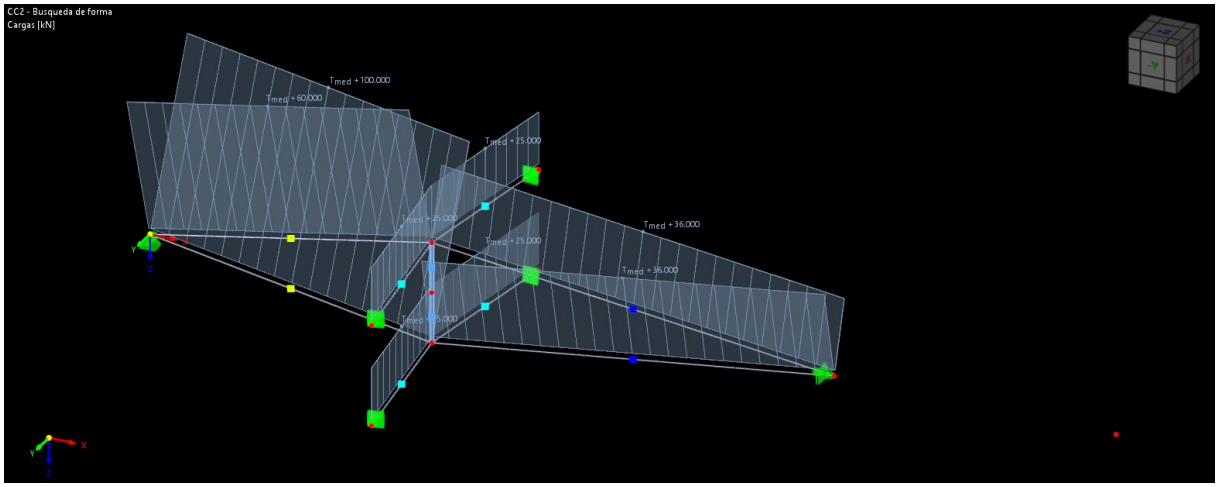


Figura 11.18: Cargas de pretensado en los cables. RFEM 6

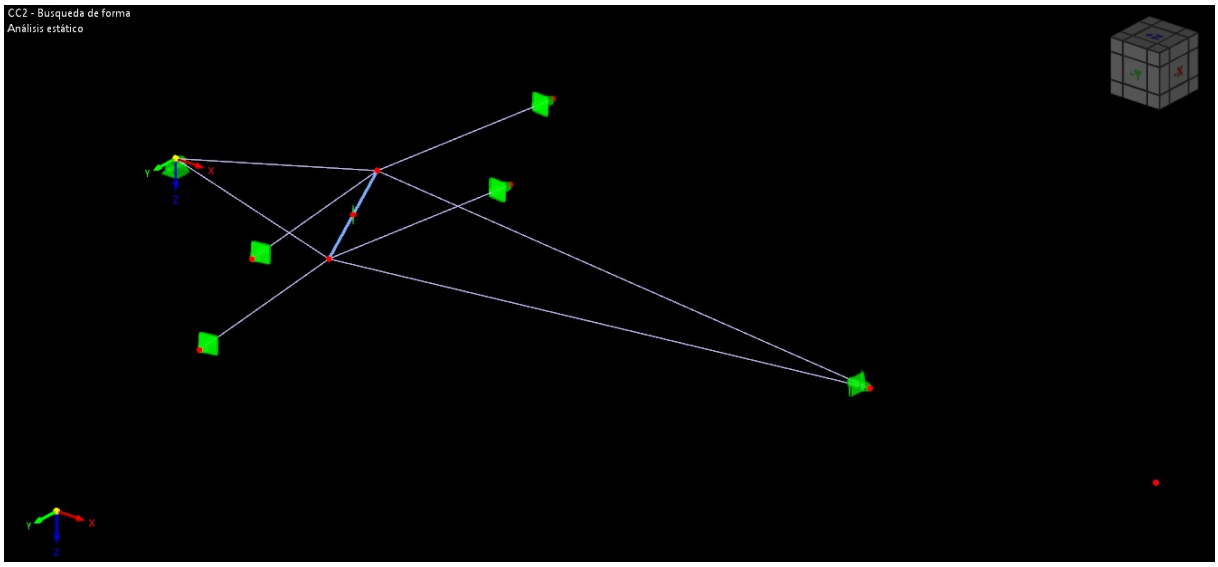


Figura 11.19: Geometría obtenida con el complemento búsqueda de forma. RFEM 6

Obtenemos así la geometría base y como podemos ver en la siguiente figura sus diagramas de esfuerzos.

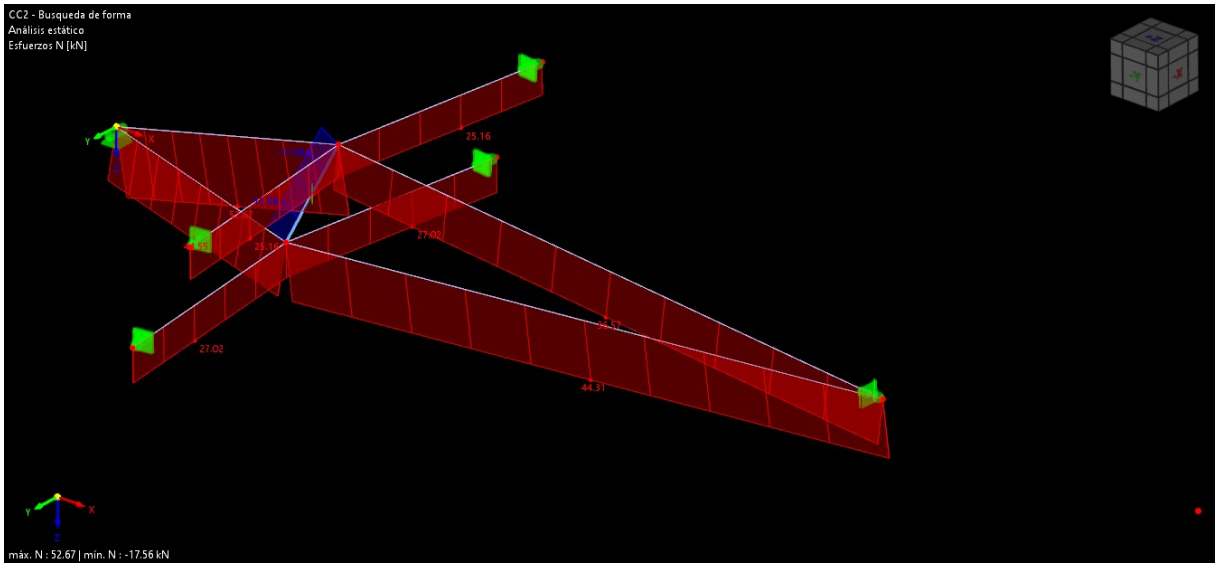


Figura 11.20: Diagramas esfuerzos axiles geometría base. RFEM 6

Como era de esperar, debido a los pretensados aplicados, los cables se encuentran sometidos a tracción, evidentemente los valores que se muestran en los diagramas de esfuerzos no son los mismos que las cargas aplicadas, esto se debe a la interacción de unos con otros. La sección tubular se encuentra comprimida debido a las cargas que traicionan los cables.

Si revolucionamos esta geometría en giros de 15º al rededor del eje central (nudo rojo

en las imágenes), sustituimos los apoyos del extremo interior por un anillo colector de cable, y retiramos los apoyos que impedían el desplazamiento longitudinalmente de los cables,conseguimos la forma geométrica de partida de la cubierta.

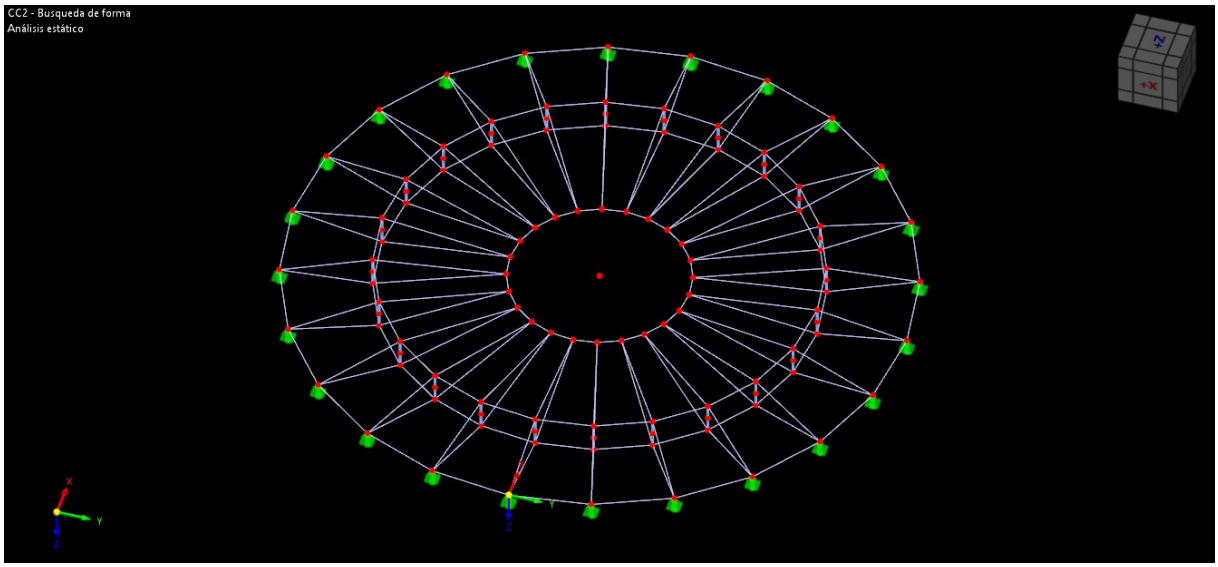


Figura 11.21: Geometría de partida de la cubierta. RFEM 6

Siguiendo el procedimiento anterior, aplicando los pretensados correspondientes, se vería así de la siguiente manera:

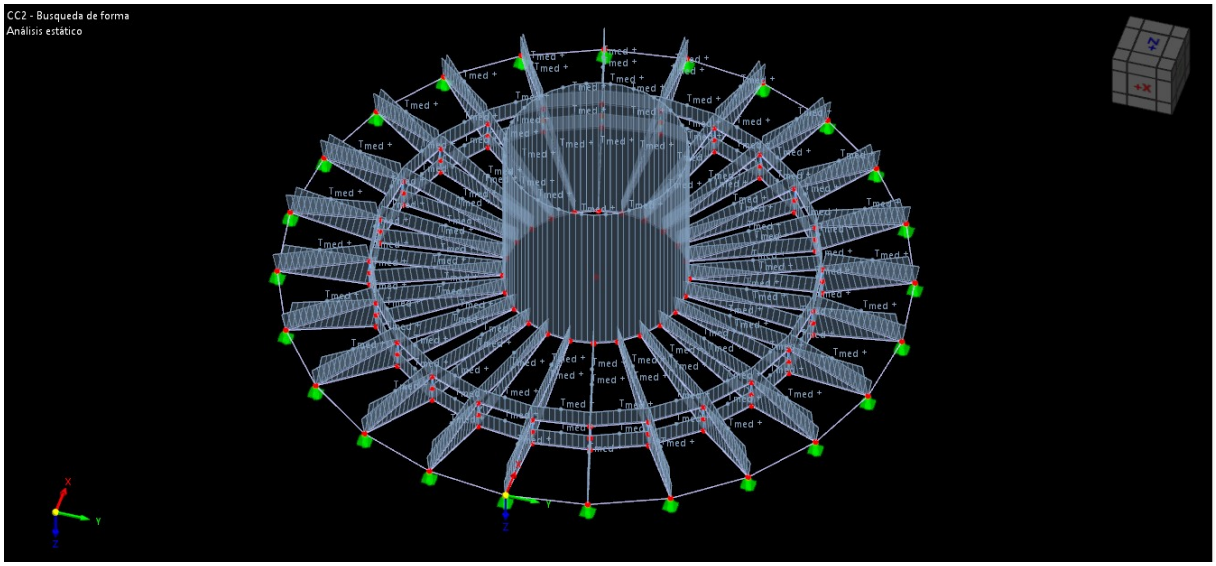


Figura 11.22: Pretensados de los cables de la cubierta. RFEM 6

Como se aprecia en la **imagen 11.22**, el pretensado del cable interior es mucho mayor que los demás, a razón de 5 veces mayor que el pretensado que le sigue en magnitud por debajo de este. Este cable, es por ello también el de mayor diámetro y la razón principal

y justificación de esto, es que se trata del anillo colector, en este se encuentran 24 nudos anclados traccionándolo cada uno en su respectivo plano, es por ello que el pretensado de este debe ser tan grande, para que este anillo traccione también a estos.

El cable de diámetro exterior que va entre apoyos, no cumple ninguna función estructural pero servirá para la fijación de superficies de membrana.

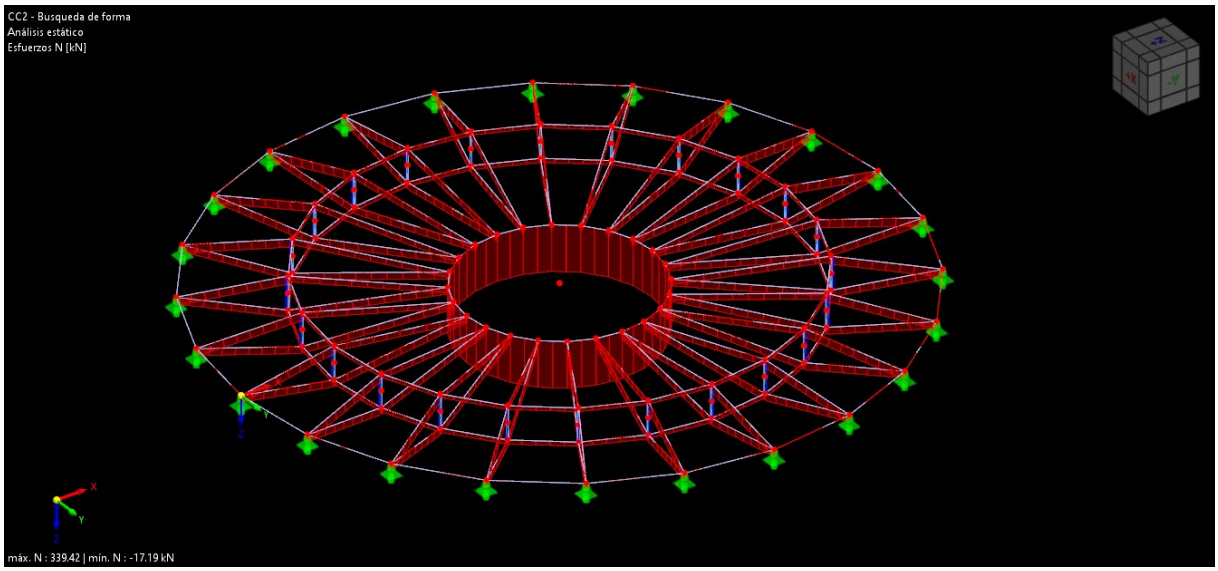


Figura 11.23: Diagramas de esfuerzos de los cables de la cubierta. RFEM 6

Según muestra la imagen. toda la estructura está traccionada, salvo las secciones de barra tubular, las cuales están comprimidas.

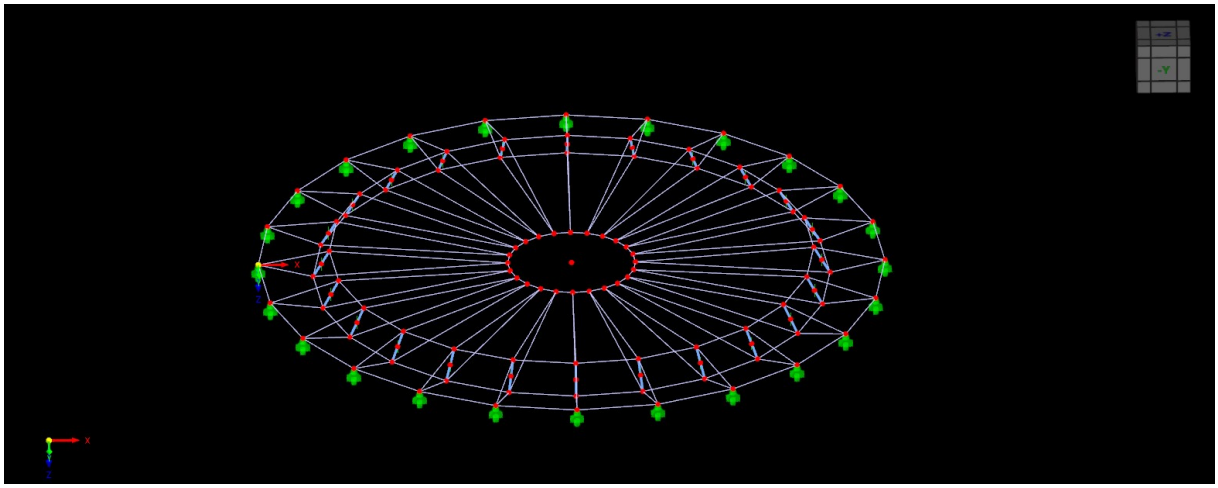


Figura 11.24: Geometría obtenida con el complemento búsqueda de forma.. RFEM 6

La **figura 11.26** muestra la geometría que nos proporciona el complemento búsqueda de forma hasta este momento.

Una vez llegados a este punto, se realizan las definiciones de superficie, aplicaciones de membranas, y precargas de estas como se realizó en el anterior **Capítulo 10**.

Proponiendo al programa la siguiente estructura:

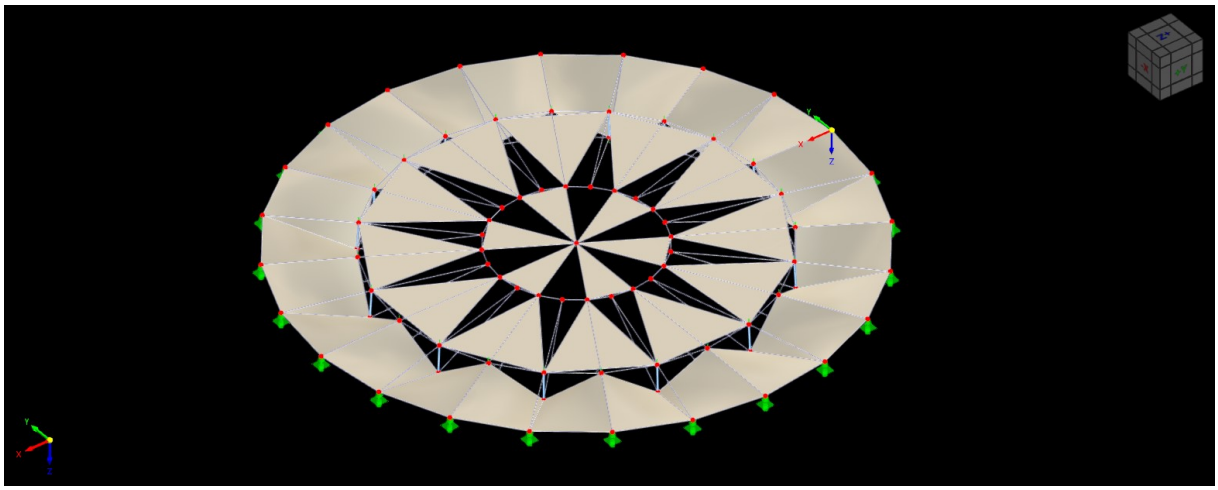


Figura 11.25: Geometría propuesta. RFEM 6

Y obteniendo como resultado la siguiente:

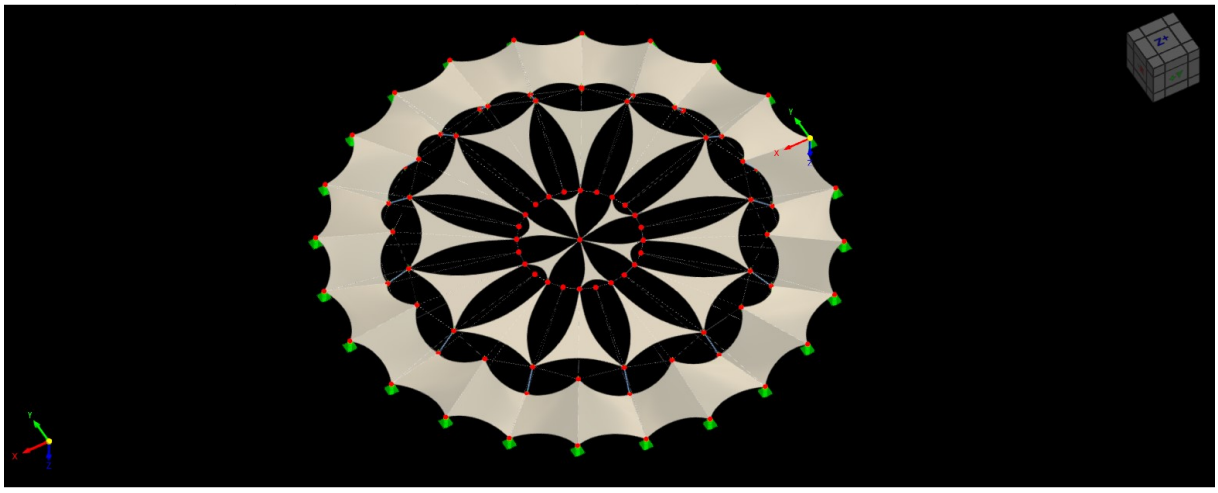


Figura 11.26: Geometría obtenida finalmente. RFEM 6

12 Análisis aerodinámico de la cubierta ligera con RWIND 3

Para la cubierta que se propone, es fundamental evaluar la influencia del viento debido a la flexibilidad y baja rigidez de los materiales empleados, como los cables de acero y membrana.

Como ya se comentó en la **Subsubsección 9.2.2.1**, se empleará RWIND 3, un software de simulación aerodinámica basado en dinámica de fluidos computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics).

Este programa permite analizar el comportamiento del viento sobre la cubierta, proporcionando un modelo preciso de las cargas aerodinámicas que pueden afectar la estabilidad y seguridad de la estructura.

Este módulo nos permitirá determinar la distribución de las presiones del viento sobre la lona y los cables, datos que posteriormente se transfieren a RFEM6 para realizar el cálculo estructural y verificar la resistencia de la cubierta bajo condiciones de carga de viento reales.

12.1 Características de RWIND 3

Este subprograma presenta varias funcionalidades clave que lo convierten en una herramienta ideal para el análisis de estructuras sometidas a cargas de viento:

12.1.1 Simulación avanzada del viento

El software genera un túnel de viento digital, en el que se modela el flujo del aire alrededor de la estructura. Esto permite obtener un campo de presiones y fuerzas aerodinámicas detallado.

12.1.2 Integración con RFEM6

RWIND 3 esta diseñado para trabajar en conjunto con REFM6, facilitando la transferencia de cargas aerodinámicas al modelo estructural. Este flujo de trabajo permite un análisis estructural mas precioso.

12.1.3 Modelado de turbulencias y efectos del entorno

El programa permite definir diferentes perfiles de viento, ajustándose a las condiciones específicas de la ubicación, como:

- Velocidad y dirección del viento según normativa.
- Altura de la estructura y su relación con la topografía del entorno.
- Condiciones de rugosidad del terreno, como la influencia de edificios cercanos.

12.1.4 Análisis en múltiples direcciones

RWIND 3 permite estudiar la acción del viento desde diferentes ángulos, lo que resulta esencial para evaluar la estabilidad de la lo lona y los cables en diferentes escenarios de carga.

12.1.5 Gestión de mallas adaptativas

El programa genera una malla computacional adaptativa, optimizando la precisión en la simulación del viento sobre la estructura.

12.2 Procedimiento de análisis en RWIND 3

12.2.1 Importación del modelo desde RFEM6

La geometría de la cubierta, compuesta por cables y membranas, se diseña en RFEM6 y se transfiere a RWIND 3 para realizar el análisis aerodinámico

12.2.2 Definición de las condiciones del viento

Se establece un perfil de viento basado en las condiciones climáticas de Málaga, considerando:

- Velocidad del viento según normativas aplicables.
- Rugosidad del terreno y posibles interferencias de edificaciones cercanas.
- Altura de la cubierta y su exposición al viento.

12.2.3 Ejecución de la simulación

RWIND 3 realiza la simulación del flujo del viento sobre la cubierta, generando un mapa de presiones y fuerzas aerodinámicas que afectan a la lona y los cables.

12.2.4 Exportación de cargas aerodinámicas a RFEM 6

Los resultados obtenidos en RWIND 3 se transfieren a RFEM 6 para:

- Aplicar las cargas de viento sobre la estructura.
- Evaluar su comportamiento bajo las condiciones aerodinámicas definidas.
- Verificar la estabilidad de la cubierta y los esfuerzos en los cables y la lona.

12.3 Aplicación práctica en la cubierta de la plaza de toros de Málaga

Dado que la cubierta propuesta en este TFG es una estructura flexible y ligera, la acción del viento juega un papel fundamental en su diseño. Las cargas aerodinámicas obtenidas mediante RWIND 3 permiten:

- Optimizar el diseño de los cables y su tensado para mejorar la estabilidad.
- Evaluar la deformación de la lona bajo distintas condiciones de viento.
- Prevenir problemas estructurales, como el flameo excesivo de la membrana o la sobrecarga de los cables.

En conclusión RWIND 3 es una herramienta esencial para evaluar el comportamiento de la cubierta. Gracias a su capacidad de simulación de túnel de viento digital, permite calcular con precisión las cargas de viento y transferirlas a RFEM 6 para su análisis estructural, cosa que de no ser gracias a esta herramienta, introducir las cargas de viento sobre la estructura sería una practica muy tediosa y no tendríamos la certeza o la capacidad de evaluar las máximas posibilidades de la acción del viento sobre esta.

A continuación se detallará el paso a paso seguido para la obtención de las cargas de viento sobre la cubierta.

El primer paso es activar el módulo de RWIND de simulación de viento, para ellos debemos entrar en los datos básicos de nuestro archivo y seleccionarlo.

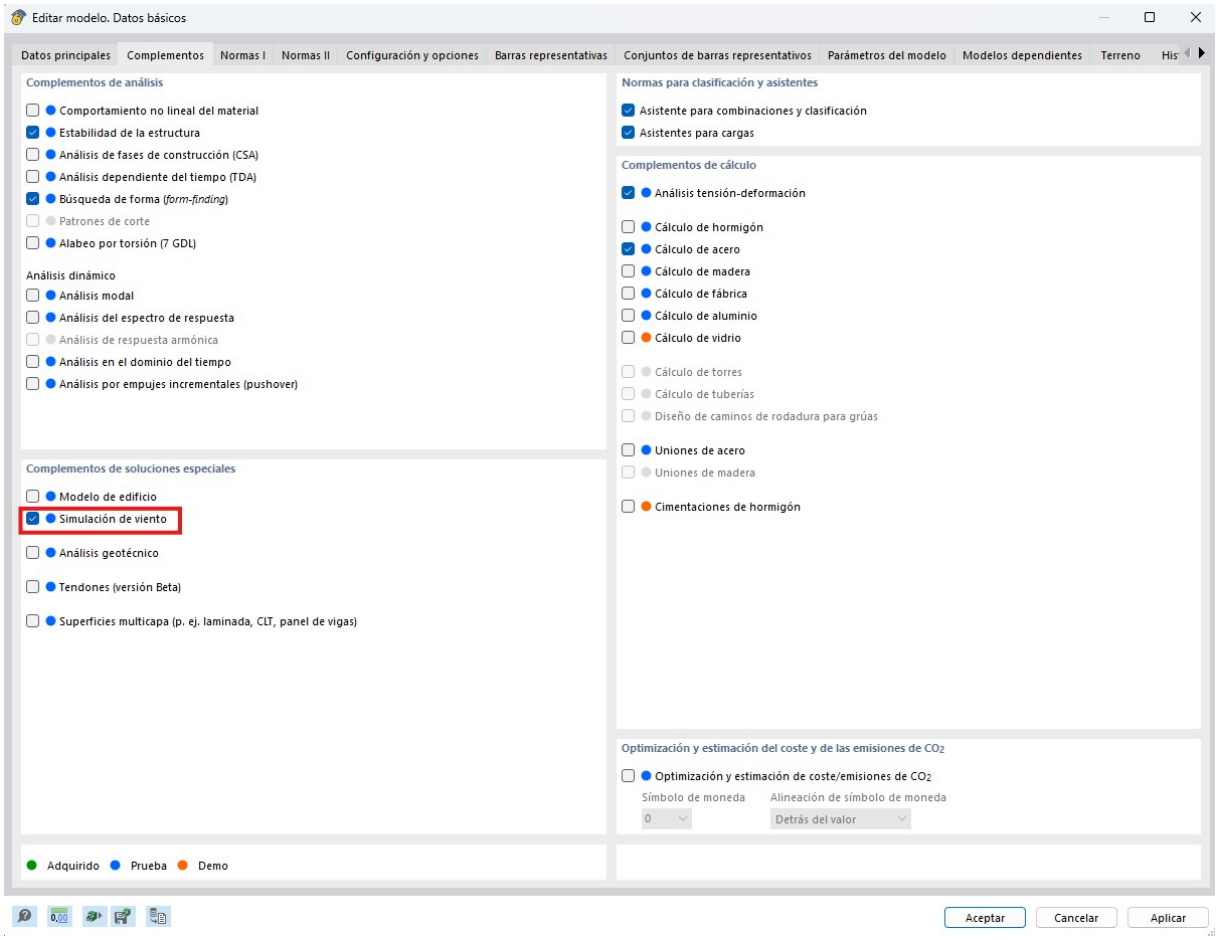


Figura 12.1: Ventana datos básicos. RFEM 6.

Una vez cargado el módulo, en el navegador de datos se activan 3 nuevas pestañas, una de ellas dentro de la carpeta casos de cargas y combinaciones y las otros dos dentro de la carpeta asistentes para cargas.

Estas pestañas son, configuración del análisis de simulación de viento, perfiles de viento y simulación de viento.

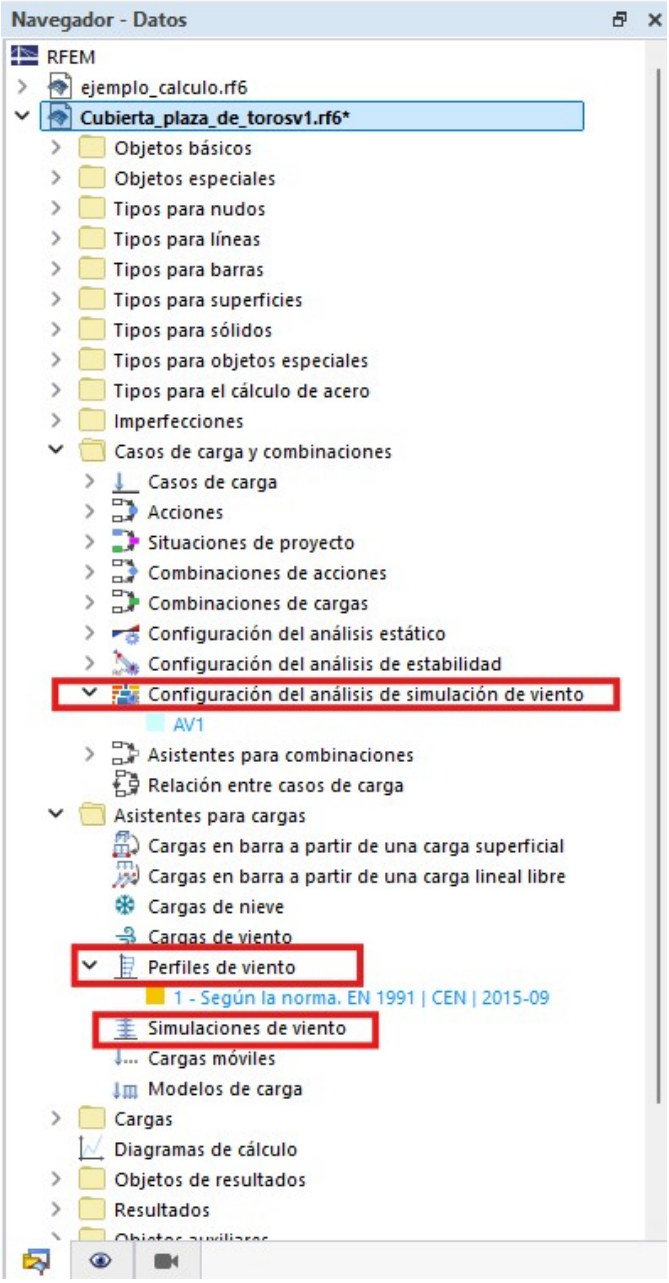


Figura 12.2: Ventana navegador de datos RFEM 6.

Si seleccionamos, configuración del análisis de simulación de viento, se abre la ventana de configuración de esta, donde escogeremos el tipo de flujo de viento emtre estacionario y no estacionario.

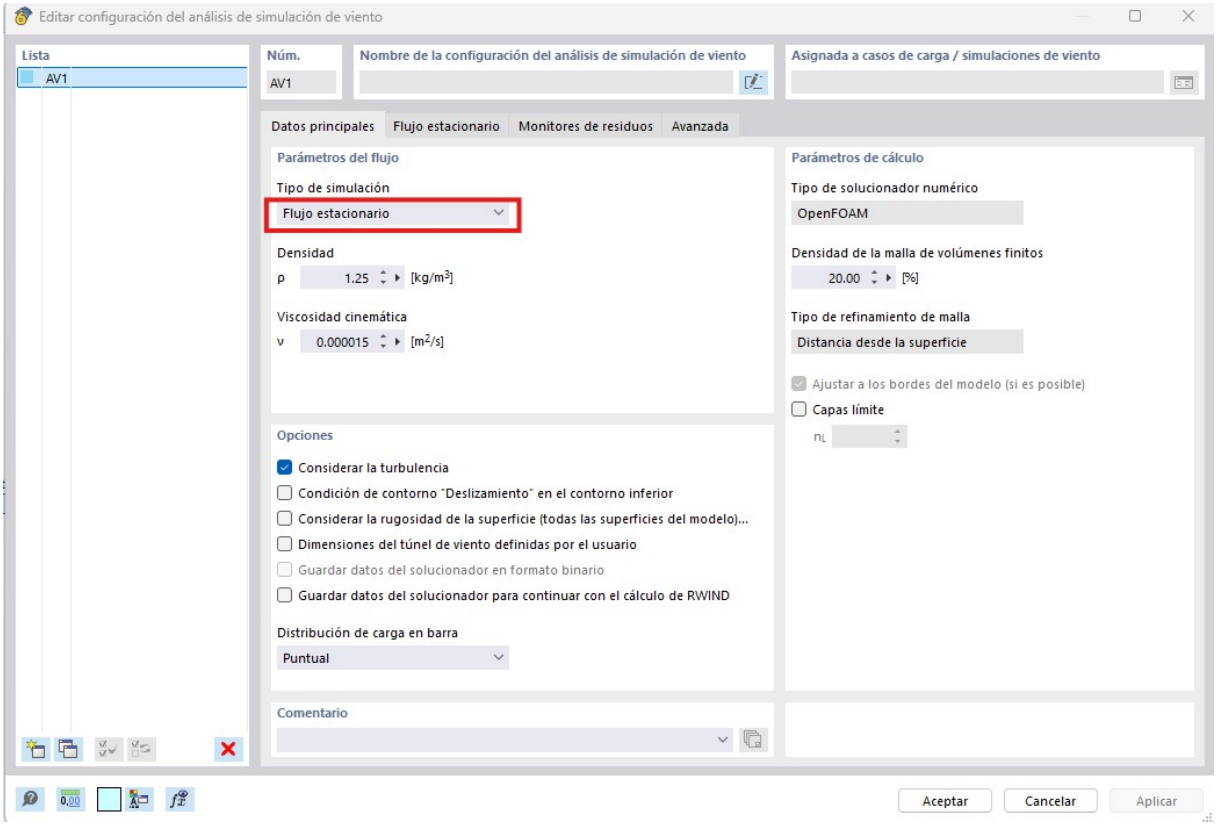


Figura 12.3: Ventana editor configuración de análisis de simulación de viento. RFEM 6.

Una vez elegido el tipo de flujo de viento, en este caso estacionario, aceptamos y nos vamos a la carpeta de asistentes de cargas y abrimos perfiles de viento. Seleccionamos el tipo de norma, los parámetros como categoría del terreno, velocidad de viente, valores de tabla, etc. se cargan de manera automática gracias a tener introducida en los datos del archivo la localización GPS de la estructura,este proceso se detalla en el manual.

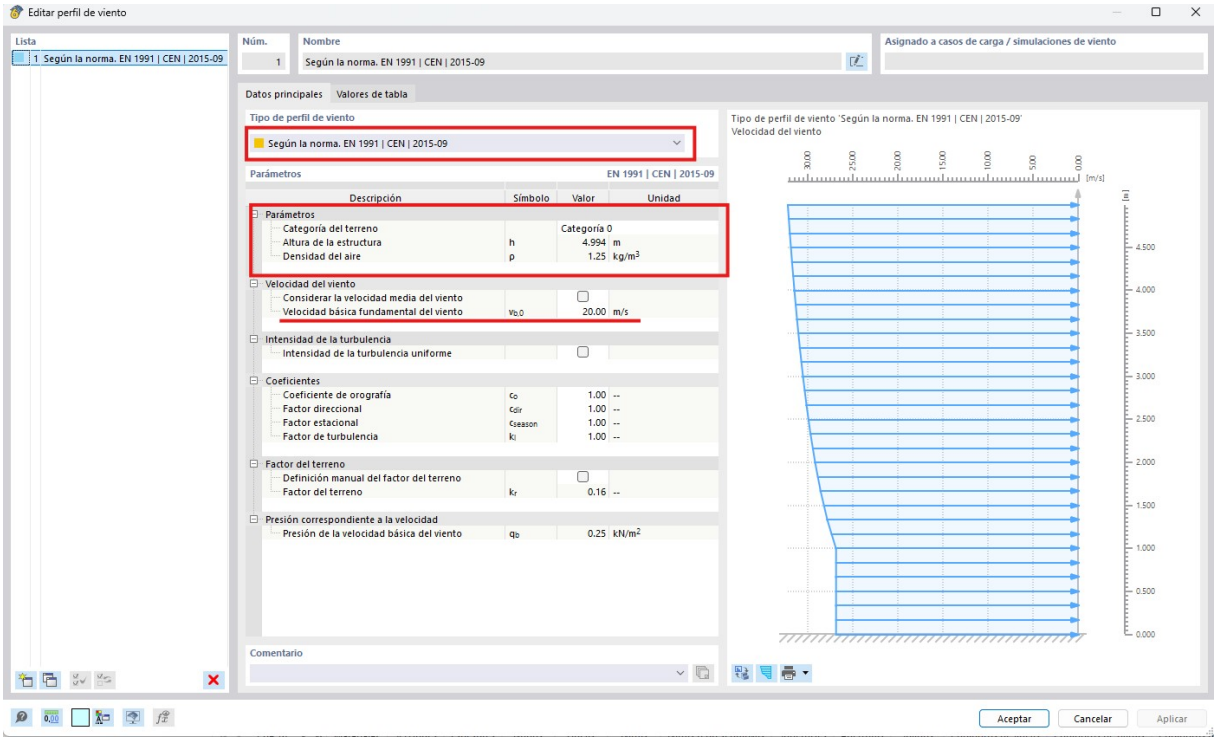


Figura 12.4: Ventana editor perfil de viento. RFEM 6.

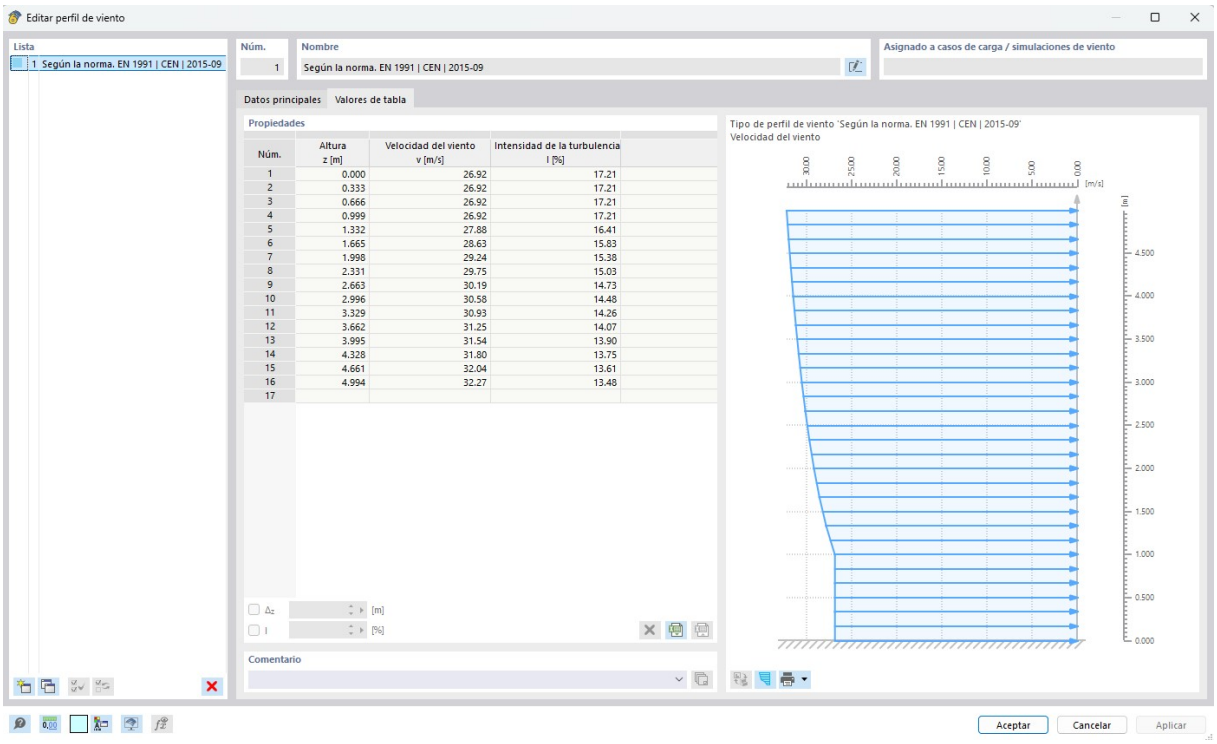


Figura 12.5: Ventana editor perfil de viento, pestaña valores de tabla. RFEM 6.

Seguidamente, entramos en la pestaña simulación de viento. Donde escogeremos el perfil de viento y la dirección de este. En este caso la dirección la definiremos con un ángulo de 0.00º que es la dirección del eje X de la cubierta.

El programa nos facilita el poder escoger todas las direcciones que consideremos necesarias, pero para esta simulación tan solo tomaremos una, ya que por cada dirección que se desee comprobar se genera un nuevo caso de carga, lo que genera un gran consumo computacional debido a la características tan potentes de este módulo.

Otro motivo por el que se ha tomado la decisión de escoger una sola dirección del viente, es que la cubierta es totalmente simétrica.

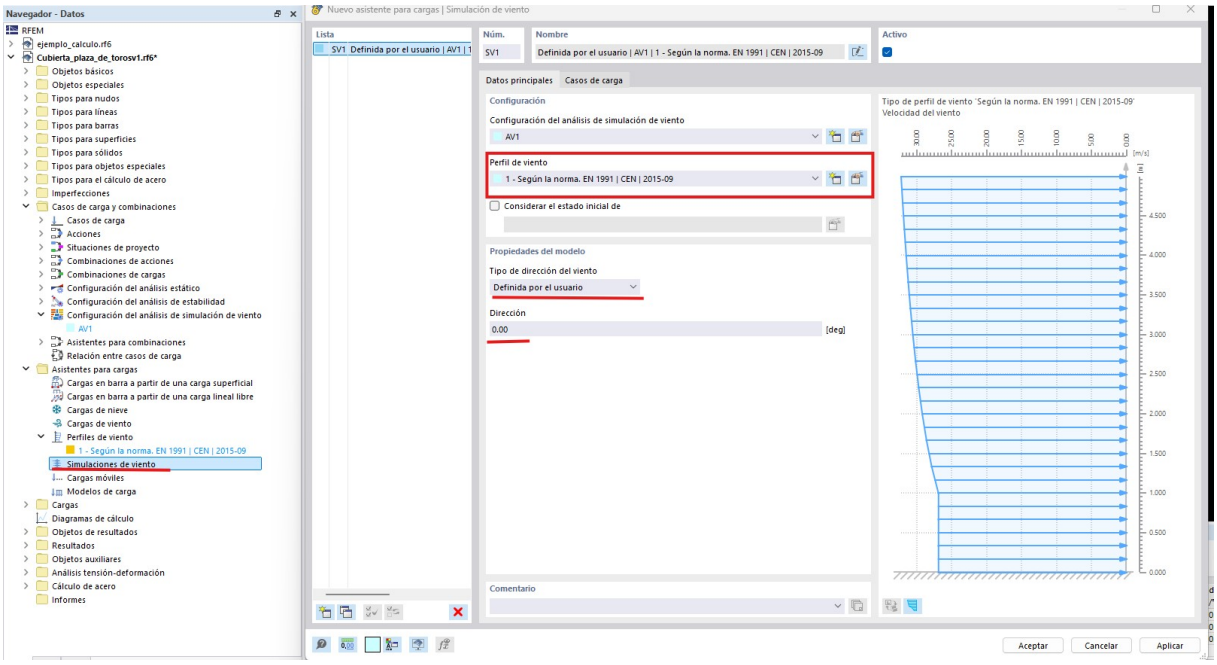


Figura 12.6: Ventana asistente para cargas, simulación de viento. RFEM 6.

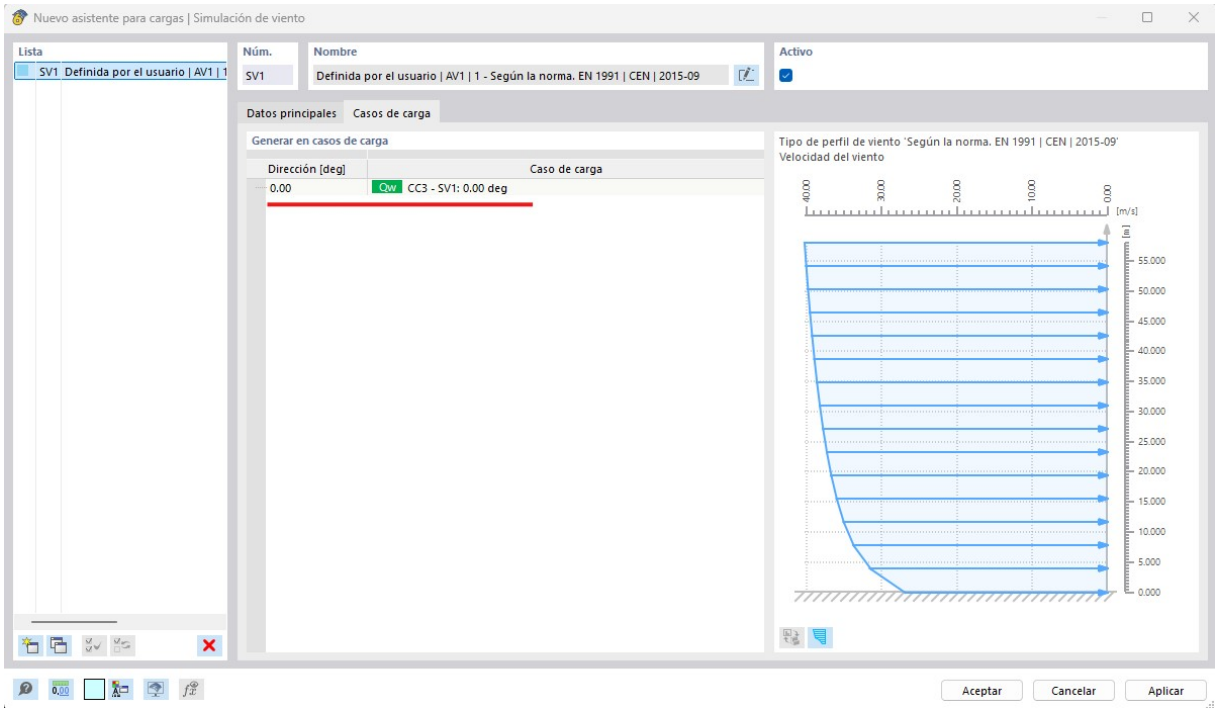


Figura 12.7: Caso de carga generado. RFEM 6.

Concluidos todos estos ajustes, en la ventana de casos de carga, seleccionamos el generado para el viento llamado SV1.

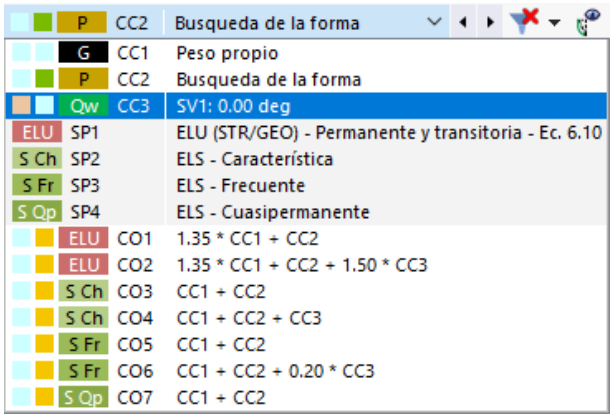


Figura 12.8: Ventana casos de carga. RFEM 6.

Y habilitamos una opción muy importante. Dentro del recuadro opciones especiales, marcamos çonsiderar el estado inicial de: z seleccionamos el caso de carga 2 de la búsqueda de forma.

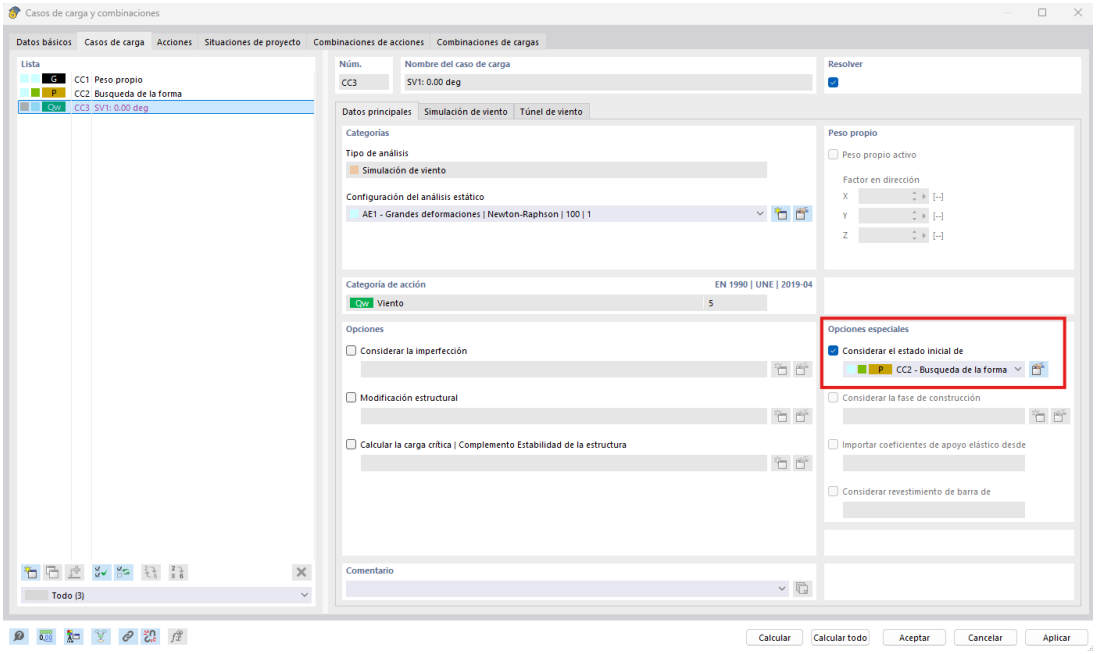


Figura 12.9: Consideración de estado inicial. RFEM 6.

Este paso es esencial, pues este caso de carga partirá teniendo en cuenta ya la estructura generada por el complemento de búsqueda de forma y realizará la simulación de viento a partir de esta geometría con los esfuerzos correspondientes que ya presenta esta.

En esta misma ventana, cambiamos la pestaña a simulación de viento y clicamos sobre el símbolo inferior derecho.

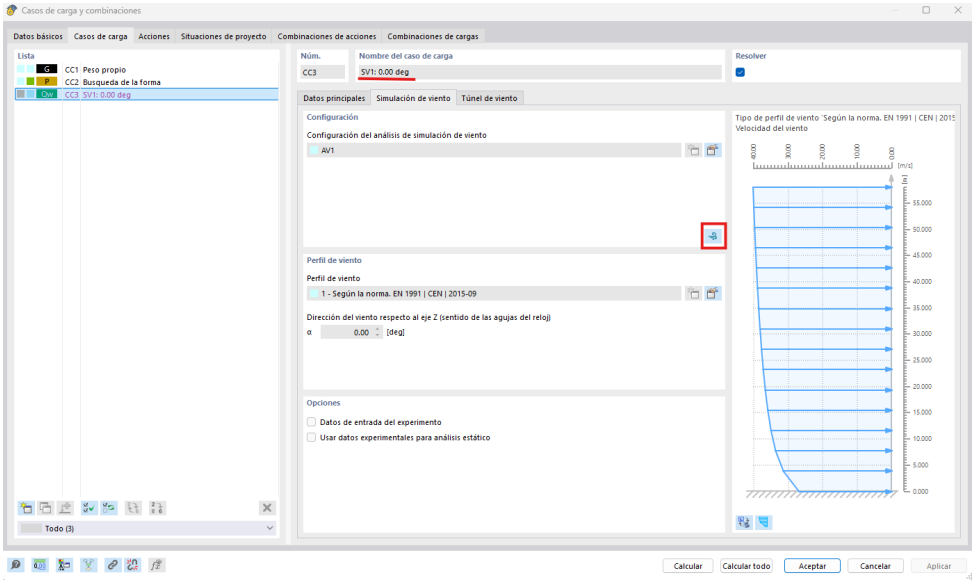


Figura 12.10: Ventana editor configuración de análisis de simulación de viento. RFEM 6.

El programa nos abre de manera automática el subprograma RWIND exportándole la estructura de la cubierta. Esta es la ventana principal de RWIND.

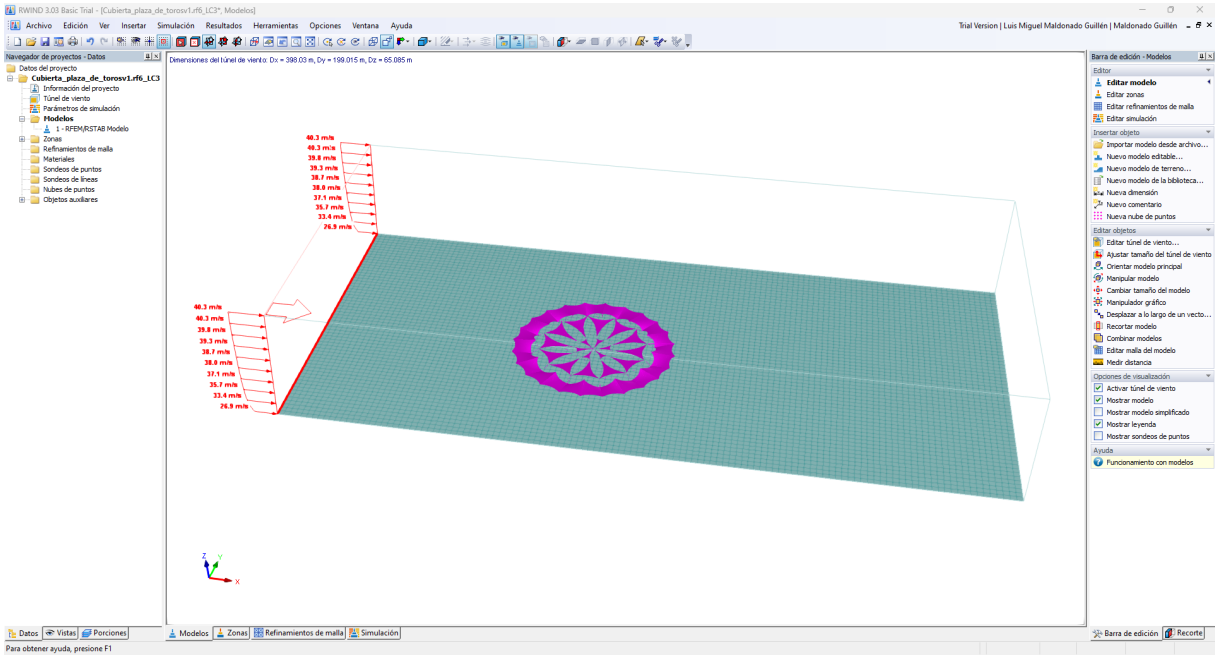


Figura 12.11: Ventana principal de RWIND. RWIND 3.

El programa muestra un túnel de viente con un perfil de velocidades las cuales han sido cargadas según la edición de los pasos que hemos realizado anteriormente. En su interior se encuentra la cubierta con la geometría especificada.

A continuación en la ventana de navegador de proyectos, seccionamos los parámetros de simulación y editamos la malla de volúmenes finitos, limitándola a un 20 % pues como anteriormente se comentó, para este caso no necesitamos tanto volumen de celdas que aumentarían mucho el consumo computacional.

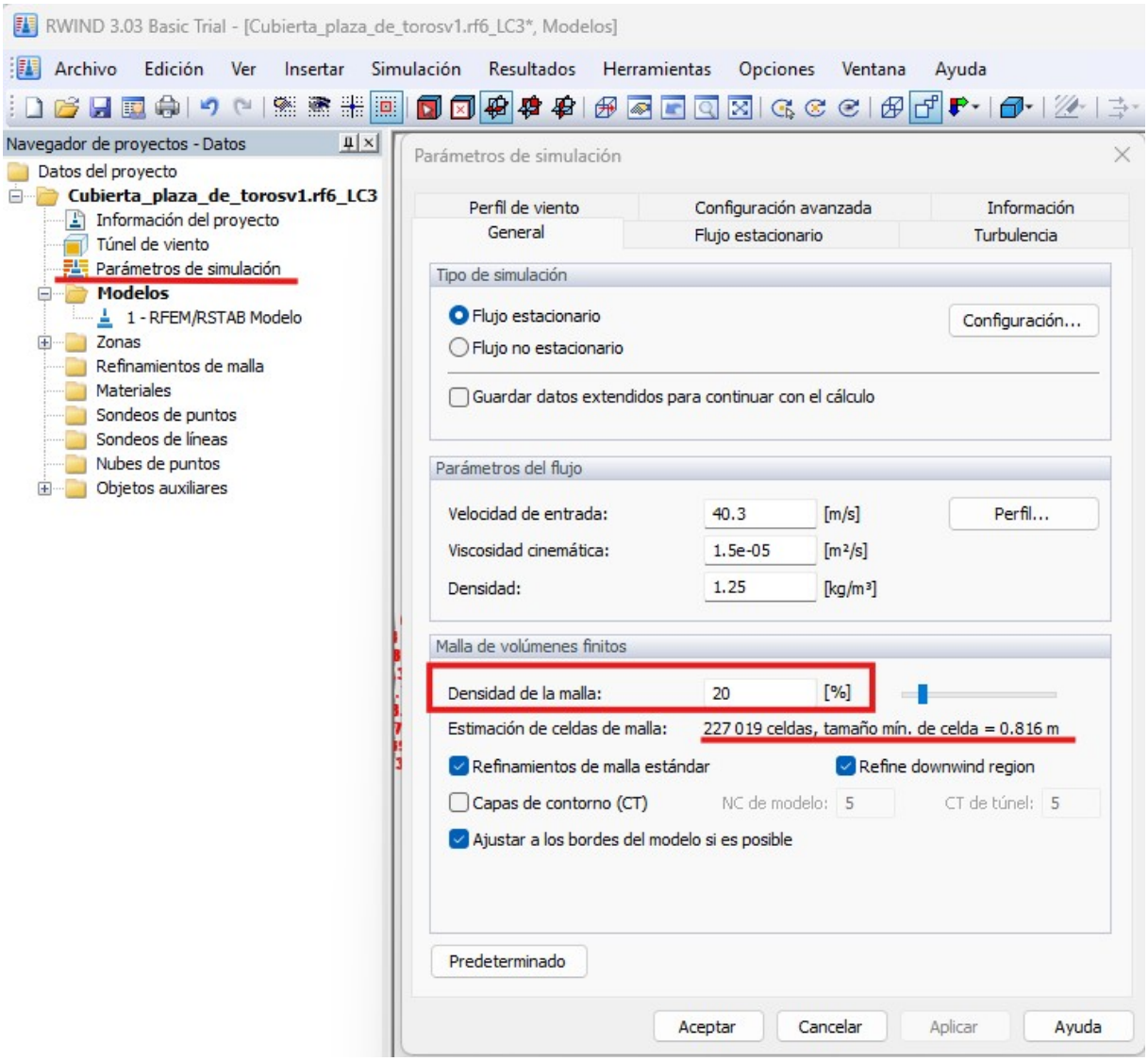


Figura 12.12: Ventana de edición de parámetros de simulación. RWIND 3.

Seguidamente editamos el modelo en la simplificación de este con un nivel de detalle 4, donde el tamaño de este en la cubierta será de 0.20 m.

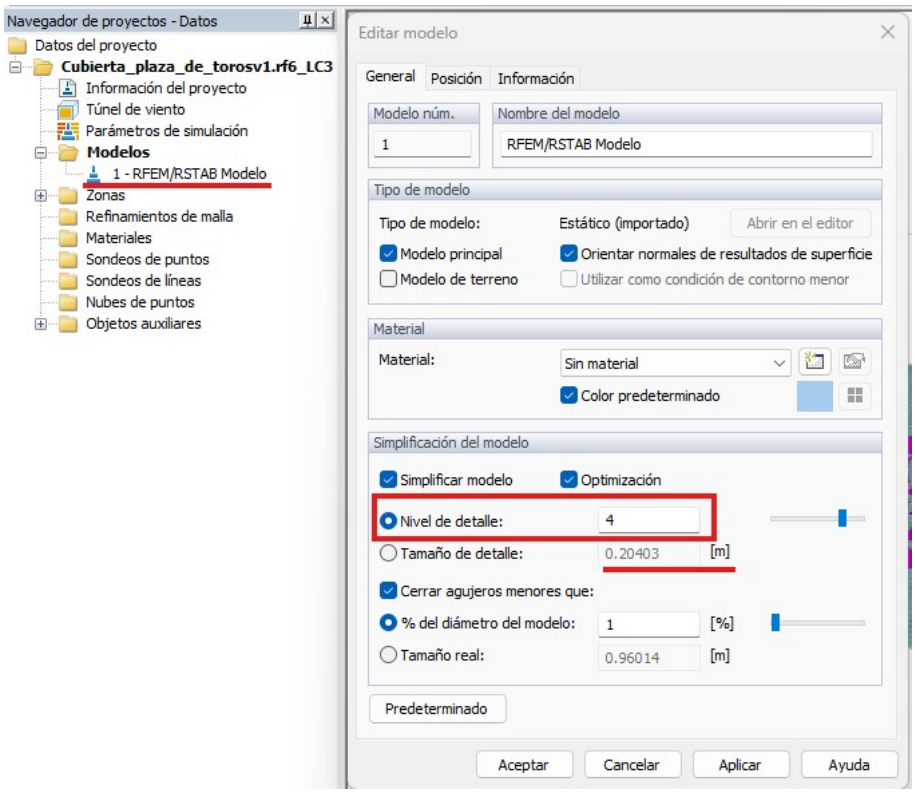


Figura 12.13: Edición de la simplicidad del modelo. RWIND 3.

Una vez concluidos estos ajustes,en la venta de barra de edición de simulacion, seleccionamos calcular resultados.

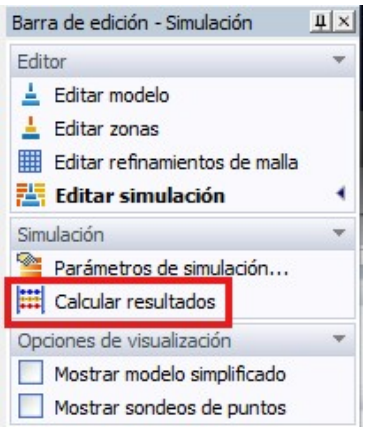


Figura 12.14: Cálculo de resultados. RWIND 3.

Tras un tiempo de cálculo, aproximadamente media hora, se toma conciencia de la complejidad de cálculo de este tipo de módulo. Lo que nos hace pensar en el caso de que si hubiéramos escogido un refinado de malla volumétrica del túnel de viento más fina, junto con un mayor nivel de detalle del modelo y con varios casos de carga de diferentes direcciones del viento, lo que podría llegar a tardar.

Aparece entonces la siguiente ventana.

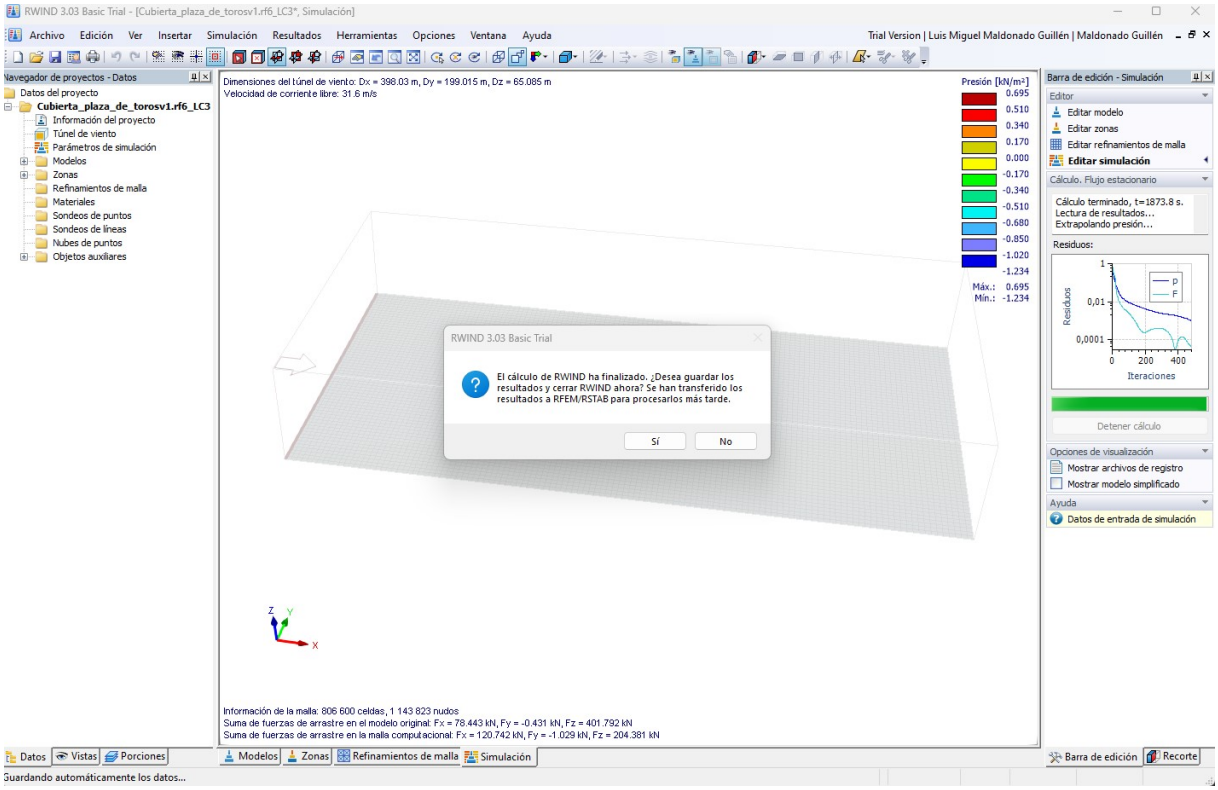


Figura 12.15: Finalización del cálculo. RWIND 3.

Se nos informa de que el cálculo ha concluido y se procederá a exportar los datos obtenidos a RFEM 6.

RWIND es un subprograma muy visual, y ayuda mucho a visualizar el comportamiento de cualquier tipo de estructura bajo las condiciones de viento que especifiquemos. En la siguiente imagen, se muestra la visualización de lineas de flujo de velocidad del viento a través de la cubierta.

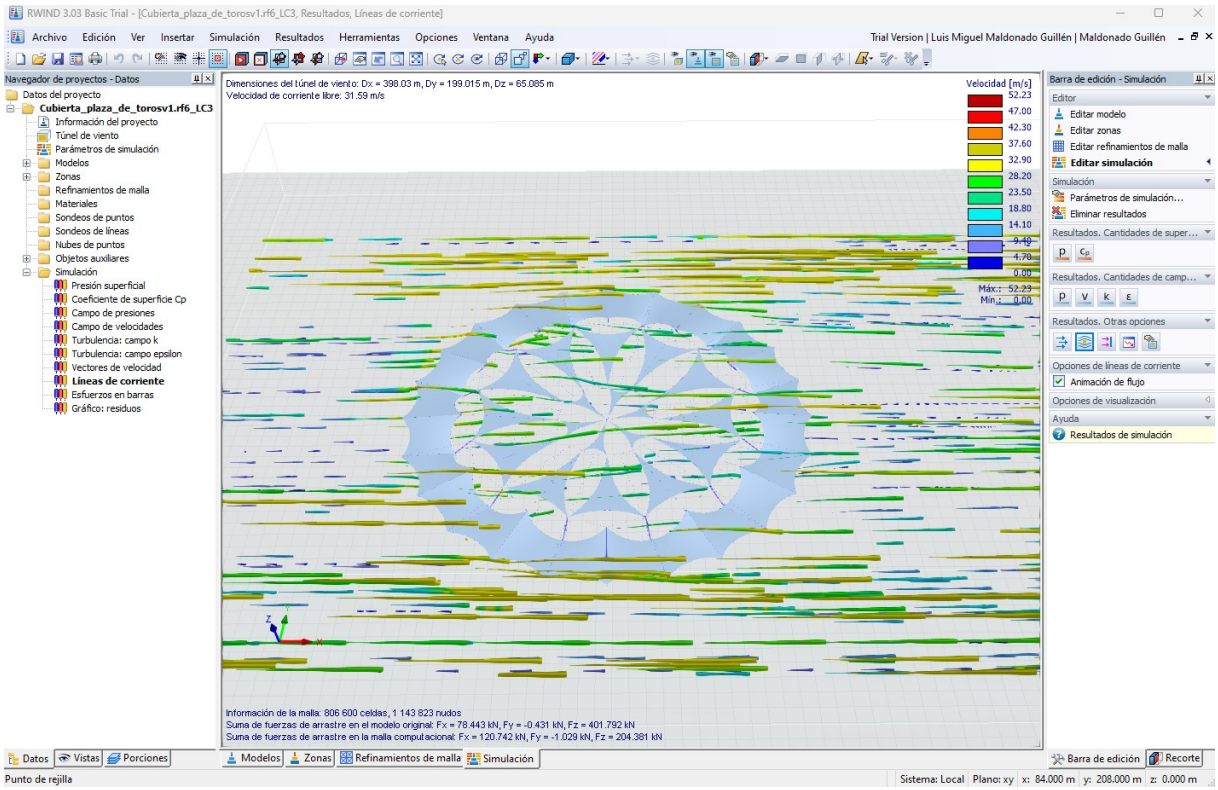


Figura 12.16: Líneas de flujo de viento según velocidad. RWIND 3.

Exportados los datos a RFEM 6, la ventana principal con el caso de carga de viento SV1 se muestra de la siguiente forma.

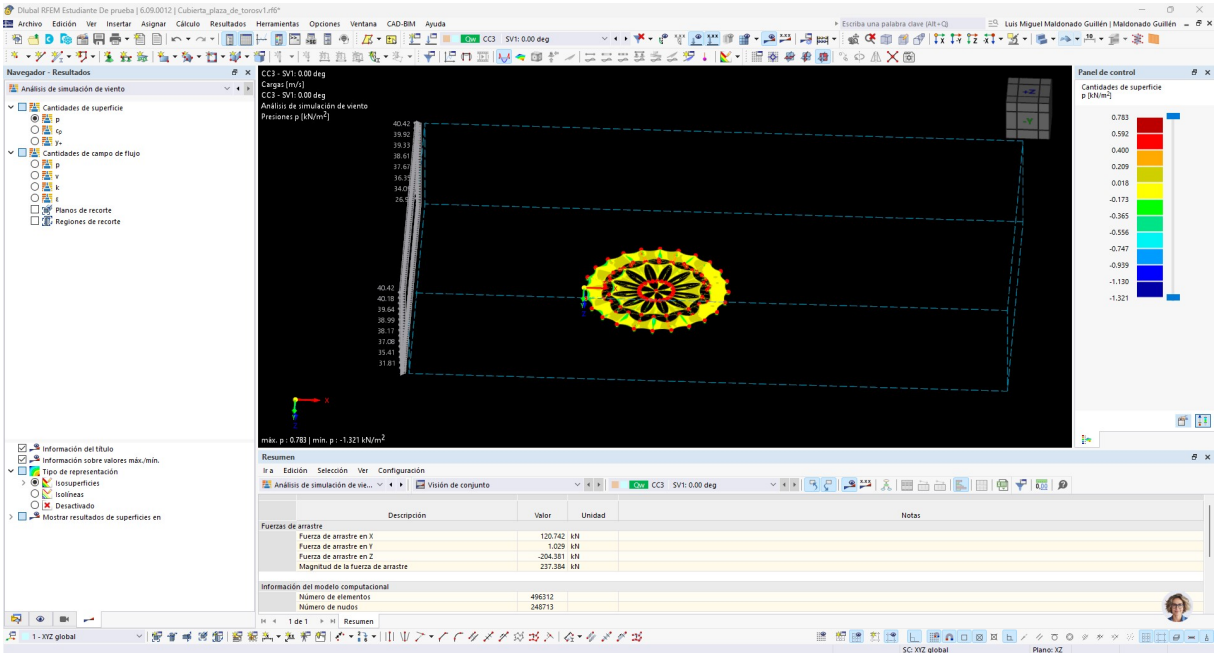


Figura 12.17: Ventana principal para carga de viento SV1. RFEM 6.

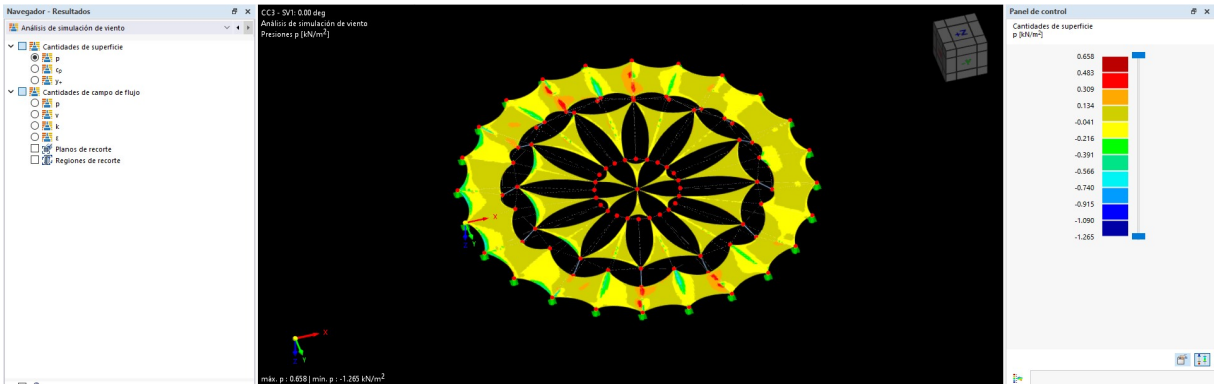


Figura 12.18: Ventana cargas de viento según presiones kN/m^2. RFEM 6.

RFEM nos proporciona diferentes opciones de visualización, según presiones, velocidad, energía cinética turbulenta, velocidad de disipación de energía cinética turbulenta, por planos de recorte, regiones de recorte, etc.

13 Comprobación de la estructura

En este capítulo se procederá a la comprobación, de los elementos de la estructura mas significativos y que han sido objeto de estudio en este proyecto. Son los cables(de acero de alta resistencia) con sus diferentes diámetros , secciones tubulares CHS (acero S275-JR) y las membranas (PVC-TipoIII).

13.1 Cables

En el modelado de la cubierta, los elementos tipo cable se definieron utilizando las herramientas específicas que proporciona el programa RFEM 6, las cuales permiten representar fielmente el comportamiento físico de este tipo de elementos.

A diferencia de otros elementos estructurales como barras o chapas, los cables no se calculan en RFEM 6 a partir de una ley constitutiva convencional tensión-deformación(σ-ε). Esto se debe a que los cables presentan un comportamiento geométricamente no lineal, activando su rigidez únicamente bajo estado de tracción. El software aplica una formulación no lineal basada en la elongación real del elemento:

$$N = EA \cdot \frac{\Delta L}{L_0}$$

Así, el cable se comporta como un elemento sin rigidez a compresión, y su capacidad resistente se activa únicamente cuando está pretensado o traccionado. RFEM permite introducir un módulo de elasticidad efectivo, pero no contempla plastificación ni estados postelásticos, lo cual está en consonancia con el diseño seguro de los cables.

Como se puede observar en la siguiente imagen, cuando seleccionamos los cables objeto de estudio para un análisis de tensión-deformación, el programa nos los excluye del cálculo tomándolos como secciones no válidas o desactivadas.

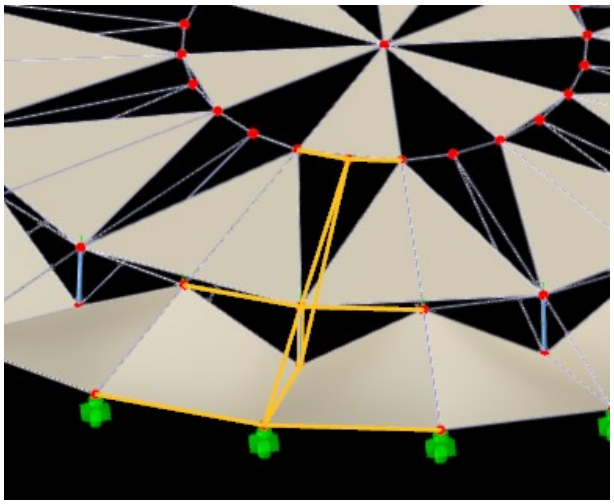


Figura 13.1: Cables seleccionados para su estudio.

En la siguiente imagen se muestra en la columna de *objetos seleccionados*, los números con los que el programa a nombrado a los cables seleccionados anteriormente.

Figura 13.2: Tabla de resultados.

En la **figura 13.3**, en la columna *No validos/desactivados* se muestran todos los números que corresponden a cables y como se puede ver en la misma figura, en la columna *para analizar* se muestra el numero 240, el cual corresponde a la sección circular, sección que sí analiza RFEM 6 mediante un análisis de tensión deformación por los motivos explicados anteriormente.

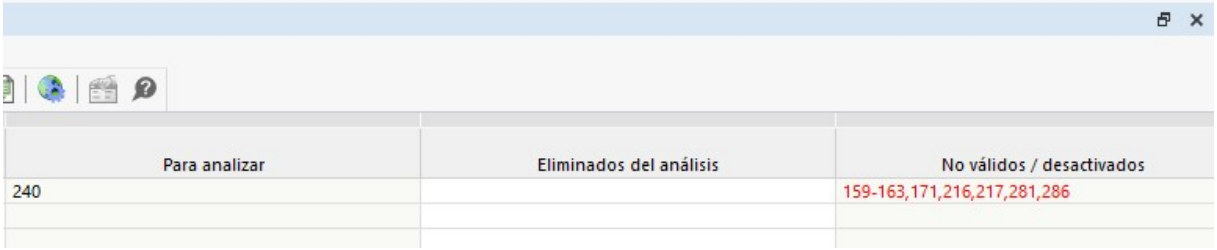


Figura 13.3: Elementos no válidos o desactivados.

Podríamos entonces, para estos cables realizar una comprobación mediante comparación de sus esfuerzos de tracción frente a los esfuerzos límites de estos, la cual sería totalmente válida. Pero para más seguridad se toma la siguiente aproximación para realizar un cálculo de acero y justificar aun más si cabe la validez de los cables.

13.1.1 Primera aproximación errónea: sustitución por redondos

En una primera aproximación, y como medida de seguridad, se planteó la sustitución de los cables por redondos macizos de acero S355-JR, utilizando la misma sección transversal que tienen los diferentes cables.

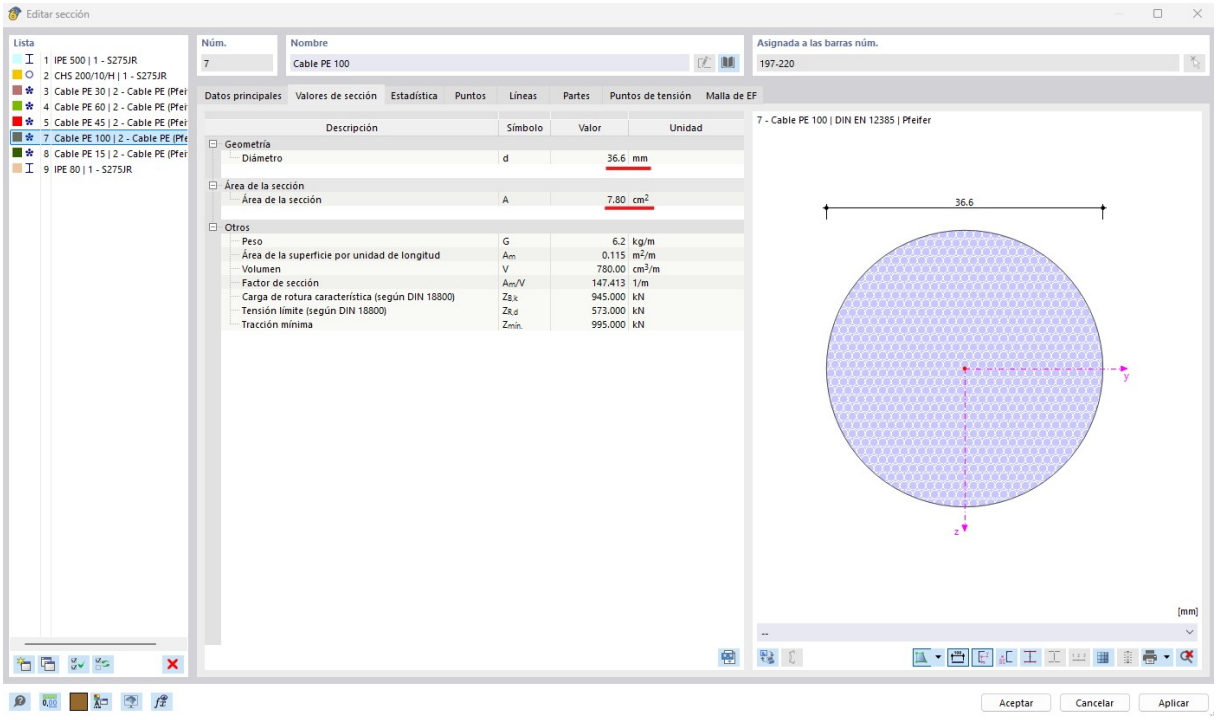


Figura 13.4: Sección y diámetro del cable.

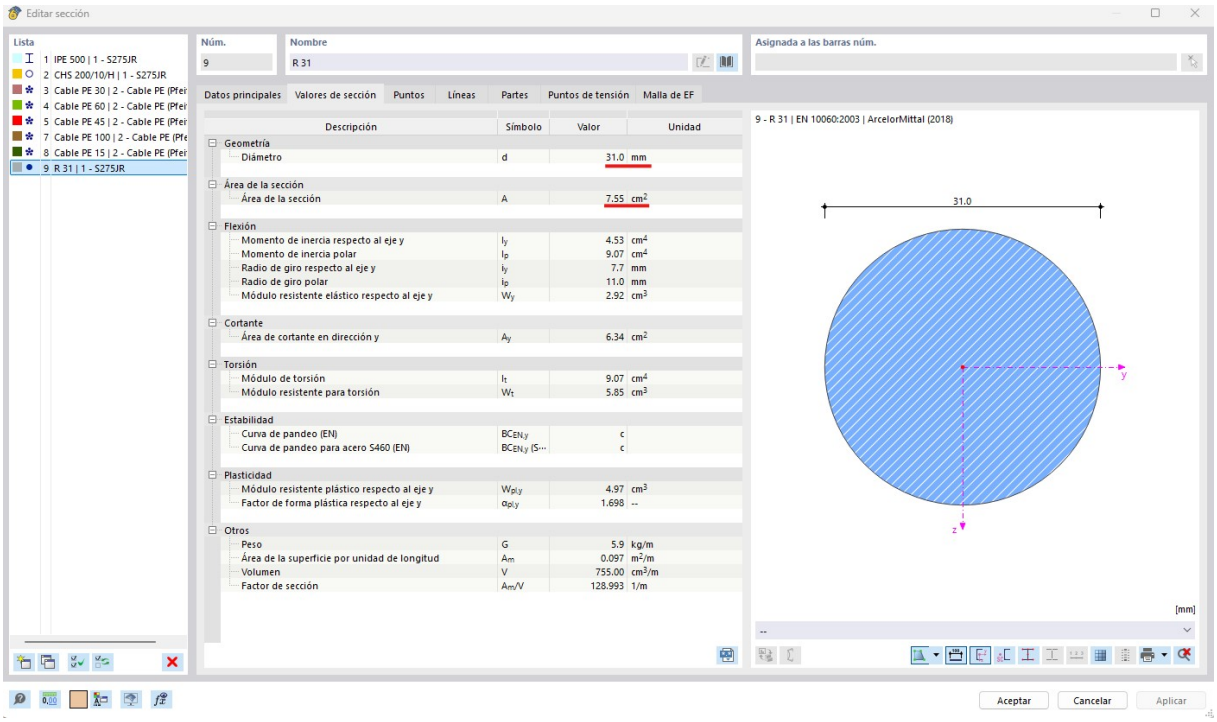


Figura 13.5: Sección y diámetro del redondo.

Como podemos ver en las fotos, se tomó como sección de cable de prueba el PE 100 con 36,6 mm de diámetro y 7,80 cm^2 y fue sustituido por un redondo de 31 mm de diámetro y 7,55 cm^2 de sección. Es lógico que el redondo tenga menor diámetro que el cable para la misma sección ya que el cable esta compuesto por hilos de acero trenzado entre los que quedan huecos y el redondo es macizo.

Una vez definida la sección del redondo tomada, se aplica en el modelo de la cubierta y se sustituye por sus cables homólogos y cambiando de *tipo cable* a *tipo barra traccionada* como se muestra en la siguientes imágenes.

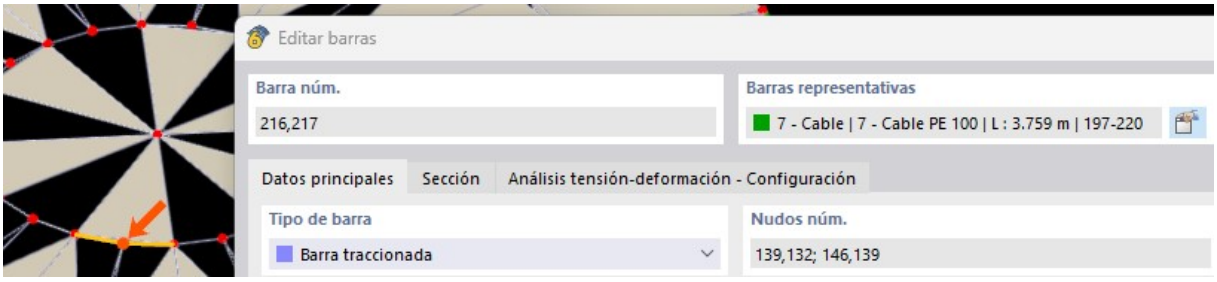


Figura 13.6: Cambio del tipo de barra cable a barra traccionada

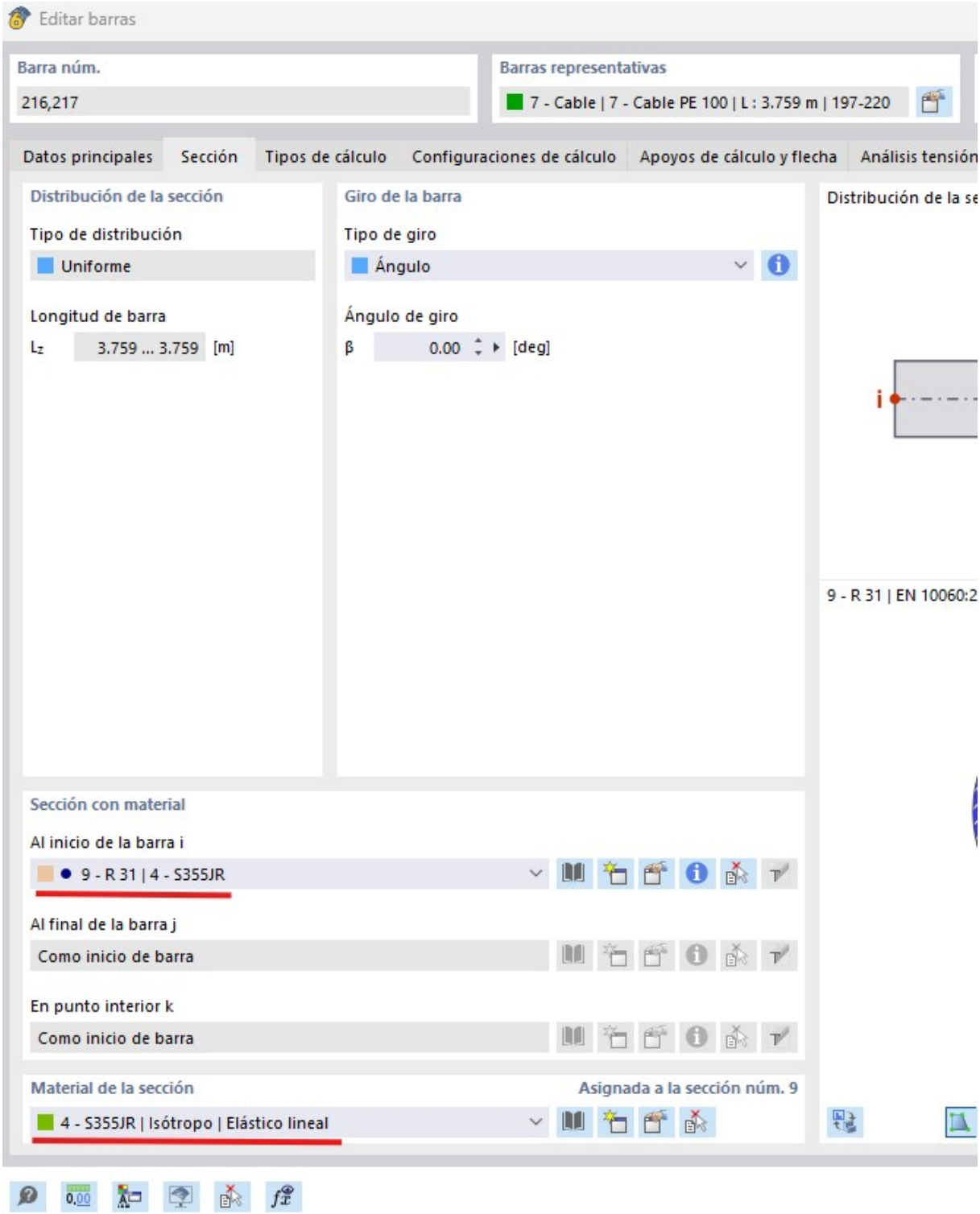


Figura 13.7: Sección y diámetro del redondo.

A continuación, si se observa en la tabla de resultados, al realizar este cambio, podemos ver como el numero de esas dos secciones de cables que ahora son redondos, ya si aparecen en la columna de *Para analizar* en lugar de la de *No válidos/desactivados* como el resto de cables que se seleccionaron para el cálculo.

Para analizar	Eliminados del análisis	No válidos / desactivados
216,217,240		159-163,171,281,286

Figura 13.8: Tabla de resultados.

En este momento ya se activa la posibilidad de realizar el cálculo de acero para esas secciones como se muestra en la **figura 13.9**

Objetos a dimensionar | Cálculo de acero | EN 1993 | UNE | 2016-02

Ir a Edición Selección Ver Configuración

Cálculo de acero | Datos de entrada

Tipo de objeto	Calcular todo	Objetos seleccionados	Para calcular
Barras	☐	216,217,240	216,217,240
Barras representativas	☐		

Figura 13.9: Tabla de resultados, cálculo de acero.

Tras el cálculo se observa en la tabla de resultados y en los diagramas en esas secciones que dichas barras no cumplen con los criterios de seguridad al aplicar el cálculo en estado limite último, la comprobación a tracción que es la única manera en la que trabajan los cables (redondos en nuestra comprobación).

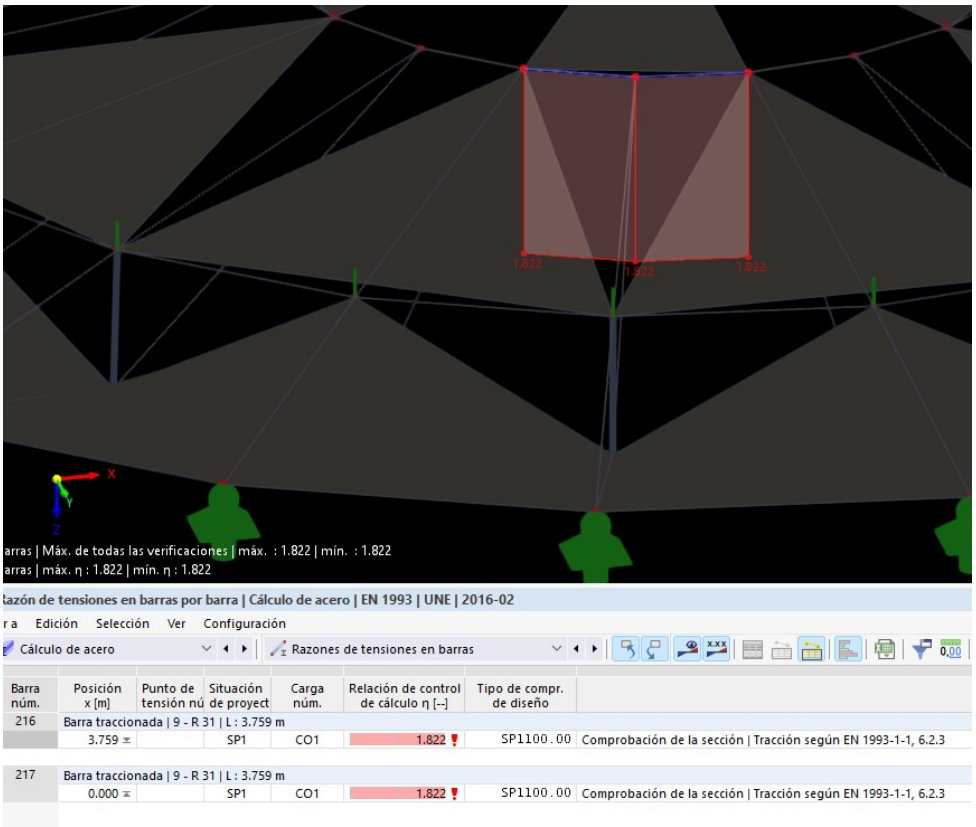


Figura 13.10: Tabla de resultados.

Al observar la comprobación que se realiza **figura 13.11**, se identificó un error en el planteamiento.

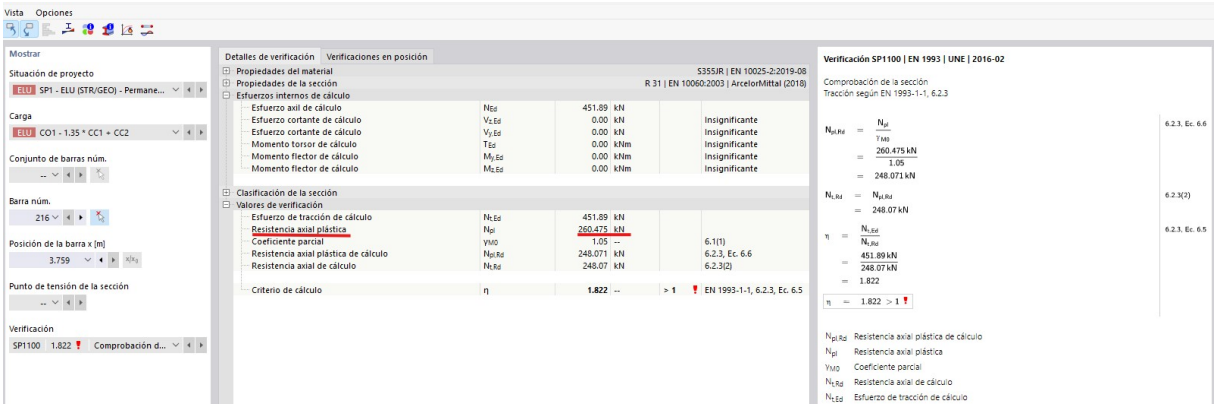


Figura 13.11: Tabla de resultados.

El error fue pensar que un redondo macizo de acero por tener la misma sección que un cable, podría resistir el mismo esfuerzo a tracción que un cable. Como se observa en

la imagen anterior, la resistencia axial de este redondo es de 260,475 kN, frente a los 573 kN de tracción límite que soporta el cable con la misma sección.

En el siguiente apartado se explica algunas de las características de por que esta diferencia de resistencias axiales.

13.1.2 Comparativa técnica entre cables Pfeifer y redondos de acero

En la prueba anterior, se tomó como referencia un *cable Pfeifer de 36,6 mm* de diámetro, con una *tensión límite de 573 kN*, y se comparó con un redondo macizo de acero **S355-JR**. Aunque ambos elementos tienen una sección próxima (780 mm^2), el cable ofrece una resistencia mucho mayor debido a los siguientes factores:

- **Material de alta resistencia**: los cables Pfeifer están fabricados con aceros especiales de tracción elevada (1370–1860 MPa), frente a los 355 MPa del S355-JR.
- **Trefilado y orientación del material**: los cables están compuestos por numerosos alambres trefilados en frío, un proceso que endurece el acero y eleva considerablemente su resistencia. Además, al estar trenzados en la dirección de la tracción, las fibras del acero se alinean con la carga, lo cual maximiza el aprovechamiento del material. En contraste, los redondos laminados tienen una estructura interna más heterogénea y con orientaciones aleatorias.
- **Tratamientos mecánicos específicos**: los cables reciben procesos térmicos y mecánicos adicionales, como el tratamiento por deformación en frío, que mejoran sus propiedades sin aumentar su peso. En conjunto, estos tratamientos hacen que el acero del cable trabaje a niveles de tensión mucho más altos sin fallar.
- **Comportamiento estructural específico**: los cables están diseñados únicamente para resistir tracción. A diferencia de un redondo de acero, que puede estar dimensionado también para soportar compresión y flexión, en los cables toda la sección trabaja de forma efectiva bajo tracción pura. Esto permite un uso mucho más eficiente del material, reduciendo masa y aumentando capacidad portante específica.

En resumen, aunque el área de ambos elementos sea igual,el tipo de acero, su tratamiento, y la forma de trabajo del cable hacen que el cable pueda soportar muchas más tensiones que un redondo convencional. Por eso no se pueden sustituir directamente sin un estudio de resistencia equivalente.

13.1.3 Corrección y cálculo del redondo equivalente

Una vez identificado el error anterior, se procedió a determinar cuál sería el diámetro necesario de un redondo de acero S355-JR capaz de soportar los 573 kN de tensión límite del cable. El cálculo se basó en el siguiente criterio:

$$A = \frac{F}{f_y} = \frac{573000\,\mathrm{N}}{355\,\mathrm{MPa}} \approx 1614\,\mathrm{mm}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \approx \sqrt{\frac{4 \cdot 1614}{\pi}} \approx 45{,}4\,\mathrm{mm}$$

Por tanto, un redondo de **45,4 mm** de diámetro sería necesario para igualar la capacidad resistente del cable de Pfeifer de 36,6 mm.

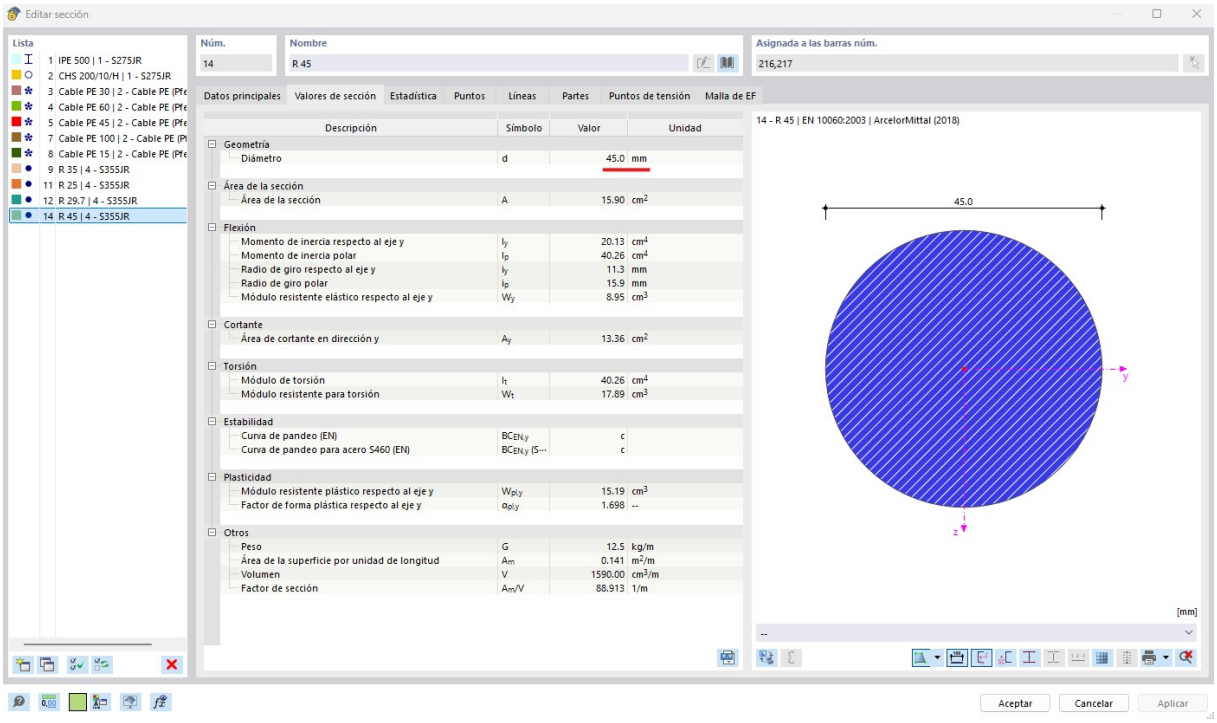


Figura 13.12: Sección que tiene la capacidad resistente del cable.

De igual forma, se realiza el mismo cálculo para los diferentes diámetros de los cables objeto de estudio, obteniendo así los siguientes diámetros de redondos.

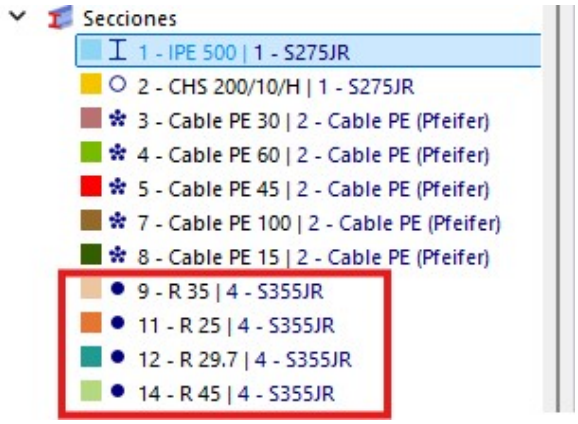


Figura 13.13: Redondos de acero de diferentes diámetros.

Y se sustituyen como anteriormente por los cables correspondientes de la estructura. En la siguiente figura, se muestra una sección de la cubierta sin la membrana para una mejor visualización de este cambio.

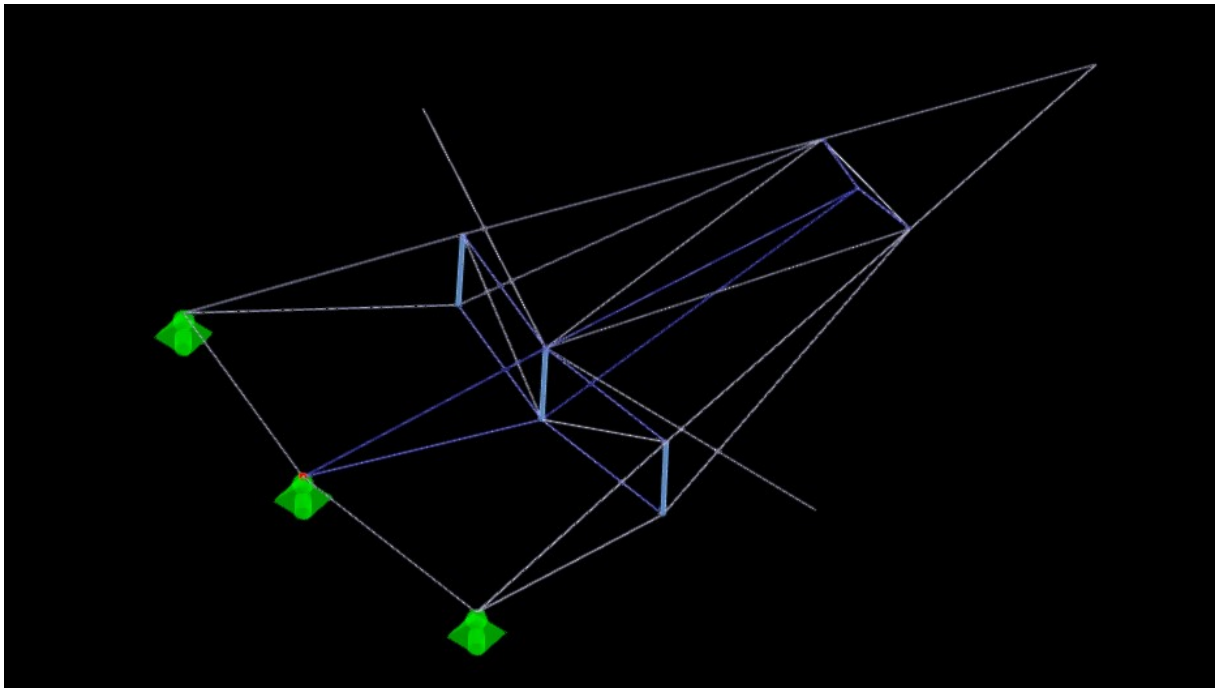


Figura 13.14: Redondos de acero intercambiados en la cubierta.

Como se puede ver en la **imagen 13.14**, se pueden diferenciar los redondos en un tono azul oscuro de los cables de color blanco.

13.1.4 Verificación en Estado Límite Último (ELU)

Tras establecer el redondo equivalente teórico, se realizaron las comprobaciones correspondientes para las combinaciones de carga en Estado Límite Último (ELU), aplicando las normativas vigentes. Este cálculo de acero complementario servirá como verificación adicional de seguridad estructural, garantizando que la estructura mantendrá la resistencia necesaria.

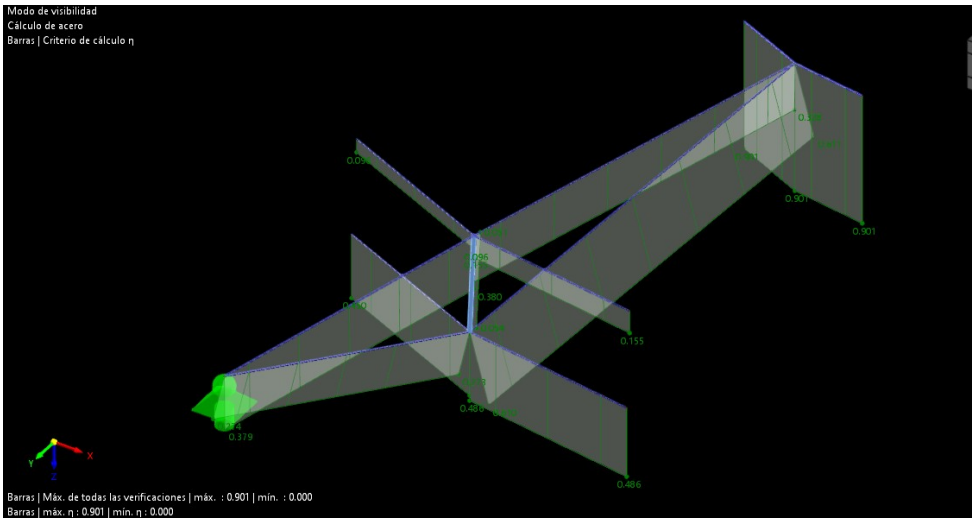


Figura 13.15: Diagramas de resultados de la comprobación.

Razón de tensiones en barras por barra | Cálculo de acero | EN 1993 | UNE | 2016-02

Ir a Edición Selección Ver Configuración

Cálculo de acero | Razones de tensiones en barras

Barra núm.	Posición x [m]	Punto de tensión nú	Situación de proyect	Carga núm.	Relación de control de cálculo η [--]	Tipo de compr. de diseño	
160	Barra traccionada | 11 - R 25 | L : 19.744 m						
	19.744		SP1	CO1	0.611	SP1100.00	Comprobación de la sección | Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3
161	Barra traccionada | 9 - R 35 | L : 14.693 m						
	14.693		SP1	CO2	0.380	SP1100.00	Comprobación de la sección | Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3
162	Barra traccionada | 9 - R 35 | L : 15.224 m						
	0.000		SP1	CO1	0.274	SP1100.00	Comprobación de la sección | Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3
163	Barra traccionada | 12 - R 29.7 | L : 8.695 m						
	8.695		SP1	CO2	0.155	SP1100.00	Comprobación de la sección | Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3
164	Barra traccionada | 12 - R 29.7 | L : 8.759 m						
	0.000		SP1	CO2	0.486	SP1100.00	Comprobación de la sección | Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3
171	Barra traccionada | 12 - R 29.7 | L : 8.695 m						
	0.000		SP1	CO2	0.096	SP1100.00	Comprobación de la sección | Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3
172	Barra traccionada | 12 - R 29.7 | L : 8.759 m						
	8.759		SP1	CO2	0.450	SP1100.00	Comprobación de la sección | Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3
216	Barra traccionada | 14 - R 45 | L : 3.759 m						
	3.759		SP1	CO1	0.901	SP1100.00	Comprobación de la sección | Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3
217	Barra traccionada | 14 - R 45 | L : 3.759 m						
	0.000		SP1	CO1	0.901	SP1100.00	Comprobación de la sección | Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3

Figura 13.16: Tabla de resultados de las comprobaciones.

Como podemos observar en las anteriores imágenes, todas los redondos comprobados cumplen con los requisitos de seguridad mostrando la combinación para cada barra mas limitante. En el caso de la sección 161 es la combinación de cargas 1 y para la barra 162 es la combinación de cargas número 2.

A continuación en las siguientes figuras, se muestran los cálculos que realiza RFEM6 para sus comprobaciones junto con la sección de la norma a la que pertenece dicha comprobación.

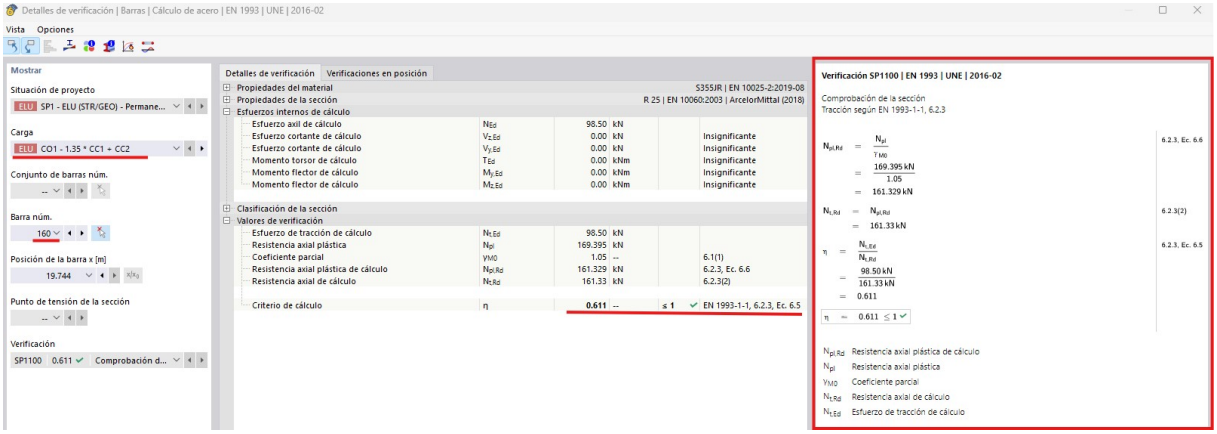


Figura 13.17: Comprobaciones de RFEM6 para la barra 161.

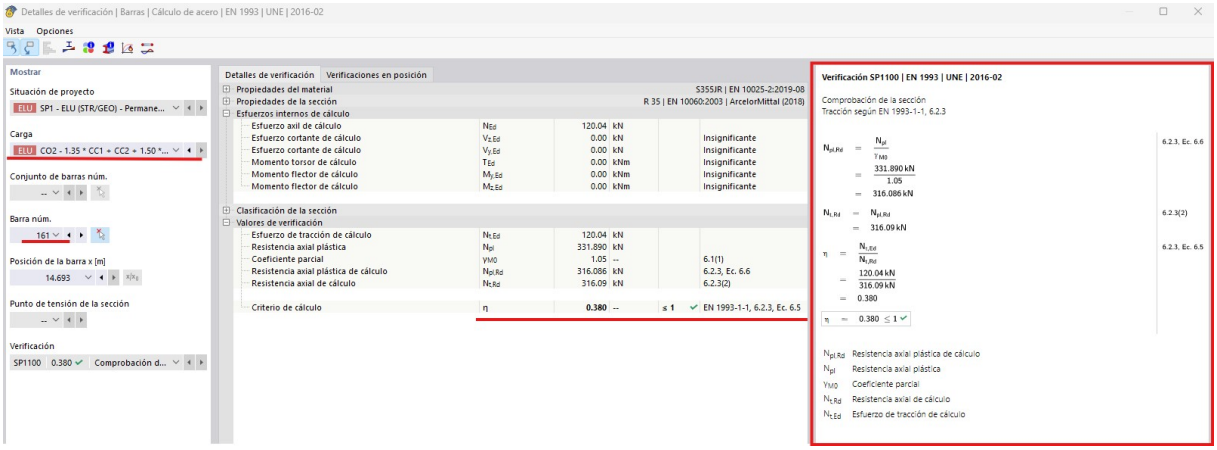


Figura 13.18: Comprobaciones de RFEM6 para la barra 162.

A continuación se muestran los informes que proporciona el programa para un mejor entendimiento de los cálculos realizados por este.

Verificación SP1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3

$$N_{pl,Rd} = \frac{N_{pl}}{\gamma_{M0}} = \frac{169.395\,kN}{1.05} = 161.329\,kN$$ 6.2.3, Ec. 6.6

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = 161.33\,kN$$ 6.2.3(2)

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{53.09\,kN}{161.33\,kN} = 0.329$$ 6.2.3, Ec. 6.5

$$\eta = 0.329 \leq 1$$ ✔

$N_{pl,Rd}$	Resistencia axial plástica de cálculo
N_{pl}	Resistencia axial plástica
γ_{M0}	Coeficiente parcial
$N_{t,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
$N_{t,Ed}$	Esfuerzo de tracción de cálculo

Verificación SP1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3

$$N_{pl,Rd} = \frac{N_{pl}}{\gamma_{M0}} = \frac{169.395\,kN}{1.05} = 161.329\,kN$$ 6.2.3, Ec. 6.6

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = 161.33\,kN$$ 6.2.3(2)

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{98.43\,kN}{161.33\,kN} = 0.610$$ 6.2.3, Ec. 6.5

$$\eta = 0.610 \leq 1$$ ✔

$N_{pl,Rd}$	Resistencia axial plástica de cálculo
N_{pl}	Resistencia axial plástica
γ_{M0}	Coeficiente parcial
$N_{t,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
$N_{t,Ed}$	Esfuerzo de tracción de cálculo

Verificación SP1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3

$$N_{pl,Rd} = \frac{N_{pl}}{\gamma_{M0}} = \frac{331.890\,kN}{1.05} = 316.086\,kN$$ 6.2.3, Ec. 6.6

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = 316.09\,kN$$ 6.2.3(2)

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{76.08\,kN}{316.09\,kN} = 0.241$$ 6.2.3, Ec. 6.5

$$\eta = 0.241 \leq 1$$ ✔

$N_{pl,Rd}$	Resistencia axial plástica de cálculo
N_{pl}	Resistencia axial plástica
γ_{M0}	Coeficiente parcial
$N_{t,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
$N_{t,Ed}$	Esfuerzo de tracción de cálculo

Verificación SP1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3

$$N_{pl,Rd} = \frac{N_{pl}}{\gamma_{M0}} = \frac{331.890\,kN}{1.05} = 316.086\,kN$$ 6.2.3, Ec. 6.6

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = 316.09\,kN$$ 6.2.3(2)

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{86.61\,kN}{316.09\,kN} = 0.274$$ 6.2.3, Ec. 6.5

$$\eta = 0.274 \leq 1$$ ✔

$N_{pl,Rd}$	Resistencia axial plástica de cálculo
N_{pl}	Resistencia axial plástica
γ_{M0}	Coeficiente parcial
$N_{t,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
$N_{t,Ed}$	Esfuerzo de tracción de cálculo

Verificación SP1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3

$$N_{pl,Rd} = \frac{N_{pl}}{\gamma_{M0}} = \frac{239.085\,kN}{1.05} = 227.700\,kN$$ 6.2.3, Ec. 6.6

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = 227.70\,kN$$ 6.2.3(2)

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{35.20\,kN}{227.70\,kN} = 0.155$$ 6.2.3, Ec. 6.5

$$\eta = 0.155 \leq 1$$ ✔

$N_{pl,Rd}$	Resistencia axial plástica de cálculo
N_{pl}	Resistencia axial plástica
γ_{M0}	Coeficiente parcial
$N_{t,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
$N_{t,Ed}$	Esfuerzo de tracción de cálculo

Verificación SP1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3

$$N_{pl,Rd} = \frac{N_{pl}}{\gamma_{M0}} = \frac{239.085\,kN}{1.05} = 227.700\,kN$$ 6.2.3, Ec. 6.6

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = 227.70\,kN$$ 6.2.3(2)

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{110.74\,kN}{227.70\,kN} = 0.486$$ 6.2.3, Ec. 6.5

$$\eta = 0.486 \leq 1$$ ✔

$N_{pl,Rd}$	Resistencia axial plástica de cálculo
N_{pl}	Resistencia axial plástica
γ_{M0}	Coeficiente parcial
$N_{t,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
$N_{t,Ed}$	Esfuerzo de tracción de cálculo

Verificación SP1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3

$$N_{pl,Rd} = \frac{N_{pl}}{\gamma_{M0}} = \frac{239.085\,kN}{1.05} = 227.700\,kN$$ 6.2.3, Ec. 6.6

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = 227.70\,kN$$ 6.2.3(2)

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{21.81\,kN}{227.70\,kN} = 0.096$$ 6.2.3, Ec. 6.5

$$\eta = 0.096 \leq 1$$ ✔

$N_{pl,Rd}$	Resistencia axial plástica de cálculo
N_{pl}	Resistencia axial plástica
γ_{M0}	Coeficiente parcial
$N_{t,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
$N_{t,Ed}$	Esfuerzo de tracción de cálculo

Verificación SP1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3

$$N_{pl,Rd} = \frac{N_{pl}}{\gamma_{M0}} = \frac{239.085\,kN}{1.05} = 227.700\,kN$$ 6.2.3, Ec. 6.6

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = 227.70\,kN$$ 6.2.3(2)

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{102.45\,kN}{227.70\,kN} = 0.450$$ 6.2.3, Ec. 6.5

$$\eta = 0.450 \leq 1$$ ✔

$N_{pl,Rd}$	Resistencia axial plástica de cálculo
N_{pl}	Resistencia axial plástica
γ_{M0}	Coeficiente parcial
$N_{t,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
$N_{t,Ed}$	Esfuerzo de tracción de cálculo

Verificación SP1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3

$$N_{pl,Rd} = \frac{N_{pl}}{\gamma_{M0}} = \frac{532.650\,kN}{1.05} = 507.286\,kN$$ 6.2.3, Ec. 6.6

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = 507.29\,kN$$ 6.2.3(2)

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{456.83\,kN}{507.29\,kN} = 0.901$$ 6.2.3, Ec. 6.5

$\eta = 0.901 \leq 1$ ✔

$N_{pl,Rd}$	Resistencia axial plástica de cálculo
N_{pl}	Resistencia axial plástica
γ_{M0}	Coeficiente parcial
$N_{t,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
$N_{t,Ed}$	Esfuerzo de tracción de cálculo

Verificación SP1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Tracción según EN 1993-1-1, 6.2.3

$$N_{pl,Rd} = \frac{N_{pl}}{\gamma_{M0}} = \frac{532.650\,kN}{1.05} = 507.286\,kN$$ 6.2.3, Ec. 6.6

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = 507.29\,kN$$ 6.2.3(2)

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{456.85\,kN}{507.29\,kN} = 0.901$$ 6.2.3, Ec. 6.5

$\eta = 0.901 \leq 1$ ✔

$N_{pl,Rd}$	Resistencia axial plástica de cálculo
N_{pl}	Resistencia axial plástica
γ_{M0}	Coeficiente parcial
$N_{t,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
$N_{t,Ed}$	Esfuerzo de tracción de cálculo

13.2 Sección CHS 200/10/H de acero S275-JR

Para la comprobación de esta sección se tomara una de las 24 barras que componen parte de la cubierta.

La decisión de el estudio de una sola barra es debido a que la cubierta presenta simetría tanto en la forma geométrica como en la distribución de cargas de pretensado, la única que puede presentar variación y lo hace es las carga producida por el viento, por ello la sección escogida se localiza en una de las regiones de la cubierta con mayor exposición a este el cual origina un pequeño cambio en la forma de la cubierta por las membranas.

Para este estudio, se ha tomado la barra número 240, la cual ha aparecido ya en el anterior apartado. Se realizará un cálculo de acero para comprobar sus esfuerzos y comportamiento respecto a estos.

Para ello debemos seleccionarla como se muestra en la siguiente imagen, donde se ve un pequeño sector de la cubierta para una mejor identificación del perfil seleccionado en amarillo.

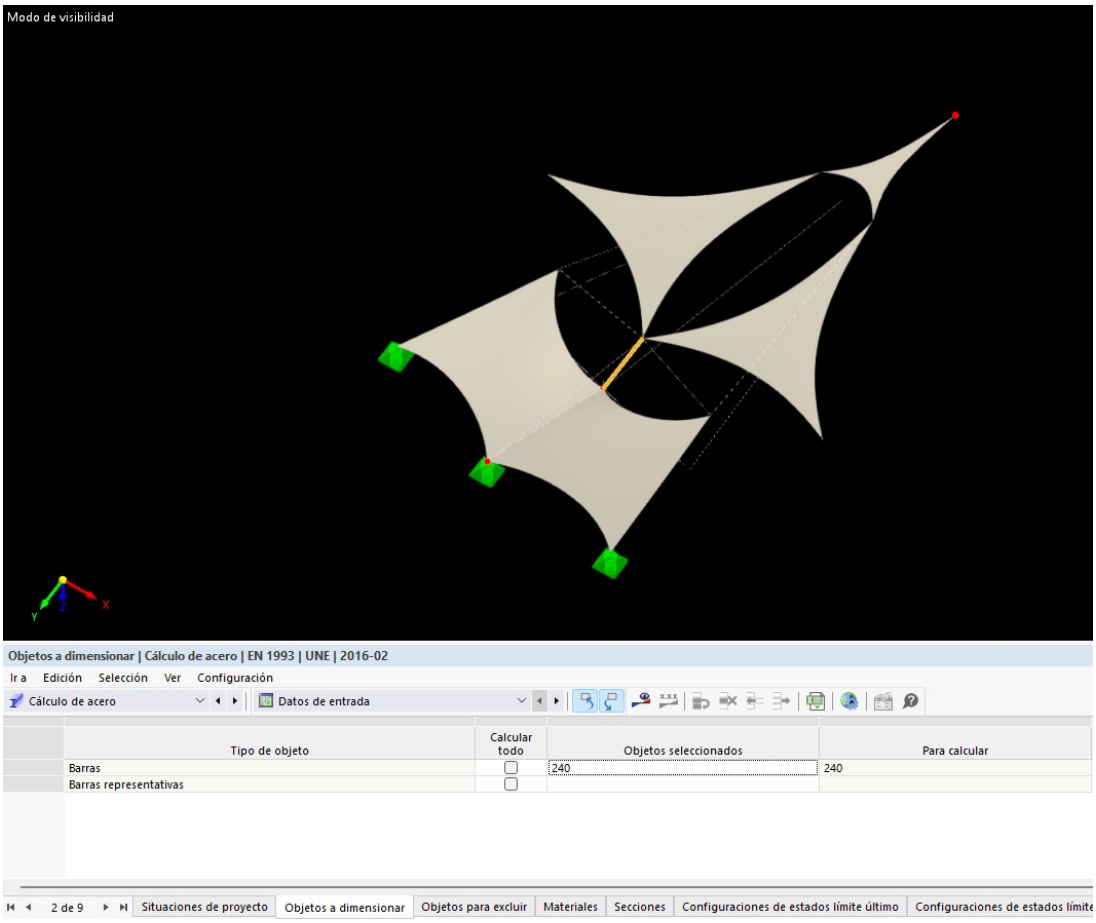


Figura 13.19: Selección perfil tubular CHS.

Una vez seleccionado, realizamos el cálculo obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la **figura 13.20**.

Razón de tensiones en barras por situación de proyecto | Cálculo de acero | EN 1993 | UNE | 2016-02

Ir a Edición Selección Ver Configuración

Cálculo de acero | Razones de tensiones en barras | Sin

Situac. de proyecto	Barra núm.	Posición x [m]	Punto de tensión nú	Carga núm.	Relación de control de cálculo η [--]	Tipo de compr. de diseño	Descripción
SP1	ELU (STR/GEO) - Permanente y transitoria - Ec. 6.10						
	240	0.000		CO1	0.016	SP1200.00	Comprobación de la sección | Compresión según EN 1993-1-1, 6.2.4
		5.000		CO1	0.004	SP3100.02	Comprobación de la sección | Cortante en el eje z según EN 1993-1-1, 6.2.6(2) | Cálculo plástico
		5.000		CO2	0.004	SP3300.02	Comprobación de la sección | Cortante resultante según EN 1993-1-1, 6.2.6(2) | Cálculo plástico
		2.500 1/2		CO1	0.030	SP4100.03	Comprobación de la sección | Flexión respecto al eje y según EN 1993-1-1, 6.2.5 | Cálculo plástico
		3.750 3/4		CO2	0.007	SP5100.03	Comprobación de la sección | Flexión respecto al eje z según EN 1993-1-1, 6.2.5 | Cálculo plástico
		2.500 1/2		CO2	0.001	SP6500.01	Comprobación de la sección | Flexión biaxial, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.1 y 6.2.10 | Cálculo plástico
		2.500 1/2		CO1	0.031	SP6500.02	Comprobación de la sección | Flexión respecto al eje y, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.1 y 6.2.10 | Cálculo plástico
		0.000		CO2	0.004	SP6500.03	Comprobación de la sección | Flexión respecto al eje z, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.1 y 6.2.10 | Cálculo plástico
		0.000		CO1	0.000	ST1100.00	Estabilidad | Pandeo por flexión respecto al eje y principal según EN 1993-1-1, 6.3.1
		0.000		CO1	0.000	ST1300.00	Estabilidad | Pandeo por flexión respecto al eje z principal según EN 1993-1-1, 6.3.1
		0.000		CO2	0.051	ST3100.00	Estabilidad | Flexión y pandeo respecto a los ejes principales según EN 1993-1-1, 6.3.3
SP2	ELS - Característica						
	240	0.000		CO3	0.000	SE0100.00	Estado límite de servicio | Flechas insignificantes
		2.500 1/2		CO3	0.051	SE1100.00	Estado límite de servicio | Flechas en dirección z
		3.333 2/3		CO4	0.007	SE1200.00	Estado límite de servicio | Flechas en dirección y
SP3	ELS - Frecuente						
	240	0.000		CO5	0.000	SE0100.00	Estado límite de servicio | Flechas insignificantes
		2.500 1/2		CO5	0.034	SE1100.00	Estado límite de servicio | Flechas en dirección z
SP4	ELS - Cuasipermanente						
	240	0.000		CO7	0.000	SE0100.00	Estado límite de servicio | Flechas insignificantes
		2.500 1/2		CO7	0.034	SE1100.00	Estado límite de servicio | Flechas en dirección z

Figura 13.20: Tabla de resultados del cálculo.

En la anterior imagen se muestras las diferentes situaciones de proyecto donde SP1 pertenece a un cálculo en Estado límite Último y SP2, SP3 y SP4 pertenecen a un cálculo en Estado Límite de Servicio.

A continuación se adjuntan algunos de los informes de cálculo proporcionados por el programa para una mayor claridad de los cálculos realizados para llegar a estos resultados.

Verificación SP1200 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Compresión según EN 1993-1-1, 6.2.4

$$N_{c,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 59.69\,cm^2 \cdot \frac{275.000\,N/mm^2}{1.05} = 1563.32\,kN$$ Ec. 6.10

$$\eta_N = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{24.67\,kN}{1563.32\,kN} = 0.016$$

$$\eta = \eta_N = 0.016$$ 6.2.4, Ec. 6.9

$$\eta = 0.016 \leq 1$$ ✔

$N_{c,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
A	Área de la sección
f_y	Límite elástico
γ_{M0}	Coeficiente parcial
η_N	Componente de cálculo para N
$N_{c,Ed}$	Esfuerzo de compresión de cálculo

Verificación SP3100.02 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Cortante en el eje z según EN 1993-1-1, 6.2.6(2) | Cálculo plástico

6.2.6(2), Ec. 6.18

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{38.00\,cm^2 \cdot \left(\frac{275.000\,N/mm^2}{\sqrt{3}}\right)}{1.05} = 574.60\,kN$$

6.2.6(1)

$$V_{c,z,Rd} = V_{pl,z,Rd} = 574.60\,kN$$

$$\eta_{Vz} = \frac{V_{z,Ed}}{V_{c,z,Rd}} = \frac{2.28\,kN}{574.60\,kN} = 0.004$$

$$\eta = \eta_{Vz} = 0.004$$

$$\eta = 0.004 \leq 1 \checkmark$$

$V_{pl,z,Rd}$	Valor de cálculo de la resistencia a cortante
$A_{v,z}$	Área de cortante
f_y	Límite elástico
γ_{M0}	Coeficiente parcial
$V_{c,z,Rd}$	Resistencia al esfuerzo cortante
η_{Vz}	Componente de cálculo para V_z
$V_{z,Ed}$	Esfuerzo cortante de cálculo

Verificación ST1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Estabilidad
Pandeo por flexión respecto al eje y principal según EN 1993-1-1, 6.3.1

$$N_{cr,y} = (\pi)^2 \cdot E \cdot \frac{I_y}{(L_{cr,y})^2} = (\pi)^2 \cdot 210000.000\,N/mm^2 \cdot \frac{2697.60\,cm^4}{(5.000\,m)^2} = 2236.44\,kN$$ 6.3.1.2(1)

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{59.69\,cm^2 \cdot 275.000\,N/mm^2}{2236.44\,kN}} = 0.857$$ 6.3.1.3(1)

$$\eta_{N_{cr,y}} = \gamma_{M1} \cdot \frac{N_{c,Ed}}{N_{cr,y}} = 1.05 \cdot \frac{24.67\,kN}{2236.44\,kN} = 0.012$$ 6.3.1.2(4)

$$\eta_{N_{cr,y}} \leq 0.04$$

Se pueden omitir los efectos de pandeo según EN 1993-1-1, 6.3.1.2(4).

$$\eta = 0.000 \leq 1$$ ✔

$N_{cr,y}$	Esfuerzo crítico elástico
E	Módulo de elasticidad
I_y	Momento de inercia
$L_{cr,y}$	Longitud de pandeo
$\bar{\lambda}_y$	Esbeltez adimensional
A	Área de la sección
f_y	Límite elástico
$\eta_{N_{cr,y}}$	Criterio N_{Ed} / $N_{cr,y}$
γ_{M1}	Coeficiente parcial
$N_{c,Ed}$	Esfuerzo de compresión de cálculo

Verificación ST1300 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Estabilidad
Pandeo por flexión respecto al eje z principal según EN 1993-1-1, 6.3.1

$$N_{cr,z} = (\pi)^2 \cdot E \cdot \frac{I_z}{(L_{cr,z})^2} = (\pi)^2 \cdot 210000.000\,N/mm^2 \cdot \frac{2697.60\,cm^4}{(5.000\,m)^2} = 2236.44\,kN$$ 6.3.1.2(1)

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{59.69\,cm^2 \cdot 275.000\,N/mm^2}{2236.44\,kN}} = 0.857$$ 6.3.1.3(1)

$$\eta_{N_{cr,z}} = \gamma_{M1} \cdot \frac{N_{c,Ed}}{N_{cr,z}} = 1.05 \cdot \frac{24.67\,kN}{2236.44\,kN} = 0.012$$ 6.3.1.2(4)

$$\eta_{N_{cr,z}} \leq 0.04$$

Se pueden omitir los efectos de pandeo según EN 1993-1-1, 6.3.1.2(4).

$$\eta = 0.000 \leq 1$$ ✔

$N_{cr,z}$	Esfuerzo crítico elástico
E	Módulo de elasticidad
I_z	Momento de inercia
$L_{cr,z}$	Longitud de pandeo
$\bar{\lambda}_z$	Esbeltez adimensional
A	Área de la sección
f_y	Límite elástico
$\eta_{N_{cr,z}}$	Criterio N_{Ed} / $N_{cr,z}$
γ_{M1}	Coeficiente parcial
$N_{c,Ed}$	Esfuerzo de compresión de cálculo

Verificación ST3100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Estabilidad
Flexión y pandeo respecto a los ejes principales según EN 1993-1-1, 6.3.3

$$N_{cr,y} = (\pi)^2 \cdot E \cdot \frac{I_y}{(L_{cr,y})^2} = (\pi)^2 \cdot 210000.000\,N/mm^2 \cdot \frac{2697.60\,cm^4}{(5.000\,m)^2} = 2236.44\,kN$$ 6.3.1.2(1)

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{59.69\,cm^2 \cdot 275.000\,N/mm^2}{2236.44\,kN}} = 0.857$$ 6.3.1.3(1)

$$\Phi_y = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_y \cdot \left(\bar{\lambda}_y - 0.2\right) + \left(\bar{\lambda}_y\right)^2\right] = 0.5 \cdot \left[1 + 0.210 \cdot (0.857 - 0.2) + (0.857)^2\right] = 0.936$$ 6.3.1.2(1)

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{(\Phi_y)^2 - \left(\bar{\lambda}_y\right)^2}} = \frac{1}{0.936 + \sqrt{(0.936)^2 - (0.857)^2}} = 0.76$$ 6.3.1.2(1), ec. 6.49

$$N_{cr,z} = (\pi)^2 \cdot E \cdot \frac{I_z}{(L_{cr,z})^2} = (\pi)^2 \cdot 210000.000\,N/mm^2 \cdot \frac{2697.60\,cm^4}{(5.000\,m)^2} = 2236.44\,kN$$ 6.3.1.2(1)

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{59.69\,cm^2 \cdot 275.000\,N/mm^2}{2236.44\,kN}} = 0.857$$ 6.3.1.3(1)

$$\Phi_z = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_z \cdot \left(\bar{\lambda}_z - 0.2\right) + \left(\bar{\lambda}_z\right)^2\right] = 0.5 \cdot \left[1 + 0.210 \cdot (0.857 - 0.2) + (0.857)^2\right] = 0.936$$ 6.3.1.2(1)

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{(\Phi_z)^2 - \left(\bar{\lambda}_z\right)^2}} = \frac{1}{0.936 + \sqrt{(0.936)^2 - (0.857)^2}} = 0.76$$ 6.3.1.2(1), ec. 6.49

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 59.69\,cm^2 \cdot 275.000\,N/mm^2 = 1641.480\,kN$$ 6.3.3, tab. 6.7

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 361.33\,cm^3 \cdot 275.000\,N/mm^2 = 99.37\,kNm$$ 6.3.3, tab. 6.7

$$\alpha_{h,y} = \frac{M_{h,y}}{M_{s,y}} = \frac{0.00\,kNm}{2.85\,kNm} = 0.000$$ Tab. B.3

$$C_{my} = 0.95 + 0.05 \cdot \alpha_{h,y} = 0.95 + 0.05 \cdot 0.000 = 0.950$$ Tab. B.3

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + \left(\overline{\lambda}_y - 0.2\right) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)$$

$$= 0.950 \cdot \left(1 + (0.857 - 0.2) \cdot \frac{24.67\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}\right)$$

$$= 0.963$$

$$k_{yy} = \min\left(k_{yy},\ C_{my} \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)\right)$$

$$= \min\left(0.963,\ 0.950 \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \frac{24.67\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}\right)\right)$$

$$= 0.963$$

6.3.3(4)

$$k_{zy} = 0.6 \cdot C_{my} \cdot \left(1 + \left(\overline{\lambda}_y - 0.2\right) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)$$

$$= 0.6 \cdot 0.950 \cdot \left(1 + (0.857 - 0.2) \cdot \frac{24.67\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}\right)$$

$$= 0.578$$

6.3.3(4)

$$k_{zy} = \min\left(k_{zy},\ 0.6 \cdot C_{my} \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)\right)$$

$$= \min\left(0.578,\ 0.6 \cdot 0.950 \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \frac{24.67\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}\right)\right)$$

$$= 0.578$$

6.3.3(4), ec. 6.61

$$\eta_{N6.61} = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}$$

$$= \frac{24.67\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}$$

$$= 0.021$$

6.3.3(4), ec. 6.61

$$\eta_{My6.61} = k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}$$

$$= 0.963 \cdot \frac{2.85\,kNm}{\frac{99.37\,kNm}{1.05}}$$

$$= 0.029$$

6.3.3(4), ec. 6.61

$$\eta_{6.61} = \eta_{N6.61} + \eta_{My6.61}$$

$$= 0.021 + 0.029$$

$$= 0.050$$

6.3.3(4), ec. 6.62

$$\eta_{N6.62} = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}$$

$$= \frac{24.67\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}$$

$$= 0.021$$

6.3.3(4), ec. 6.62

$$\eta_{My6.62} = k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}$$

$$= 0.578 \cdot \frac{2.85\,kNm}{\frac{99.37\,kNm}{1.05}}$$

$$= 0.017$$

6.3.3(4), ec. 6.62

$$\eta_{6.62} = \eta_{N6.62} + \eta_{My6.62}$$

$$= 0.021 + 0.017$$

$$= 0.038$$

$\eta = \max(\eta_{6.61}, \eta_{6.62})$
$= \max(0.050, 0.038)$
$= 0.050$

6.3.3(4), ec. 6.61, 6.62

$\eta = 0.050 \leq 1$ ✔

$N_{cr,y}$	Esfuerzo crítico elástico
E	Módulo de elasticidad
I_y	Momento de inercia
$L_{cr,y}$	Longitud de pandeo
$\bar{\lambda}_y$	Esbeltez adimensional
A	Área de la sección
f_y	Límite elástico
Φ_y	Valor para determinar el coeficiente de reducción χ
α_y	Coeficiente de imperfección
χ_y	Coeficiente de reducción para pandeo
$N_{cr,z}$	Esfuerzo crítico elástico
I_z	Momento de inercia
$L_{cr,z}$	Longitud de pandeo
$\bar{\lambda}_z$	Esbeltez adimensional
Φ_z	Valor para determinar el coeficiente de reducción χ
α_z	Coeficiente de imperfección
χ_z	Coeficiente de reducción
N_{Rk}	Valor característico de la resistencia a compresión
$M_{y,Rk}$	Valor característico de la resistencia a momentos flectores
$W_{pl,y}$	Módulo resistente plástico
$\alpha_{h,y}$	Coeficiente
$M_{h,y}$	Momento con viga cóncava hacia abajo
$M_{s,y}$	Momento con viga cóncava hacia arriba
C_{my}	Coeficiente del momento uniforme equivalente
k_{yy}	Coeficiente de interacción
$N_{c,Ed}$	Esfuerzo de compresión de cálculo
γ_{M1}	Coeficiente parcial
k_{zy}	Coeficiente de interacción
$\eta_{N\ 6.61}$	Componente de cálculo para N
$\eta_{My\ 6.61}$	Componente de cálculo para M_y
$M_{y,Ed}$	Momento flector de cálculo (máximo en segmento)
$\eta_{6.61}$	Razón de tensiones
$\eta_{N\ 6.62}$	Componente de cálculo para N
$\eta_{My\ 6.62}$	Componente de cálculo para M_y
$\eta_{6.62}$	Razón de tensiones

Verificación SP1200 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Compresión según EN 1993-1-1, 6.2.4

$$N_{c,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 59.69\,cm^2 \cdot \frac{275.000\,N/mm^2}{1.05} = 1563.32\,kN$$ Ec. 6.10

$$\eta_N = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{24.39\,kN}{1563.32\,kN} = 0.016$$

$$\eta = \eta_N = 0.016$$ 6.2.4, Ec. 6.9

$$\eta = 0.016 \leq 1$$ ✔

$N_{c,Rd}$	Resistencia axial de cálculo
A	Área de la sección
f_y	Límite elástico
γ_{M0}	Coeficiente parcial
η_N	Componente de cálculo para N
$N_{c,Ed}$	Esfuerzo de compresión de cálculo

Verificación SP3100.02 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Cortante en el eje z según EN 1993-1-1, 6.2.6(2) | Cálculo plástico

6.2.6(2), Ec. 6.18

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{38.00\,cm^2 \cdot \left(\frac{275.000\,N/mm^2}{\sqrt{3}}\right)}{1.05} = 574.60\,kN$$

6.2.6(1)

$$V_{c,z,Rd} = V_{pl,z,Rd} = 574.60\,kN$$

$$\eta_{Vz} = \frac{V_{z,Ed}}{V_{c,z,Rd}} = \frac{2.23\,kN}{574.60\,kN} = 0.004$$

$$\eta = \eta_{Vz} = 0.004$$

$$\eta = 0.004 \leq 1 \checkmark$$

$V_{pl,z,Rd}$	Valor de cálculo de la resistencia a cortante
$A_{v,z}$	Área de cortante
f_y	Límite elástico
γ_{M0}	Coeficiente parcial
$V_{c,z,Rd}$	Resistencia al esfuerzo cortante
η_{Vz}	Componente de cálculo para V_z
$V_{z,Ed}$	Esfuerzo cortante de cálculo

Verificación SP5100.03 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Flexión respecto al eje z según EN 1993-1-1, 6.2.5 | Cálculo plástico

6.2.5, Ec. 6.13

$$M_{pl,z,Rd} = W_{pl,z} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 361.33\,cm^3 \cdot \frac{275.000\,N/mm^2}{1.05} = 94.63\,kNm$$

$$\eta_{Mz} = \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = \frac{0.29\,kNm}{94.63\,kNm} = 0.003$$

$$\eta = \eta_{Mz} = 0.003$$

$$\eta = 0.003 \leq 1 \checkmark$$

$M_{pl,z,Rd}$	Momento resistente de cálculo
$W_{pl,z}$	Módulo resistente plástico
f_y	Límite elástico
γ_{M0}	Coeficiente parcial
η_{Mz}	Componente de cálculo para M_z
$M_{z,Ed}$	Momento flector de cálculo

Verificación ST3100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Estabilidad
Flexión y pandeo respecto a los ejes principales según EN 1993-1-1, 6.3.3

$$N_{cr,y} = (\pi)^2 \cdot E \cdot \frac{I_y}{(L_{cr,y})^2} = (\pi)^2 \cdot 210000.000\,N/mm^2 \cdot \frac{2697.60\,cm^4}{(5.000\,m)^2} = 2236.44\,kN$$ 6.3.1.2(1)

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{59.69\,cm^2 \cdot 275.000\,N/mm^2}{2236.44\,kN}} = 0.857$$ 6.3.1.3(1)

$$\Phi_y = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_y \cdot \left(\bar{\lambda}_y - 0.2\right) + \left(\bar{\lambda}_y\right)^2\right] = 0.5 \cdot \left[1 + 0.210 \cdot (0.857 - 0.2) + (0.857)^2\right] = 0.936$$ 6.3.1.2(1)

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{(\Phi_y)^2 - \left(\bar{\lambda}_y\right)^2}} = \frac{1}{0.936 + \sqrt{(0.936)^2 - (0.857)^2}} = 0.76$$ 6.3.1.2(1), ec. 6.49

$$N_{cr,z} = (\pi)^2 \cdot E \cdot \frac{I_z}{(L_{cr,z})^2} = (\pi)^2 \cdot 210000.000\,N/mm^2 \cdot \frac{2697.60\,cm^4}{(5.000\,m)^2} = 2236.44\,kN$$ 6.3.1.2(1)

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{59.69\,cm^2 \cdot 275.000\,N/mm^2}{2236.44\,kN}} = 0.857$$ 6.3.1.3(1)

$$\Phi_z = 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_z \cdot \left(\bar{\lambda}_z - 0.2\right) + \left(\bar{\lambda}_z\right)^2\right] = 0.5 \cdot \left[1 + 0.210 \cdot (0.857 - 0.2) + (0.857)^2\right] = 0.936$$ 6.3.1.2(1)

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{(\Phi_z)^2 - \left(\bar{\lambda}_z\right)^2}} = \frac{1}{0.936 + \sqrt{(0.936)^2 - (0.857)^2}} = 0.76$$ 6.3.1.2(1), ec. 6.49

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 59.69\,cm^2 \cdot 275.000\,N/mm^2 = 1641.480\,kN$$ 6.3.3, tab. 6.7

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 361.33\,cm^3 \cdot 275.000\,N/mm^2 = 99.37\,kNm$$ 6.3.3, tab. 6.7

$$M_{z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y = 361.33\,cm^3 \cdot 275.000\,N/mm^2 = 99.37\,kNm$$ 6.3.3, tab. 6.7

$$\alpha_{h,y} = \frac{M_{h,y}}{M_{s,y}} = \frac{0.00\,kNm}{2.79\,kNm} = 0.001$$ Tab. B.3

$$C_{my} = 0.9 + 0.1 \cdot \alpha_{h,y} = 0.9 + 0.1 \cdot 0.001 = 0.900$$ Tab. B.3

$$\alpha_{h,z} = \frac{M_{h,z}}{M_{s,z}} = \frac{0.29\,kNm}{-0.38\,kNm} = -0.761$$ Tab. B.3

$$C_{mz} = 0.9 + 0.1 \cdot \alpha_{h,z} = 0.9 + 0.1 \cdot -0.761 = 0.824$$ Tab. B.3

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + \left(\bar{\lambda}_y - 0.2\right) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right) = 0.900 \cdot \left(1 + (0.857 - 0.2) \cdot \frac{24.39\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}\right) = 0.912$$

$$k_{yy} = \min\left(k_{yy},\ C_{my} \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)\right) = \min\left(0.912,\ 0.900 \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \frac{24.39\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}\right)\right) = 0.912$$

$$k_{yz} = 0.6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + \left(\bar{\lambda}_z - 0.2\right) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right) = 0.6 \cdot 0.824 \cdot \left(1 + (0.857 - 0.2) \cdot \frac{24.39\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}\right) = 0.501$$ 6.3.3(4)

$$k_{yz} = \min\left(k_{yz},\ 0.6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)\right) = \min\left(0.501,\ 0.6 \cdot 0.824 \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \frac{24.39\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}\right)\right) = 0.501$$ 6.3.3(4)

$$k_{zy} = 0.6 \cdot C_{my} \cdot \left(1 + \left(\bar{\lambda}_y - 0.2\right) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right) = 0.6 \cdot 0.900 \cdot \left(1 + (0.857 - 0.2) \cdot \frac{24.39\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}\right) = 0.547$$ 6.3.3(4)

$$k_{zy} = \min\left(k_{zy},\ 0.6 \cdot C_{my} \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)\right) = \min\left(0.547,\ 0.6 \cdot 0.900 \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \frac{24.39\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}\right)\right) = 0.547$$ 6.3.3(4)

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + \left(\bar{\lambda}_z - 0.2\right) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right) = 0.824 \cdot \left(1 + (0.857 - 0.2) \cdot \frac{24.39\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}\right) = 0.835$$ 6.3.3(4)

$$k_{zz} = \min\left(k_{zz},\ C_{mz} \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}\right)\right)$$ 6.3.3(4)

$$= \min\left(0.835,\ 0.824 \cdot \left(1 + 0.8 \cdot \frac{24.39\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}\right)\right)$$

$$= 0.835$$

$$\eta_{N6.61} = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}$$ 6.3.3(4), ec. 6.61

$$= \frac{24.39\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}$$

$$= 0.020$$

$$\eta_{My6.61} = k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}$$ 6.3.3(4), ec. 6.61

$$= 0.912 \cdot \frac{2.79\,kNm}{\frac{99.37\,kNm}{1.05}}$$

$$= 0.027$$

$$\eta_{Mz6.61} = k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}}$$ 6.3.3(4), ec. 6.61

$$= 0.501 \cdot \frac{0.69\,kNm}{\frac{99.37\,kNm}{1.05}}$$

$$= 0.004$$

$$\eta_{6.61} = \eta_{N6.61} + \eta_{My6.61} + \eta_{Mz6.61}$$ 6.3.3(4), ec. 6.61

$$= 0.020 + 0.027 + 0.004$$

$$= 0.051$$

$$\eta_{N6.62} = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}}$$ 6.3.3(4), ec. 6.62

$$= \frac{24.39\,kN}{0.76 \cdot \frac{1641.480\,kN}{1.05}}$$

$$= 0.020$$

$$\eta_{My6.62} = k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}$$ 6.3.3(4), ec. 6.62

$$= 0.547 \cdot \frac{2.79\,kNm}{\frac{99.37\,kNm}{1.05}}$$

$$= 0.016$$

$$\eta_{Mz6.62} = k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}}$$ 6.3.3(4), ec. 6.62

$$= 0.835 \cdot \frac{0.69\,kNm}{\frac{99.37\,kNm}{1.05}}$$

$$= 0.006$$

$$\eta_{6.62} = \eta_{N6.62} + \eta_{My6.62} + \eta_{Mz6.62}$$ 6.3.3(4), ec. 6.62

$$= 0.020 + 0.016 + 0.006$$

$$= 0.043$$

$$\eta = \max(\eta_{6.61}, \eta_{6.62})$$ 6.3.3(4), ec. 6.61, 6.62

$$= \max(0.051,\ 0.043)$$

$$= 0.051$$

$$\eta = 0.051 \le 1 \checkmark$$

$N_{cr,y}$	Esfuerzo crítico elástico
E	Módulo de elasticidad
I_y	Momento de inercia
$L_{cr,y}$	Longitud de pandeo
$\bar{\lambda}_y$	Esbeltez adimensional
A	Área de la sección
f_y	Límite elástico

Φ_y	Valor para determinar el coeficiente de reducción χ
α_y	Coeficiente de imperfección
χ_y	Coeficiente de reducción para pandeo
$N_{cr,z}$	Esfuerzo crítico elástico
I_z	Momento de inercia
$L_{cr,z}$	Longitud de pandeo
$\bar{\lambda}_z$	Esbeltez adimensional
Φ_z	Valor para determinar el coeficiente de reducción χ
α_z	Coeficiente de imperfección
χ_z	Coeficiente de reducción
N_{Rk}	Valor característico de la resistencia a compresión
$M_{y,Rk}$	Valor característico de la resistencia a momentos flectores
$W_{pl,y}$	Módulo resistente plástico
$M_{z,Rk}$	Valor característico de la resistencia a momentos flectores
$W_{pl,z}$	Módulo resistente plástico
$\alpha_{h,y}$	Coeficiente
$M_{h,y}$	Momento con viga cóncava hacia abajo
$M_{s,y}$	Momento con viga cóncava hacia arriba
C_{my}	Coeficiente del momento uniforme equivalente
$\alpha_{h,z}$	Coeficiente
$M_{h,z}$	Momento con viga cóncava hacia abajo
$M_{s,z}$	Momento con viga cóncava hacia arriba
C_{mz}	Coeficiente del momento uniforme equivalente
k_{yy}	Coeficiente de interacción
$N_{c,Ed}$	Esfuerzo de compresión de cálculo
γ_{M1}	Coeficiente parcial
k_{yz}	Coeficiente de interacción
k_{zy}	Coeficiente de interacción
k_{zz}	Coeficiente de interacción
$\eta_{N\ 6.61}$	Componente de cálculo para N
$\eta_{My\ 6.61}$	Componente de cálculo para M_y
$M_{y,Ed}$	Momento flector de cálculo (máximo en segmento)
$\eta_{Mz\ 6.61}$	Componente de cálculo para M_z
$M_{z,Ed}$	Momento flector de cálculo (máximo en segmento)
$\eta_{6.61}$	Razón de tensiones
$\eta_{N\ 6.62}$	Componente de cálculo para N
$\eta_{My\ 6.62}$	Componente de cálculo para M_y
$\eta_{Mz\ 6.62}$	Componente de cálculo para M_z
$\eta_{6.62}$	Razón de tensiones

Verificación SP6500.03 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Comprobación de la sección
Flexión respecto al eje z, esfuerzo axil y cortante según EN 1993-1-1, 6.2.9.1 y 6.2.10 | Cálculo plástico

6.2.6(2), Ec. 6.18

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{38.00\,cm^2 \cdot \left(\frac{275.000\,N/mm^2}{\sqrt{3}}\right)}{1.05} = 574.60\,kN$$

$$V_{z,Rd,min.} = V_{pl,z,Rd} = 574.60\,kN$$

$$\eta_{Vz} = \frac{V_{z,Ed}}{V_{z,Rd,min.}} = \frac{2.23\,kN}{574.60\,kN} = 0.004$$

Según 6.2.8(2) or 6.2.10(2), se ignora el efecto del esfuerzo cortante/tensión tangencial en el eje z porque es menor que la mitad de la resistencia a cortante.

6.2.3, Ec. 6.6

$$N_{pl,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 59.69\,cm^2 \cdot \frac{275.000\,N/mm^2}{1.05} = 1563.320\,kN$$

6.2.5, Ec. 6.13

$$M_{pl,z,Rd} = W_{pl,z} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 361.33\,cm^3 \cdot \frac{275.000\,N/mm^2}{1.05} = 94.63\,kNm$$

6.2.9.1(5)

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{24.39\,kN}{1563.320\,kN} = 0.016$$

6.2.9.1(6)

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \cdot \left(1 - (n)^{1.7}\right) = 94.63\,kNm \cdot \left(1 - (0.016)^{1.7}\right) = 94.55\,kNm$$

6.2.9.1(2), ec. 6.31

$$\eta_{6.31} = \frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} = \frac{0.29\,kNm}{94.55\,kNm} = 0.003$$

$$\eta_N = \left(\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}\right)^{1.7} = \left(\frac{24.39\,kN}{1563.320\,kN}\right)^{1.7} = 0.001$$

$$\eta_{Mz} = \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = \frac{0.29\,kNm}{94.63\,kNm} = 0.003$$

$$\eta = \eta_N + \eta_{Mz} = 0.001 + 0.003 = 0.004$$

$$\eta = 0.004 \leq 1 \checkmark$$

$V_{pl,z,Rd}$	Valor de cálculo de la resistencia a cortante
$A_{v,z}$	Área de cortante
f_y	Límite elástico
γ_{M0}	Coeficiente parcial
η_{Vz}	Componente de cálculo para V_z
$V_{z,Ed}$	Esfuerzo cortante de cálculo

$V_{z,Rd,mín.}$	Valor de cálculo de la resistencia a cortante
$N_{pl,Rd}$	Resistencia axial plástica de cálculo
A	Área de la sección
$M_{pl,z,Rd}$	Momento resistente de cálculo
$W_{pl,z}$	Módulo resistente plástico
n	Relación entre el esfuerzo axil de cálculo y la resistencia plástica de cálculo
N_{Ed}	Esfuerzo axil de cálculo
$M_{N,z,Rd}$	Momento resistente de cálculo
$\eta_{6.31}$	Razón de tensiones
$M_{z,Ed}$	Momento flector de cálculo
η_N	Componente de cálculo para N
η_{Mz}	Componente de cálculo para M_z

Verificación ST1300 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Estabilidad
Pandeo por flexión respecto al eje z principal según EN 1993-1-1, 6.3.1

$$N_{cr,z} = (\pi)^2 \cdot E \cdot \frac{I_z}{(L_{cr,z})^2} = (\pi)^2 \cdot 210000.000\,N/mm^2 \cdot \frac{2697.60\,cm^4}{(5.000\,m)^2} = 2236.44\,kN$$ 6.3.1.2(1)

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{59.69\,cm^2 \cdot 275.000\,N/mm^2}{2236.44\,kN}} = 0.857$$ 6.3.1.3(1)

$$\eta_{N_{cr,z}} = \gamma_{M1} \cdot \frac{N_{c,Ed}}{N_{cr,z}} = 1.05 \cdot \frac{24.39\,kN}{2236.44\,kN} = 0.011$$ 6.3.1.2(4)

$$\eta_{N_{cr,z}} \leq 0.04$$

Se pueden omitir los efectos de pandeo según EN 1993-1-1, 6.3.1.2(4).

$$\eta = 0.000 \leq 1$$ ✔

$N_{cr,z}$	Esfuerzo crítico elástico
E	Módulo de elasticidad
I_z	Momento de inercia
$L_{cr,z}$	Longitud de pandeo
$\bar{\lambda}_z$	Esbeltez adimensional
A	Área de la sección
f_y	Límite elástico
$\eta_{N_{cr,z}}$	Criterio N_{Ed} / $N_{cr,z}$
γ_{M1}	Coeficiente parcial
$N_{c,Ed}$	Esfuerzo de compresión de cálculo

Verificación ST1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Estabilidad
Pandeo por flexión respecto al eje y principal según EN 1993-1-1, 6.3.1

$$N_{cr,y} = (\pi)^2 \cdot E \cdot \frac{I_y}{(L_{cr,y})^2} = (\pi)^2 \cdot 210000.000\,N/mm^2 \cdot \frac{2697.60\,cm^4}{(5.000\,m)^2} = 2236.44\,kN$$ 6.3.1.2(1)

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{59.69\,cm^2 \cdot 275.000\,N/mm^2}{2236.44\,kN}} = 0.857$$ 6.3.1.3(1)

$$\eta_{N_{cr,y}} = \gamma_{M1} \cdot \frac{N_{c,Ed}}{N_{cr,y}} = 1.05 \cdot \frac{24.39\,kN}{2236.44\,kN} = 0.011$$ 6.3.1.2(4)

$$\eta_{N_{cr,y}} \leq 0.04$$

Se pueden omitir los efectos de pandeo según EN 1993-1-1, 6.3.1.2(4).

$$\eta = 0.000 \leq 1$$ ✔

$N_{cr,y}$	Esfuerzo crítico elástico
E	Módulo de elasticidad
I_y	Momento de inercia
$L_{cr,y}$	Longitud de pandeo
$\bar{\lambda}_y$	Esbeltez adimensional
A	Área de la sección
f_y	Límite elástico
$\eta_{N_{cr,y}}$	Criterio N_{Ed} / $N_{cr,y}$
γ_{M1}	Coeficiente parcial
$N_{c,Ed}$	Esfuerzo de compresión de cálculo

Verificación SE1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Estado límite de servicio
Flechas en dirección z

Combinación: característica
Tipo de segmento en el eje z: Viga

$$w_{lim} = \frac{L}{L/w_{lim}} = \frac{5.000\,m}{300.00} = 16.7\,mm$$

$$\eta = \frac{|w_{tot,z}|}{w_{lim}} = \frac{|0.9\,mm|}{16.7\,mm} = 0.051$$ 7.2

$$\eta = 0.051 \leq 1$$ ✔

w_{lim}	Valor límite de flecha
L	Longitud de referencia
L / w_{lim}	Criterio límite para flecha
$w_{tot,z}$	Flecha total

Verificación SE1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Estado límite de servicio
Flechas en dirección z

Combinación: frecuente
Tipo de segmento en el eje z: Viga

$$w_{lim} = \frac{L}{L/w_{lim}} = \frac{5.000\,m}{200.00} = 25.0\,mm$$

$$\eta = \frac{|w_{tot,z}|}{w_{lim}} = \frac{|0.9\,mm|}{25.0\,mm} = 0.034$$

7.2

$$\eta = 0.034 \leq 1$$

w_{lim}	Valor límite de flecha
L	Longitud de referencia
L / w_{lim}	Criterio límite para flecha
$w_{tot,z}$	Flecha total

Verificación SE1100 | EN 1993 | UNE | 2016-02

Estado límite de servicio
Flechas en dirección z

Combinación: cuasipermanente
Tipo de segmento en el eje z: Viga

$$w_{lim} = \frac{L}{L/w_{lim}} = \frac{5.000\,m}{200.00} = 25.0\,mm$$

$$\eta = \frac{|w_{tot,z}|}{w_{lim}} = \frac{|0.9\,mm|}{25.0\,mm} = 0.034$$ 7.2

$$\eta = 0.034 \leq 1$$ ✔

w_{lim}	Valor límite de flecha
L	Longitud de referencia
L / w_{lim}	Criterio límite para flecha
$w_{tot,z}$	Flecha total

13.3 Membranas PVC-Tipo III

Para la comprobación estructural de las membranas de cubierta se ha utilizado el análisis tensión-deformación proporcionado por el programa RFEM 6. Las membranas, definidas como elementos ortotrópicos tipo *PES-PVC Tipo III*, están sometidas a un pretensado inicial así como a acciones gravitatorias y de viento.

Para realizar este cálculo se han seleccionado todas las membranas en este caso, ya que era preciso ver el comportamiento en tensiones de todas ellas a causa del viento, sus pretensados y el desconocimiento del comportamiento del material que las compone bajo cargas.

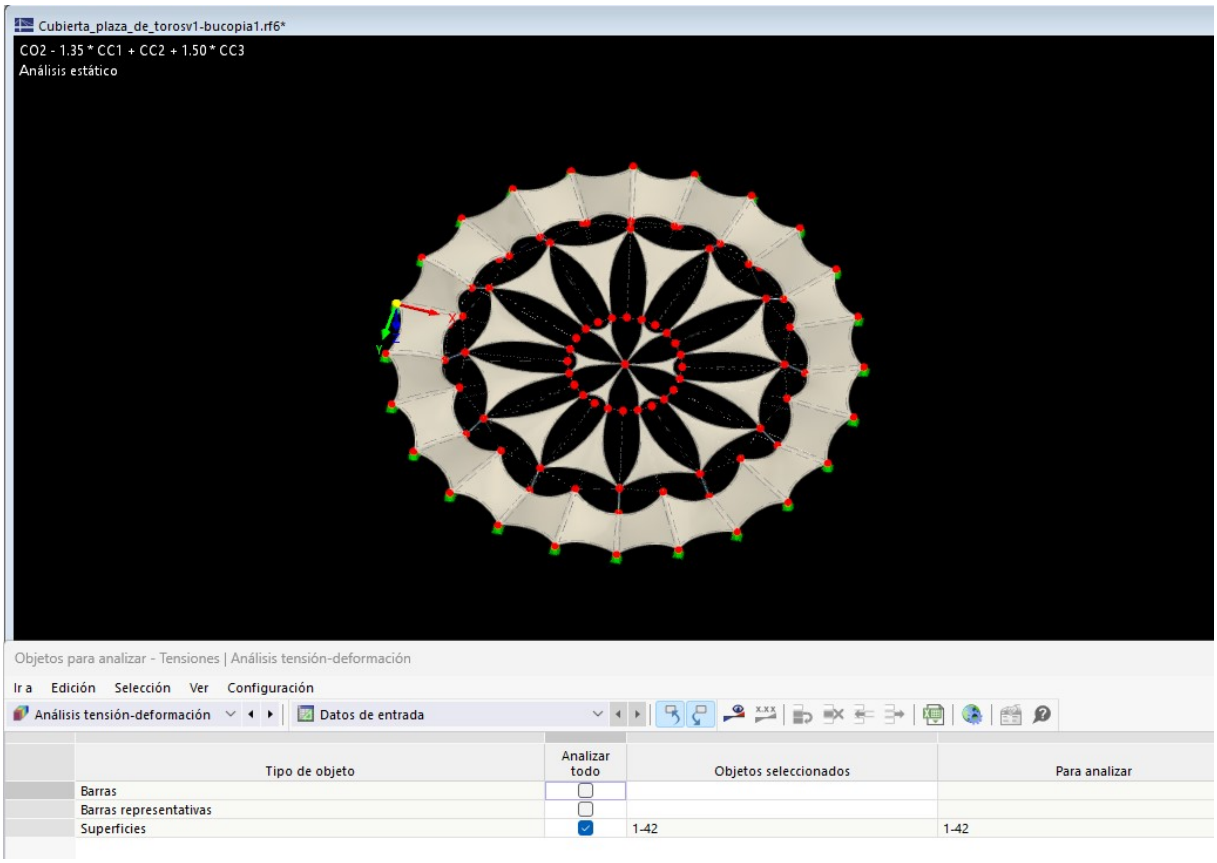


Figura 13.21: Selección de las superficies en la tabla de resultados.

Seguidamente debemos definir la tensión límite de forma manual con la que se van a comparar las tensiones en direcciones principales.

Cálculo de la tensión límite del material

El fabricante del tejido proporciona la resistencia última a tracción en ambas direcciones principales del material (urdimbre y trama), expresada en unidades de kN/m de ancho. En este caso, se ha considerado el valor proporcionado para la dirección de la **trama** (dirección 2) para ambas direcciones ya que es el mas restrictivo:

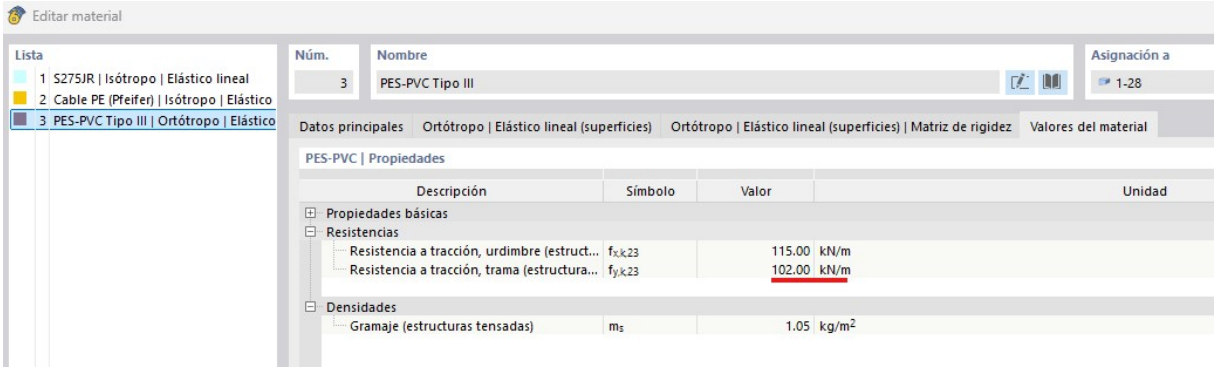


Figura 13.22: Resistencia del material a trama y urdimbre.

$$f_{\text{trama}} = 102\,\text{N/mm}$$

Para obtener la **tensión límite** (en N/mm^2), se divide este valor por el espesor del material. En este caso se ha tomado:

$$t = 1{,}0\,\text{mm}$$

Por tanto, la tensión límite en dirección 1 y 2 es:

$$\sigma_{\text{lim},2} = \frac{f_{\text{trama}}}{t} = \frac{102}{1{,}0} = 102\,\text{N/mm}^2$$

Este valor representa el límite elástico a tracción del tejido en la dirección de la trama y urdimbre y se utilizará como referencia para la comprobación de la tensión en dicha dirección.

Para ello definimos este valor de forma manual en RFEM 6.

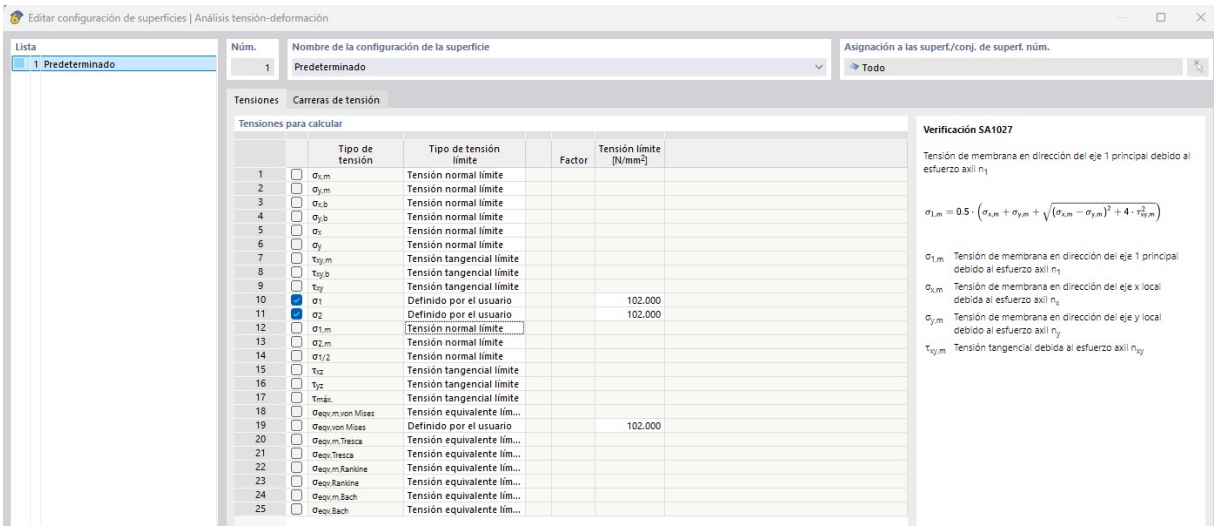


Figura 13.23: Definición de la tension limite para las tensiones principales.

El modelo de cálculo proporciona, para cada superficie de membrana, los resultados de tensiones principales:

- σ_1: tensión principal máxima (urdimbre)
- σ_2: tensión principal mínima (trama)

Dado que el material es **ortotrópico** y solo trabaja a tracción, la verificación se realiza comparando directamente las tensiones principales obtenidas con sus respectivas tensiones límite. En particular, para la dirección 2:

$$\eta_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{\text{lim},2}}$$

Donde:

- η_2 es la razón de utilización en dirección de trama.
- El diseño es admisible si $\eta_2 < 1{,}0$.

Criterio de comparación: tensiones principales

No se ha utilizado la tensión equivalente de **Von Mises** como criterio de comprobación, ya que este es válido para materiales *isótropos* como el acero. En tejidos técnicos ortotrópicos, el comportamiento a tracción es distinto en cada dirección, por lo que el criterio adecuado consiste en comparar directamente las tensiones σ_1 y σ_2 con sus respectivos límites admisibles, según las especificaciones del fabricante del tejido.

Una vez aclarado esto, realizamos el cálculo, obteniendo los siguientes datos.

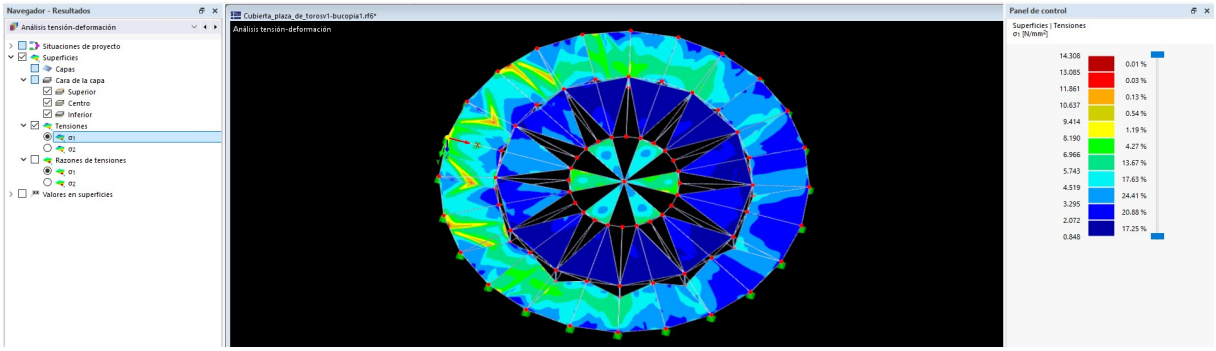


Figura 13.24: Tensiones en dirección principal 1.

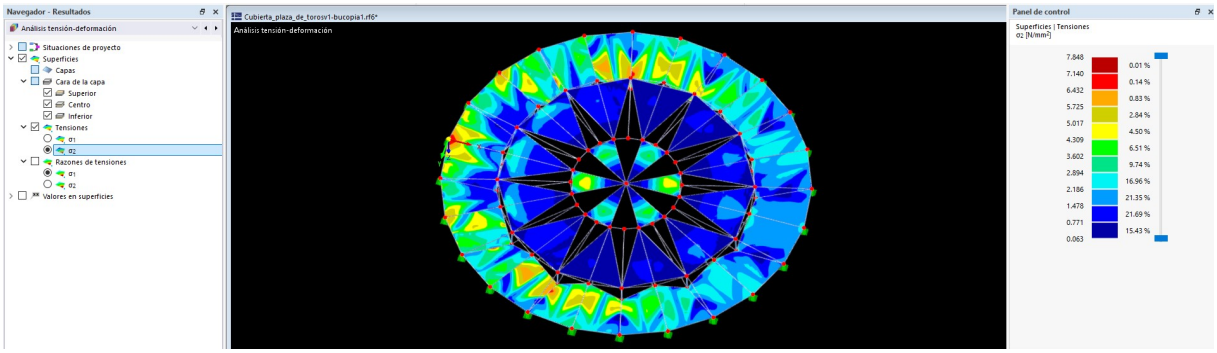


Figura 13.25: Tensiones en dirección principal 2.

En las anteriores imágenes podemos distinguir por colores las diferentes tensiones en las superficies de las membranas. Este código de colores está definido en el panel de control de la derecha.

En las siguientes imágenes se muestra la tabla de resultados con estos mismos para cada superficie de membrana de la cubierta, donde podemos verificar que cumplen sobradamente.

Tensiones en superficies según superficie

Ir a Edición Selección Ver Configuración

Análisis tensión-deformación | Tensiones en superficies

Superfic. núm.	Nudo de malla núm.	Coordenadas de nudos de malla [m] X	Y	Z	Situación de proyect	Carga núm.	Capa Núm.	Cara	Tipo de tensión	Tensión [N/mm²] Existente	Límite	Razón de tensiones η [--]
1	7,247,18,245 | Membrana | Cuadrangular | 1 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	415	10.009	-10.180	2.880	SP1	CO2		Superior	σ_1	12.154	102.000	0.119 ✓
	26090	0.490	0.000	-0.006	SP1	CO2		Superior	σ_2	7.170	102.000	0.070 ✓
2	194,246,7,248 | Membrana | Cuadrangular | 1 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	999	10.009	10.180	2.880	SP1	CO2		Superior	σ_1	12.099	102.000	0.119 ✓
	26090	0.490	0.000	-0.006	SP1	CO2		Superior	σ_2	7.195	102.000	0.071 ✓
3	25,251,34,249 | Membrana | Cuadrangular | 2 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	1428	8.511	-26.711	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_1	14.308	102.000	0.140 ✓
	1437	7.541	-24.650	0.009	SP1	CO2		Superior	σ_2	5.969	102.000	0.059 ✓
4	18,250,25,252 | Membrana | Cuadrangular | 2 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	392	9.544	-10.304	2.720	SP1	CO2		Superior	σ_1	10.960	102.000	0.107 ✓
	1441	6.855	-23.755	-0.006	SP1	CO2		Superior	σ_2	7.276	102.000	0.071 ✓
5	41,255,50,253 | Membrana | Cuadrangular | 3 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	2792	27.157	-42.877	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_1	10.991	102.000	0.108 ✓
	3439	34.778	-30.908	2.007	SP1	CO2		Superior	σ_2	6.701	102.000	0.066 ✓
6	34,254,41,256 | Membrana | Cuadrangular | 3 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	1833	20.529	-27.471	3.040	SP1	CO2		Superior	σ_1	8.779	102.000	0.086 ✓
	1833	20.529	-27.471	3.040	SP1	CO2		Superior	σ_2	7.836	102.000	0.077 ✓
7	57,259,66,257 | Membrana | Cuadrangular | 4 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	4584	57.930	-37.061	3.200	SP1	CO2		Superior	σ_1	7.819	102.000	0.077 ✓
	4606	48.000	-38.206	-0.130	SP1	CO2		Superior	σ_2	5.741	102.000	0.056 ✓
8	50,258,57,260 | Membrana | Cuadrangular | 4 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	3220	38.070	-37.061	3.200	SP1	CO2		Superior	σ_1	9.752	102.000	0.096 ✓
	3289	38.444	-35.665	3.680	SP1	CO2		Superior	σ_2	7.299	102.000	0.072 ✓
9	73,263,82,261 | Membrana | Cuadrangular | 5 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	5506	77.874	-37.062	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_1	5.361	102.000	0.053 ✓
	6199	64.976	-28.613	0.033	SP1	CO2		Superior	σ_2	3.317	102.000	0.033 ✓
10	66,262,73,264 | Membrana | Cuadrangular | 5 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	4653	57.556	-35.665	3.680	SP1	CO2		Superior	σ_1	7.196	102.000	0.071 ✓
	4699	57.307	-34.735	4.000	SP1	CO2		Superior	σ_2	4.785	102.000	0.047 ✓
11	89,267,98,265 | Membrana | Cuadrangular | 6 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	6870	92.403	-17.159	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_1	5.771	102.000	0.057 ✓
	7563	77.008	-16.292	0.033	SP1	CO2		Superior	σ_2	3.684	102.000	0.036 ✓
12	82,266,89,268 | Membrana | Cuadrangular | 6 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											

Figura 13.26: Tabla de resultados.

Análisis tensión-deformación | Tensiones en superficies

Superfic. núm.	Nudo de malla núm.	Coordenadas de nudos de malla [m] X	Y	Z	Situación de proyect	Carga núm.	Capa Núm.	Cara	Tipo de tensión	Tensión [N/mm²] Existente	Límite	Razón de tensiones η [--]
12	6040	73.768	-25.768	3.840	SP1	CO2		Superior	σ_1	5.750	102.000	0.056 ✓
	7565	76.613	-16.976	0.033	SP1	CO2		Superior	σ_2	3.993	102.000	0.039 ✓
13	105,271,114,269 | Membrana | Cuadrangular | 7 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	8907	80.450	8.289	4.573	SP1	CO2		Superior	σ_1	5.568	102.000	0.055 ✓
	8907	80.450	8.289	4.573	SP1	CO2		Superior	σ_2	4.011	102.000	0.039 ✓
14	98,270,105,272 | Membrana | Cuadrangular | 7 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	8969	80.450	-8.289	4.573	SP1	CO2		Superior	σ_1	5.590	102.000	0.055 ✓
	8969	80.450	-8.289	4.573	SP1	CO2		Superior	σ_2	4.011	102.000	0.039 ✓
15	121,275,130,273 | Membrana | Cuadrangular | 8 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	10132	73.768	25.768	3.840	SP1	CO2		Superior	σ_1	5.668	102.000	0.056 ✓
	10291	76.613	16.976	0.033	SP1	CO2		Superior	σ_2	3.919	102.000	0.038 ✓
16	114,274,121,276 | Membrana | Cuadrangular | 8 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	8884	80.874	8.809	4.640	SP1	CO2		Superior	σ_1	5.695	102.000	0.056 ✓
	10293	77.008	16.292	0.033	SP1	CO2		Superior	σ_2	3.593	102.000	0.035 ✓
17	137,279,146,277 | Membrana | Cuadrangular | 9 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	11473	57.556	35.665	3.680	SP1	CO2		Superior	σ_1	7.282	102.000	0.071 ✓
	11519	57.307	34.735	4.000	SP1	CO2		Superior	σ_2	4.822	102.000	0.047 ✓
18	130,278,137,280 | Membrana | Cuadrangular | 9 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	12299	77.874	37.062	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_1	5.586	102.000	0.055 ✓
	11657	64.976	28.613	0.033	SP1	CO2		Superior	σ_2	3.348	102.000	0.033 ✓
19	153,283,162,281 | Membrana | Cuadrangular | 10 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	12768	38.070	37.061	3.200	SP1	CO2		Superior	σ_1	9.750	102.000	0.096 ✓
	12837	38.444	35.665	3.680	SP1	CO2		Superior	σ_2	7.311	102.000	0.072 ✓
20	146,282,153,284 | Membrana | Cuadrangular | 10 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	11404	57.930	37.061	3.200	SP1	CO2		Superior	σ_1	7.754	102.000	0.076 ✓
	12767	48.000	38.695	-0.123	SP1	CO2		Superior	σ_2	5.722	102.000	0.056 ✓
21	169,287,178,285 | Membrana | Cuadrangular | 11 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	14109	20.529	27.471	3.040	SP1	CO2		Superior	σ_1	8.868	102.000	0.087 ✓
	14109	20.529	27.471	3.040	SP1	CO2		Superior	σ_2	7.848	102.000	0.077 ✓
22	162,286,169,288 | Membrana | Cuadrangular | 11 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	15020	27.157	42.877	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_1	11.021	102.000	0.108 ✓
	14404	34.778	30.908	2.007	SP1	CO2		Superior	σ_2	6.644	102.000	0.065 ✓
23	185,291,194,289 | Membrana | Cuadrangular | 12 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	1021	9.544	10.304	2.720	SP1	CO2		Superior	σ_1	10.908	102.000	0.107 ✓

Figura 13.27: Tabla de resultados.

Tensiones en superficies según superficie

Ir a Edición Selección Ver Configuración

Análisis tensión-deformación | Tensiones en superficies

Superfic. núm.	Nudo de malla núm.	Coordenadas de nudos de malla [m] X	Y	Z	Situación de proyect	Carga núm.	Capa Núm.	Cara	Tipo de tensión	Tensión [N/mm²] Existente	Límite	Razón de tensiones η [--]
24	16353	8.511	26.711	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_1	14.255	102.000	0.140 ✓
	16328	7.541	24.650	0.009	SP1	CO2		Superior	σ_2	5.919	102.000	0.058 ✓
25	295-293 | Membrana | Cuadrangular | 1 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	16512	46.969	19.026	-0.051	SP1	CO2		Superior	σ_1	2.185	102.000	0.021 ✓
	16754	46.986	26.743	-0.135	SP1	CO2		Superior	σ_2	0.977	102.000	0.010 ✓
26	298-296 | Membrana | Cuadrangular | 13 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	17074	36.712	15.241	-0.049	SP1	CO2		Superior	σ_1	3.485	102.000	0.034 ✓
	17071	35.485	16.072	-0.063	SP1	CO2		Superior	σ_2	1.491	102.000	0.015 ✓
27	301-299 | Membrana | Cuadrangular | 14 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	17816	20.137	16.087	-0.194	SP1	CO2		Superior	σ_1	5.253	102.000	0.051 ✓
	17814	20.644	16.965	-0.194	SP1	CO2		Superior	σ_2	4.041	102.000	0.040 ✓
28	304-302 | Membrana | Cuadrangular | 15 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	18492	15.827	0.000	-0.194	SP1	CO2		Superior	σ_1	5.934	102.000	0.058 ✓
	18493	15.827	-0.507	-0.194	SP1	CO2		Superior	σ_2	3.990	102.000	0.039 ✓
29	307-305 | Membrana | Cuadrangular | 16 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	19166	20.137	-16.087	-0.194	SP1	CO2		Superior	σ_1	5.136	102.000	0.050 ✓
	19168	20.644	-16.965	-0.194	SP1	CO2		Superior	σ_2	4.003	102.000	0.039 ✓
30	310-308 | Membrana | Cuadrangular | 17 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	19796	36.712	-15.241	-0.049	SP1	CO2		Superior	σ_1	3.498	102.000	0.034 ✓
	19799	35.485	-16.072	-0.063	SP1	CO2		Superior	σ_2	1.557	102.000	0.015 ✓
31	313-311 | Membrana | Cuadrangular | 18 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	21062	46.969	-19.026	-0.051	SP1	CO2		Superior	σ_1	2.370	102.000	0.023 ✓
	20820	46.986	-26.743	-0.135	SP1	CO2		Superior	σ_2	0.990	102.000	0.010 ✓
32	316-314 | Membrana | Cuadrangular | 19 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	21152	55.768	-20.352	-0.078	SP1	CO2		Superior	σ_1	2.709	102.000	0.027 ✓
	21323	61.627	-26.129	-0.164	SP1	CO2		Superior	σ_2	1.355	102.000	0.013 ✓
33	319-317 | Membrana | Cuadrangular | 20 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	21866	75.356	-16.965	-0.194	SP1	CO2		Superior	σ_1	3.595	102.000	0.035 ✓
	21866	75.356	-16.965	-0.194	SP1	CO2		Superior	σ_2	2.341	102.000	0.023 ✓
34	322-320 | Membrana | Cuadrangular | 21 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	22478	66.843	2.155	-0.049	SP1	CO2		Superior	σ_1	3.160	102.000	0.031 ✓
	22852	76.717	0.000	-0.157	SP1	CO2		Superior	σ_2	2.058	102.000	0.020 ✓
35	325-323 | Membrana | Cuadrangular | 22 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	23220	75.356	16.965	-0.194	SP1	CO2		Superior	σ_1	3.532	102.000	0.035 ✓

Figura 13.28: Tabla de resultados.

35	325-323 | Membrana | Cuadrangular | 22 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	23220	75.356	16.965	-0.194	SP1	CO2		Superior	σ_1	3.532	102.000	0.035 ✓
	23220	75.356	16.965	-0.194	SP1	CO2		Superior	σ_2	2.309	102.000	0.023 ✓
36	328-326 | Membrana | Cuadrangular | 23 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	23821	55.768	20.352	-0.078	SP1	CO2		Superior	σ_1	2.477	102.000	0.024 ✓
	24359	61.627	26.129	-0.164	SP1	CO2		Superior	σ_2	1.336	102.000	0.013 ✓
37	331,329,330 | Membrana | Cuadrangular | 1 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	24507	43.680	13.242	0.000	SP1	CO1		Superior	σ_1	6.895	102.000	0.068 ✓
	24622	44.914	9.931	0.000	SP1	CO1		Superior	σ_2	3.722	102.000	0.036 ✓
38	334,332,333 | Membrana | Cuadrangular | 24 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	24735	37.572	0.000	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_1	8.818	102.000	0.086 ✓
	24841	38.069	3.086	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_2	4.989	102.000	0.049 ✓
39	337,335,336 | Membrana | Cuadrangular | 25 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	24999	36.389	-6.703	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_1	7.319	102.000	0.072 ✓
	25108	40.013	-6.472	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_2	3.893	102.000	0.038 ✓
40	340,338,339 | Membrana | Cuadrangular | 26 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	25243	52.320	-13.242	0.000	SP1	CO1		Superior	σ_1	6.895	102.000	0.068 ✓
	25372	51.086	-9.931	0.000	SP1	CO1		Superior	σ_2	3.722	102.000	0.036 ✓
41	343,341,342 | Membrana | Cuadrangular | 27 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	25472	58.924	0.000	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_1	9.308	102.000	0.091 ✓
	25651	58.915	-3.594	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_2	5.042	102.000	0.049 ✓
42	346,344,345 | Membrana | Cuadrangular | 28 - Uniforme | d : 1.0 mm | 3 - PES-PVC Tipo III											
	25735	59.611	6.703	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_1	7.467	102.000	0.073 ✓
	25847	55.982	6.980	0.000	SP1	CO2		Superior	σ_2	4.078	102.000	0.040 ✓

Figura 13.29: Tabla de resultados.

Se va a tomar la superficie 3 al ser la que mayores tensiones tiene para mostrar los cálculos realizados por el programa tanto en las siguientes imágenes como en las hojas de informe.

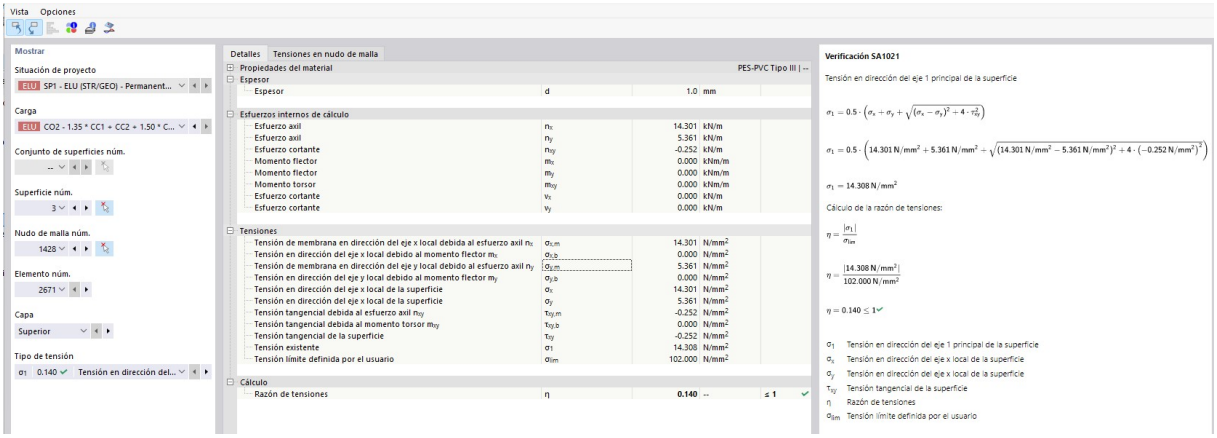


Figura 13.30: Cálculos y comprobación realizados por el programa.

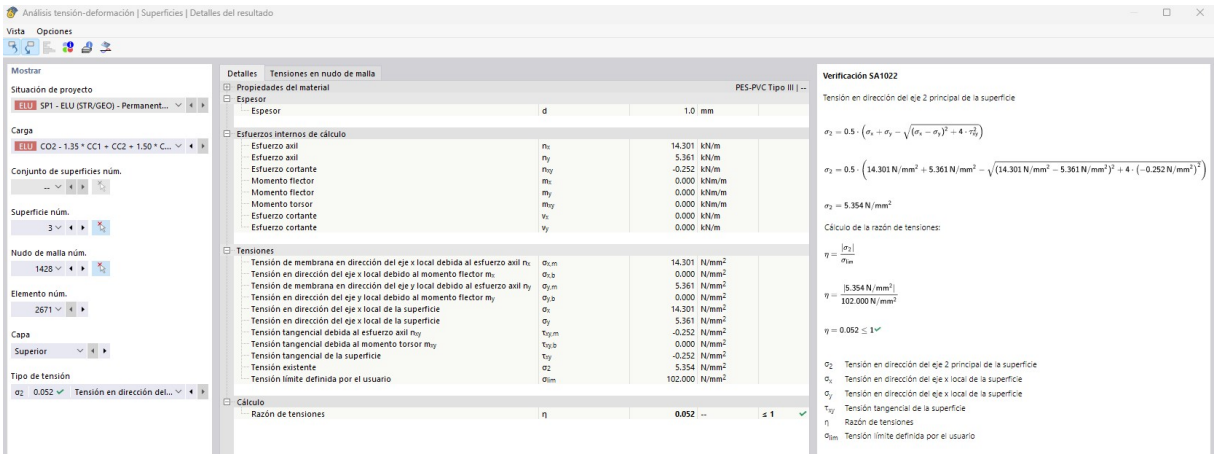


Figura 13.31: Cálculos y comprobación realizados por el programa.

Verificación SA1021

Tensión en dirección del eje 1 principal de la superficie

$$\sigma_1 = 0.5 \cdot \left(\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2}\right)$$

$$\sigma_1 = 0.5 \cdot \left(14.301\,\mathrm{N/mm^2} + 5.361\,\mathrm{N/mm^2} + \sqrt{(14.301\,\mathrm{N/mm^2} - 5.361\,\mathrm{N/mm^2})^2 + 4 \cdot \left(-0.252\,\mathrm{N/mm^2}\right)^2}\right)$$

$$\sigma_1 = 14.308\,\mathrm{N/mm^2}$$

Cálculo de la razón de tensiones:

$$\eta = \frac{|\sigma_1|}{\sigma_{lim}}$$

$$\eta = \frac{|14.308\,\mathrm{N/mm^2}|}{102.000\,\mathrm{N/mm^2}}$$

$$\eta = 0.140 \leq 1 \checkmark$$

σ_1	Tensión en dirección del eje 1 principal de la superficie
σ_x	Tensión en dirección del eje x local de la superficie
σ_y	Tensión en dirección del eje x local de la superficie
τ_{xy}	Tensión tangencial de la superficie
η	Razón de tensiones
σ_{lim}	Tensión límite definida por el usuario

Verificación SA1022

Tensión en dirección del eje 2 principal de la superficie

$$\sigma_2 = 0.5 \cdot \left(\sigma_x + \sigma_y - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2}\right)$$

$$\sigma_2 = 0.5 \cdot \left(14.301\,\mathrm{N/mm^2} + 5.361\,\mathrm{N/mm^2} - \sqrt{(14.301\,\mathrm{N/mm^2} - 5.361\,\mathrm{N/mm^2})^2 + 4 \cdot \left(-0.252\,\mathrm{N/mm^2}\right)^2}\right)$$

$$\sigma_2 = 5.354\,\mathrm{N/mm^2}$$

Cálculo de la razón de tensiones:

$$\eta = \frac{|\sigma_2|}{\sigma_{lim}}$$

$$\eta = \frac{|5.354\,\mathrm{N/mm^2}|}{102.000\,\mathrm{N/mm^2}}$$

$$\eta = 0.052 \leq 1 \checkmark$$

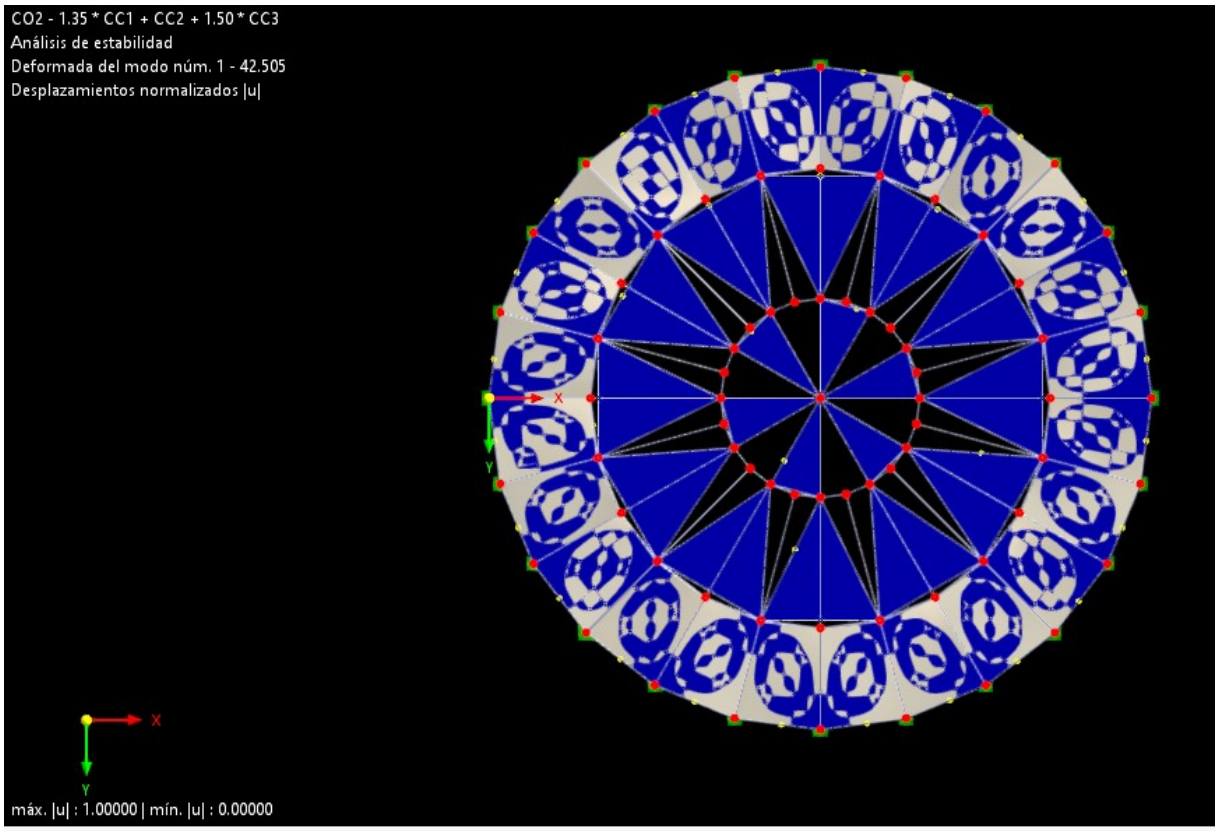
σ_2	Tensión en dirección del eje 2 principal de la superficie
σ_x	Tensión en dirección del eje x local de la superficie
σ_y	Tensión en dirección del eje x local de la superficie
τ_{xy}	Tensión tangencial de la superficie
η	Razón de tensiones
σ_{lim}	Tensión límite definida por el usuario

13.4 Comprobación de estabilidad global de la estructura

Dado que la estructura de la cubierta está compuesta por elementos de carácter ligero y esbelto, como cables pretensados, barras metálicas y membranas de PVC, resulta esencial comprobar su comportamiento frente a posibles fenómenos de inestabilidad estructural, incluso si las tensiones obtenidas en los elementos individuales están dentro de los límites admisibles.

El análisis de estabilidad permite verificar que la estructura mantiene su forma y equilibrio frente a pequeñas perturbaciones, considerando tanto el efecto de las deformaciones como la sensibilidad a las cargas aplicadas. Este estudio se justifica especialmente en estructuras que presentan una baja rigidez global o que dependen del pretensado para garantizar su resistencia y estabilidad.

Se ha complementado el estudio con un **análisis de pandeo lineal** para determinar los factores de carga crítica y modos de inestabilidad más relevantes. Aunque este análisis tiene carácter lineal, proporciona una visión general del comportamiento de la estructura ante aumentos de carga y posibles mecanismos de colapso.



Factores de carga crítica

Ir a Edición Selección Ver Configuración

Análisis de estabilidad | Factores de carga crítica | ELU CO2 1.35 * CC1 + CC2 + 1.50 * C...

Modo núm.	Factor de carga crítica f [--]	Coeficiente de amplificación α [--]
1	42.505	1.024
2	43.575	1.023
3	44.253	1.023
4	44.632	1.023
5	46.172	1.022
6	46.624	1.022
7	48.042	1.021
8	56.541	1.018
9	58.176	1.017
10	58.859	1.017

Figura 13.32: Cálculos y comprobación para factores de carga crítica.

El resultado de este análisis confirma que la estructura presenta un comportamiento estable dentro del rango de solicitaciones previsto para los estados límite de proyecto, sin detectarse modos críticos de inestabilidad en las condiciones de cálculo consideradas.

Este estudio contribuye a garantizar la seguridad estructural del conjunto y refuerza la validez del diseño propuesto.

14 Conclusión

A lo largo de este Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo el análisis y dimensionamiento de una cubierta ligera compuesta por cables de acero y una membrana textil, utilizando el software *RFEM 6.08* de *Dlubal*. El objetivo principal ha sido estudiar el comportamiento estructural de este tipo de soluciones, caracterizadas por su ligereza, flexibilidad y eficiencia en el uso de materiales.

Tras una revisión inicial de las tipologías de cubiertas tensadas y de los materiales empleados, se ha procedido a modelar la estructura en un entorno de cálculo no lineal, prestando especial atención a la interacción entre los cables y la membrana, así como a la correcta definición de las condiciones de contorno y pretensado. Uno de los aspectos clave ha sido la búsqueda de forma(*form-finding*), imprescindible para definir la geometría final de equilibrio de la cubierta, teniendo en cuenta las fuerzas internas generadas por el pretensado.

Para la acción del viento, se ha empleado el módulo *RWIND*, que ha permitido simular el comportamiento aerodinámico de la cubierta mediante análisis *CFD (Computational Fluid Dynamics)*. Gracias a ello, se han obtenido presiones más realistas que las ofrecidas por métodos normativos simplificados, lo que ha permitido una evaluación más precisa de los efectos del viento sobre la geometría compleja de la cubierta.

Los resultados obtenidos han demostrado la viabilidad estructural de la solución planteada, destacando la importancia del pretensado en los cables y la adecuada interacción con la membrana para garantizar la estabilidad global. Además, el análisis no lineal geométrico ha sido fundamental para captar el comportamiento real de la estructura ante las distintas combinaciones de carga.

En definitiva, este trabajo me ha permitido profundizar en el conocimiento de las estructuras tensadas, valorar sus ventajas y limitaciones, y aplicar herramientas profesionales de cálculo avanzadas. La experiencia adquirida resulta especialmente valiosa de cara a un futuro profesional orientado al diseño y análisis de estructuras singulares y eficientes.

15 Bibliografía

- Código Técnico de la Edificación, Documento de Básico Seguridad Estructural (2006).
- Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Acciones en la Edificación (2006).
- Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Acero(2006).
- Eurocódigo (EN-1993).
- Dlubal Soporte: Documento/Manual "RFEM 6"
- Dlubal Soporte: Documento/Manual "Búsqueda de la Forma"
  Artículo: "Busqueda de forma en RFEM 6"
  Seminario web: "Búsqueda de forma en cubiertas ligeras de estadios en RFEM 6"
- Dlubal Soporte: Documento/Manual "RWIND 3"
  Artículo: "¿CFD o túnel de viento? Los 6 beneficios más importantes de la simulación de flujo digital para ingenieros"
  Seminario web: "Estructuras con membranas tensadas"

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

II ANEXOS

Diseño y cálculo de cubierta mediante membranas tensadas para la plaza de toros de Málaga

Autor:

Luis Miguel Maldonado Guillén

Tutor:

D. José Sandino Egea

Información académica:

Grado en Ingeniería Mecánica

Málaga, 22 de mayo de 2025

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Anexo I: Manual de RFEM 6

Diseño y cálculo de cubierta mediante membranas tensadas para la plaza de toros de Málaga

---

Autor:

Luis Miguel Maldonado Guillén

Tutor:

D. José Sandino Egea

Información académica:

Grado en Ingeniería Mecánica

Málaga, 22 de mayo de 2025

El presente anexo tiene como objetivo proporcionar una visión general sobre el uso de RFEM 6 en el contexto de análisis y diseños de estructuras, haciendo notorias sus ventajas, capacidades y aplicaciones específicas en este caso para una estructura compuesta por cables de acero y membrana de PVC.

1 Interfaz gráfica de usuario y configuración

1.1 Pantalla Principal

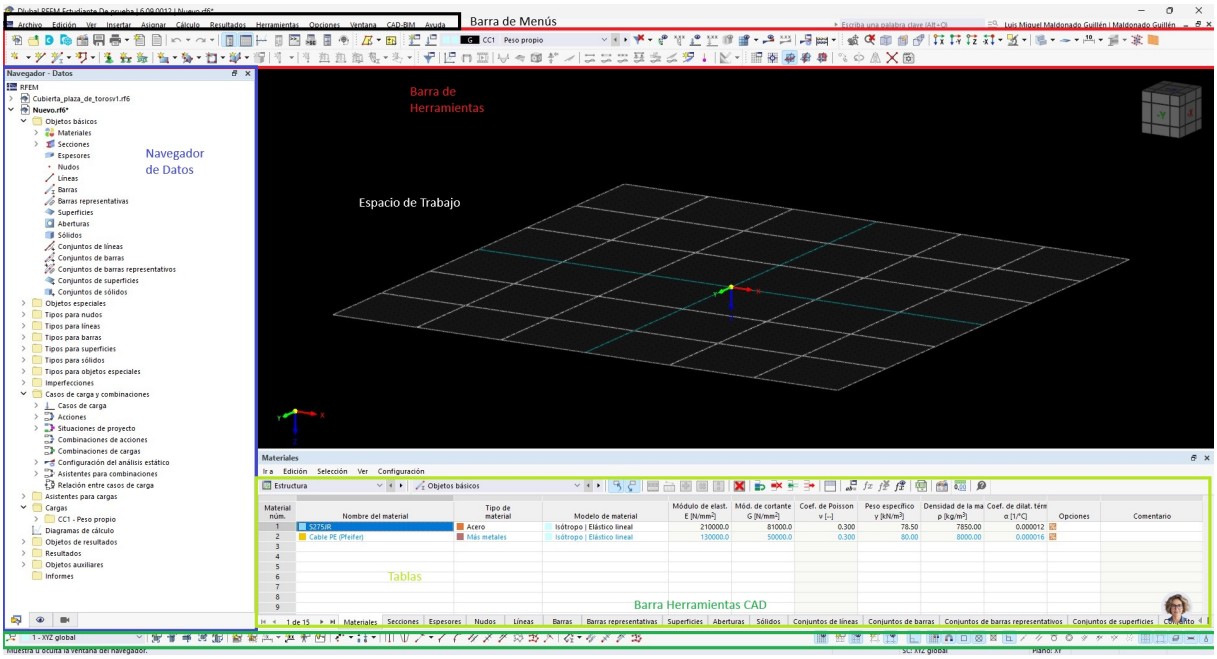


Figura 15.3: Pantalla principal de RFEM 6.

Esta es la pantalla principal que muestra el programa, constituida por una barra de menús y una barra de herramientas en la parte superior como cualquier otro programa de características similares.

En el lado izquierdo, se encuentra la ventana de navegador de datos, a través de esta se puede acceder a infinidad de recursos, esta ventana cambiará como veremos más adelante según cambiemos a ventana de visualización, ventana de resultados y ventana de vistas.

En la zona inferior encontramos la zona de tablas, donde se mostrará información según precisemos, junto con resultados, elementos, tipos de materiales, etc.

Bajo esta, se encuentra la barra de herramientas CAD, es un acceso rápido a la hora de elaborar el modelo de la estructura de los diferentes recursos disponibles.

1.2 Unidades y decimales

Antes de comenzar cualquier modelo, debemos comprobar las unidades.

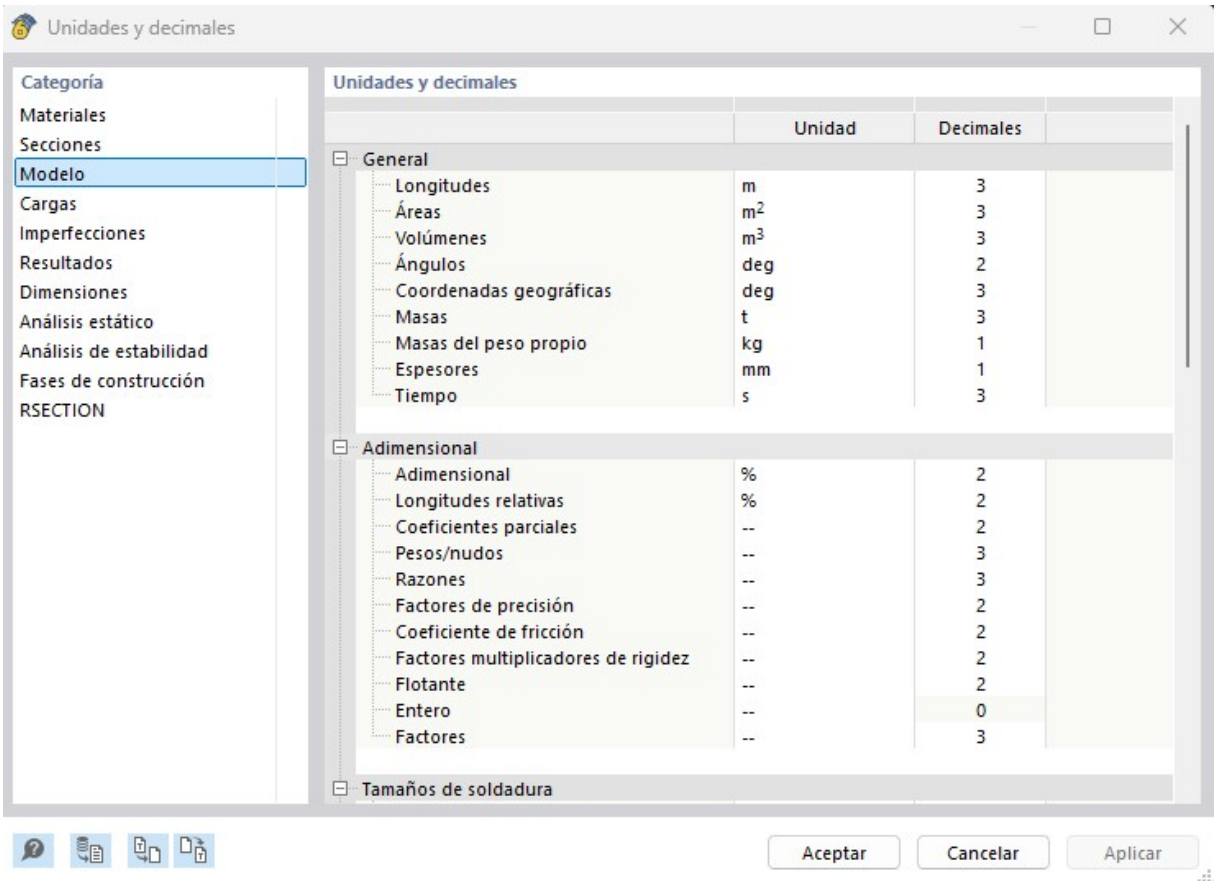


Figura 15.4: Ventana unidades y decimales.

1.3 Ajuste de color y visualización de objetos

Podemos cambiar rápidamente la visualización de un objeto utilizando su menú contextual, haciendo clic con el botón secundario del ratón en el símbolo del modelo, la carga o el resultado. Pulsando sobre las Propiedades de visualización, abriremos el cuadro de diálogo que muestra los parámetros de visualización.

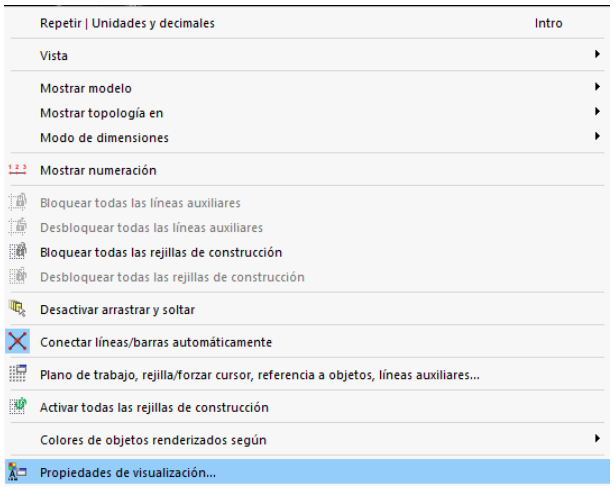


Figura 15.5: Ventana de diálogo.

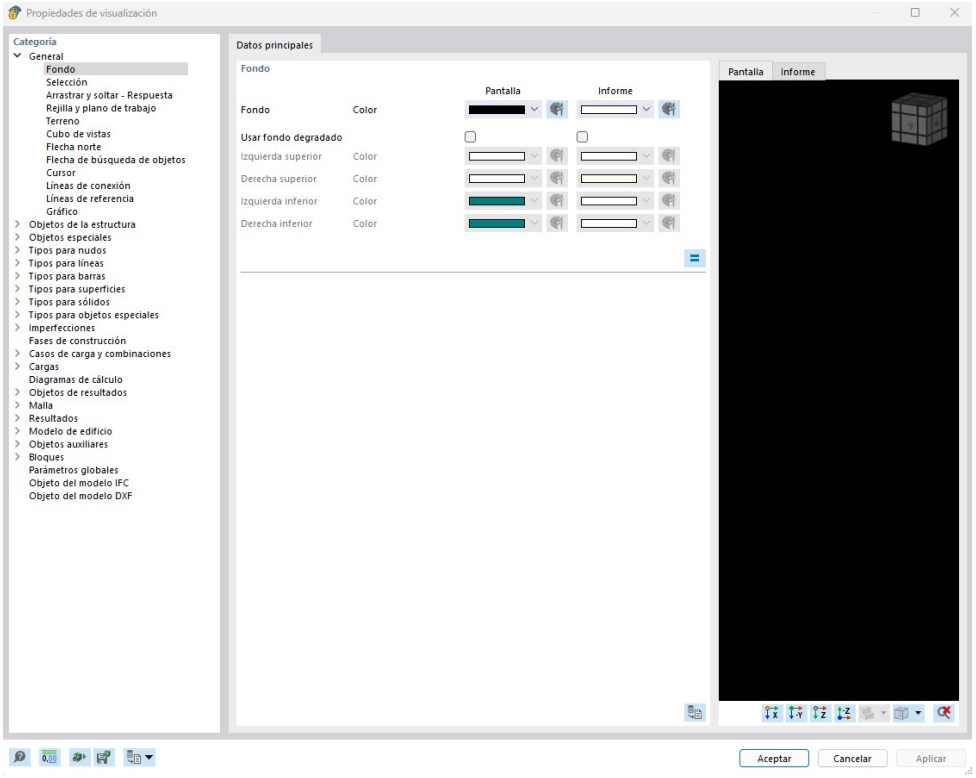


Figura 15.6: Cuadro de diálogo parámetros de visualización.

1.4 Navegador

Se visualiza un navegador a la izquierda como se comentó anteriormente en **Subsección 1.1** de la ventana de trabajo, que muestra los datos de los archivos abiertos en una estructura de árbol. Al hacer clic en el símbolo Abrir directorio , puede ampliar las entradas de una rama y cerrarlas con Lista de apertura .

Un objeto que se selecciona en el navegador también se selecciona en la ventana de trabajo. Esto le permite localizar y editar objetos rápidamente.

En el borde inferior del navegador, encontrará tres pestañas (cuatro después del cálculo). Utilice las pestañas para cambiar entre los navegadores 'Datos', 'Mostrar', 'Vistas' y 'Resultados'.

1.4.1 Navegador de datos

El Navegador de datos gestiona el modelo, la carga y los datos de cálculo, así como los resultados calculados. Los objetos definidos incorrectamente se visualizan en rojo, los objetos que no se utilizan en azul.

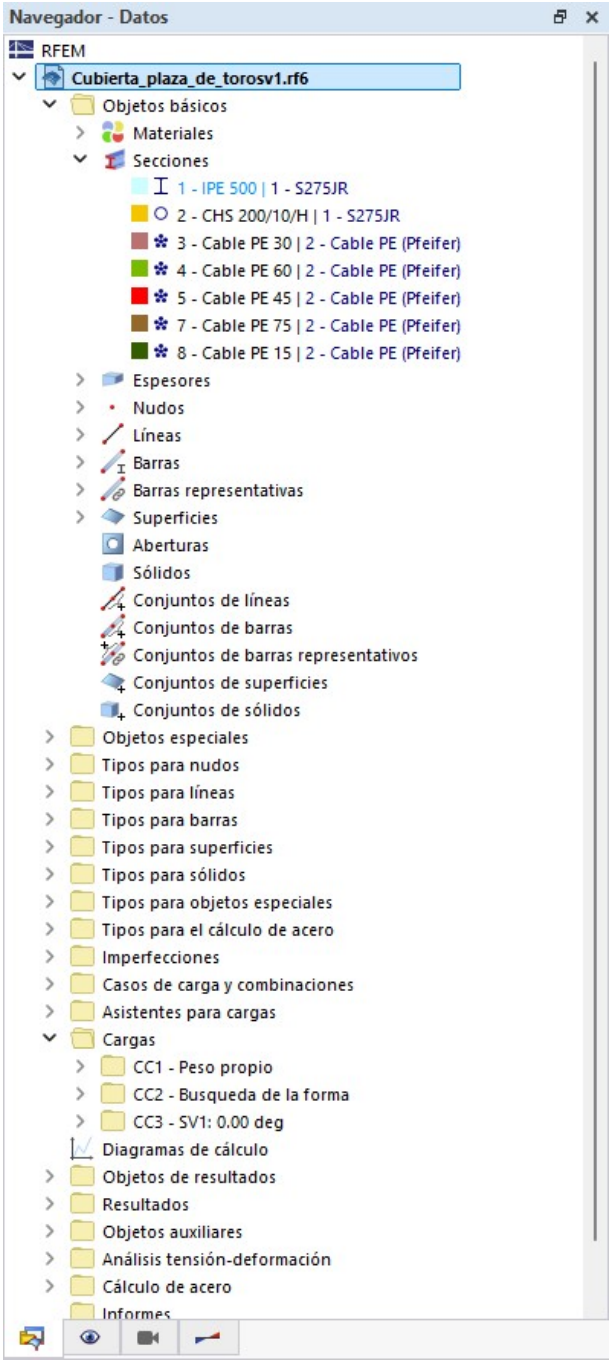


Figura 15.7: Ventana navegador de datos.

1.4.2 Navegador mostrar

El Navegador mostrar controla la representación gráfica de los objetos en la ventana de trabajo. Si desmarca la casilla de una entrada, se oculta el objeto o atributo.

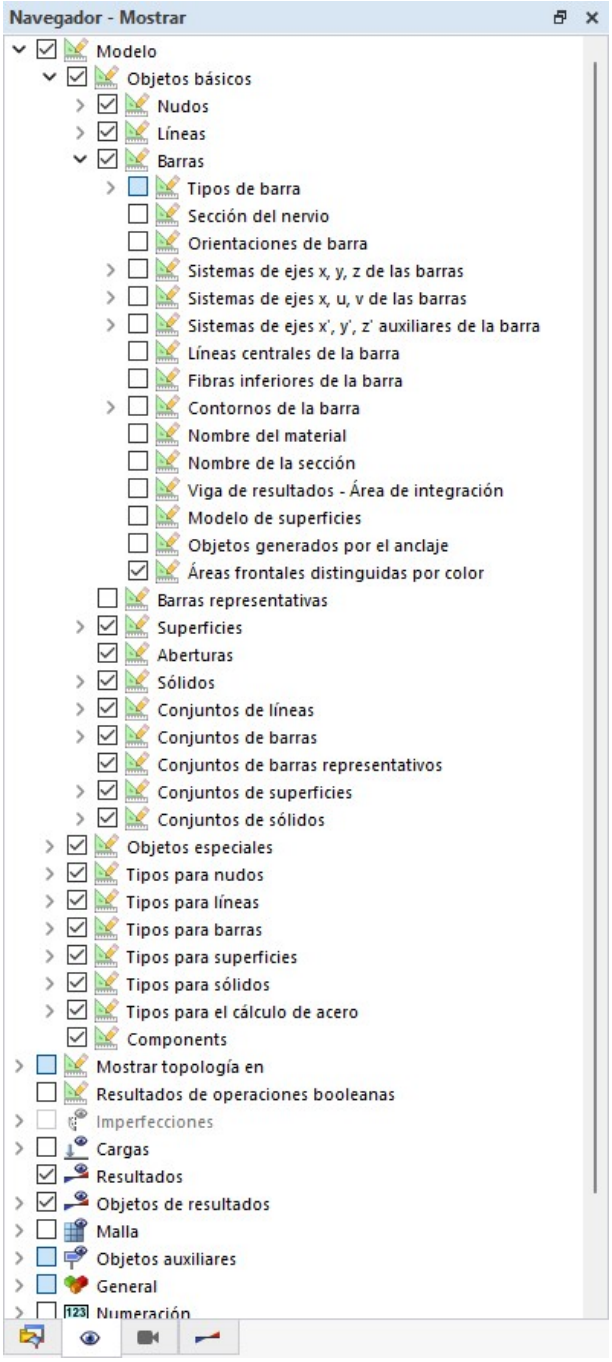


Figura 15.8: Ventana navegador mostrar.

1.4.3 Navegador vistas

El Navegador vistas gestiona las vistas definidas por el usuario, así como las visibilidades de objetos definidas por el usuario y creadas automáticamente (vistas parciales, grupos). Utilizando los botones en ambas secciones del navegador puede crear vistas definidas por el usuario, definir visibilidades, integrar objetos en visibilidades, etc.

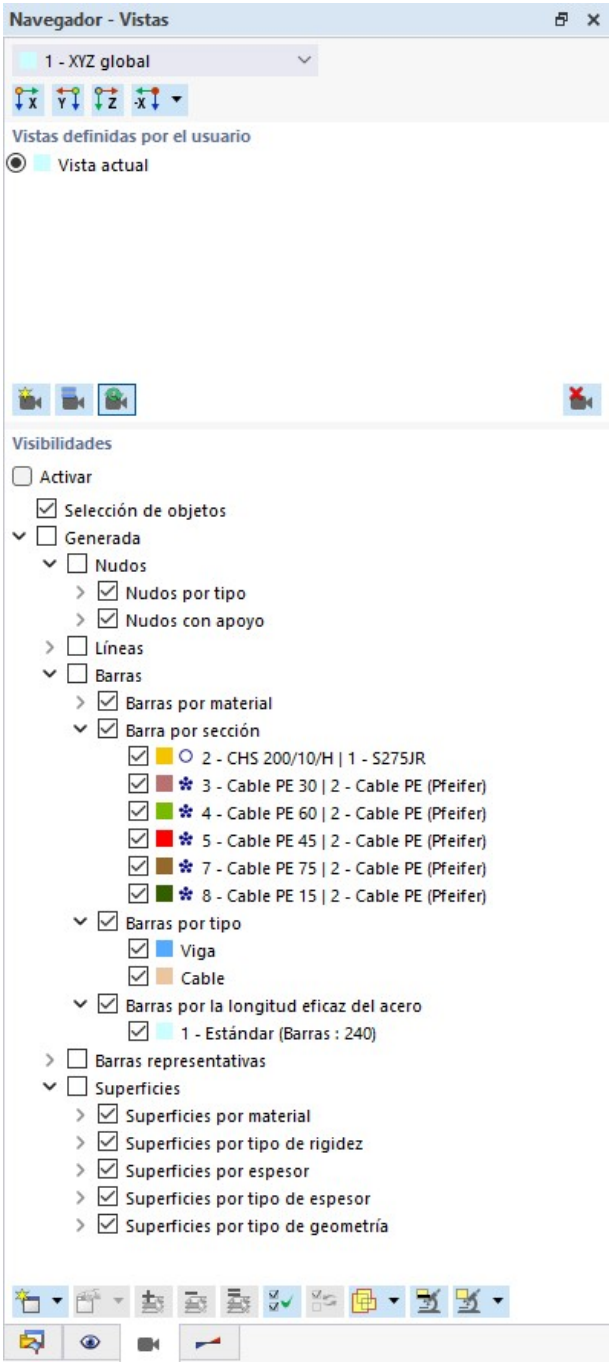


Figura 15.9: Ventana navegador vistas.

1.4.4 Navegador resultados

El Navegador resultados controla los resultados que se visualizan en el gráfico. Las entradas dependen de si se visualizan los resultados de un análisis estructural o de un cálculo.

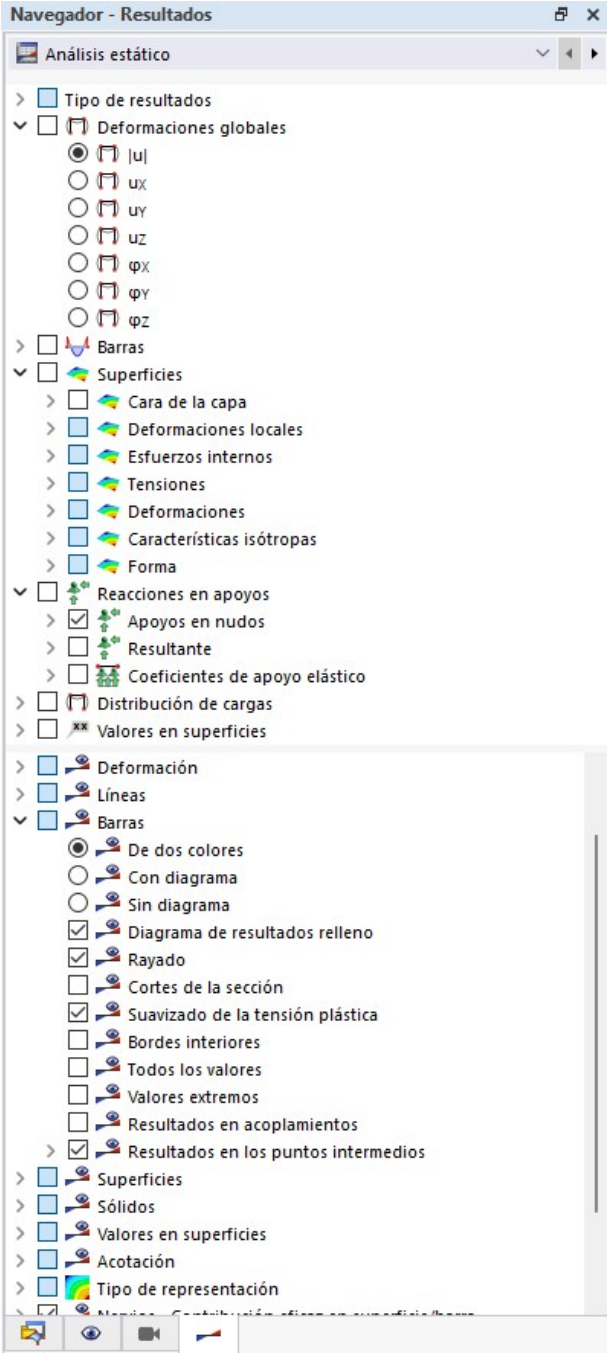


Figura 15.10: Ventana navegador resultados.

1.5 Tablas

Las tablas se encuentran en la parte inferior de la ventana de trabajo como se mencionó en la **Subsección 1.1**. Gestionan los datos del modelo, la carga y los resultados en forma numérica.

El contenido de la tabla se puede controlar por medio de categorías que incluyen subcategorías individuales. Primero, defina la categoría a la izquierda en la barra de herramientas de la tabla. La lista proporciona varias entradas para datos estructurales, de carga y de resultados **15.11**

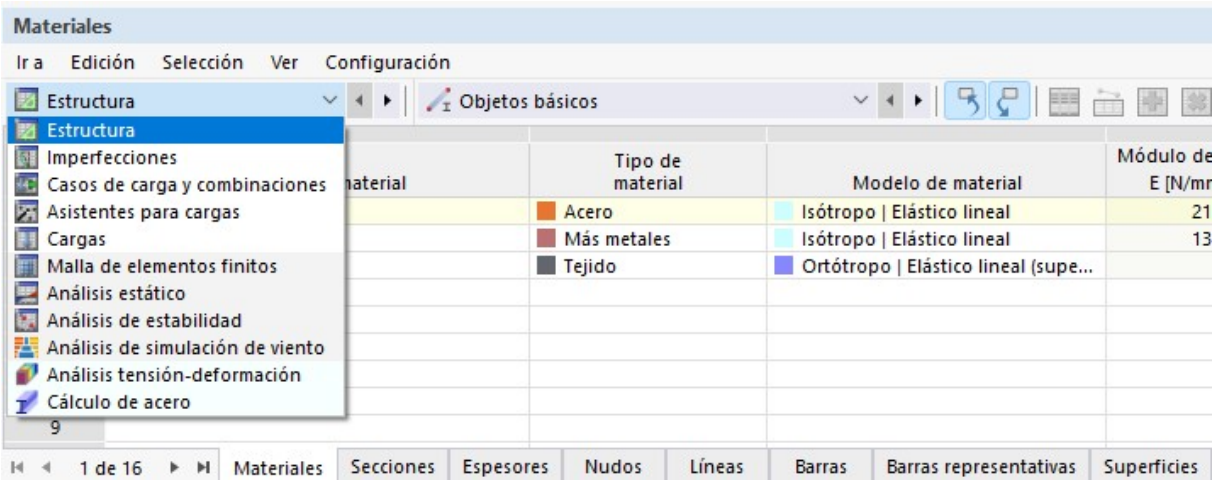


Figura 15.11: Ventana tablas.

Luego, seleccione la subcategoría en la lista a la derecha. Cada categoría se divide en entradas específicas.

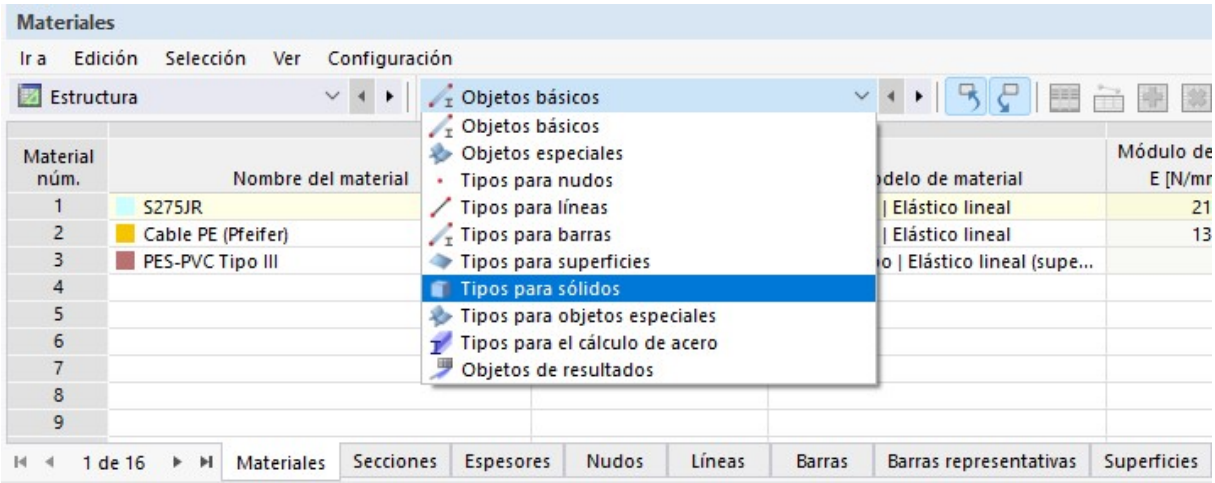


Figura 15.12: Ventana tablas.

2 Datos básicos del modelo

Son las ventanas a partir de la cuales se crean y editan las especificaciones de un nuevo modelo. En la siguiente figura, deberíamos seleccionar la fila de datos básicos.

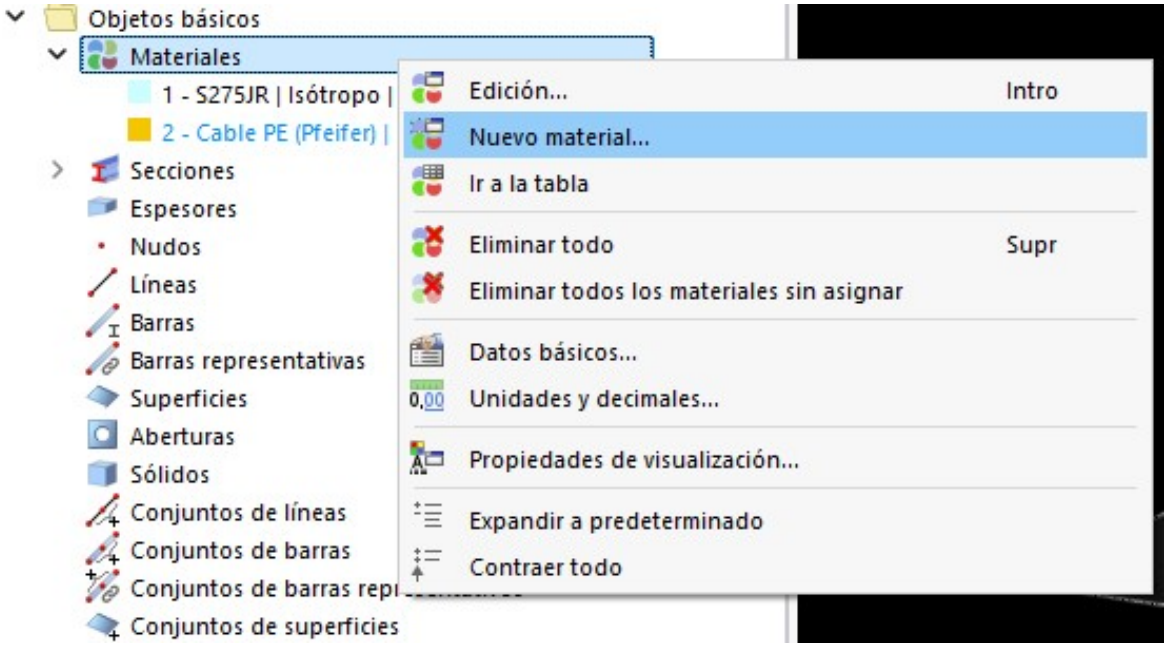


Figura 15.13: Ventana de diálogo, datos básicos.

2.1 Datos principales

En esta ventana se gestionan los datos del modelo.

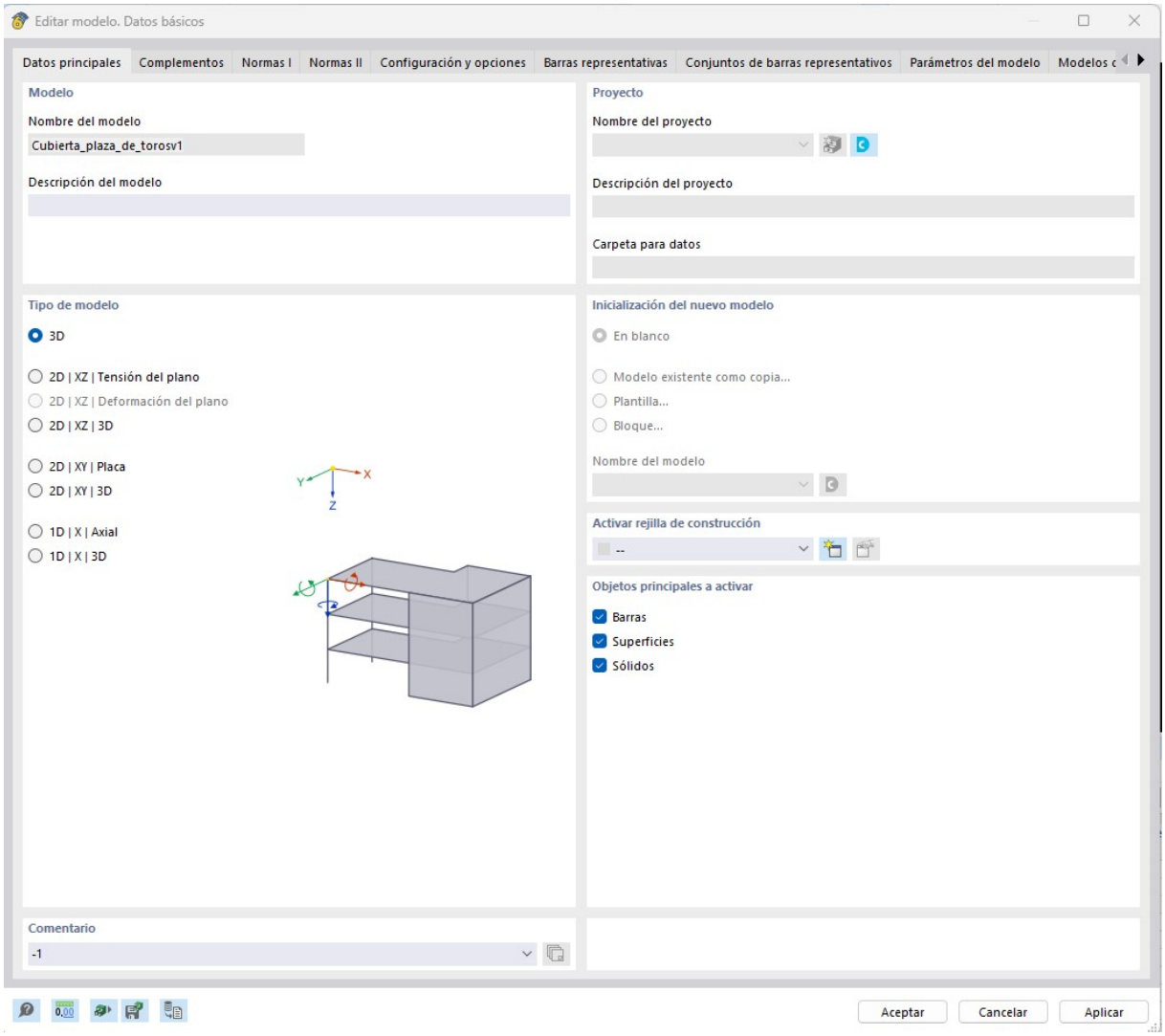


Figura 15.14: Ventana datos básicos.

Se debe especificar el 'Nombre del modelo', ya que también es el nombre de archivo del modelo. Sin embargo, la 'Descripción del modelo' es opcional, permitiéndole describir el modelo brevemente. La descripción aparece en el informe, pero no tiene ninguna otra función.

En la lista 'Nombre de proyecto', seleccione la carpeta del proyecto donde desea crear el modelo. Utilice el botón Nuevo proyecto para crear un nuevo proyecto. Aparece el cuadro de diálogo 'Crear nuevo proyecto' donde introduce los datos relevantes del proyecto.

El tipo de modelo controla si se analiza un modelo espacial, plano o unidimensional. Si el modelo disponible no es 3D, en esta sección del diálogo puede restringir los parámetros

de entrada a coordenadas reducidas y grados de libertad.

Los tipos '2D | XZ' son adecuados para muros y placas cuando las cargas solo actúan en la dirección del plano de la superficie. Estos tipos también se recomiendan para estructuras de vigas planas. Los tipos '2D | XY' representan estructuras de superficies planas como placas que se cargan perpendicularmente al plano de la superficie. Las opciones '3D' permiten un cálculo espacial del sistema plano, por ejemplo, si usa secciones asimétricas con ángulos de giro como arriostramientos contraviento.

Los tipos '1D | X' permiten modelar estructuras de vigas unidimensionales como vigas continuas. De nuevo, la opción '3D' permite el cálculo espacial de secciones rotadas.

También es posible cambiar el tipo de modelo posteriormente. Sin embargo, esto puede conllevar la pérdida de datos, por ejemplo, si reduce un modelo 3D a una placa.

2.2 Complementos

En la pestaña Complementos, se definen los análisis y cálculos que se realizan para el modelo. Marque la casilla de un complemento para activarlo. De este modo, se vuelven disponibles funciones adicionales para objetos, tales como opciones de entrada para parámetros relevantes para el cálculo: longitudes eficaces, rigidizadores transversales o amplias opciones de cálculo como son la torsión de alabeo y el análisis de estabilidad o dinámico.

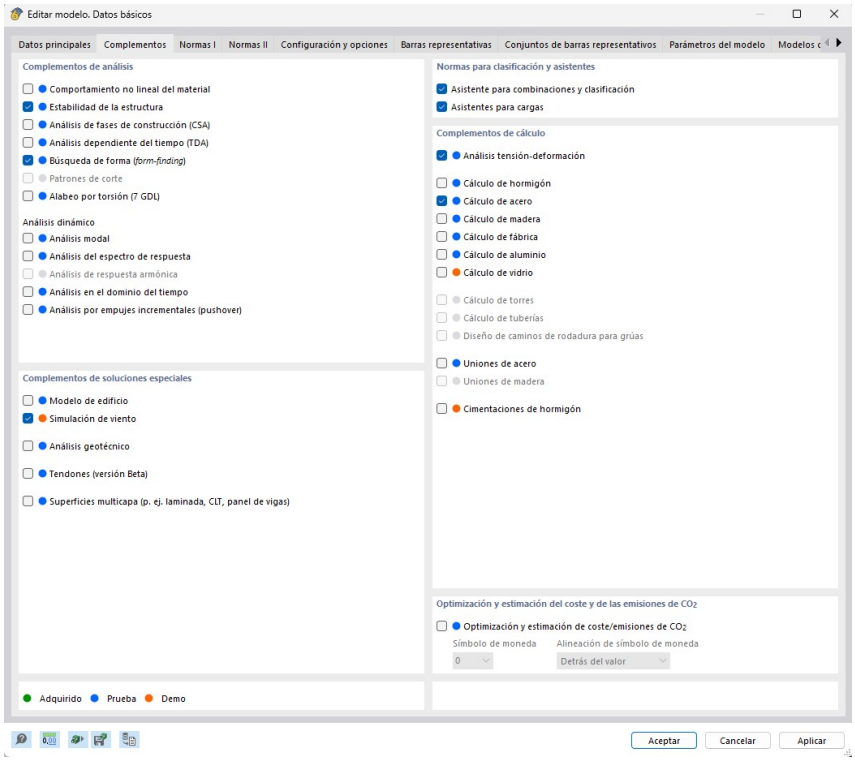


Figura 15.15: Ventana complementos.

2.3 Normas I

Las normas constituyen la base para el análisis estructural y varios cálculos. En la pestaña Normas I, define las reglas más importantes según las cuales se dimensiona y calcula el modelo.

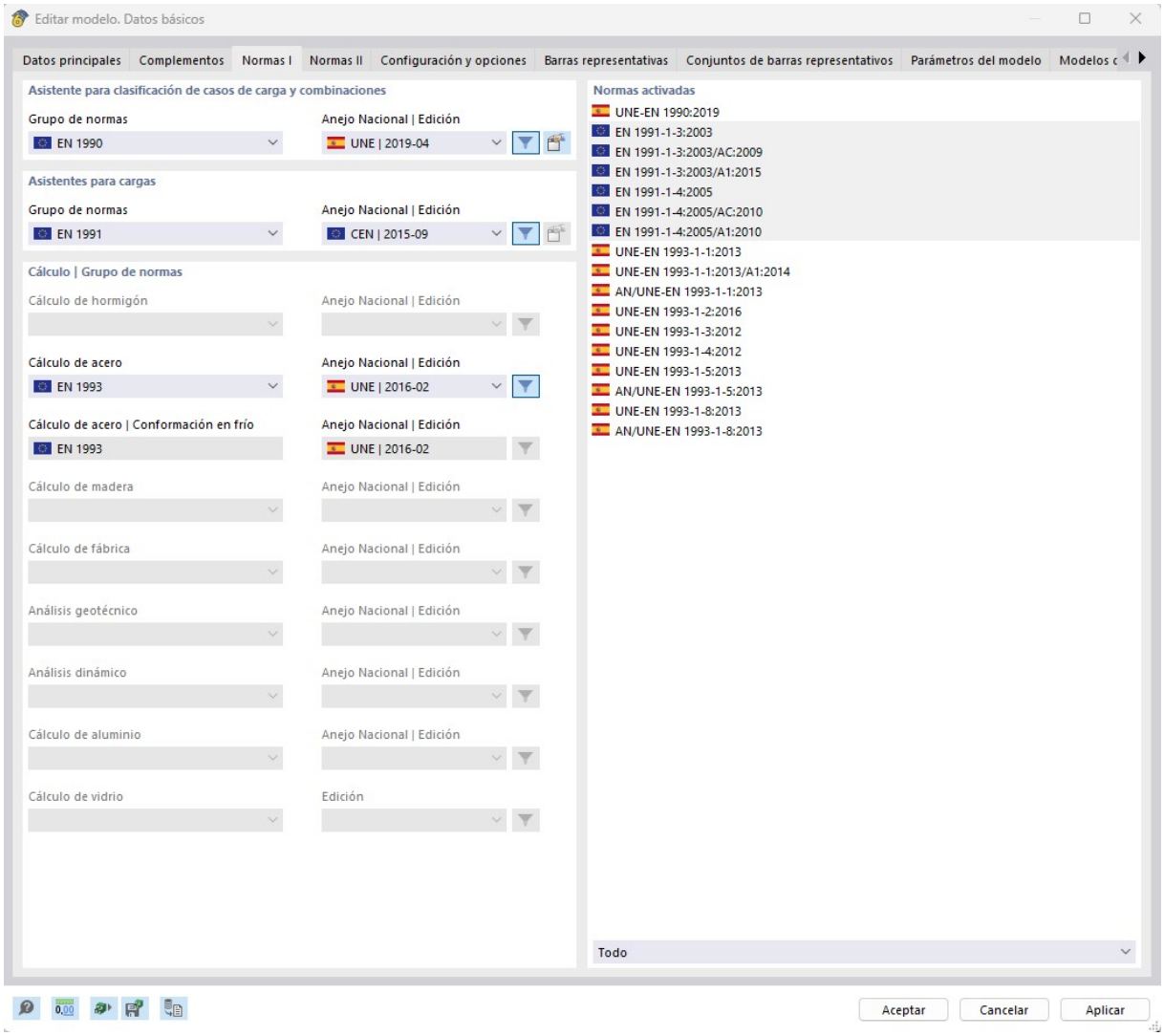


Figura 15.16: Ventana Normas I.

2.4 Normas II

En la pestaña Normas II, puede definir las reglas para áreas de aplicación especiales.

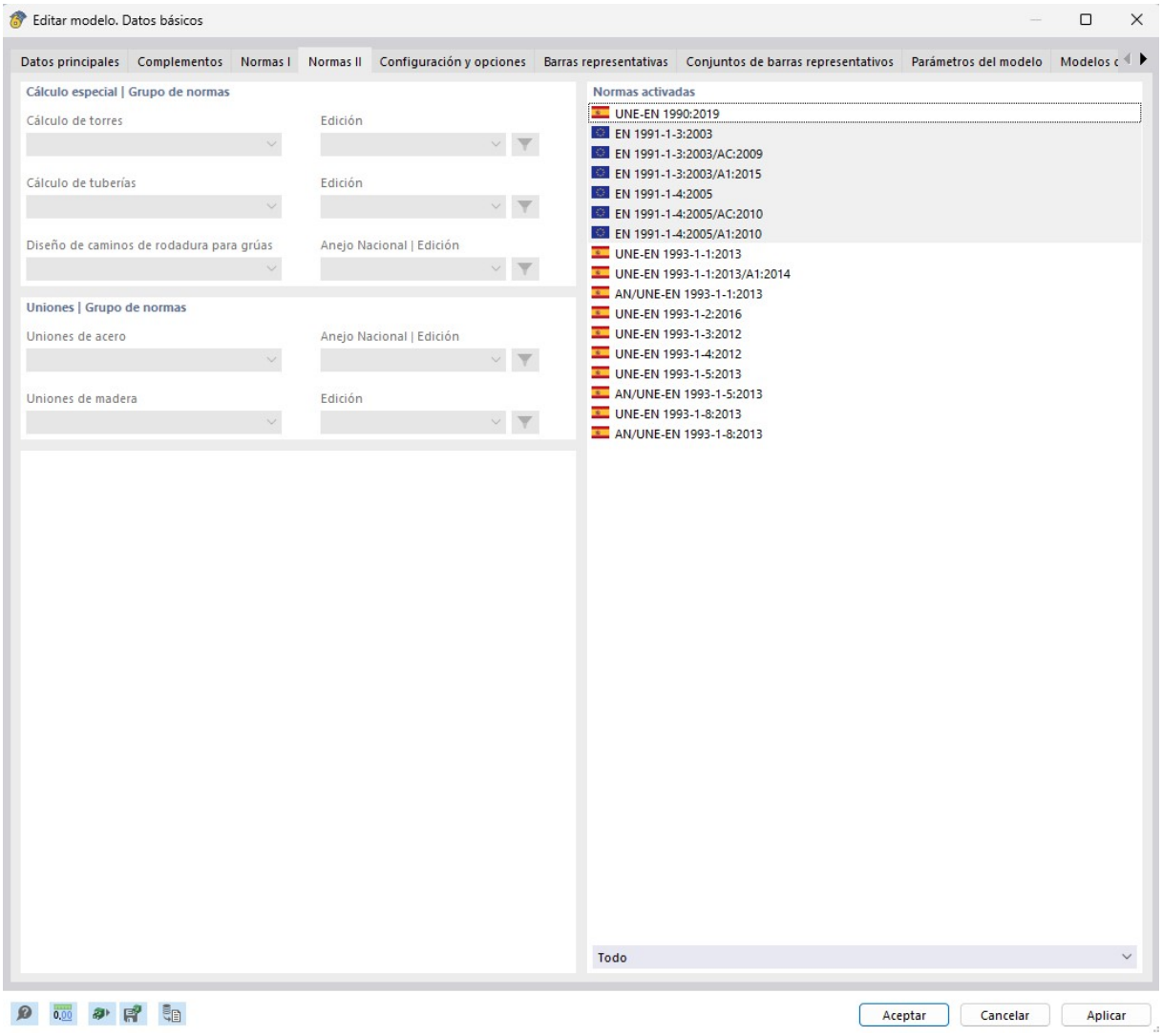


Figura 15.17: Ventana Normas II.

2.5 Configuración y opciones

En la pestaña Configuración y opciones, puede ajustar el valor para la aceleración gravitatoria, las tolerancias geométricas de los objetos y la alineación de los ejes.

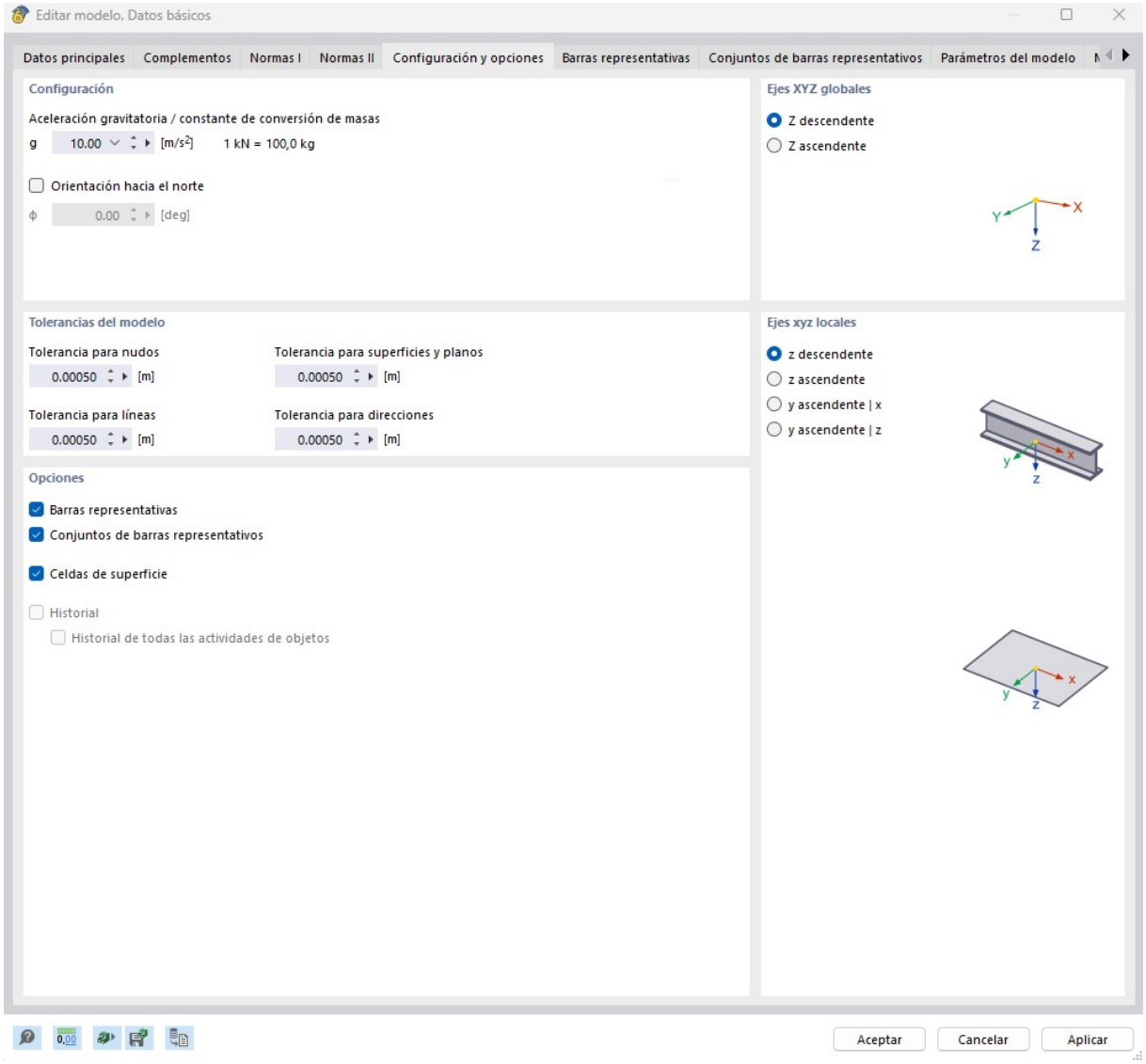


Figura 15.18: Ventana Configuración y opciones.

2.6 Barras representativas

La pestaña barras representativas se muestra si ha definido Configuración y opciones . Aquí puede definir los criterios según los cuales el programa crea representantes"para las barras.

Las barras representativas son plantillas para objetos 1D que tienen propiedades idénticas en lo que se refiere a material, sección, tipo de barra y longitud. Estos elementos representativos pueden entenderse como "plantillas de barras". Facilitan la evaluación y documentación de los resultados. Dado que solo se analiza la barra con los esfuerzos internos determinantes y los momentos de todos los tipos similares, las barras representativas proporcionan una buena visión de conjunto tanto en el programa como en el informe.

Los elementos representativos no se crean manualmente, sino que RFEM los genera automáticamente.

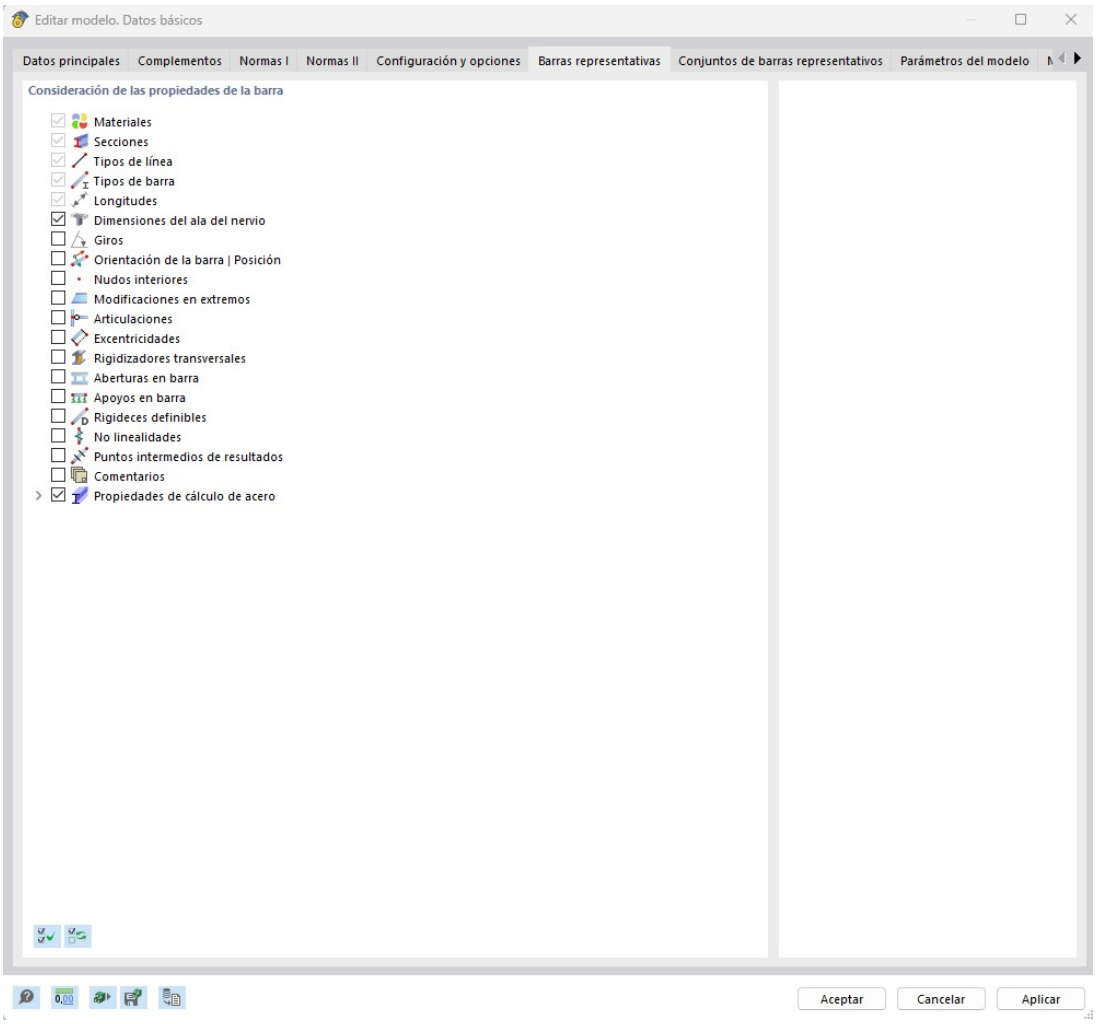


Figura 15.19: Ventana Barras representativas.

2.7 Conjunto de Barras representativas

La pestaña Conjuntos de barras representativos puede definir los criterios según los cuales el programa crea representativos"para conjuntos de barras.

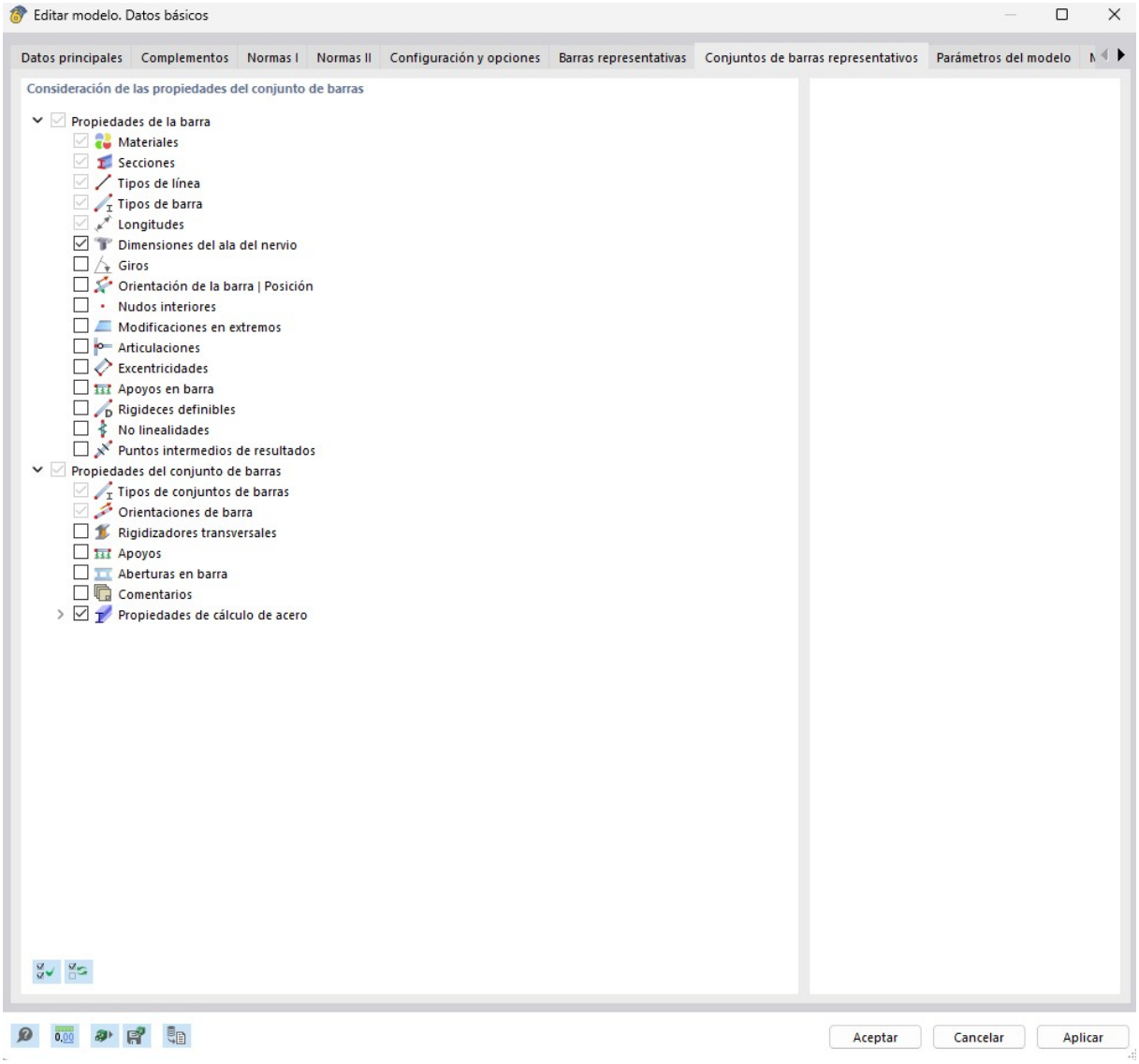


Figura 15.20: Ventana Conjunto de barras representativas.

2.8 Parámetros del modelo

En la pestaña Parámetros del modelo, puede definir la posición geográfica del objeto de construcción e introducir información sobre el proyecto de construcción.

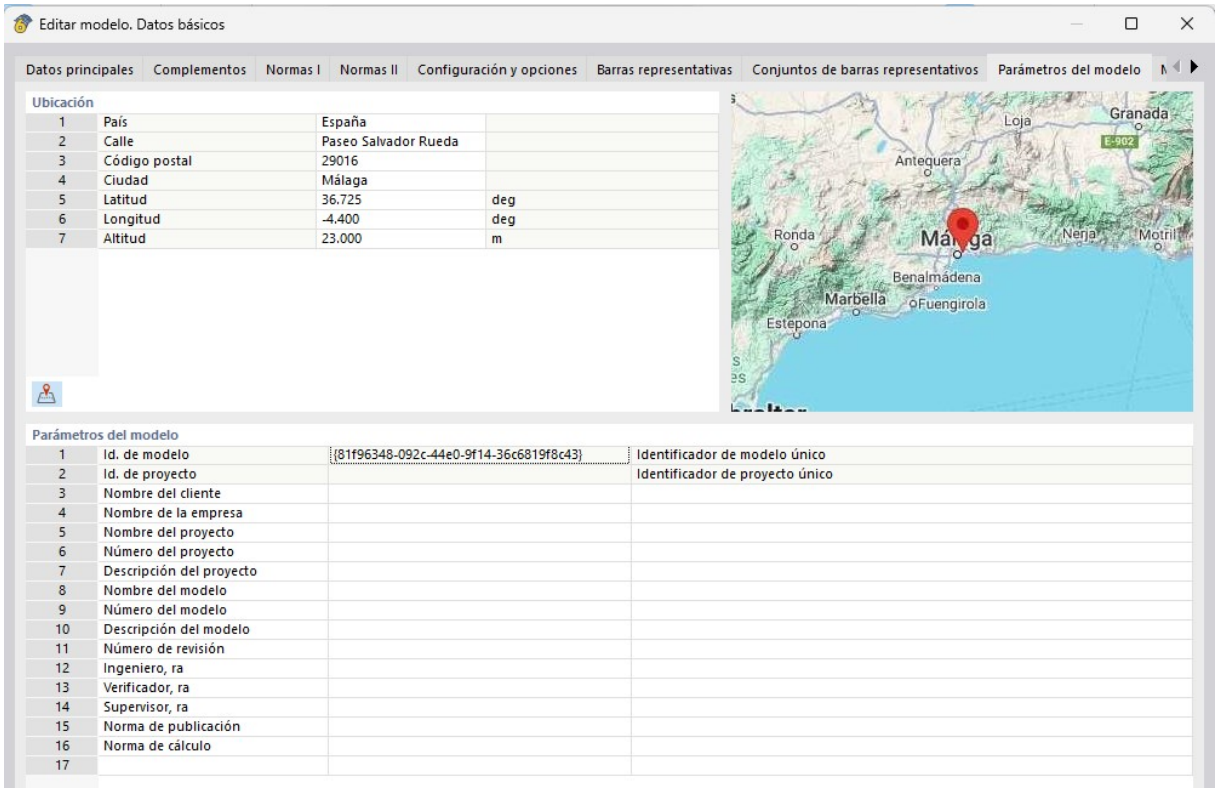


Figura 15.21: Ventana Parámetros del modelo.

2.9 Terreno

La pestaña Terreno es relevante para simulaciones numéricas de flujos de viento al utilizar RWIND. Aquí puede definir la topología del entorno del edificio.

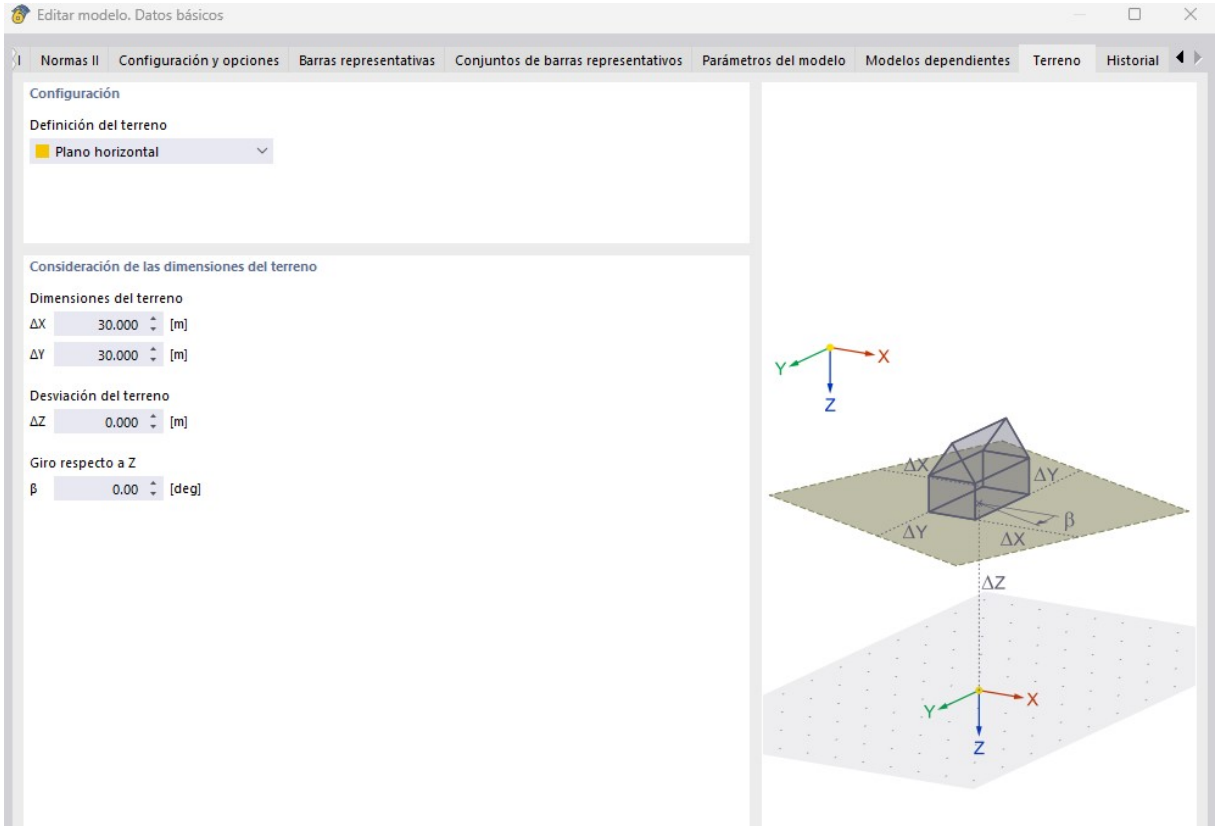


Figura 15.22: Ventana Terreno.

3 Estructura

3.1 Objetos básicos

Los Objetos básicos gestionan propiedades estructurales elementales tales como materiales, nudos y superficies. Cada objeto básico se incluye en una lista como subcategoría en el navegador. En la tabla, los datos se organizan en las pestañas correspondientes.

3.1.1 Materiales

Se requieren materiales para definir superficies, secciones y sólidos. Las propiedades del material afectan a las rigideces de estos objetos

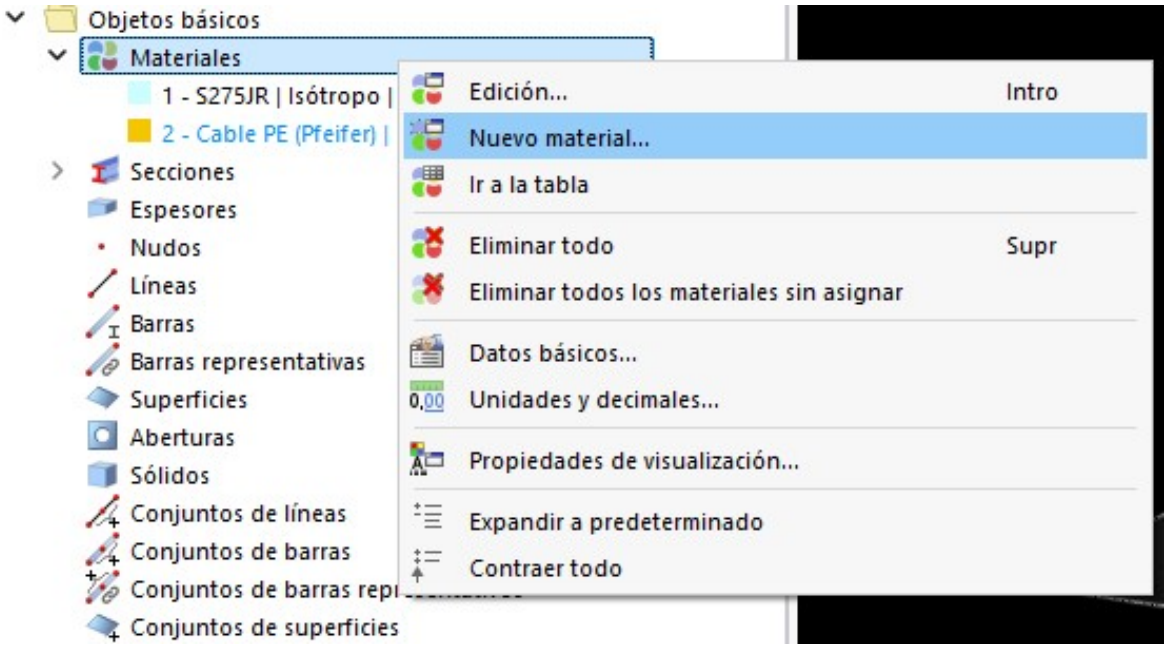


Figura 15.23: Ventana dialogo nuevo material.

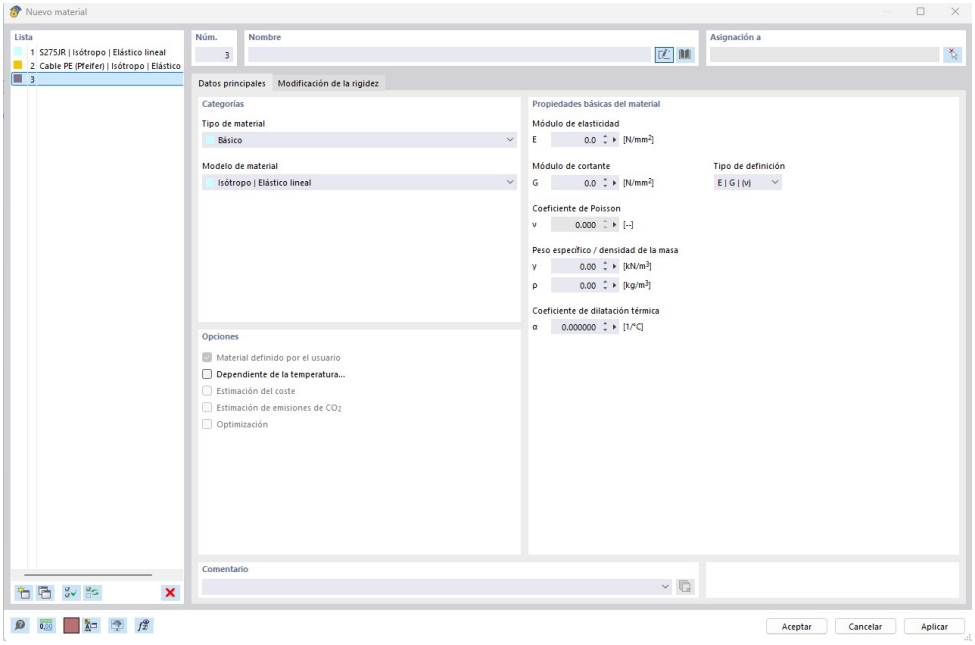


Figura 15.24: Ventana nuevo material.

Para acceder a la biblioteca, hacemos clic sobre el libro, abriéndose así una nueva ventana.

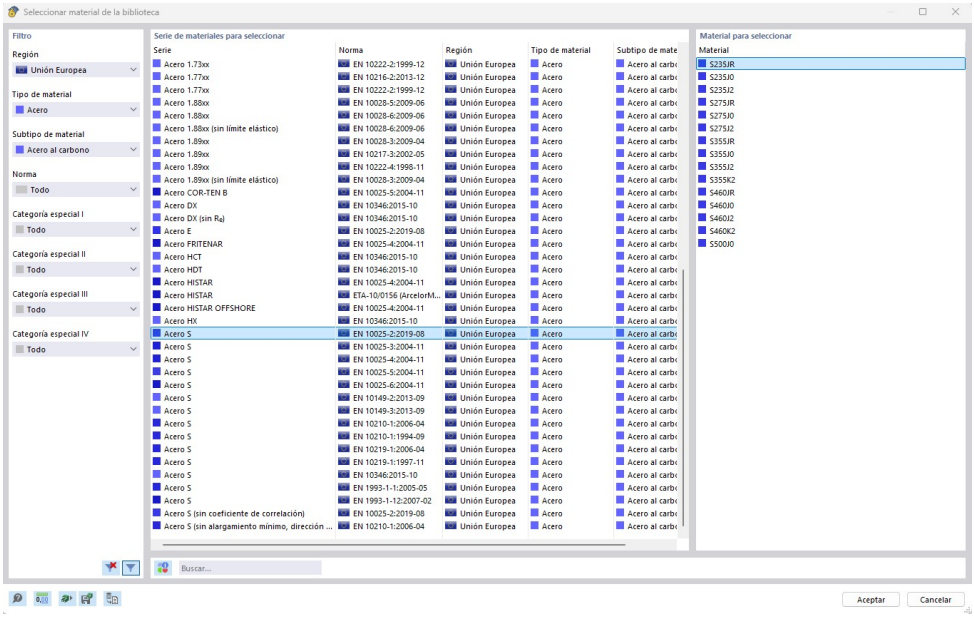


Figura 15.25: Ventana selección nuevo material.

En esta nueva ventana, se puede filtrar el material deseados según región, tipo, subtipo, norma, etc. Una vez seleccionado el material deseado, se actualiza la ventana de nuevo material con las propiedades de este seleccionado.

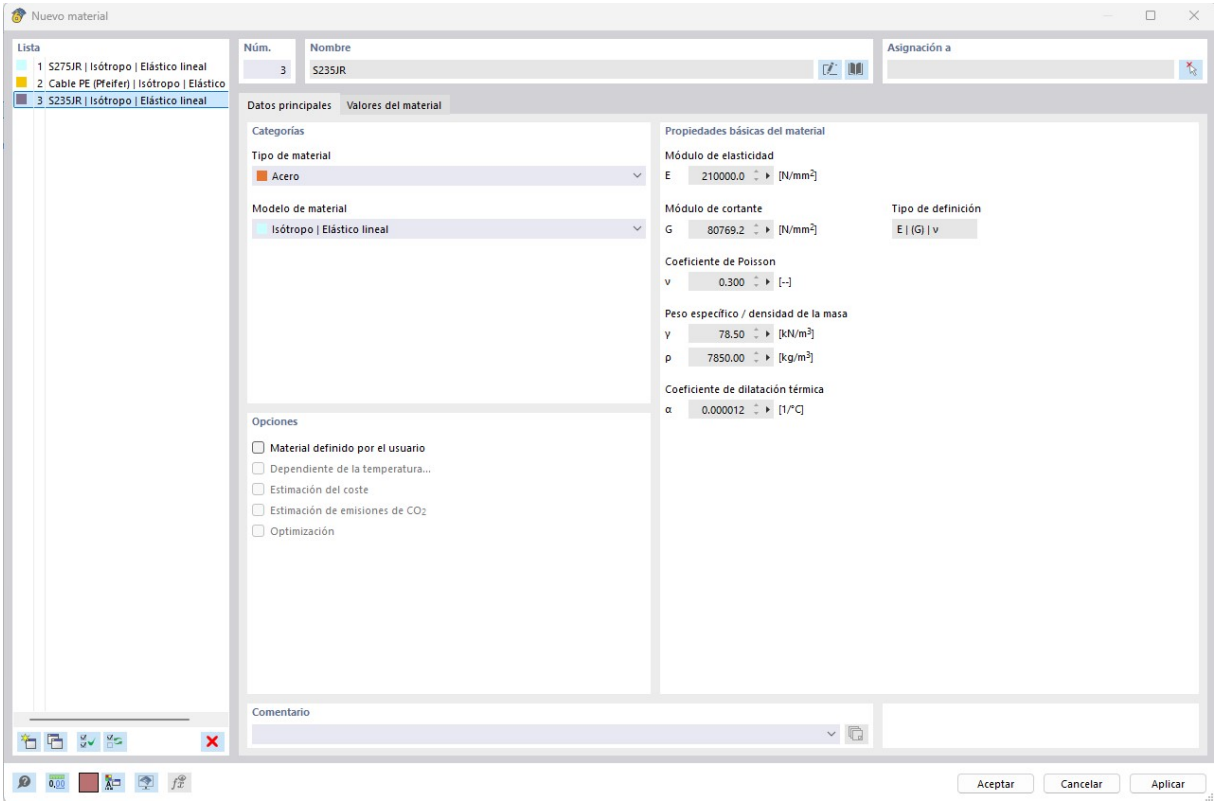


Figura 15.26: Ventana nuevo material actualizada.

3.1.2 Secciones

Se necesita una sección para describir las propiedades de una barra: las propiedades de la sección y las propiedades asignadas del material afectan la rigidez de la barra.

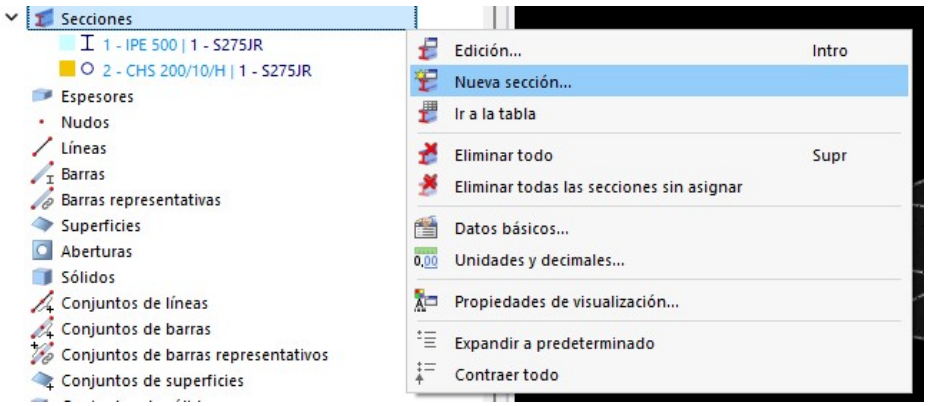


Figura 15.27: Ventana dialogo nueva sección.

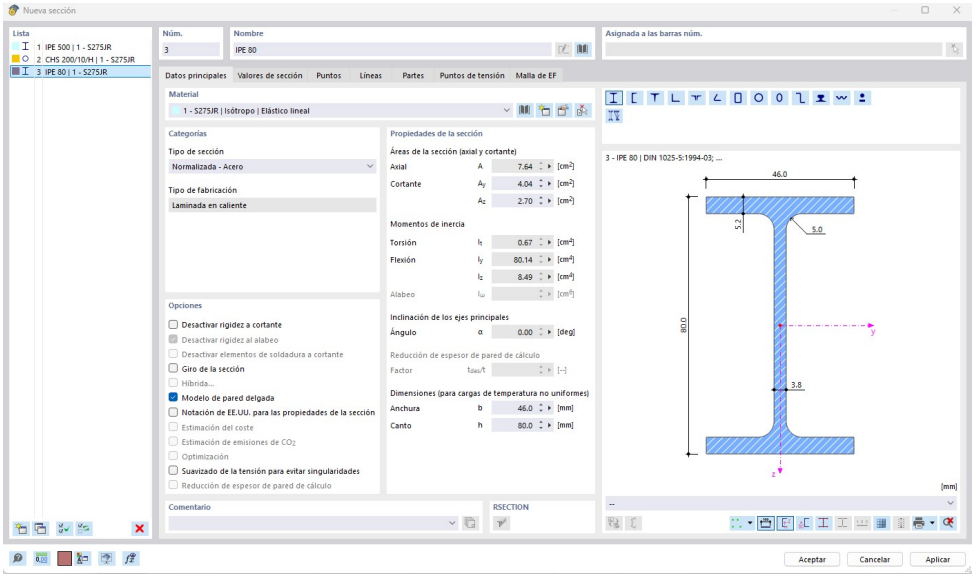


Figura 15.28: Ventana nueva sección.

En esta ventana se muestran las propiedades de la sección y si clicamos sobre la pestaña valores de sección, podremos visualizar sus datos geométricos, área, datos a flexión, cortante, etc.

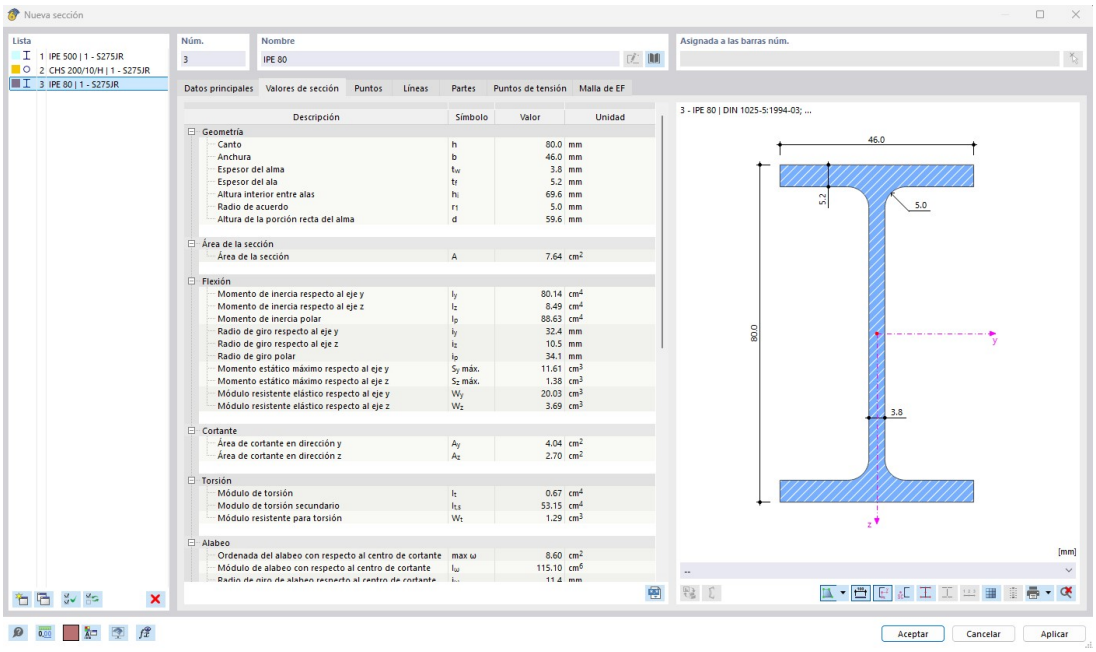


Figura 15.29: Ventana valores de sección.

Pulsando sobre el libro, podemos acceder a la biblioteca de secciones, abriéndose así una nueva ventana.

Figura 15.30: Ventana nueva sección de la biblioteca.

En esta ventana, se puede escoger el tipo de sección buscada, según si es normalizada, de pared delgada, maziza, armada o barra.

Una vez seleccionado el tipo deseado, se abre la nueva ventana.

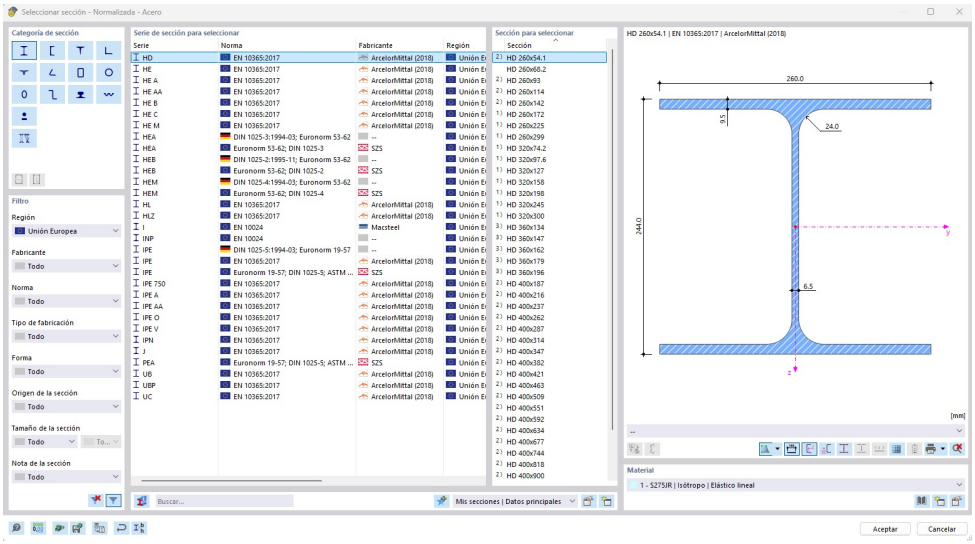


Figura 15.31: Ventana seleccionar sección.

En esta nueva ventana, se puede filtrar la sección deseados según región, fabricante, tipode de fabricación, norma, etc. Una vez seleccionada la sección deseada, se actualiza la ventana de nueva sección con las propiedades de esta seleccionada.

3.1.3 Barra

Las barras son propiedades de las líneas. Al asignar una sección (mediante la cual también se define el material), la barra recibe una rigidez. Al generar una malla de EF, los elementos 1D se crean en las barras.

Las barras solo se pueden conectar entre sí en los nudos. Cuando las barras se cruzan entre sí sin compartir ningún nudo en común, no existe conexión. No se transfieren esfuerzos internos ni momentos en tales cruces.

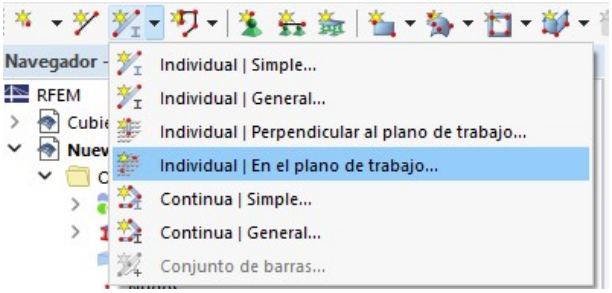


Figura 15.32: Ventana diálogo nueva barra.

Escogemos el tipo barra individual simple, abriéndose así la siguiente ventana.

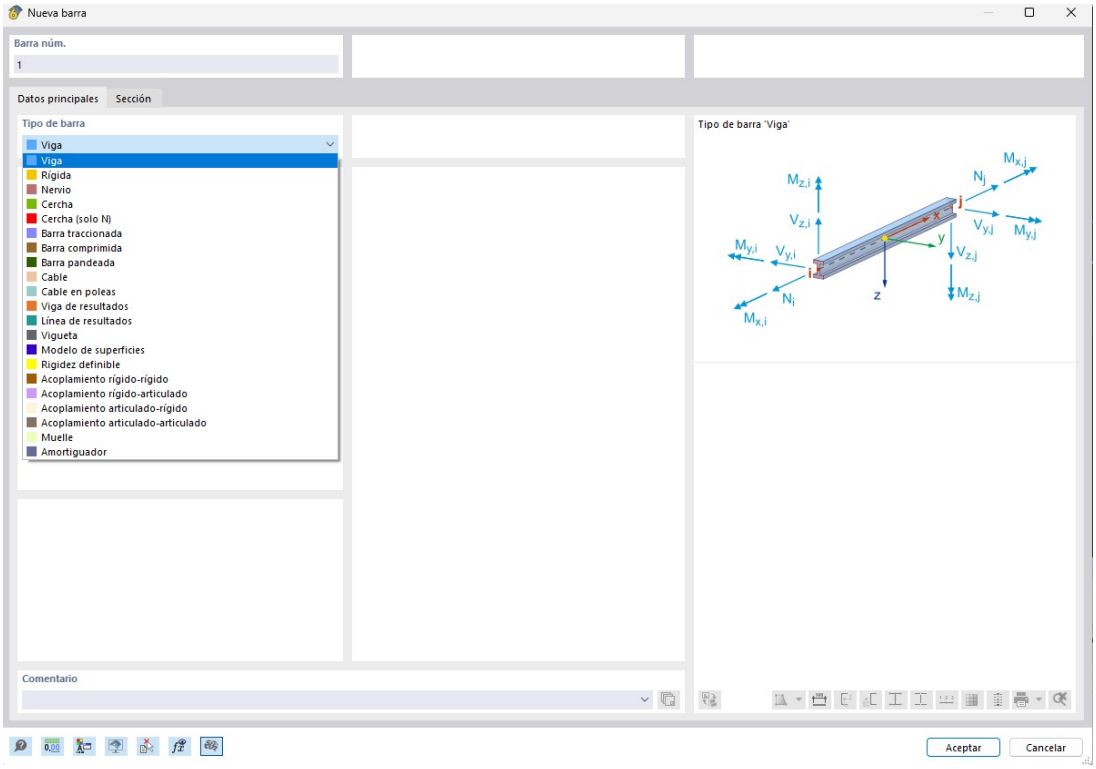


Figura 15.33: Ventana nueba barra.

En esta ventana, podemos editar en tipo de barra que va a ser, seleccionando la pestaña sección, abrimos una nueva ventana.

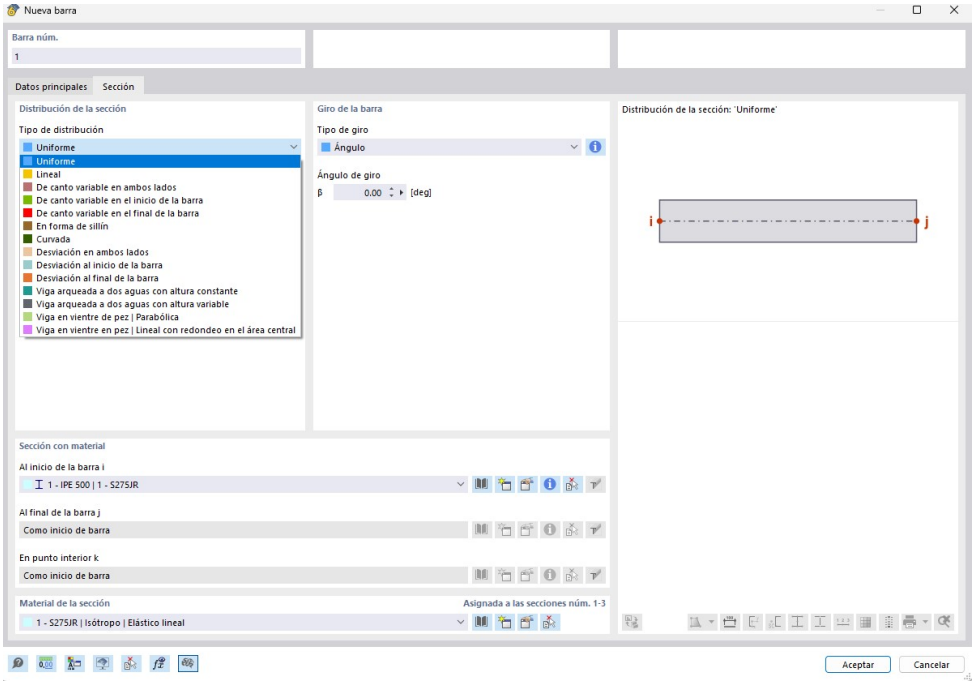


Figura 15.34: Ventana sección de barra.

En esta se edita el tipo de distribución de la sección, el tipo de giro de la barra,y el tipo de sección de la barra junto con el material.

Una vez definidos los parámetros de la barra, se abre el cuadro de diálogo en el espacio de trabajo, donde podremos introducir en la posición que dispongamos la barra con la longitud deseada de esta.

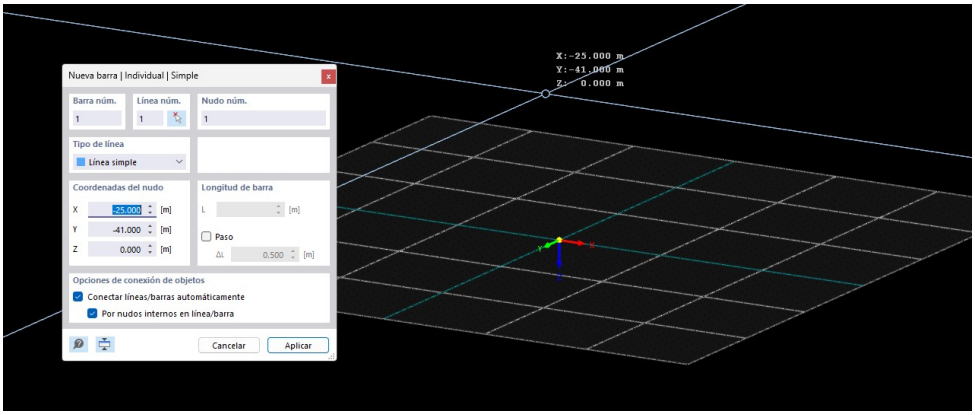


Figura 15.35: Cuadro de diálogo sobre espacio de trabajo, introducción de barra.

3.1.4 Superficies

Las superficies describen la geometría de componentes estructurales planos o curvos cuyas dimensiones de superficie son significativamente mayores que los espesores. La rigidez de una superficie resulta de su material y espesor. Al generar una malla de EF, se crean elementos 2D sobre las superficies. Se aplican en el eje del centro de gravedad de la superficie para los cálculos.

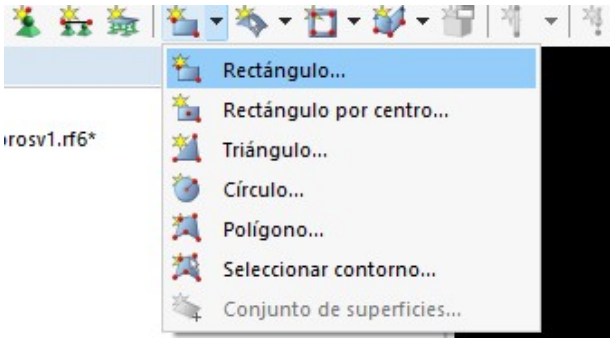


Figura 15.36: Cuadro de diálogo nueva superficie.

Seleccionamos una forma geométrica de la lista, abriendose así una nueva ventana.

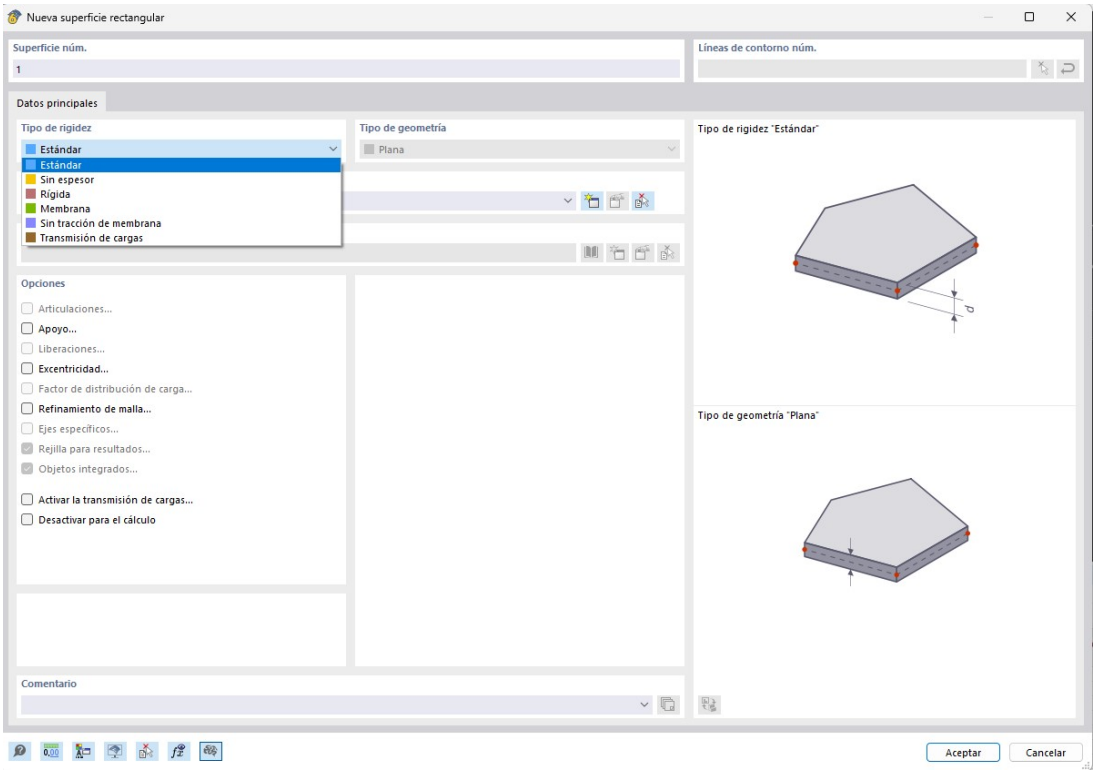


Figura 15.37: Ventana nueva superficie.

En esta ventana se escoge el tipo de rigidez de la superficie, en nuestro caso membrana, y se escoge el espesor/material de esta. Para escoger un nuevo espesor clicamos sobre el

icono de nuevo, abriéndose de nuevo otra ventana para crear un nuevo espesor. Este procedimiento se realizó en el **Subsubsección 3.1.1** para acero, de igual manera se realiza para tejido.

Una vez hecho esto la ventana de nuevo espesor quedaría de la siguiente manera.

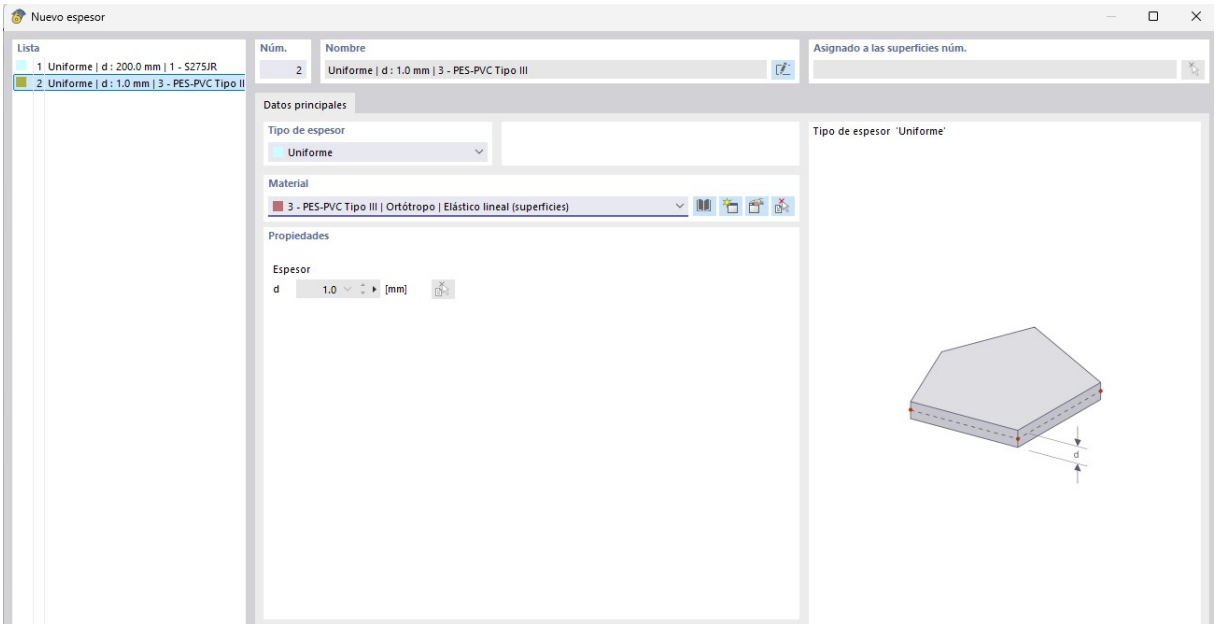


Figura 15.38: Ventana nuevo espesor.

3.2 Tipos para nudos

3.2.1 Apoyos en nudos

Los apoyos se usan para transferir cargas que se aplican en un sistema estructural en las cimentaciones. Sin apoyos, todos los nudos estarían libres y podrían desplazarse o girarse libremente. Si se desea que un nudo actúe como un apoyo, al menos uno de sus grados de libertad se debe restringir mediante un muelle o bloquear. Además, el nudo debe ser parte de una superficie o una barra.

Cada apoyo en nudo tiene un sistema de coordenadas local, que está orientado paralelo a los ejes globales X, Y y Z de forma predeterminada.

Si pulsamos doblemente sobre el símbolo de color verde con forma de apoyo de la barra superior de herramientas, abriremos un acceso directo a una ventana en la cual como podemos observar vienen predefinidos un numero de apoyos, normalmente los de uso más habitual.

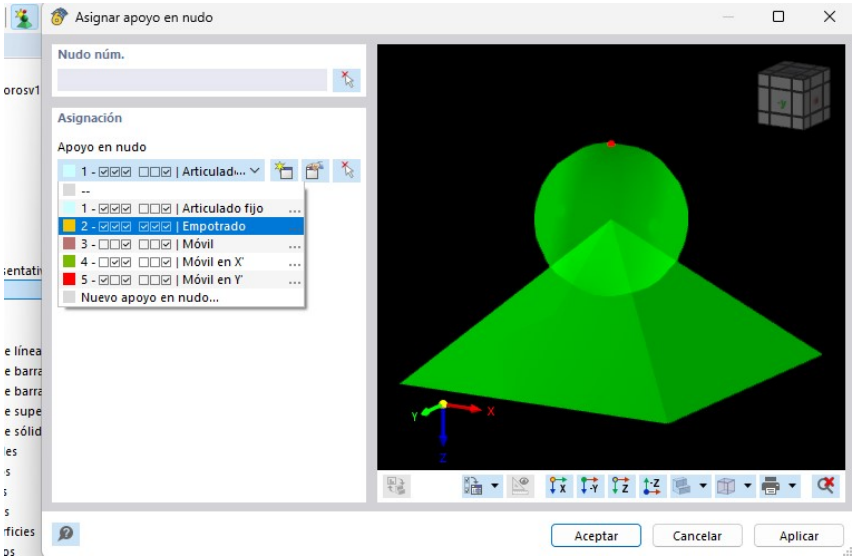


Figura 15.39: Ventana nuevo apoyo.

En el caso de que precisemos de la creación de otro diferente, se deberá clicar sobre el símbolo de nuevo, abriéndose así una nueva ventana.

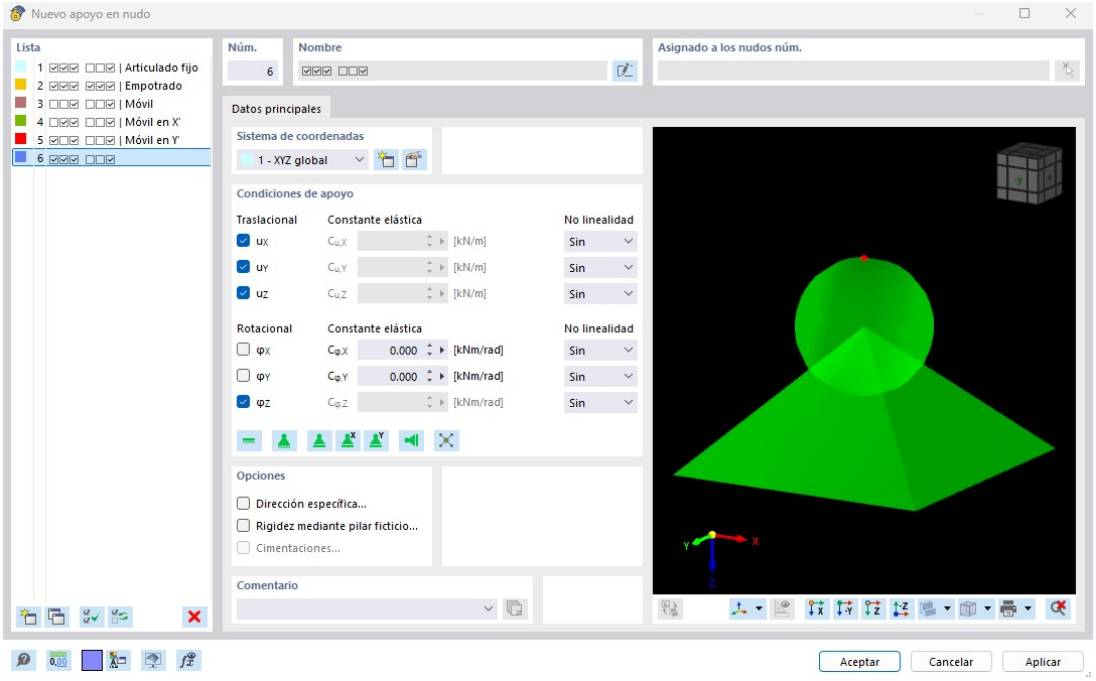


Figura 15.40: Ventana creación de nuevo apoyo.

En esta nueva ventana se pueden editar los sistemas de coordenadas, las condiciones de apoyo y otras opciones.

4 Casos de carga y combinaciones

Las cargas que actúan en el modelo se gestionan en diferentes casos de carga. Estos casos de carga se pueden superponer en combinaciones.

4.1 Casos de carga

Las cargas de una acción específica se almacenan en un caso de carga (CC). Los casos de carga son, por ejemplo, el peso propio, la carga de nieve o la sobrecarga de uso.

Si seleccionamos doblemente sobre el siguiente símbolo marcado en la barra superior de herramientas de la siguiente imagen, abriremos una nueva ventana de caso de carga.

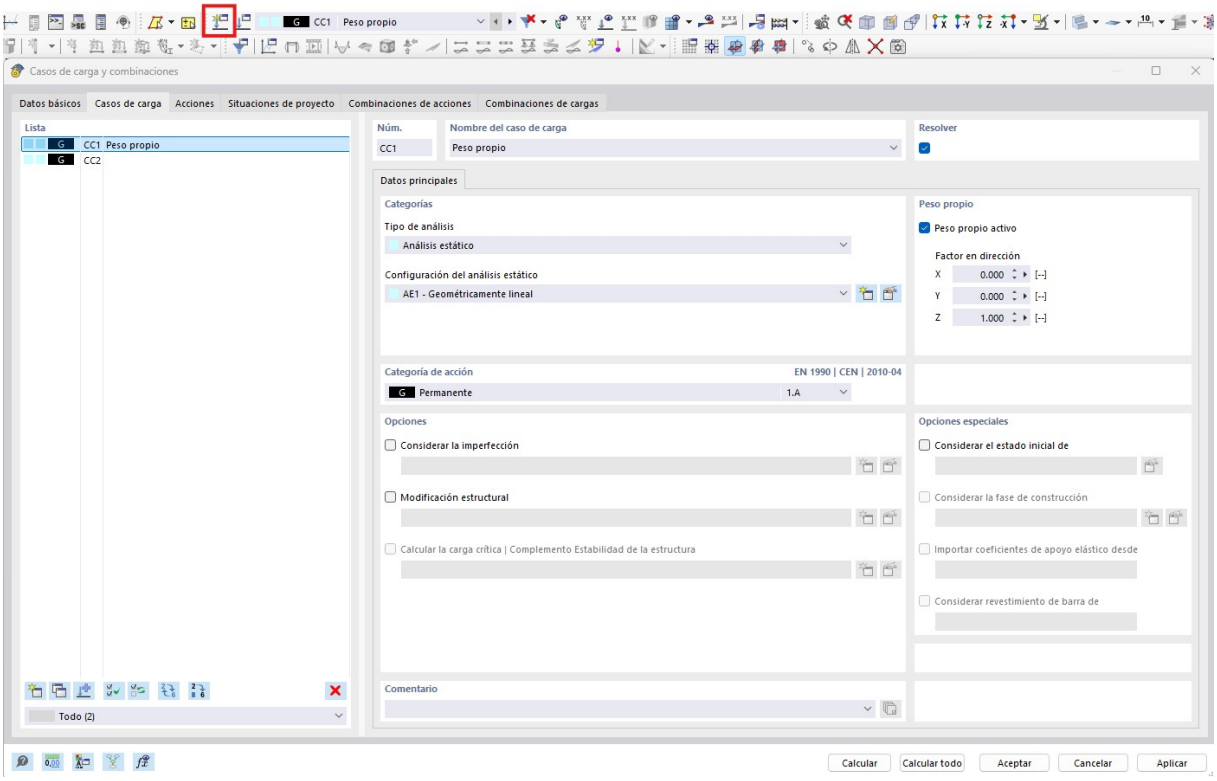


Figura 15.41: Ventana creación de nuevo caso de carga.

En esta ventana se definen las características del nuevo caso de carga como el nombre que se le dará a este, el tipo de análisis, la configuración del análisis estático, la categoría de la acción entre otros.

4.1.1 Datos básicos

En la pestaña de datos básicos se definen otras configuraciones como las que aparecen en la siguiente imagen.

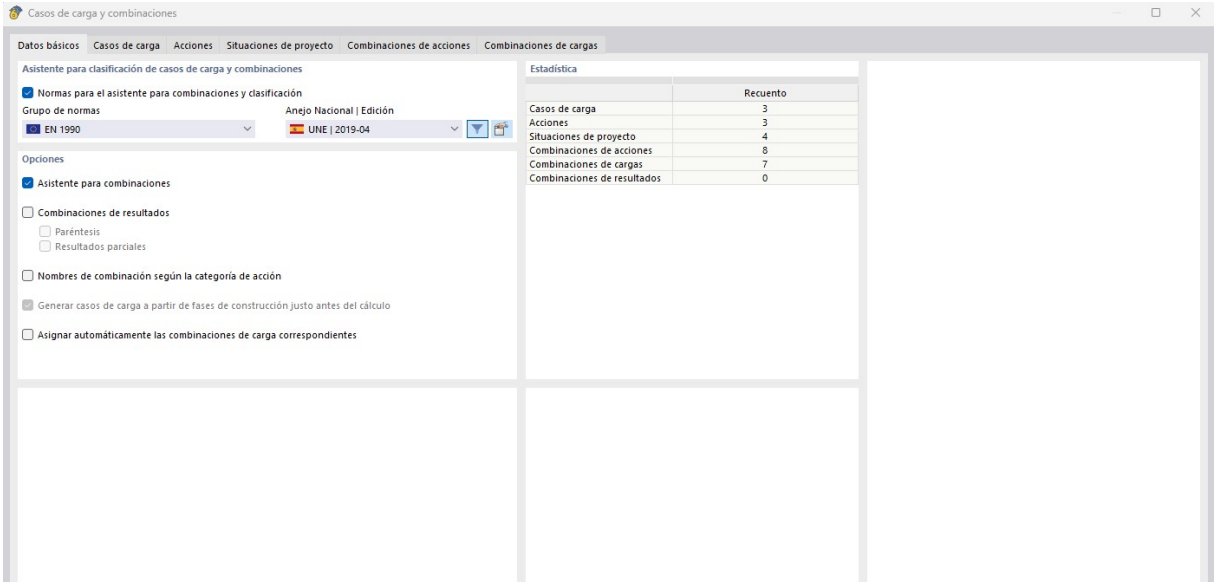


Figura 15.42: Ventana datos básicos de nuevo caso de carga.

En esta se gestiona la configuración general para clasificar y combinar los casos de carga. Puede definir si los casos de carga se van a combinar automáticamente y según qué norma se debe hacer.

4.1.2 Acciones

En la siguiente pestaña se encuentran las acciones.

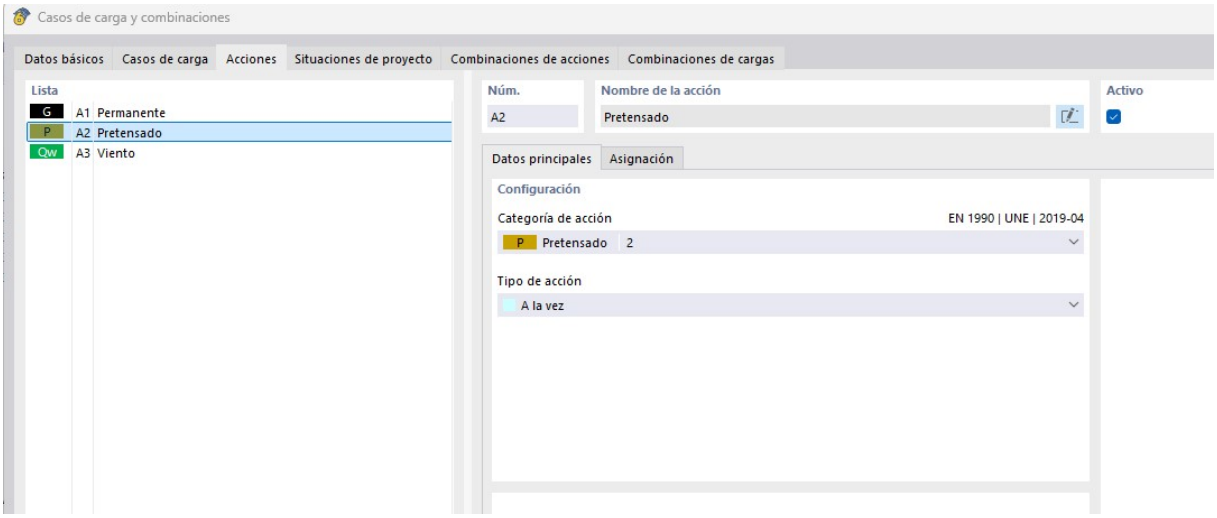


Figura 15.43: Ventana acciones de casos de carga y combinaciones.

La norma EN 1990 proporciona reglas para combinar acciones independientes en varias situaciones de proyecto. Las acciones son independientes entre sí si surgen de diferentes orígenes y si la correlación entre ellas puede descuidarse con respecto a la fiabilidad del sistema estructural.

De acuerdo con este concepto, debemos definir las acciones a las que se asignan los casos de carga para la superposición automática. Las categorías de acción definidas para los casos de carga forman la base para clasificar los casos de carga.

4.1.3 Situaciones de proyecto

En la siguiente pestaña se encuentra situaciones de proyecto.

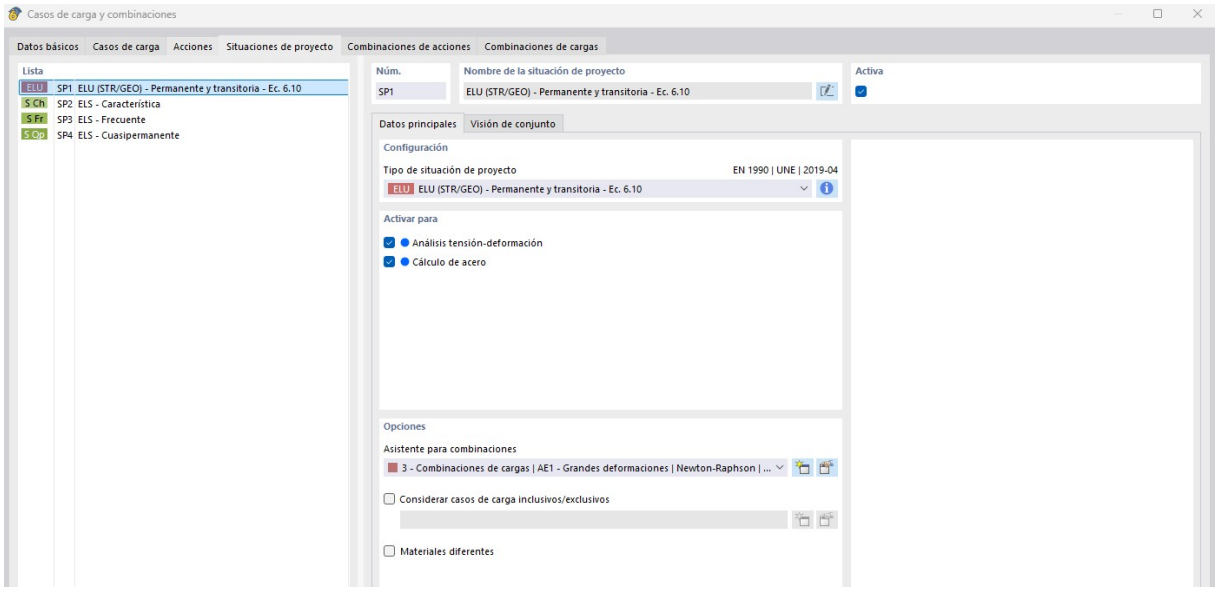


Figura 15.44: Ventana situaciones de proyecto.

Las normas describen cómo se tienen que combinar las acciones. EN 1990, por ejemplo, requiere la comprobación en estado límite último y estado límite de servicio, para lo cual se aplican ciertas reglas de combinación.

Para EN 1990, se preestablece un estado límite último y tres situaciones de proyecto en estado límite de servicio.

4.1.4 Combinaciones de acciones

Las acciones se combinan en combinaciones de acciones (CA) según los criterios descritos en la norma. Una combinación de acciones describe todas las posibilidades para superponer los casos de carga contenidos en la acción, que no debe confundirse con una combinación de carga, que representa solo una variante de estas posibilidades.

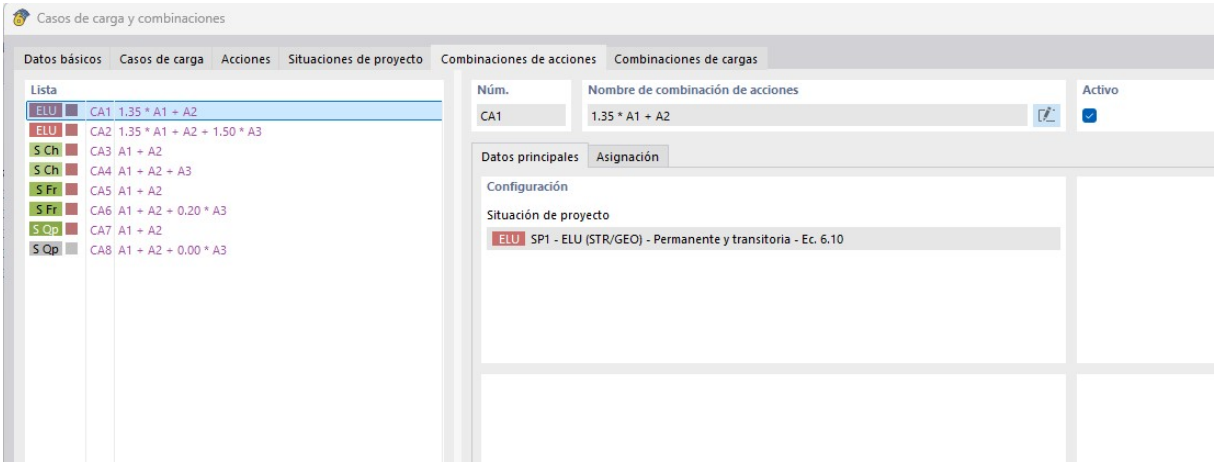


Figura 15.45: Ventana combinaciones de acciones.

Cuando se activa la pestaña, las combinaciones de acciones se generan de acuerdo con las reglas de combinación de la norma, incluyéndose en una lista por situaciones de proyecto.

El 'Nombre de combinación de acciones' es una breve descripción que se basa en los coeficientes de seguridad y los símbolos de las acciones, reflejando las reglas de combinación.

4.1.5 Combinaciones de cargas

Una combinación de cargas (CO) superpone los casos de carga según el criterio de combinación de la situación de proyecto.

Las combinaciones de cargas representan diferentes variantes de las formas en que se pueden combinar los casos de carga contenidos en una combinación de acciones.

Una combinación de cargas combina las cargas de los casos de carga contenidos en ün caso de carga grande", teniendo en cuenta los coeficientes parciales de seguridad.

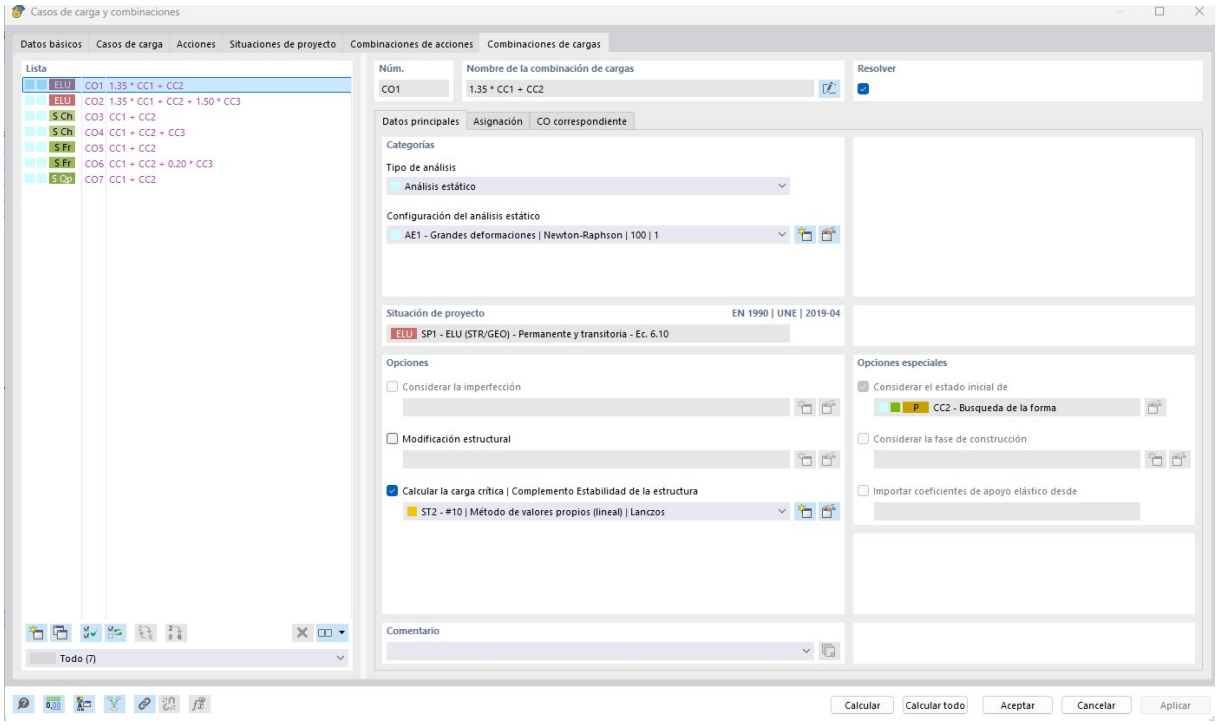


Figura 15.46: Ventana combinaciones de cargas.

Cuando la pestaña está activada, las combinaciones de cargas se generan de acuerdo con las reglas de combinación de la norma, incluyéndose en una lista por situaciones de proyecto.

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Anexo II: Planos de la cubierta.

Diseño y cálculo de cubierta mediante membranas tensadas para la plaza de toros de Málaga

---

Autor:

Luis Miguel Maldonado Guillén

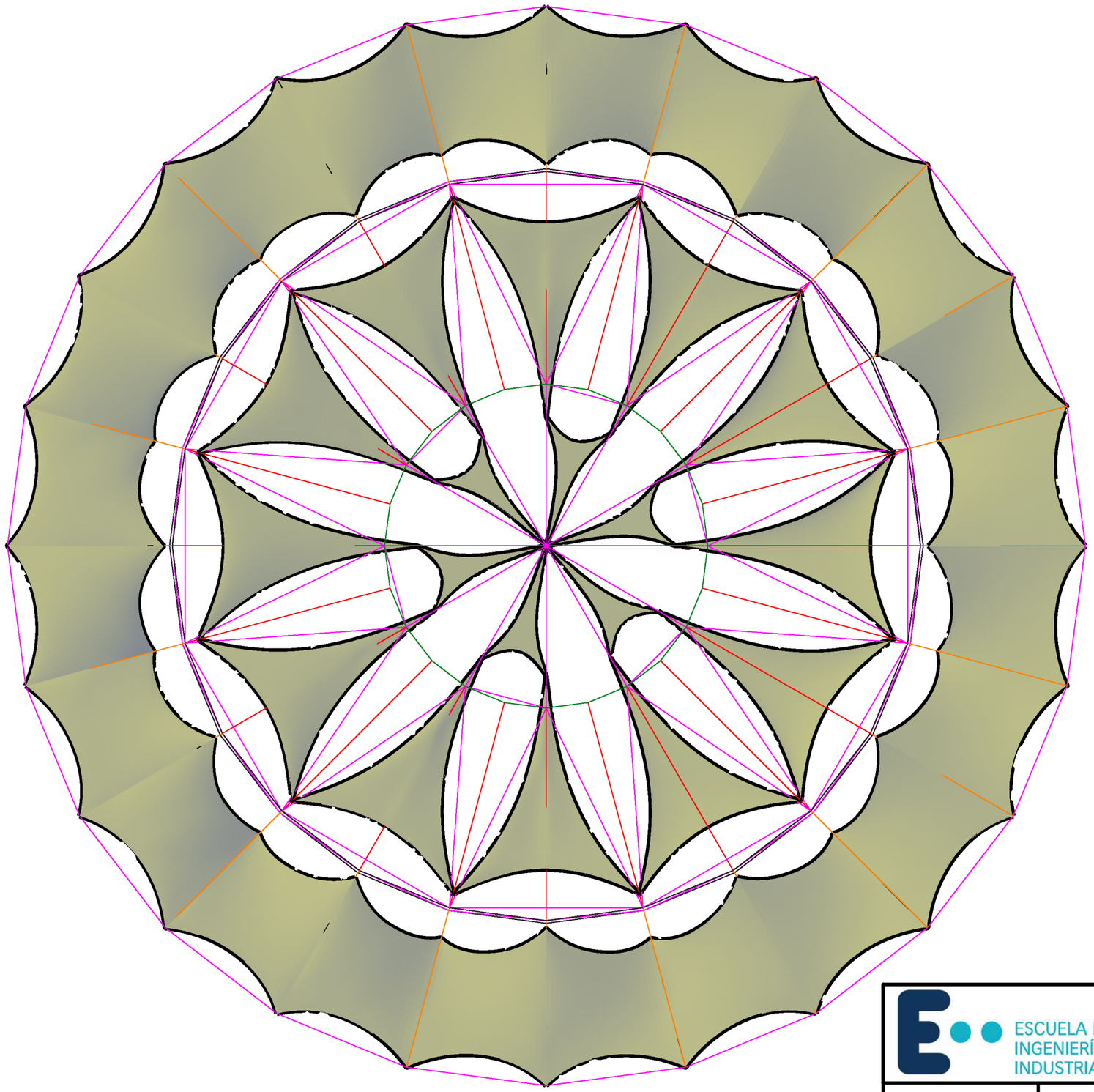
Tutor:

D. José Sandino Egea

Información académica:

Grado en Ingeniería Mecánica

Málaga, 22 de mayo de 2025



Leyenda	
	Cable PE 15
	Cable PE 30
	Cable PE 45
	Cable PE 60
	Cable PE 100
	CHS 200/10/H
	Membrana PES-PVC

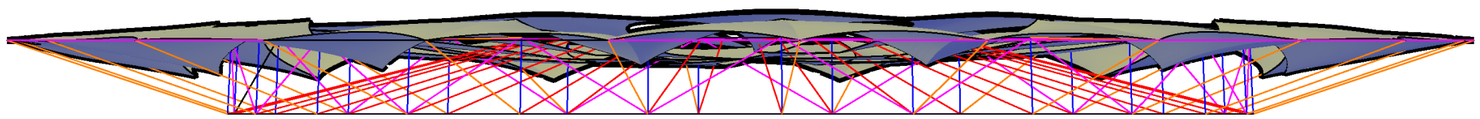
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

MALDONADO GUILLEN LUIS MIGUEL - 77669192D

Firmado digitalmente por MALDONADO GUILLEN LUIS MIGUEL - 77669192D
Fecha: 2025.05.22 19:20:26 +02'00'

Proyecto	Cubierta plaza de toros de Málaga.		
Autor	Luis Miguel Maldonado Guillén		
Fecha	Mayo 2025	Escala 1:400	Plano planta



Leyenda	
	Cable PE 15
	Cable PE 30
	Cable PE 45
	Cable PE 60
	Cable PE 100
	CHS 200/10/H
	Membrana PES-PVC

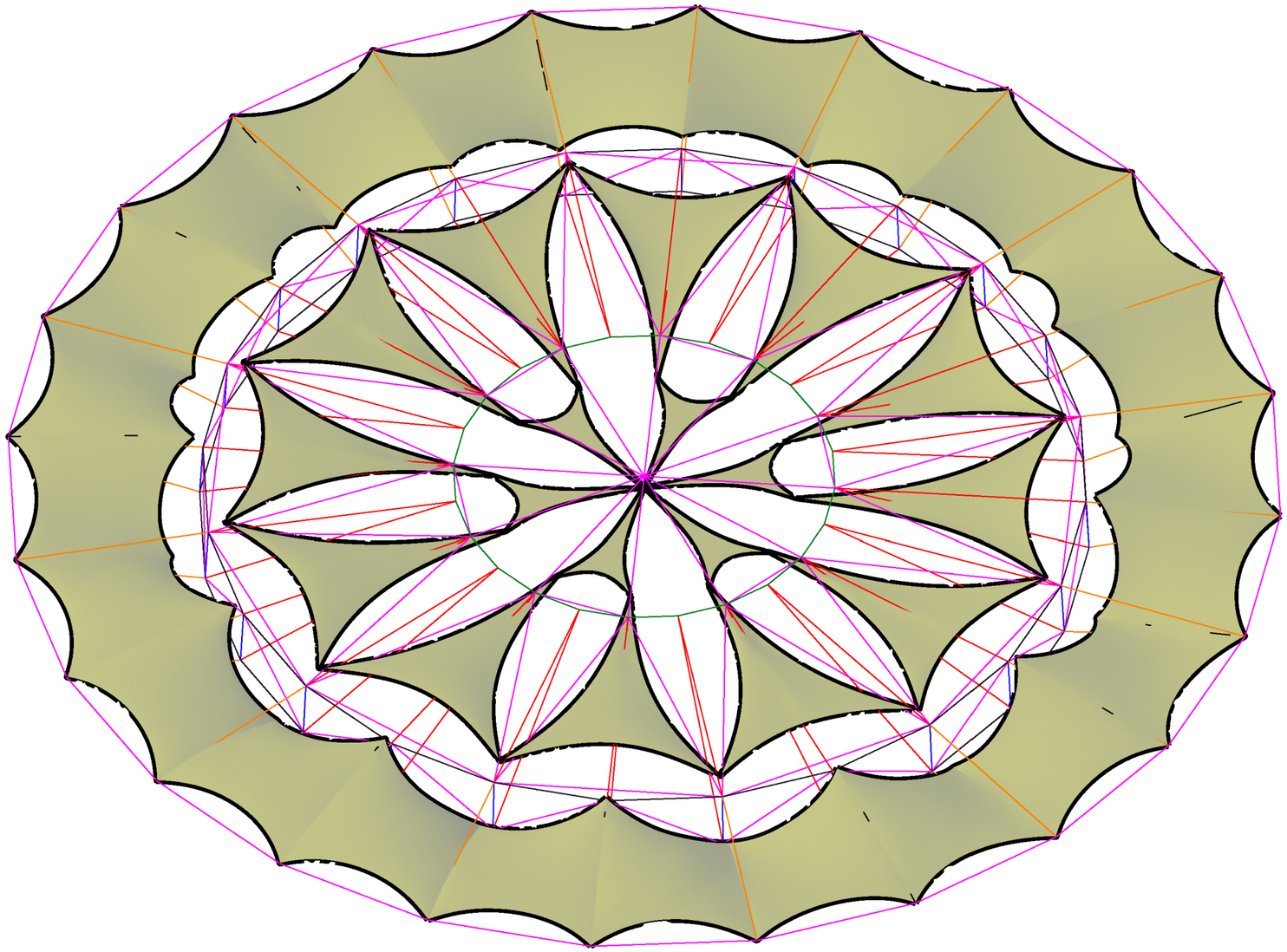
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

MALDONADO GUILLEN LUIS MIGUEL - 77669192D

Firmado digitalmente por MALDONADO GUILLEN LUIS MIGUEL - 77669192D
Fecha: 2025.05.22 19:20:45 +02'00'

Proyecto	Cubierta plaza de toros de Málaga.		
Autor	Luis Miguel Maldonado Guillén		
Fecha	Mayo 2025	Escala 1:400	Plano alzado



Leyenda	
	Cable PE 15
	Cable PE 30
	Cable PE 45
	Cable PE 60
	Cable PE 100
	CHS 200/10/H
	Membrana PES-PVC

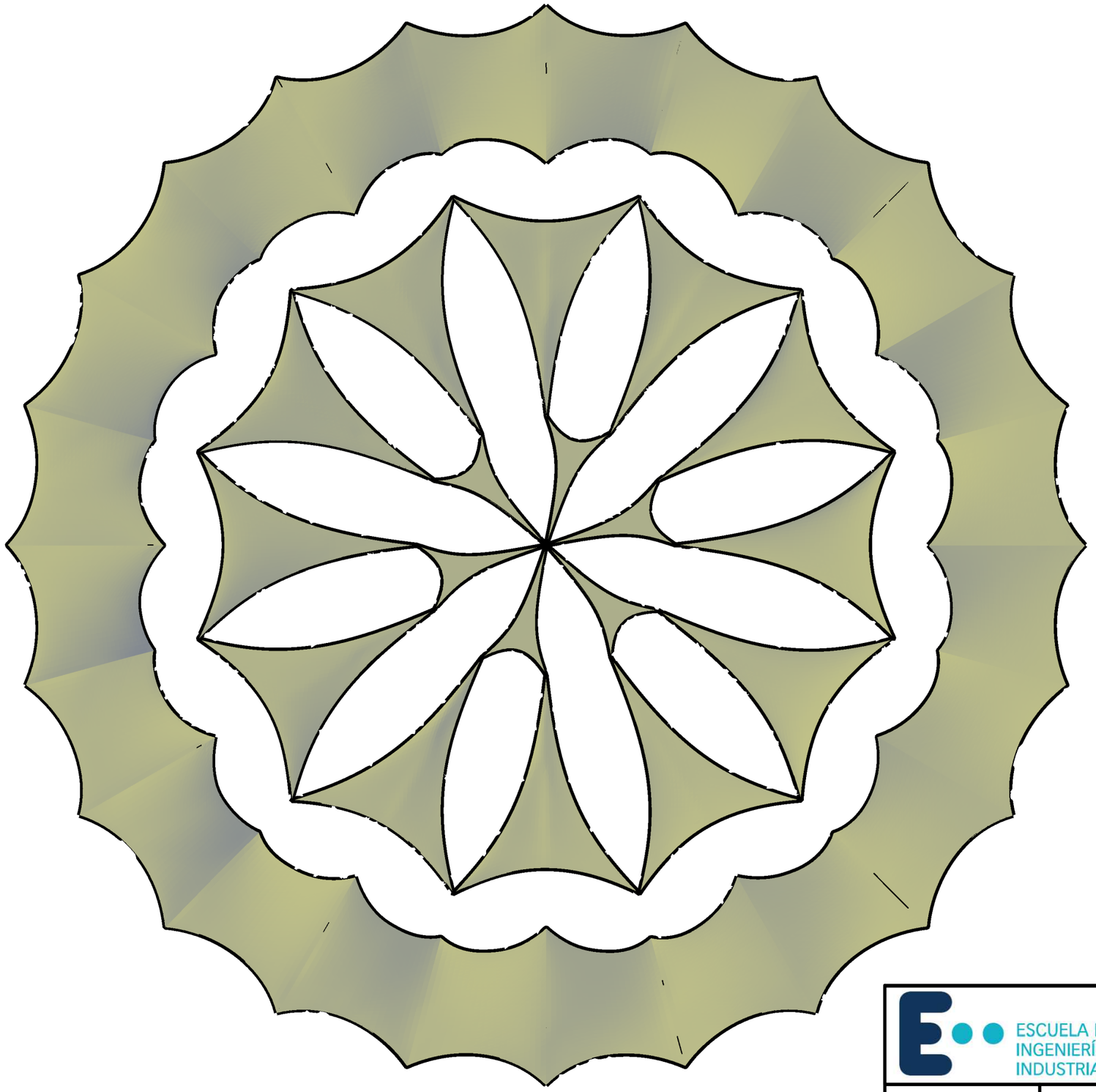
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

MALDONADO GUILLEN LUIS MIGUEL - 77669192D

Firmado digitalmente por MALDONADO GUILLEN LUIS MIGUEL - 77669192D
Fecha: 2025.05.22 19:21:23 +02'00'

Proyecto	Cubierta plaza de toros de Málaga.		
Autor	Luis Miguel Maldonado Guillén		
Fecha	Mayo 2025	Escala 1:400	Plano perspectiva



Leyenda	
	Membrana PES-PVC

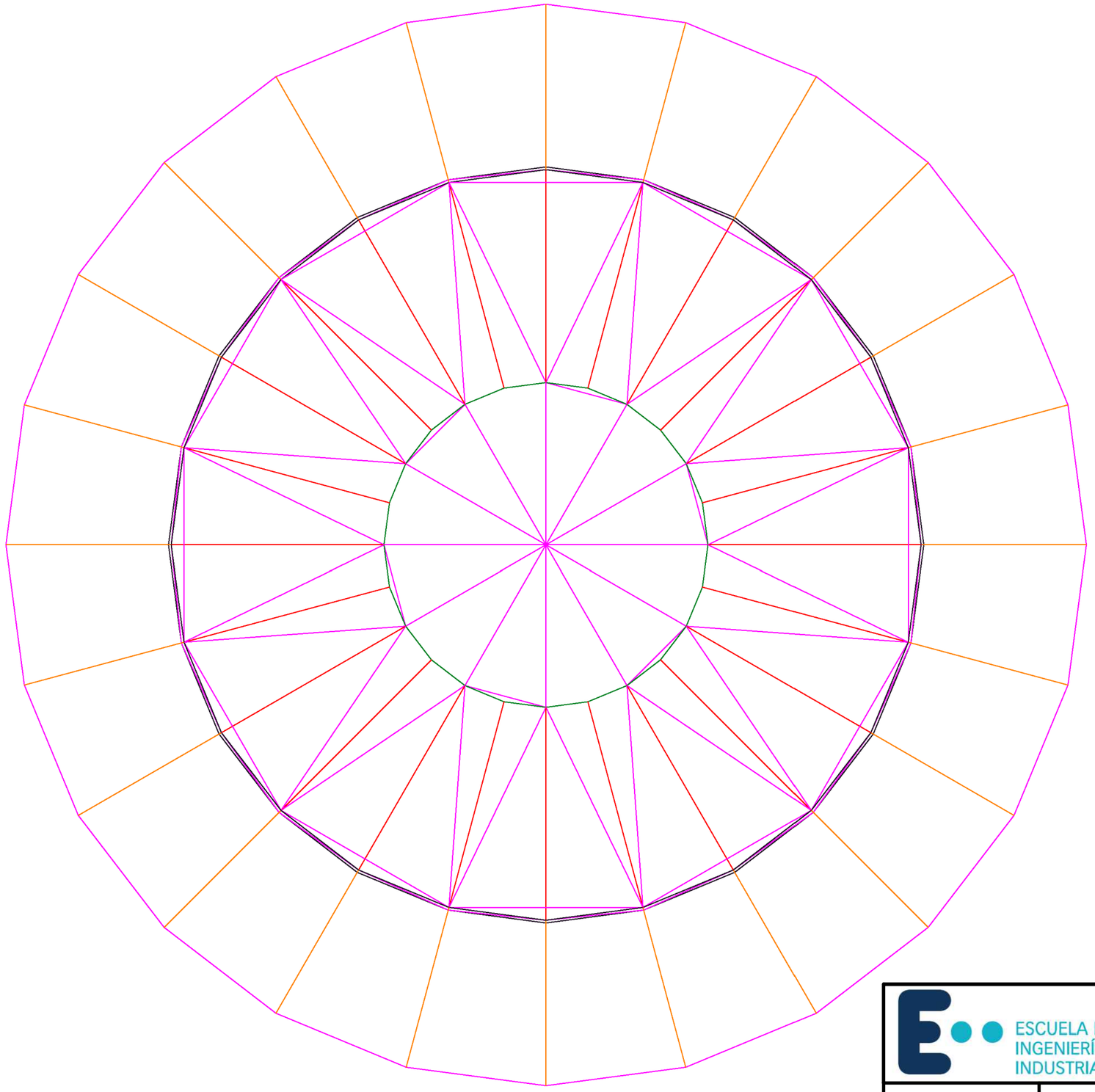
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

MALDONADO GUILLEN LUIS MIGUEL - 77669192D

Firmado digitalmente por MALDONADO GUILLEN LUIS MIGUEL - 77669192D
Fecha: 2025.05.22 19:21:38 +02'00'

Proyecto	Cubierta plaza de toros de Málaga.		
Autor	Luis Miguel Maldonado Guillén		
Fecha	Mayo 2025	Escala 1:400	Plano membrana



Leyenda	
	Cable PE 15
	Cable PE 30
	Cable PE 45
	Cable PE 60
	Cable PE 100

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

MALDONADO GUILLEN LUIS MIGUEL - 77669192D

Firmado digitalmente por MALDONADO GUILLEN LUIS MIGUEL - 77669192D
Fecha: 2025.05.22 19:22:03 +02'00'

Proyecto	Cubierta plaza de toros de Málaga.		
Autor	Luis Miguel Maldonado Guillén		
Fecha	Mayo 2025	Escala 1:400	Plano cables

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Anexo III: Planos facilitados por la Diputación de Málaga.

Diseño y cálculo de cubierta mediante membranas tensadas para la plaza de toros de Málaga

---

Autor:

Luis Miguel Maldonado Guillén

Tutor:

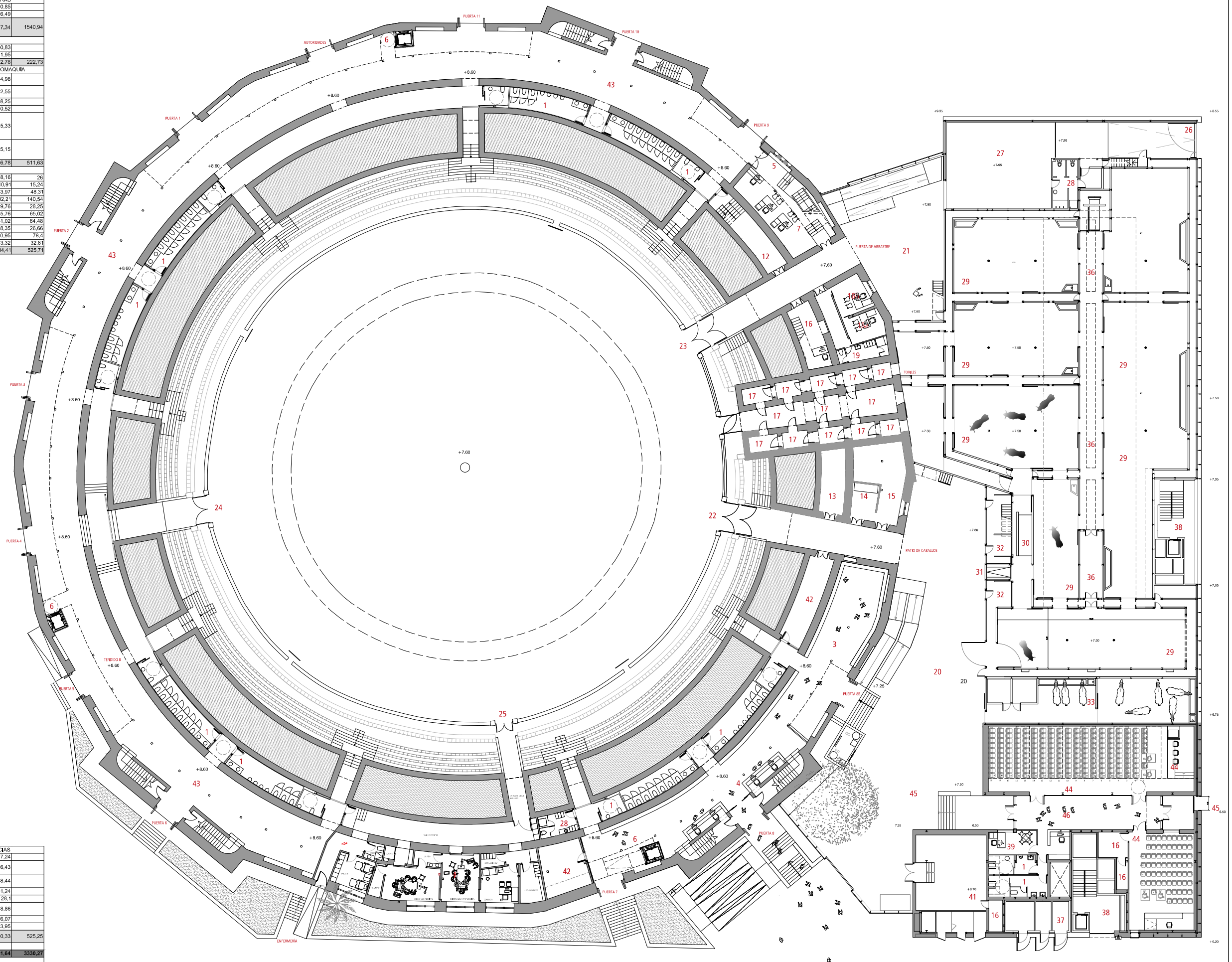
D. José Sandino Egea

Información académica:

Grado en Ingeniería Mecánica

Málaga, 22 de mayo de 2025

PLANTA BAJA		
USO	SUP. ÚTIL m²	SUP. CONST. m²
EXPOSICIONES Y MUESTRAS		
ZONA EXPOSITIVA	800.85	
ASEOS	326.49	
TOTAL P. BAJA EXPOSICIONES Y MUESTRAS	1127,34	1540,94
ENFERMERÍA		
PASILLO	60,83	
DEPENDENCIAS	111,95	
TOTAL ENFERMERÍA	172,78	222,73
CENTRO DE ARTE DE LA TAUROMAQUIA		
ACCESO EXPOSICIONES Y TIENDA	204,98	
EXPOSICIONES TEMPORALES	62,55	
ASEOS	68,25	
VESTUARIO DE PERSONAL	10,52	
UNIDADES INTERIORES CLIMATIZACIÓN PARA ENFERMERÍA Y RESTAURANTE	25,33	
UNIDAD INTERIOR CLIMATIZACIÓN PARA EXPOSICIONES	25,15	
TOTAL PLANTA BAJA C.A.T.	396,78	511,63
USOS TAURINOS		
CUADRO ELÉCTRICO	18,16	26
CAPILLA	10,91	15,24
ESTAR TOREROS	33,97	48,31
TORILES	102,21	140,54
DESPACHO PERSONAL	19,76	28,25
ZONA VETERINARIOS	45,76	65,02
ENTREPLANTA TORILES	51,02	64,48
ALMACÉN ENTREPLANTA	18,35	26,66
OFICINA EMPRESARIO	60,95	78,4
ESCUELA TAURINA	23,32	32,81
TOTAL USOS TAURINOS	384,41	525,71



CENTRO DE CONFERENCIAS		
ACCESO	17,24	
SALA DE CONFERENCIA 1 (180)	146,43	
SALA DE CONFERENCIAS 2 (60)	58,44	
VESTÍBULO CONFERENCIAS	101,24	
ASEOS	28,1	
DESPACHO-ADMINISTRACIÓN	18,86	
INSTALACIONES	76,07	
ALMACÉN	13,95	
TOTAL CENTRO DE CONFERENCIAS	460,33	525,25
TOTAL PLANTA BAJA	**2541,64**	**3330,27**
CORRALES		
HABITACIÓN MAYORAL	20,66	28,15
DESOLLADERO	102,75	116,47
VESTUARIO DESOLLADERO	20,29	25,33
CORRALES		1385,95
TOTAL CORRALES		1555,9

1 ASEOS
2 COLECCIÓN PERMANENTE TAUROMAQUIA
3 EXPOSICIONES TEMPORALES
4 VESTÍBULO ACCESO CAT, TIENDA Y RESTAURANTE
5 TAQUILLAS
6 ASCENSOR
7 OFICINAS EMPRESA
8 HABITACIÓN
9 QUIRÓFANO
10 SALA DE CURAS QUIRÓFANO
11 ZONA DE ESPERA
12 GIMNASIO Y VESTUARIO ESCUELA TAURINA
13 CUADRO ELÉCTRICO
14 CAPILLA
15 ESTAR TOREROS
16 ALMACENAJE
17 TORILES
18a VETERINARIO 1
18b VETERINARIO 2
19 VESTUARIO VETERINARIO
20 PATIO DE CABALLOS
21 PATIO DE ARRASTRE
22 PUERTA DE CUADRILLAS
23 PUERTA DE ARRASTRE
24 PUERTA GRANDE
25 PUERTA ENFERMERÍA
26 ENTRADA VEHÍCULOS DE CARGA
27 DESOLLADERO
28 VESTUARIO
29 CORRALES RESES
30 BÁSCULA
31 ENTRADA RESES
32 CONTROL ENTRADA
33 CORRAL CABALLOS
34 ALMACENAJE
35 CAJÓN DE CURAS
36 PASILLO TRASVASE RESES
37 CENTRO DE TRANSFORMACIÓN
38 ENTRADA PARKING
39 OFICINA DIPUTACIÓN
40 BAR RESTAURANTE
41 PATIO INSTALACIONES
42 UNIDAD INTERIOR CLIMATIZACIÓN
43 ESPACIO DE EXPOSICIONES Y MUESTRAS
44 SALA DE CONFERENCIAS
45 ACCESOS ZONA CONFERENCIAS
46 VESTÍBULO CONFERENCIAS
47 ENTRADA LAVAMANOS
48 LIMPIEZA INSTRUMENTAL
49 PALCO PRENSA
50 PASARELA TORILES
51 CUARTO DEL MAYORAL

Autores

Borja Peñalosa Bejarano — **Arquitecto**
Manuel J. Rodríguez Ruiz — **Arquitecto**
Rafael Salas Pulido — **Arquitecto**

Colaboradores

José Manuel Caro López — **Arquitecto Técnico**
Ángel F. Mata Martín — **Ingeniero Técn. Industrial**
Francisco J. Esteban Arbesu — **Estructuras**
Juan Antonio Aguilar Bravo — **Delineante**

Proyecto Modificado del de Ejecución

Rehabilitación y adecuación de nuevos usos de la plaza de toros de Málaga, "la Malagueta"

Situación

Paseo de Reding, Calles Cervantes y Maestranza. 29016, Málaga

Promotor

Excma. Diputación de Málaga

Plano

ESTADO REFORMADO
PLANTA BAJA

Nº Plano

A10

Fecha

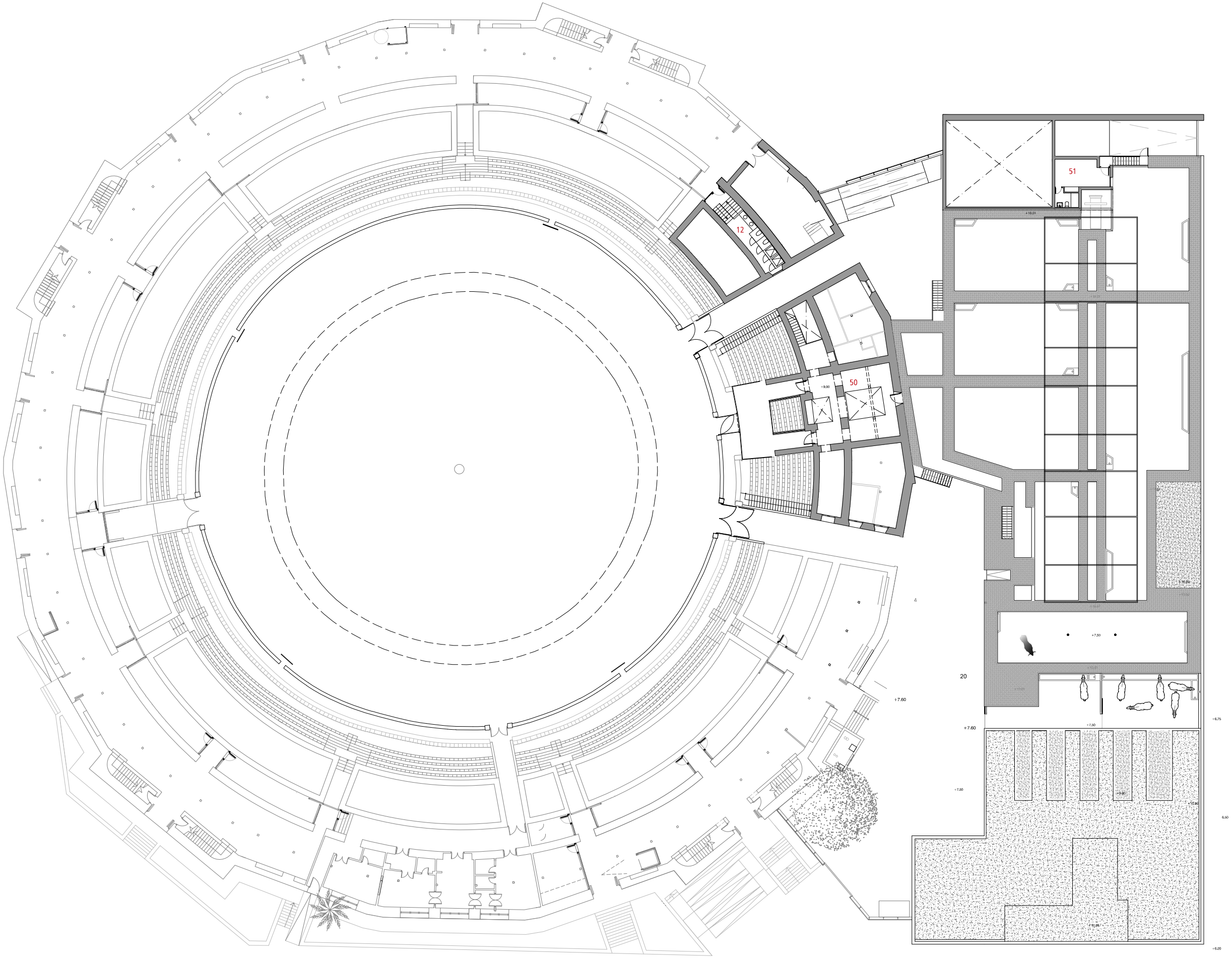
MARZO 2019

Escala	**A3**	**A1**
	1/400	1/200

BORJA PEÑALOSA — MANUEL J. RODRÍGUEZ — RAFAEL SALAS

Arquitectos

málaga.es diputación
arquitectura y urbanismo



1 ASEOS
2 COLECCIÓN PERMANENTE TAUROMAQUIA
3 EXPOSICIONES TEMPORALES
4 VESTÍBULO ACCESO CAT, TIENDA Y RESTAURANTE
5 TAQUILLAS
6 ASCENSOR
7 OFICINAS EMPRESA
8 HABITACIÓN
9 QUIRÓFANO
10 SALA DE CURAS QUIRÓFANO
11 ZONA DE ESPERA
12 GIMNASIO Y VESTUARIO ESCUELA TAURINA
13 CUADRO ELÉCTRICO
14 CAPILLA
15 ESTAR TOREROS
16 ALMACENAJE
17 TORILES
18a VETERINARIO 1
18b VETERINARIO 2
19 VESTUARIO VETERINARIO
20 PATIO DE CABALLOS
21 PATIO DE ARRASTRE
22 PUERTA DE CUADRILLAS
23 PUERTA DE ARRASTRE
24 PUERTA GRANDE
25 PUERTA ENFERMERÍA
26 ENTRADA VEHÍCULOS DE CARGA
27 DESOLLADERO
28 VESTUARIO
29 CORRALES RESES
30 BÁSCULA
31 ENTRADA RESES
32 CONTROL ENTRADA
33 CORRAL CABALLOS
34 ALMACENAJE
35 CAJÓN DE CURAS
36 PASILLO TRASVASE RESES
37 CENTRO DE TRANSFORMACIÓN
38 ENTRADA PARKING
39 OFICINA DIPUTACIÓN
40 BAR RESTAURANTE
41 PATIO INSTALACIONES
42 UNIDAD INTERIOR CLIMATIZACIÓN
43 ESPACIO DE EXPOSICIONES Y MUESTRAS
44 SALA DE CONFERENCIAS
45 ACCESOS ZONA CONFERENCIAS
46 VESTÍBULO CONFERENCIAS
47 ENTRADA LAVAMANOS
48 LIMPIEZA INSTRUMENTAL
49 PALCO PRENSA
50 PASARELA TORILES
51 CUARTO DEL MAYORAL

Autores

Borja Peñalosa Bejarano — **Arquitecto**
Manuel J. Rodríguez Ruiz — **Arquitecto**
Rafael Salas Pulido — **Arquitecto**

Colaboradores

José Manuel Caro López — **Arquitecto Técnico**
Ángel F. Mata Martín — **Ingeniero Técn. Industrial**
Francisco J. Esteban Arbesu — **Estructuras**
Juan Antonio Aguilar Bravo — **Delineante**

Proyecto Modificado del de Ejecución

Rehabilitación y adecuación de nuevos usos de la plaza de toros de Málaga, "la Malagueta"

Situación

Paseo de Reding, Calles Cervantes y Maestranza. 29016. Málaga

Promotor

Excma. Diputación de Málaga

Plano

ESTADO REFORMADO
PASARELA DE TORILES Y CUARTO DEL MAYORAL

Nº Plano

A11

Fecha

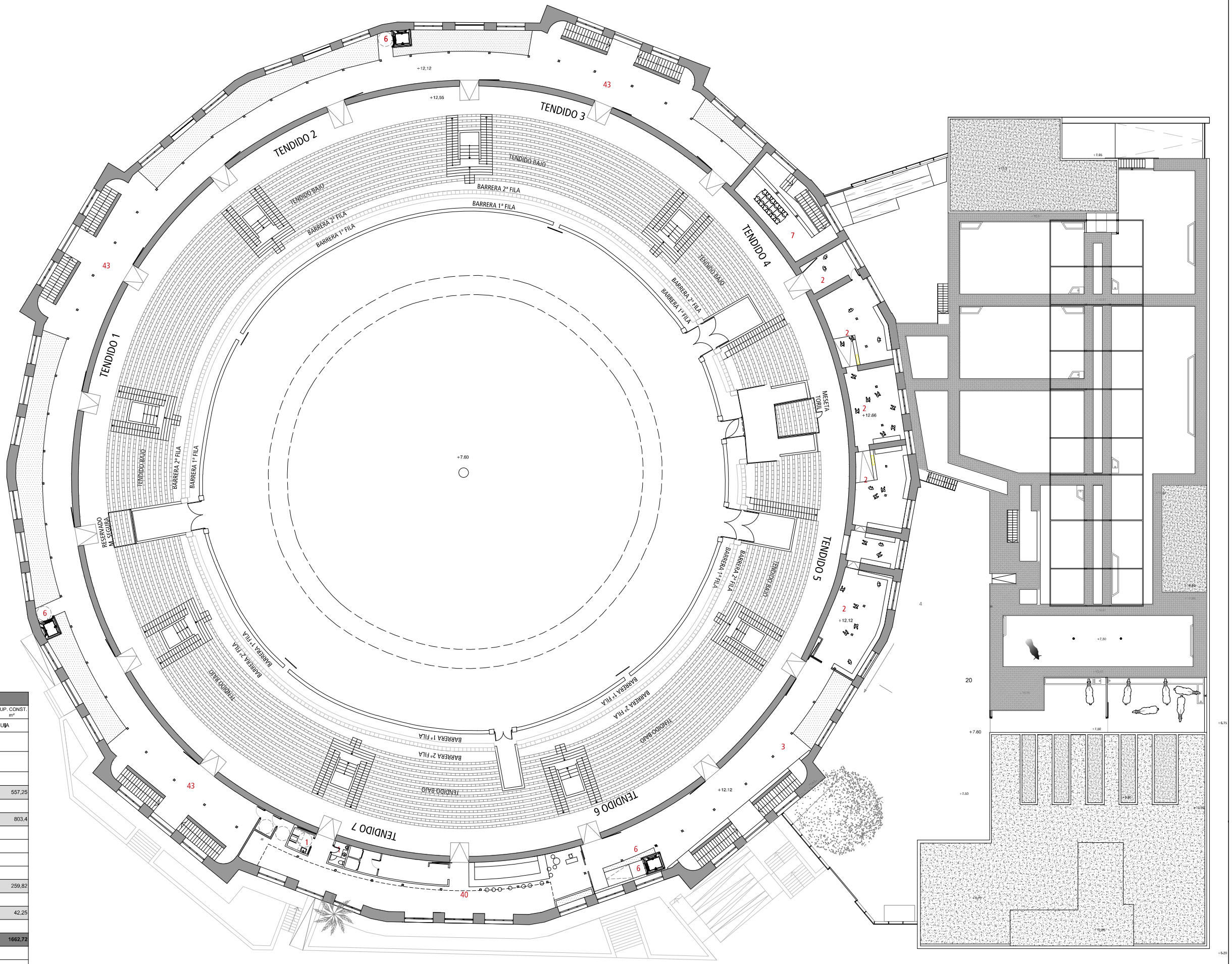
MARZO 2019

Escala	**A3**	**A1**
	1/400	1/200

BORJA PEÑALOSA — MANUEL J. RODRÍGUEZ — RAFAEL SALAS

Arquitectos

málaga.es diputación
arquitectura y urbanismo



PLANTA TENDIDOS		
USO	SUP. ÚTIL m²	SUP. CONST. m²
CENTRO DE ARTE DE LA TAUROMAQUIA		
VESTIBULO SUPERIOR CENTRO DE ARTE DE LA TAUROMAQUIA	139,15	
EXPOSICIÓN PERMANENTE CENTRO DE ARTE DE LA TAUROMAQUIA	233,1	
ESCALERA	27,69	
TOTAL P. TENDIDOS C.A.T.	399,94	557,25
EXPOSICIONES Y MUESTRAS		
EXPOSICIONES Y MUESTRAS	632,8	803,4
RESTAURANTE		
COMEDOR	160,94	
COCINA	24,89	
ASEOS	8,76	
TOTAL RESTAURANTE	194,59	259,82
USOS TAURINOS		
OFICINA EMPRESARIO	35,23	42,25
TOTAL PLANTA TENDIDOS	**1262,56**	**1662,72**
TENDIDOS DESCUBIERTOS		
TENDIDO		730,51
GRADAS TENDIDO BAJO		1585,5
TOTAL TENDIDOS DESCUBIERTOS		**2316,01**

1 ASEOS
2 COLECCIÓN PERMANENTE TAUROMAQUIA
3 EXPOSICIONES TEMPORALES
4 VESTÍBULO ACCESO CAT, TIENDA Y RESTAURANTE
5 TAQUILLAS
6 ASCENSOR
7 OFICINAS EMPRESA
8 HABITACIÓN
9 QUIRÓFANO
10 SALA DE CURAS QUIRÓFANO
11 ZONA DE ESPERA
12 GIMNASIO Y VESTUARIO ESCUELA TAURINA
13 CUADRO ELÉCTRICO
14 CAPILLA
15 ESTAR TOREROS
16 ALMACENAJE
17 TORILES
18a VETERINARIO 1
18b VETERINARIO 2
19 VESTUARIO VETERINARIO
20 PATIO DE CABALLOS
21 PATIO DE ARRASTRE
22 PUERTA DE CUADRILLAS
23 PUERTA DE ARRASTRE
24 PUERTA GRANDE
25 PUERTA ENFERMERÍA
26 ENTRADA VEHÍCULOS DE CARGA
27 DESOLLADERO
28 VESTUARIO
29 CORRALES RESES
30 BÁSCULA
31 ENTRADA RESES
32 CONTROL ENTRADA
33 CORRAL CABALLOS
34 ALMACENAJE
35 CAJÓN DE CURAS
36 PASILLO TRASVASE RESES
37 CENTRO DE TRANSFORMACIÓN
38 ENTRADA PARKING
39 OFICINA DIPUTACIÓN
40 BAR RESTAURANTE
41 PATIO INSTALACIONES
42 UNIDAD INTERIOR CLIMATIZACIÓN
43 ESPACIO DE EXPOSICIONES Y MUESTRAS
44 SALA DE CONFERENCIAS
45 ACCESOS ZONA CONFERENCIAS
46 VESTÍBULO CONFERENCIAS
47 ENTRADA LAVAMANOS
48 LIMPIEZA INSTRUMENTAL
49 PALCO PRENSA
50 PASARELA TORILES
51 CUARTO DEL MAYORAL

Autores

Borja Peñalosa Bejarano — **Arquitecto**
Manuel J. Rodríguez Ruíz — **Arquitecto**
Rafael Salas Pulido — **Arquitecto**

Colaboradores

José Manuel Caro López — **Arquitecto Técnico**
Ángel F. Mata Martín — **Ingeniero Técn. Industrial**
Francisco J. Esteban Arbesu — **Estructuras**
Juan Antonio Aguilar Bravo — **Delineante**

Proyecto Modificado del de Ejecución

Rehabilitación y adecuación de nuevos usos de la plaza de toros de Málaga, "la Malagueta"

Situación

Paseo de Reding, Calles Cervantes y Maestranza. 29016. Málaga

Promotor

Excma. Diputación de Málaga

Plano

ESTADO REFORMADO
PLANTA DE TENDIDOS

Nº Plano

A12

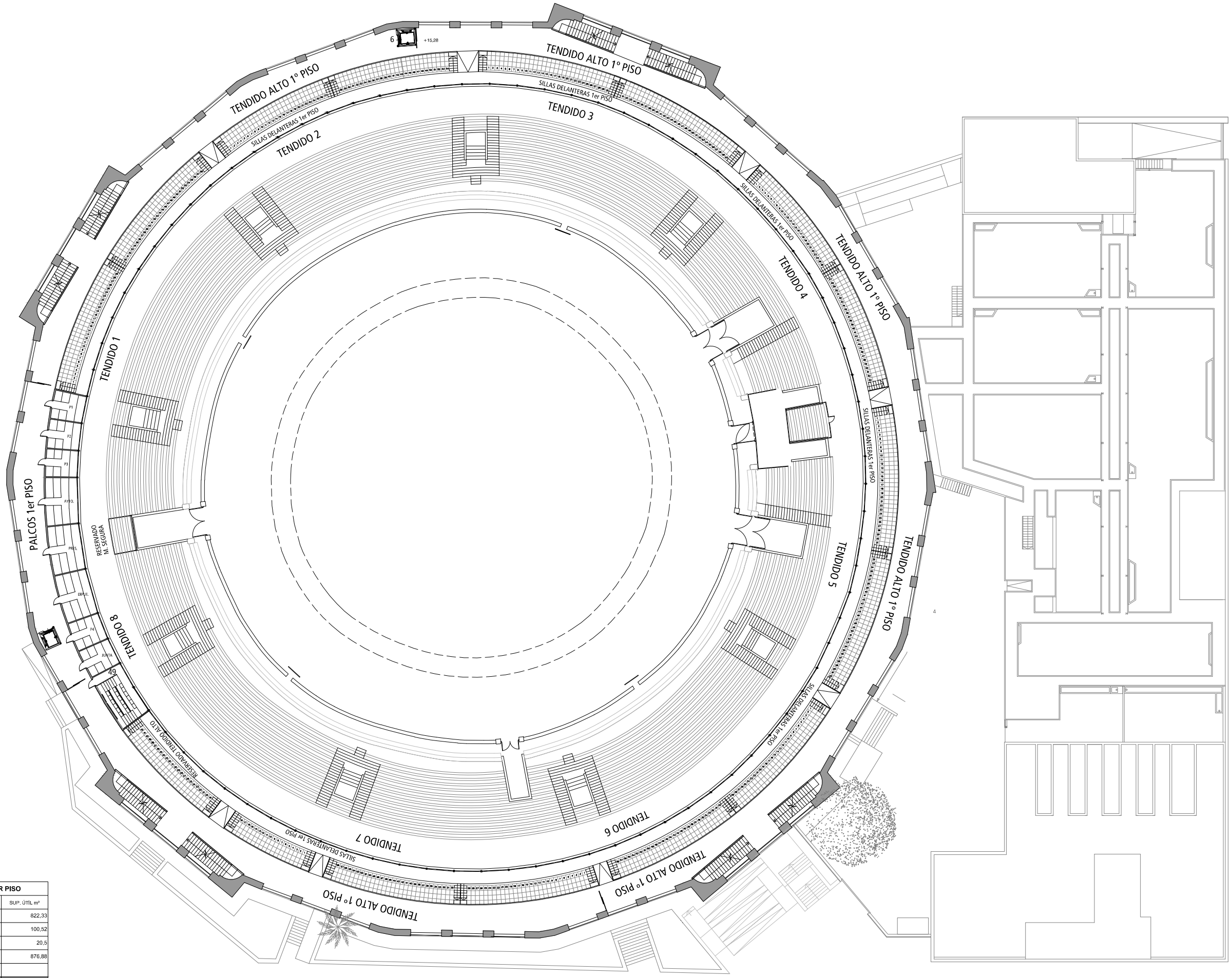
Fecha

MARZO 2019

Escala	**A3**	**A1**
	1/400	1/200

BORJA PEÑALOSA MANUEL J. RODRÍGUEZ RAFAEL SALAS
Arquitectos

málaga.es diputación
arquitectura y urbanismo



PLANTA PALCOS PRIMER PISO	
USO	SUP. ÚTIL m²
GRADAS	822,33
PALCOS	100,52
PALCO DE PRENSA	20,5
DISTRIBUIDOR Y ESCALERAS	876,88
TOTAL ÚTIL	1820,23
TOTAL CONSTRUIDA	2060,88

1 ASEOS
2 COLECCIÓN PERMANENTE TAUROMAQUIA
3 EXPOSICIONES TEMPORALES
4 VESTÍBULO ACCESO CAT, TIENDA Y RESTAURANTE
5 TAQUILLAS
6 ASCENSOR
7 OFICINAS EMPRESA
8 HABITACIÓN
9 QUIRÓFANO
10 SALA DE CURAS QUIRÓFANO
11 ZONA DE ESPERA
12 GIMNASIO Y VESTUARIO ESCUELA TAURINA
13 CUADRO ELÉCTRICO
14 CAPILLA
15 ESTAR TOREROS
16 ALMACENAJE
17 TORILES
18a VETERINARIO 1
18b VETERINARIO 2
19 VESTUARIO VETERINARIO
20 PATIO DE CABALLOS
21 PATIO DE ARRASTRE
22 PUERTA DE CUADRILLAS
23 PUERTA DE ARRASTRE
24 PUERTA GRANDE
25 PUERTA ENFERMERÍA
26 ENTRADA VEHÍCULOS DE CARGA
27 DESOLLADERO
28 VESTUARIO
29 CORRALES RESES
30 BÁSCULA
31 ENTRADA RESES
32 CONTROL ENTRADA
33 CORRAL CABALLOS
34 ALMACENAJE
35 CAJÓN DE CURAS
36 PASILLO TRASVASE RESES
37 CENTRO DE TRANSFORMACIÓN
38 ENTRADA PARKING
39 OFICINA DIPUTACIÓN
40 BAR RESTAURANTE
41 PATIO INSTALACIONES
42 UNIDAD INTERIOR CLIMATIZACIÓN
43 ESPACIO DE EXPOSICIONES Y MUESTRAS
44 SALA DE CONFERENCIAS
45 ACCESOS ZONA CONFERENCIAS
46 VESTÍBULO CONFERENCIAS
47 ENTRADA LAVAMANOS
48 LIMPIEZA INSTRUMENTAL
49 PALCO PRENSA
50 PASARELA TORILES
51 CUARTO DEL MAYORAL

Autores

Borja Peñalosa Bejarano — **Arquitecto**
Manuel J. Rodríguez Ruiz — **Arquitecto**
Rafael Salas Pulido — **Arquitecto**

Colaboradores

José Manuel Caro López — **Arquitecto Técnico**
Ángel F. Mata Martín — **Ingeniero Técn. Industrial**
Francisco J. Esteban Arbesu — **Estructuras**
Juan Antonio Aguilar Bravo — **Delineante**

Proyecto Modificado del de Ejecución

Rehabilitación y adecuación de nuevos usos de la plaza de toros de Málaga, "la Malagueta"

Situación

Paseo de Reding, Calles Cervantes y Maestranza. 29016. Málaga

Promotor

Excma. Diputación de Málaga

Plano

ESTADO REFORMADO
PLANTA PRIMER PISO

Nº Plano

A13

Fecha

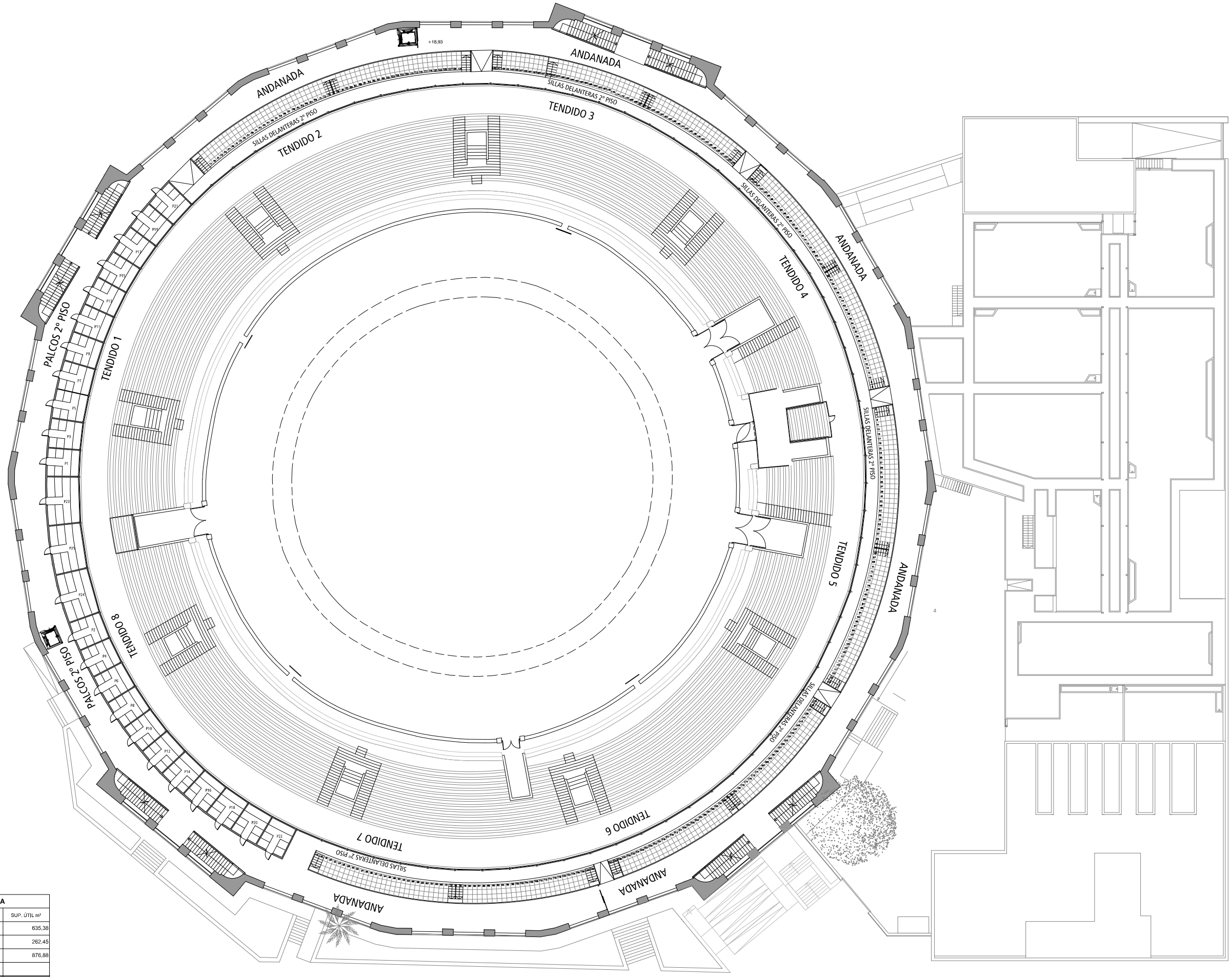
MARZO 2019

Escala	**A3**	**A1**
	1/400	1/200

BORJA PEÑALOSA — MANUEL J. RODRÍGUEZ — RAFAEL SALAS

Arquitectos

málaga.es diputación
arquitectura y urbanismo



PLANTA ANDANADA	
USO	SUP. ÚTIL m²
GRADAS	635,38
PALCOS	262,45
DISTRIBUIDOR Y ESCALERAS	876,88
TOTAL ÚTIL	1774,71
TOTAL CONSTRUIDA	2060,88

1 ASEOS
2 COLECCIÓN PERMANENTE TAUROMAQUIA
3 EXPOSICIONES TEMPORALES
4 VESTÍBULO ACCESO CAT, TIENDA Y RESTAURANTE
5 TAQUILLAS
6 ASCENSOR
7 OFICINAS EMPRESA
8 HABITACIÓN
9 QUIRÓFANO
10 SALA DE CURAS QUIRÓFANO
11 ZONA DE ESPERA
12 GIMNASIO Y VESTUARIO ESCUELA TAURINA
13 CUADRO ELÉCTRICO
14 CAPILLA
15 ESTAR TOREROS
16 ALMACENAJE
17 TORILES
18a VETERINARIO 1
18b VETERINARIO 2
19 VESTUARIO VETERINARIO
20 PATIO DE CABALLOS
21 PATIO DE ARRASTRE
22 PUERTA DE CUADRILLAS
23 PUERTA DE ARRASTRE
24 PUERTA GRANDE
25 PUERTA ENFERMERÍA
26 ENTRADA VEHÍCULOS DE CARGA
27 DESOLLADERO
28 VESTUARIO
29 CORRALES RESES
30 BÁSCULA
31 ENTRADA RESES
32 CONTROL ENTRADA
33 CORRAL CABALLOS
34 ALMACENAJE
35 CAJÓN DE CURAS
36 PASILLO TRASVASE RESES
37 CENTRO DE TRANSFORMACIÓN
38 ENTRADA PARKING
39 OFICINA DIPUTACIÓN
40 BAR RESTAURANTE
41 PATIO INSTALACIONES
42 UNIDAD INTERIOR CLIMATIZACIÓN
43 ESPACIO DE EXPOSICIONES Y MUESTRAS
44 SALA DE CONFERENCIAS
45 ACCESOS ZONA CONFERENCIAS
46 VESTÍBULO CONFERENCIAS
47 ENTRADA LAVAMANOS
48 LIMPIEZA INSTRUMENTAL
49 PALCO PRENSA
50 PASARELA TORILES
51 CUARTO DEL MAYORAL

Autores

Borja Peñalosa Bejarano — **Arquitecto**
Manuel J. Rodríguez Ruiz — **Arquitecto**
Rafael Salas Pulido — **Arquitecto**

Colaboradores

José Manuel Caro López — **Arquitecto Técnico**
Ángel F. Mata Martín — **Ingeniero Técn. Industrial**
Francisco J. Esteban Arbesu — **Estructuras**
Juan Antonio Aguilar Bravo — **Delineante**

Proyecto Modificado del de Ejecución

Rehabilitación y adecuación de nuevos usos de la plaza de toros de Málaga, "la Malagueta"

Situación

Paseo de Reding, Calles Cervantes y Maestranza. 29016. Málaga

Promotor

Excma. Diputación de Málaga

Plano

ESTADO REFORMADO
PLANTA ANDANADA

Nº Plano

A14

Fecha

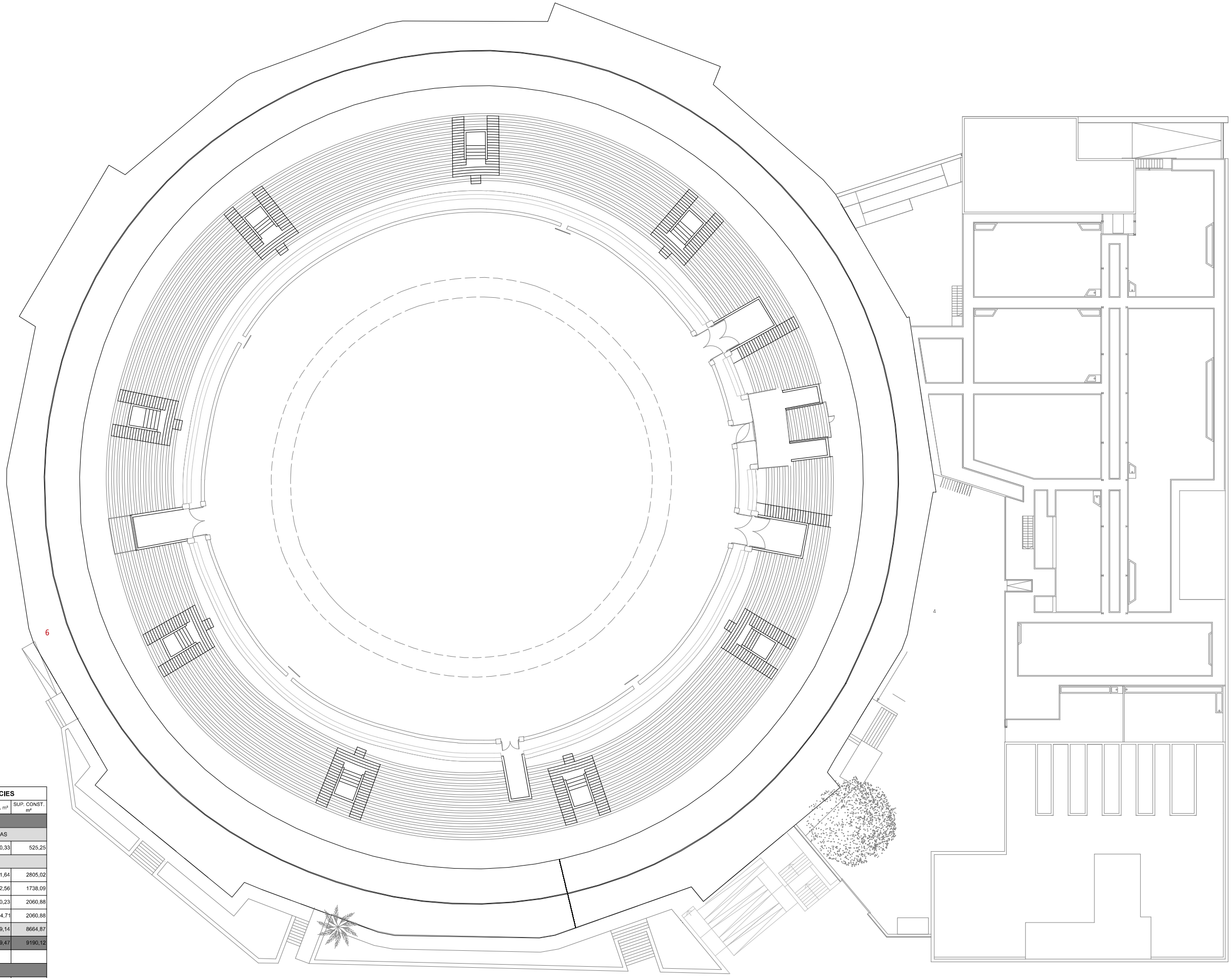
MARZO 2019

Escala	**A3**	**A1**
	1/400	1/200

BORJA PEÑALOSA — MANUEL J. RODRÍGUEZ — RAFAEL SALAS

Arquitectos

málaga.es-diputación
arquitectura y urbanismo



RESUMEN DE SUPERFICIES		
PLANTA	SUP. ÚTIL m²	SUP. CONST. m²
ZONAS CUBIERTAS		
CENTRO DE CONFERENCIAS		
PLANTA BAJA CENTRO DE CONFERENCIAS	460,33	525,25
PLAZA		
PLANTA BAJA PLAZA	2541,64	2805,02
PLANTA TENDIDOS	1262,56	1738,09
PLANTA PALCOS PRIMER PISO	1820,23	2060,88
PLANTA ANDANADA	1774,71	2060,88
TOTAL PLAZA	7399,14	8664,87
TOTAL ZONAS CUBIERTAS	7859,47	9190,12
ZONAS DESCUBIERTAS		
CORRALES		1555,9
TENDIDOS		2316,01
TOTAL ZONAS DESCUBIERTAS		3871,91

Autores

Borja Peñalosa Bejarano — **Arquitecto**
Manuel J. Rodríguez Ruíz — **Arquitecto**
Rafael Salas Pulido — **Arquitecto**

Colaboradores

José Manuel Caro López — **Arquitecto Técnico**
Ángel F. Mata Martín — **Ingeniero Técn. Industrial**
Francisco J. Esteban Arbesu — **Estructuras**
Juan Antonio Aguilar Bravo — **Delineante**

Proyecto Modificado del de Ejecución

Rehabilitación y adecuación de nuevos usos de la plaza de toros de Málaga, "la Malagueta"

Situación

Paseo de Reding, Calles Cervantes y Maestranza. 29016. Málaga

Promotor

Excma. Diputación de Málaga

Plano

ESTADO REFORMADO
PLANTA CUBIERTA

Nº Plano

A15

Fecha

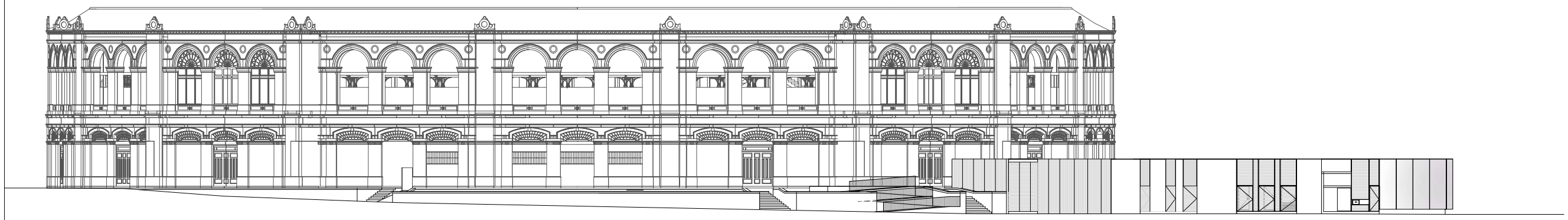
MARZO 2019

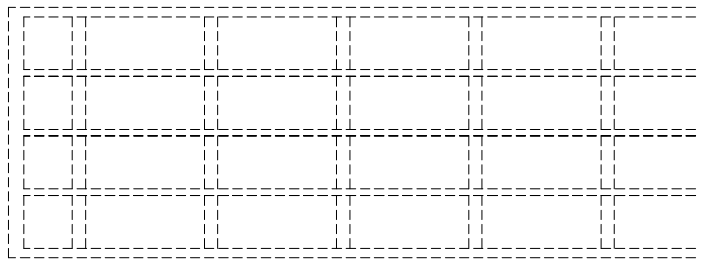
Escala	**A3**	**A1**
	1/400	1/200

BORJA PEÑALOSA — MANUEL J. RODRÍGUEZ — RAFAEL SALAS

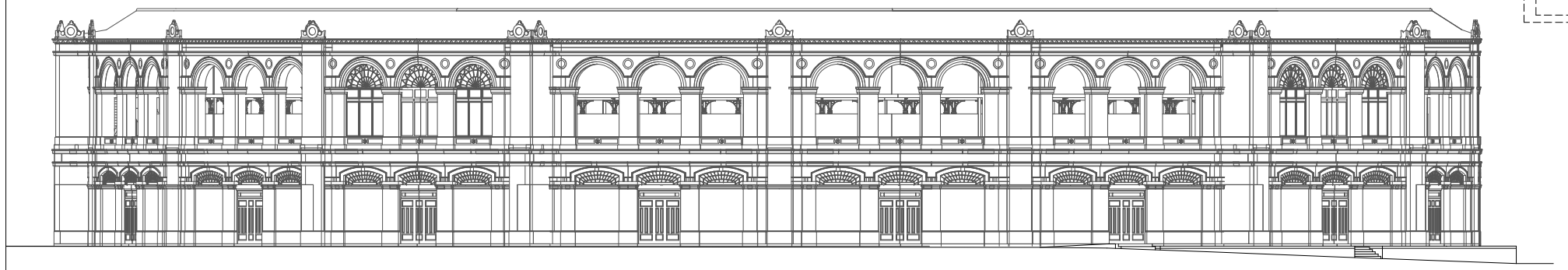
Arquitectos

málaga.es diputación
arquitectura y urbanismo



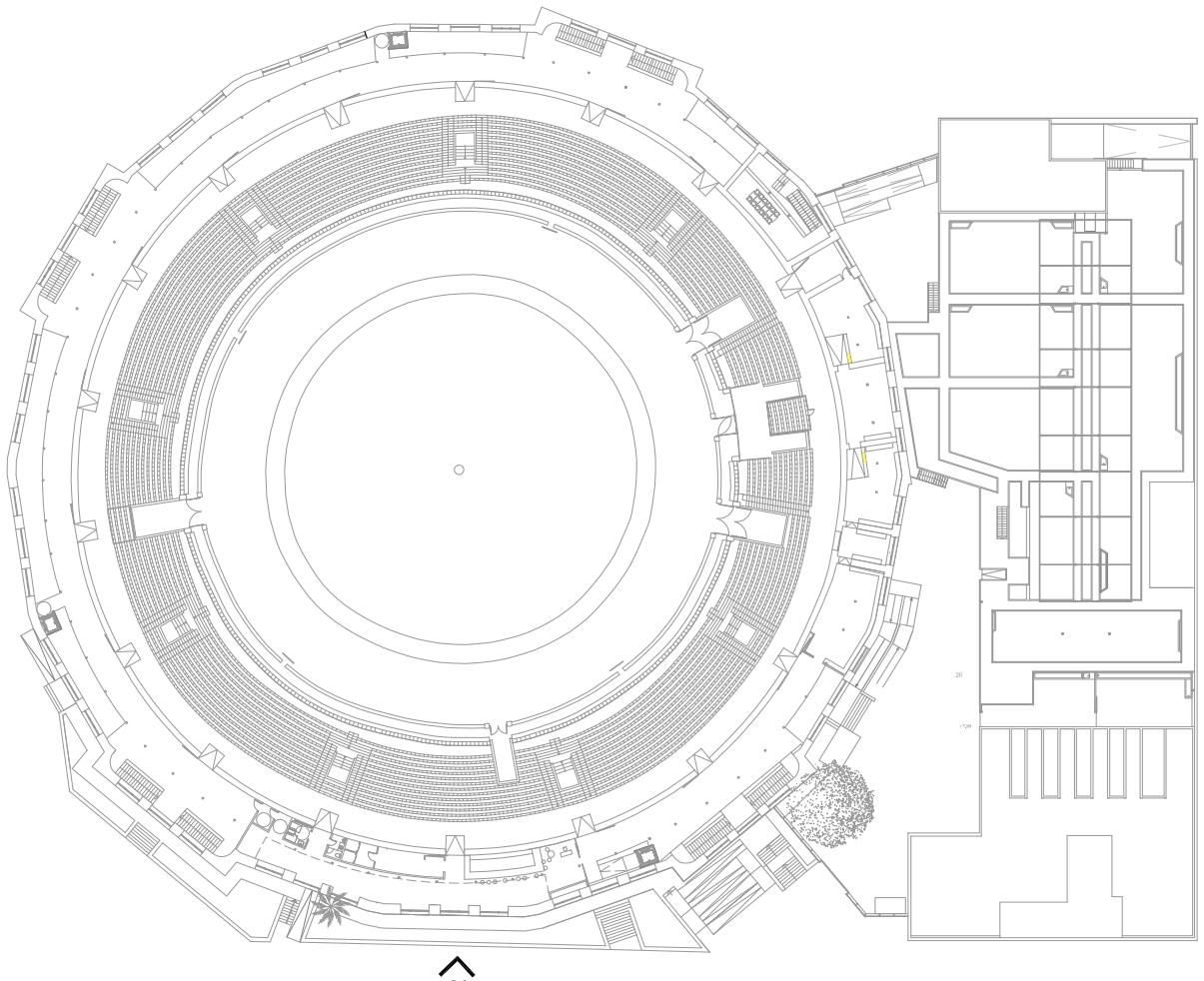


ALZADO A1. C/ MAESTRANZA



ALZADO A2. C/ MANUEL MARTÍN ESTEVEZ

A2



A1

Autores

Borja Peñalosa Bejarano	**Arquitecto**
Manuel J. Rodríguez Ruíz	**Arquitecto**
Rafael Salas Pulido	**Arquitecto**

Colaboradores

José Manuel Caro López	**Arquitecto Técnico**
Ángel F. Mata Martín	**Ingeniero Técn. Industrial**
Francisco J. Esteban Arbesu	**Estructuras**
Juan Antonio Aguilar Bravo	**Delineante**

Proyecto Modificado del de Ejecución

Rehabilitación y adecuación de nuevos usos de la plaza de toros de Málaga, "la Malagueta"

Situación

Paseo de Reding, Calles Cervantes y Maestranza, 29016, Málaga

Promotor

Excma. Diputación de Málaga

Plano

ESTADO REFORMADO
ALZADOS I

Nº Plano

A16

Fecha

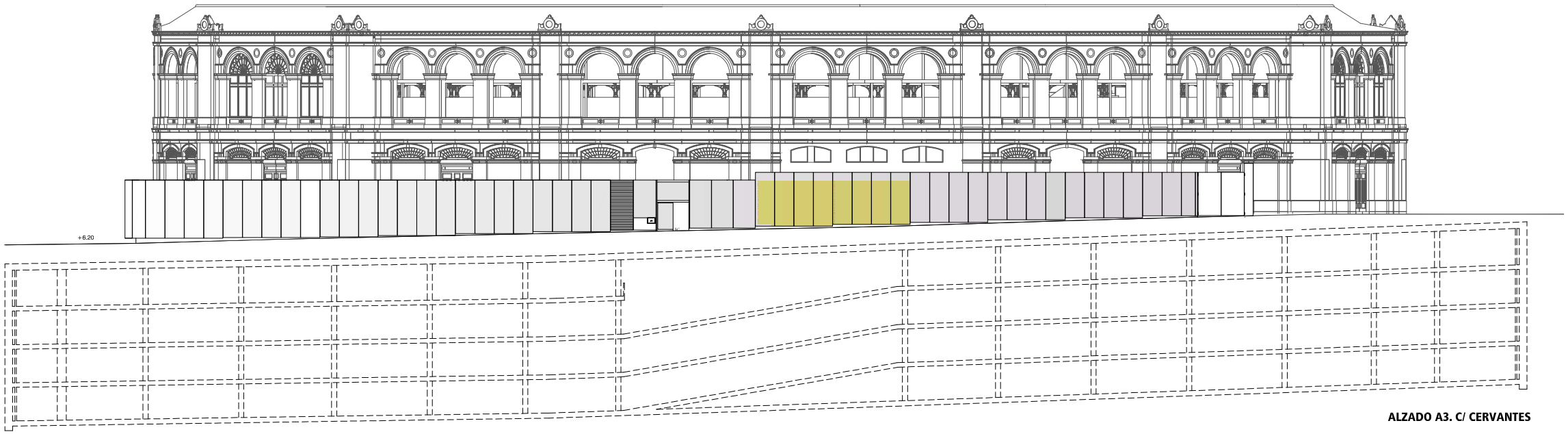
MARZO 2019

Escala	**A3**	**A1**
	1/400	1/200

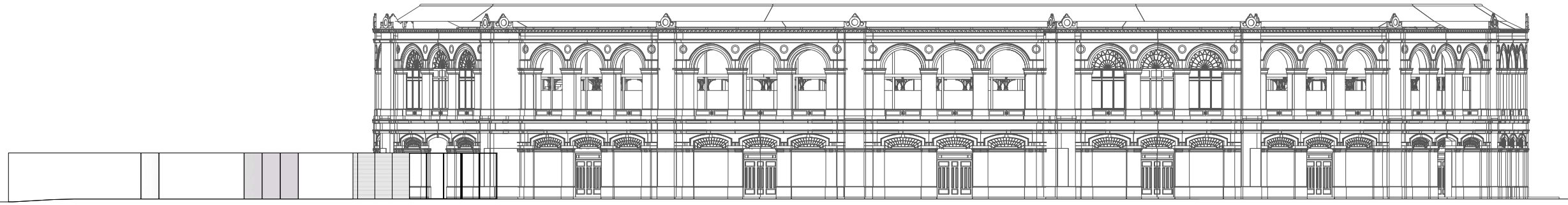
BORJA PEÑALOSA MANUEL J. RODRÍGUEZ RAFAEL SALAS

Arquitectos

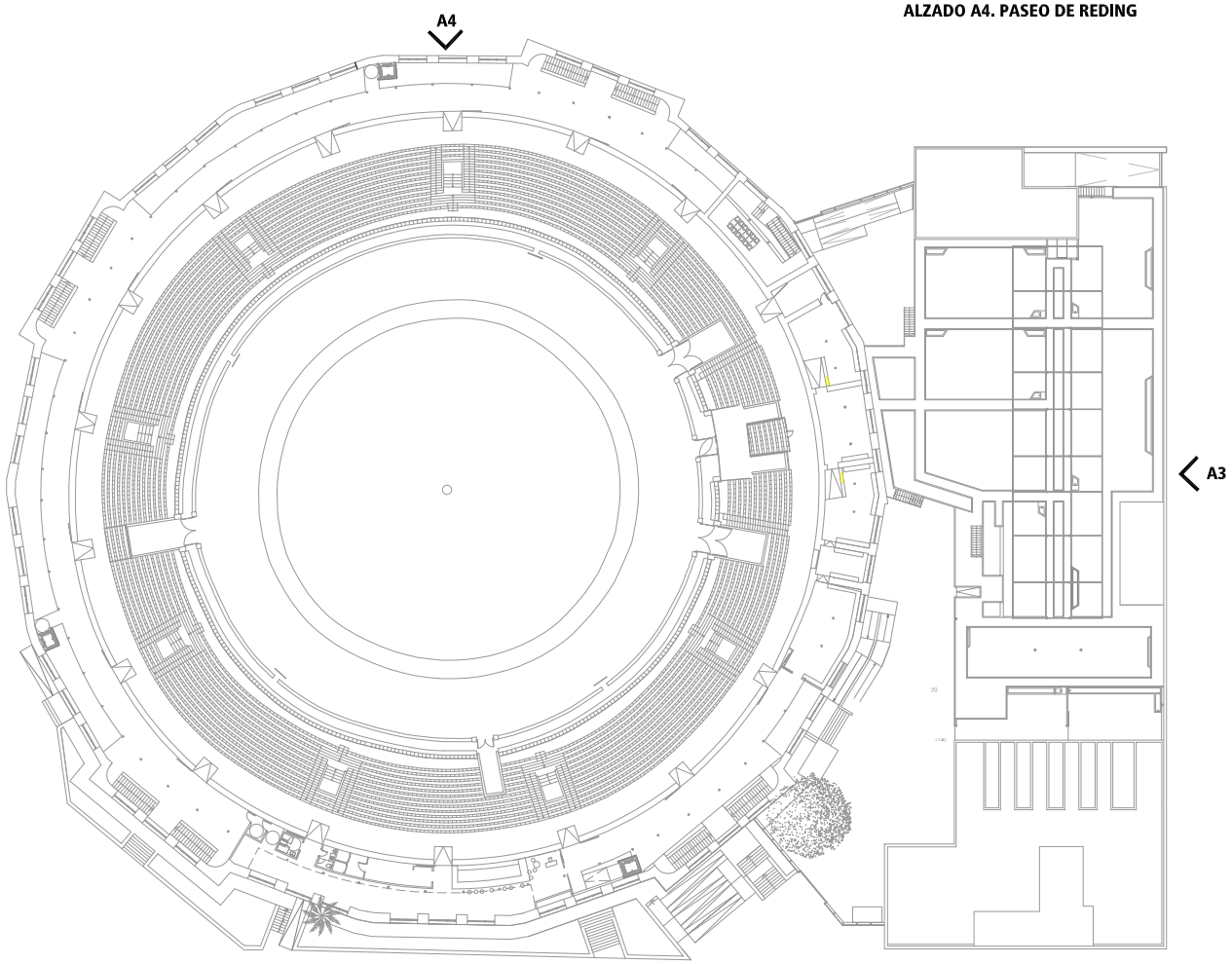
málaga.es diputación
arquitectura y urbanismo



ALZADO A3. C/ CERVANTES



ALZADO A4. PASEO DE REDING



Autores

Borja Peñalosa Bejarano	**Arquitecto**
Manuel J. Rodríguez Ruíz	**Arquitecto**
Rafael Salas Pulido	**Arquitecto**

Colaboradores

José Manuel Caro López	**Arquitecto Técnico**
Ángel F. Mata Martín	**Ingeniero Técn. Industrial**
Francisco J. Esteban Arbesu	**Estructuras**
Juan Antonio Aguilar Bravo	**Delineante**

Proyecto Modificado del de Ejecución

Rehabilitación y adecuación de nuevos usos de la plaza de toros de Málaga, "la Malagueta"

Situación

Paseo de Reding, Calles Cervantes y Maestranza, 29016, Málaga

Promotor

Excma. Diputación de Málaga

Plano

ESTADO REFORMADO
ALZADOS II

Nº Plano

A17

Fecha

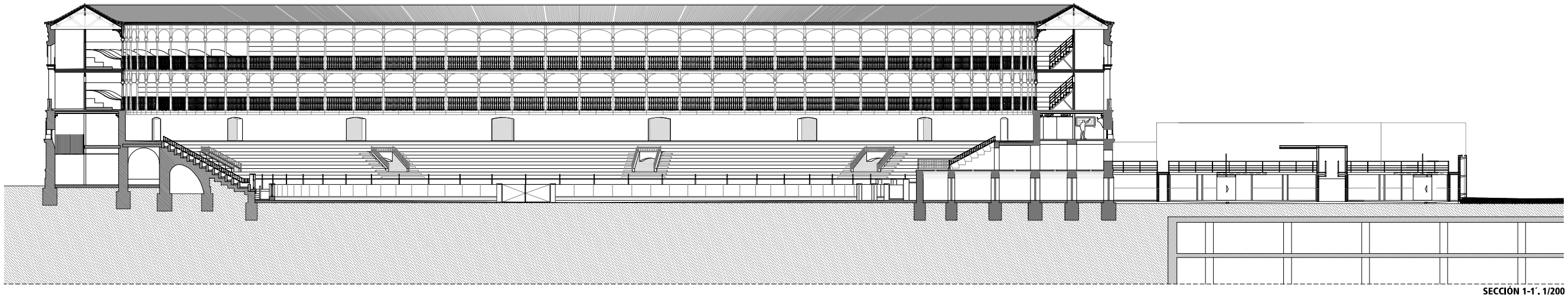
MARZO 2019

Escala	**A3**	**A1**
	1/400	1/200

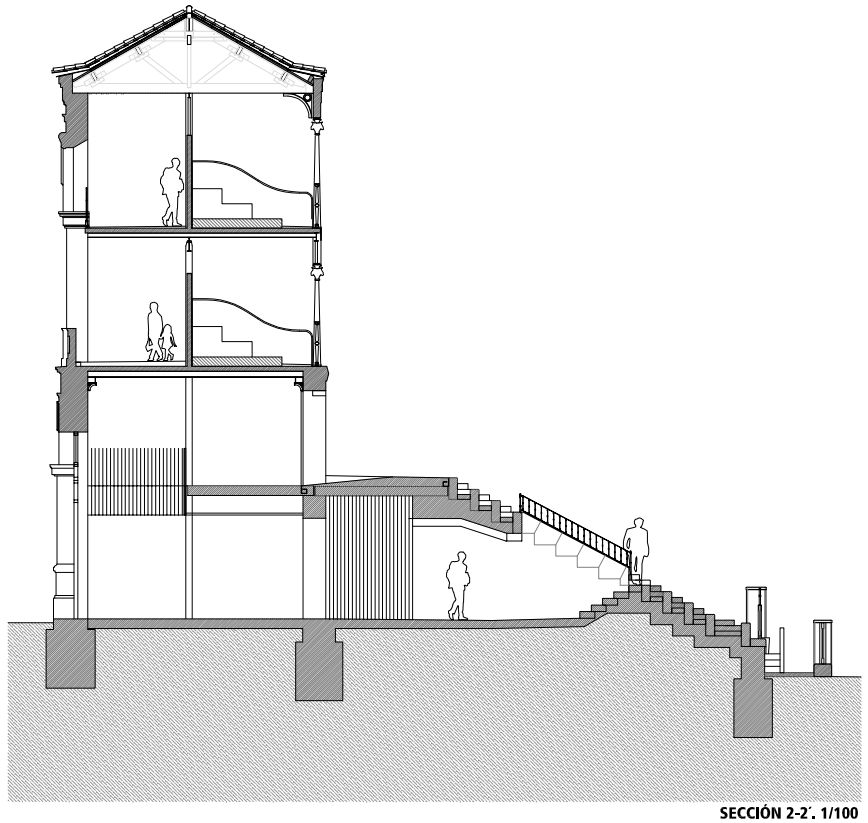
BORJA PEÑALOSA MANUEL J. RODRÍGUEZ RAFAEL SALAS

Arquitectos

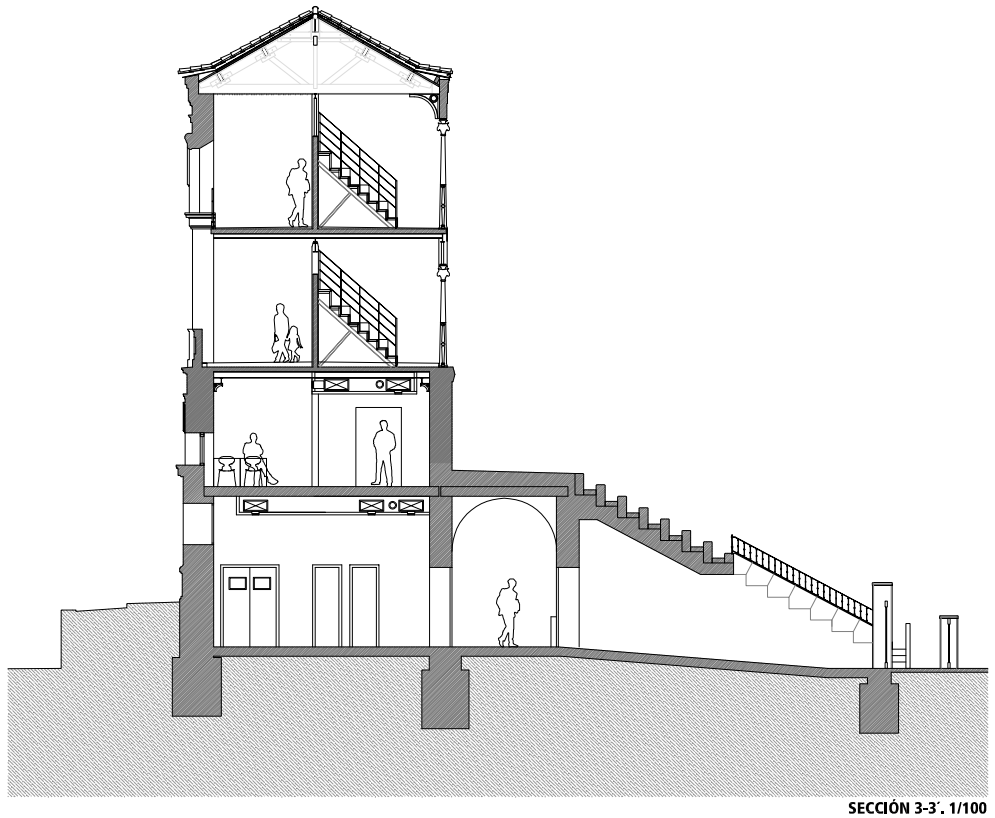
málaga.es diputación
arquitectura y urbanismo



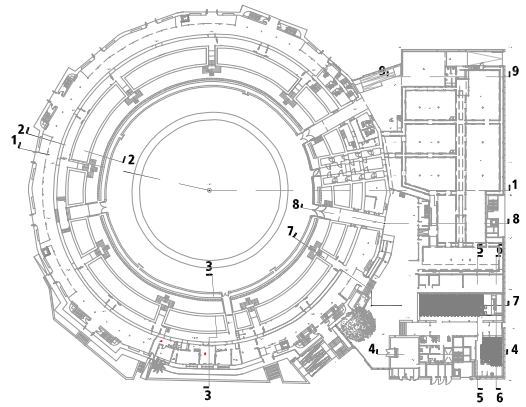
SECCIÓN 1-1´. 1/200



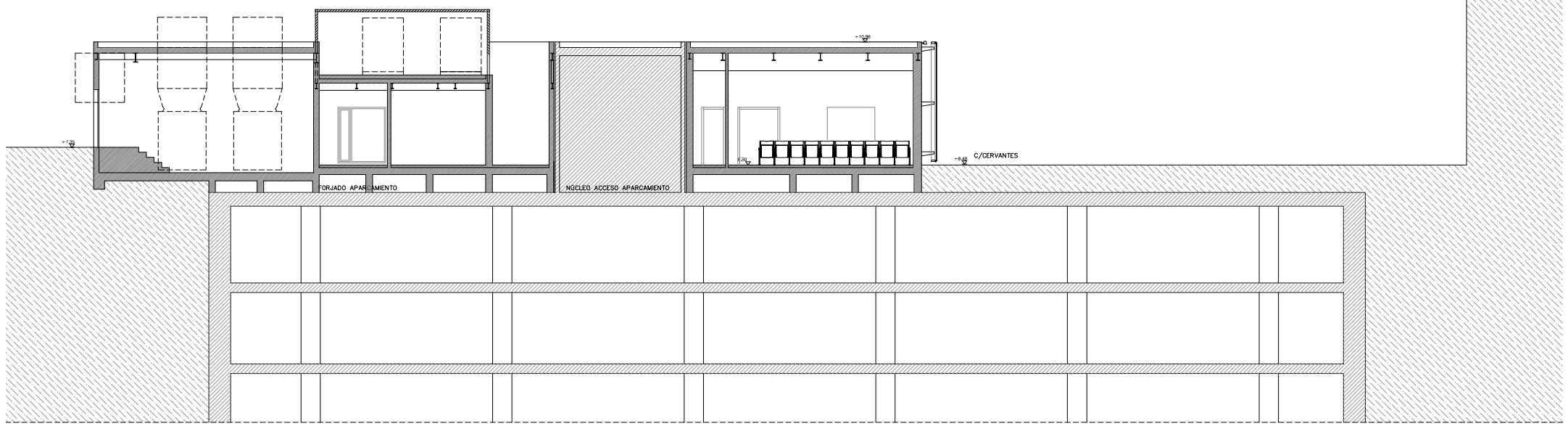
SECCIÓN 2-2´. 1/100



SECCIÓN 3-3´. 1/100



PLANTA BAJA



SECCIÓN 4-4´. 1/100

Autores

Borja Peñalosa Bejarano	**Arquitecto**
Manuel J. Rodríguez Ruiz	**Arquitecto**
Rafael Salas Pulido	**Arquitecto**

Colaboradores

José Manuel Caro López	**Arquitecto Técnico**
Ángel F. Mata Martín	**Ingeniero Técn. Industrial**
Francisco J. Esteban Arbesu	**Estructuras**
Juan Antonio Aguilar Bravo	**Delineante**

Proyecto Modificado del de Ejecución

Rehabilitación y adecuación de nuevos usos de la plaza de toros de Málaga, "la Malagueta"

Situación

Paseo de Reding, Calles Cervantes y Maestranza, 29016, Málaga

Promotor

Excma. Diputación de Málaga

Plano

ESTADO REFORMADO
SECCIONES I

Nº Plano

A18

Fecha

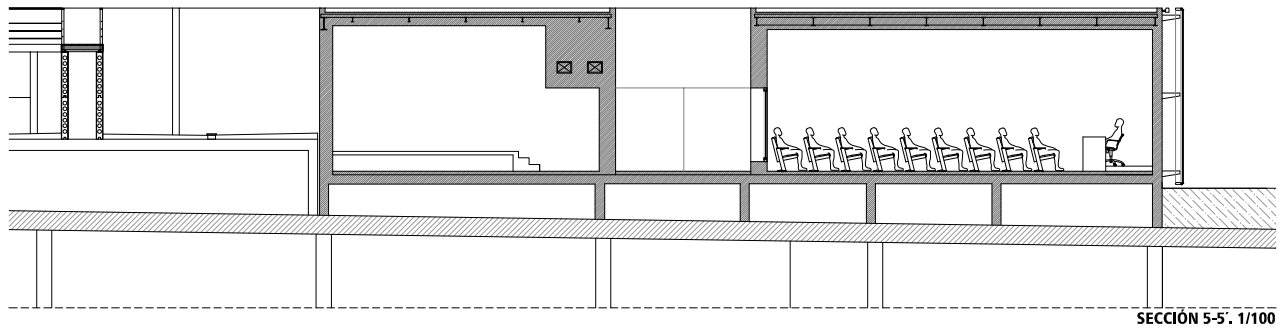
MARZO 2019

Escala	**A3**	**A1**
	1/200 1/400	1/100 1/200

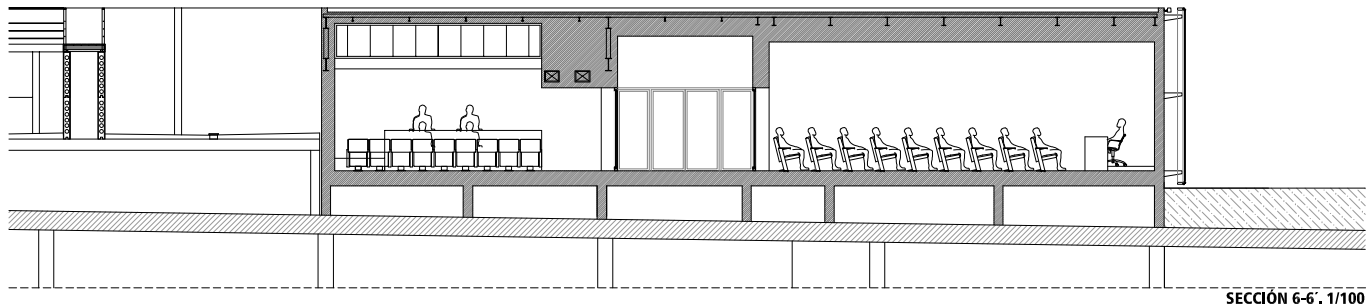
BORJA PEÑALOSA	MANUEL J. RODRÍGUEZ	RAFAEL SALAS

Arquitectos

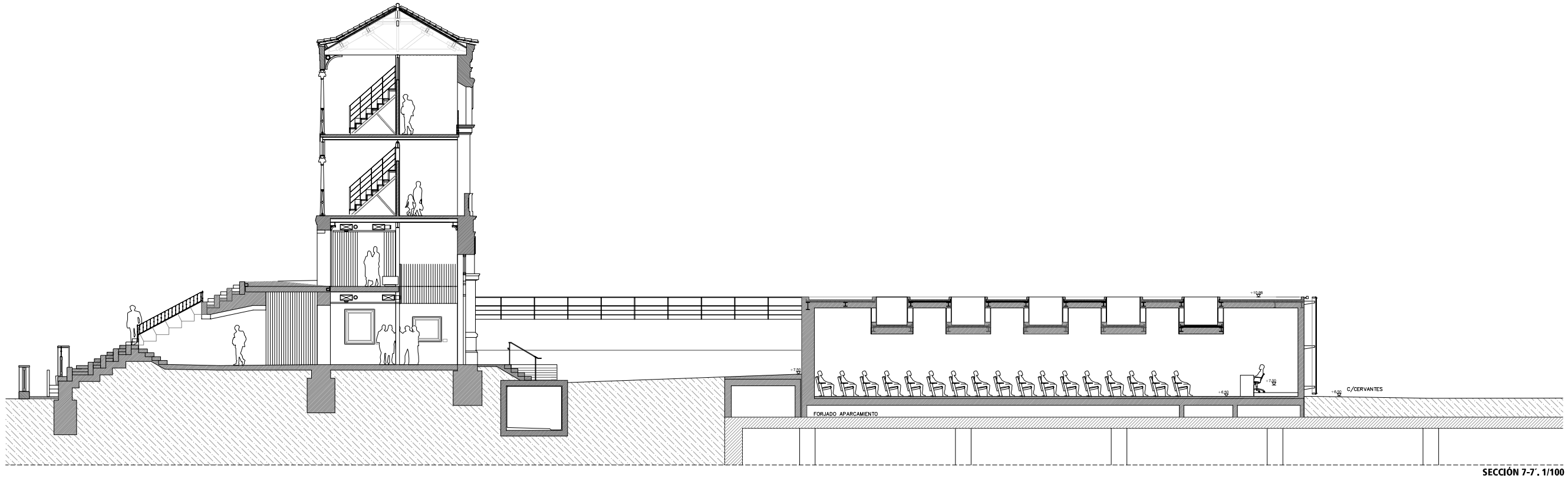
málaga.es diputación
arquitectura y urbanismo



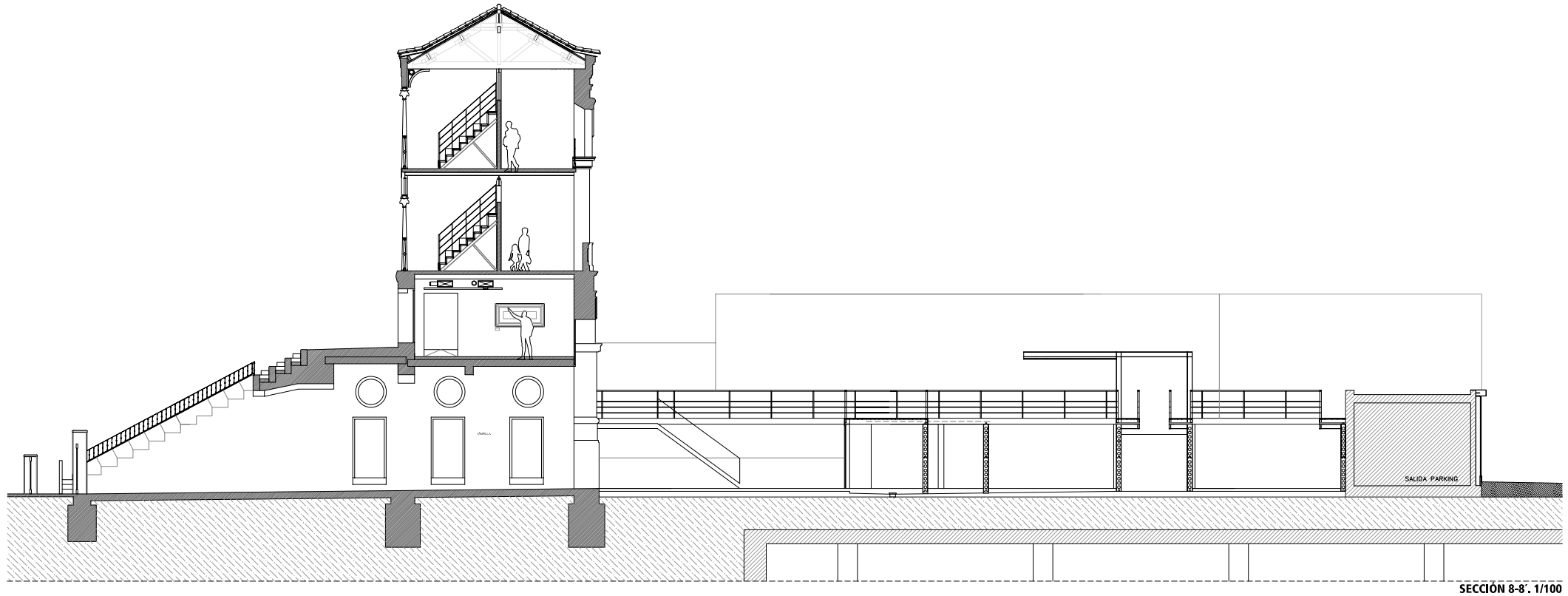
SECCIÓN 5-5´. 1/100



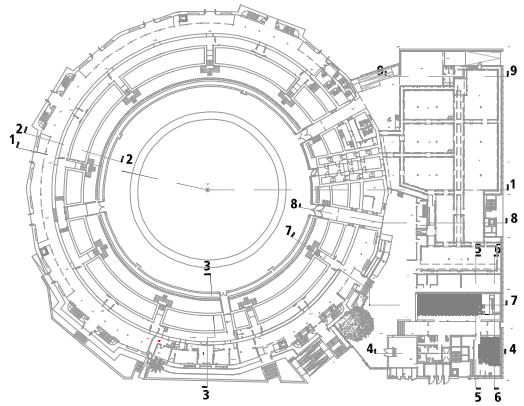
SECCIÓN 6-6´. 1/100



SECCIÓN 7-7´. 1/100



SECCIÓN 8-8´. 1/100



PLANTA BAJA

Autores

Borja Peñalosa Bejarano	**Arquitecto**
Manuel J. Rodríguez Ruíz	**Arquitecto**
Rafael Salas Pulido	**Arquitecto**

Colaboradores

José Manuel Caro López	**Arquitecto Técnico**
Ángel F. Mata Martín	**Ingeniero Técn. Industrial**
Francisco J. Esteban Arbesu	**Estructuras**
Juan Antonio Aguilar Bravo	**Delineante**

Proyecto Modificado del de Ejecución

Rehabilitación y adecuación de nuevos usos de la plaza de toros de Málaga, "la Malagueta"

Situación

Paseo de Reding, Calles Cervantes y Maestranza, 29016, Málaga

Promotor

Excma. Diputación de Málaga

Plano

ESTADO REFORMADO
SECCIONES II

Nº Plano

A19

Fecha

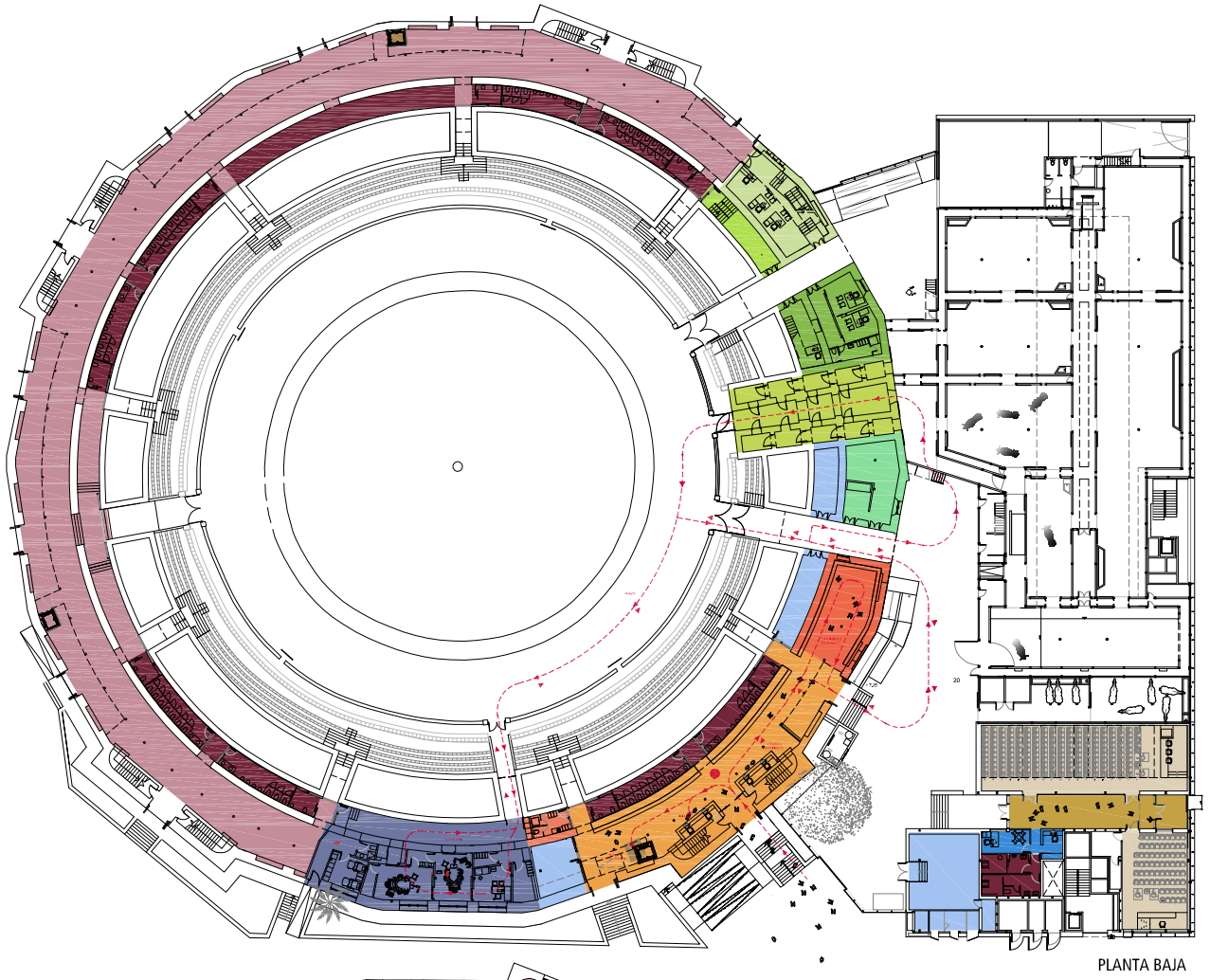
MARZO 2019

Escala	**A3**	**A1**
	1/200 1/400	1/100 1/200

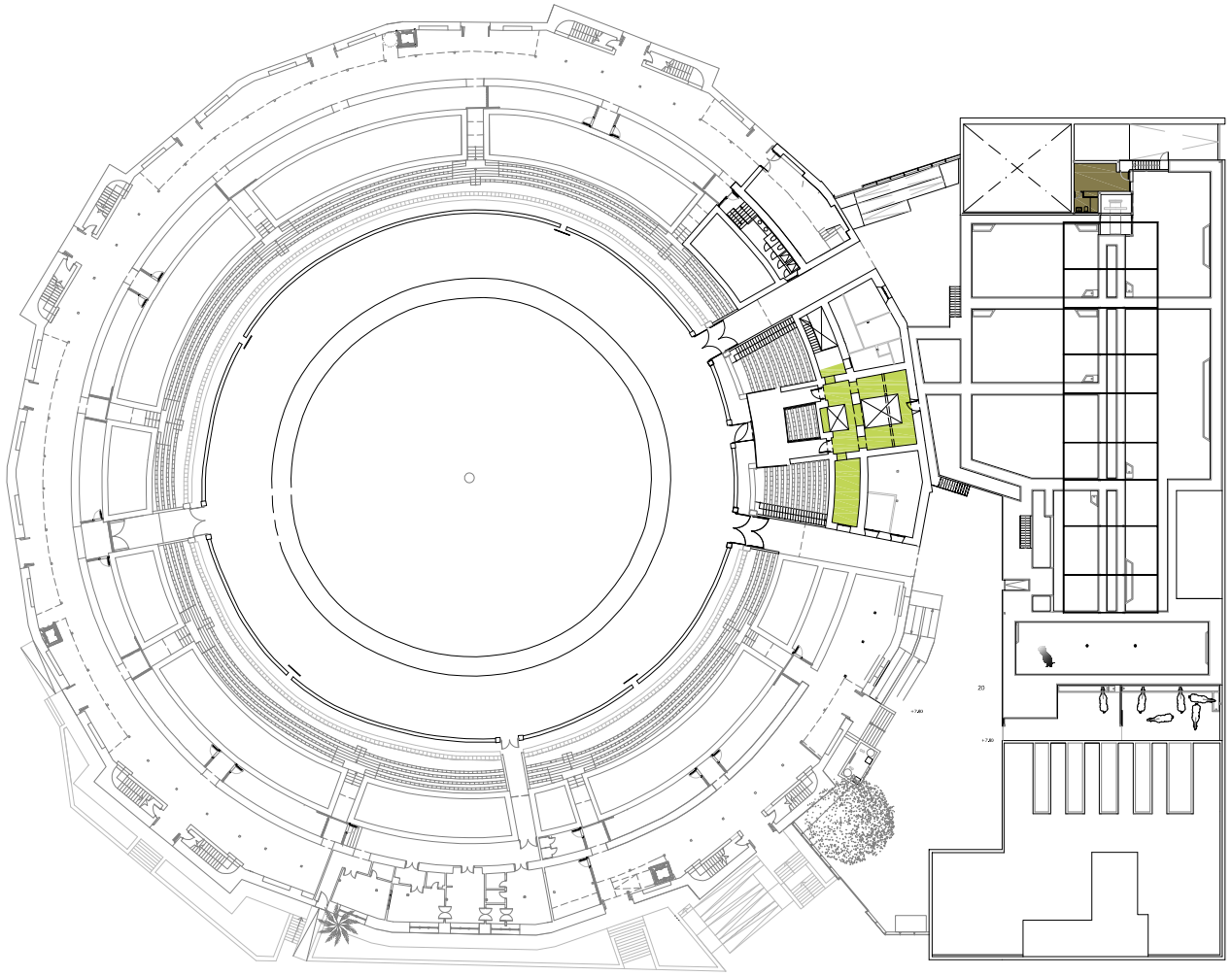
BORJA PEÑALOSA MANUEL J. RODRÍGUEZ RAFAEL SALAS

Arquitectos

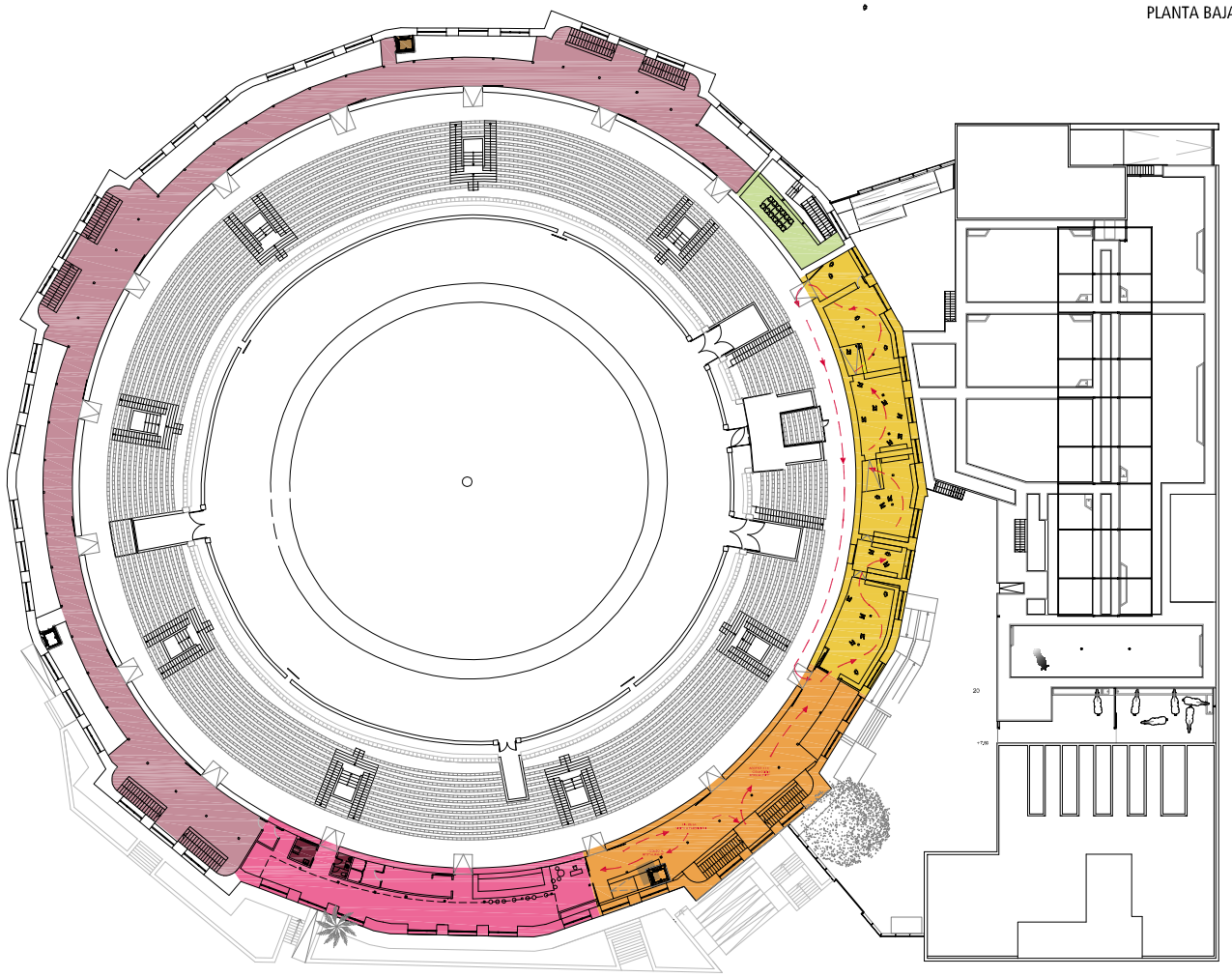
málaga.es diputación
arquitectura y urbanismo



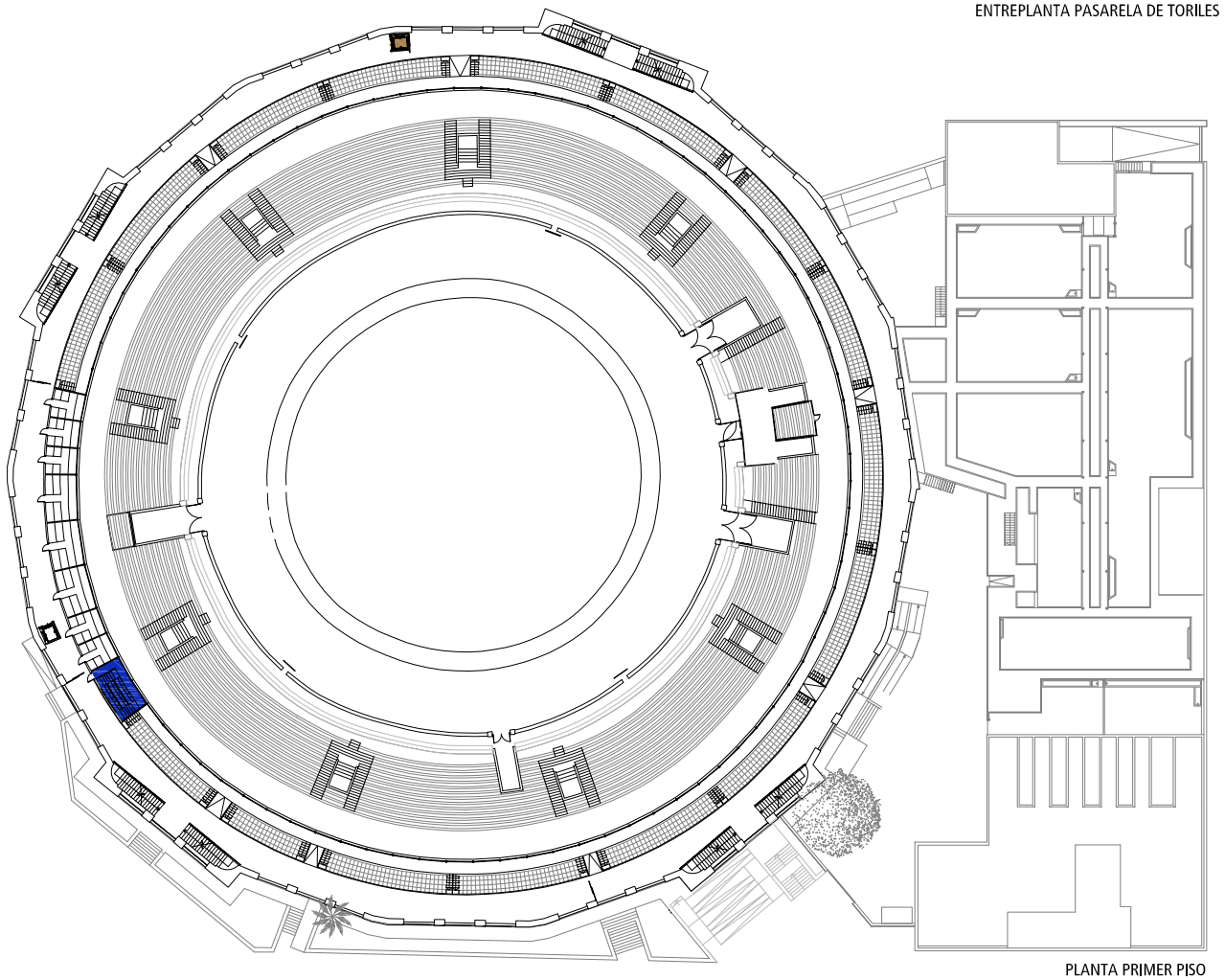
PLANTA BAJA



ENTREPLANTA PASARELA DE TORILES



PLANTA TENDIDOS



PLANTA PRIMER PISO

- ESPACIO ABIERTO MULTIUSOS
- ASCENSORES
- ESPACIOS AUXILIARES ALMACENES - INSTALACIONES
- ASEOS
- OFICINAS EMPRESA
- ESCUELA TAURINA
- CHIQUEROS
- VETERINARIO
- CUARTO DEL MAYORAL
- CAPILLA
- INSTALACIONES
- ENFERMERÍA
- OFICINA DIPUTACIÓN
- PALCO PRENSA
- VESTÍBULO CENTRO DE ARTE DE LA TAUROMAQUIA RECEPCIÓN
- EXPOSICIONES TEMPORALES
- SALAS DE CONFERENCIAS
- VESTÍBULO SALA DE CONFERENCIAS/CATERING
- VESTUARIO DE PERSONAL
- CENTRO DE ARTE DE LA TAUROMAQUIA EXPOSICIÓN PERMANENTE
- RESTAURANTE
- INICIO VISITA TURÍSTICA
- RECORRIDO VISITA TURÍSTICA

Autores

Borja Peñalosa Bejarano	**Arquitecto**
Manuel J. Rodríguez Ruiz	**Arquitecto**
Rafael Salas Pulido	**Arquitecto**

Colaboradores

José Manuel Caro López	**Arquitecto Técnico**
Ángel F. Mata Martín	**Ingeniero Técn. Industrial**
Francisco J. Esteban Arbesu	**Estructuras**
Juan Antonio Aguilar Bravo	**Delineante**

Proyecto Modificado del de Ejecución

Rehabilitación y adecuación de nuevos usos de la plaza de toros de Málaga, "la Malagueta"

Situación

Paseo de Reding, Calles Cervantes y Maestranza, 29016, Málaga

Promotor

Excma. Diputación de Málaga

Plano

ESTADO REFORMADO. PLANTAS. ZONIFICACIÓN Y USOS

Nº Plano

A20

Fecha

MARZO 2019

Escala	**A3**	**A1**
	S/E	S/E

BORJA PEÑALOSA MANUEL J. RODRÍGUEZ RAFAEL SALAS

Arquitectos

málaga.es diputación
arquitectura y urbanismo