



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Predimensionamiento de una cubierta
cónica para un depósito vertical de 16 m
de diámetro**

Autor:

Moratinos de los Ojos, Clara María

Tutor(es):

Magdaleno González, Álvaro

Lorenzana Iban, Antolín

Departamento de Construcciones

Arquitectónicas, Ingeniería del

Terreno y Mecánica de Medios

Continuos y Teoría de estructuras

Valladolid, septiembre de 2025.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutores del proyecto Álvaro Magdaleno González y Antolín Lorenzana Iban, la implicación y la ayuda que me han brindado para lograr con éxito la realización de este trabajo.

A mi familia por supuesto. A mis padres Luis y Charo por proporcionarme todo lo que he necesitado y siempre apoyarme de forma incondicional. También al resto de mi familia.

A mi hermano David por ser mi hermano.

A mi pareja y futuro marido Saúl que es la persona que más me ha apoyado y me ha brindado su ayuda siempre que ha podido.

Finalmente, a mis amigos y compañeros de clase por ayudarme en los momentos más difíciles y las risas y algún llanto que hemos tenido durante esta etapa.

Gracias a cada persona que ha formado parte de esta etapa.

RESUMEN

Con este trabajo de fin de grado se busca obtener un predimensionamiento de una cubierta cónica para un depósito vertical de 16 m de diámetro para almacenamiento de agua. Se trata de un ejercicio académico, pero en el que se hará referencia a las normas estructurales vigentes y se empleará un programa de cálculo profesional (SAP2000). Tras justificar la tipología estructural elegida y definir las cargas, se generará una guía del proceso seguido para determinar los perfiles de las barras del entramado resistente, aprovechando las capacidades del software de ingeniería asistida por ordenador.

PALABRAS CLAVE

Cálculo estructural, tipología cónica, SAP2000

ABSTRACT

This final degree project seeks to obtain a preliminary design for a conical roof for a 16-m diameter vertical water storage tank. This is an academic exercise, but it will refer to current structural standards and use a professional calculation program (SAP2000). After justifying the chosen structural typology and defining the loads, a guide will be generated for the process followed to determine the bar profiles of the load-bearing framework, leveraging the capabilities of computer-aided engineering software.

KEYWORDS

Structural Design, conical typology, SAP2000

Índice

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Objetivos del trabajo.....	2
Capítulo 2: Tipología estructural y Metodología de Cálculo	5
2.1. Tipos de cubiertas	5
2.2. SAP 2000	8
2.3. Normativa aplicable	8
2.4. Selección de los materiales.....	9
Capítulo 3: Diseño estructural	13
3.1. Descripción y ubicación	13
3.2. Esqueleto de la cubierta	15
3.3. Cargas consideradas sobre la cubierta	16
3.4. Modelado de la estructura.....	19
3.5. Creación de la malla.....	20
3.6. Modificación de la rejilla existente.....	24
3.7. Definición del material	26
3.8. Definición de perfiles y creación de “Auto Select List”	28
3.9. Definición de Patrones/Casos y Combinaciones de Carga	35
3.10. Creación de la estructura.....	39
3.11. Replicación de la estructura	45
3.12. Rotación de los ejes locales	47
3.13. Condiciones de contorno	49
3.14. Creación de superficies.....	51
3.15. Asignación de grupos	53
3.16. Aplicación de las cargas.....	55
3.17. Carga aplicada a una superficie.....	58
3.18. Cálculo e interpretación de los resultados	60
3.19. Herramienta Start Steel design/Check of structure	66
3.20. Análisis del primer resultado del cálculo	68

3.21.	Segunda Iteración	70
3.22.	Comprobación pandeo de la estructura	77
Capítulo 4: Conclusiones y otras consideraciones.....		79
4.1.	Conclusiones.....	79
4.2.	Recomendaciones para futuros estudios.....	79
4.3.	Consideraciones adicionales.....	80
Bibliografía		83
Anexo 1: Comprobaciones en SAP2000.....		84

Índice de Figuras

Figura 1: Cubierta plana [4]	5
Figura 2: Cubierta a un agua [4].....	6
Figura 3: Cubierta a dos aguas [5]	6
Figura 4: Cubierta cilíndrica [6]	7
Figura 5: Cubierta cónica [7]	7
Figura 6: Cubierta esférica [8].....	8
Figura 7: Estructura de madera en tejado cilíndrico, Cantalejo (Segovia) [9]	9
Figura 8: Ubicación del depósito [2]	13
Figura 9: Geometría del depósito y entorno [2]	14
Figura 10: Sección depósito y entorno [1].....	14
Figura 11: Render entorno del depósito [1]	15
Figura 12: Vista cenital del esqueleto de la cubierta	16
Figura 13: Ventana de configuración del modelo SAP2000	20
Figura 14: Configuración inicial de la rejilla	21
Figura 15: Interfaz SAP 2000 después de configurar la rejilla	22
Figura 16: Vista del modelo en plano "rt"	23
Figura 17: Vista del modelo en plano "rz"	23
Figura 18: Vista del modelo en plano "tz"	24
Figura 19: Opciones del menú	24
Figura 20: Ventana rejilla estructura	24
Figura 21: Ventana configuración rejilla existente.....	25
Figura 22: Ventana definición material	26
Figura 23: Ventana Definición de materiales.....	26
Figura 24: Definición propiedades del material	27
Figura 25: Propiedades del acero S275	27
Figura 26: Tipos de secciones en función del material	28
Figura 27: Tipos de perfiles existentes en el material: Hormigón	29
Figura 28: Tipos de perfiles existentes en el material: Aluminio	29
Figura 29: Tipos de perfiles existentes en el material: Otras secciones	30
Figura 30:Tipos de perfiles existentes en el material: Cold Formed	30
Figura 31: Ventana propiedades de la sección de la barra.....	31
Figura 32: Tipos de perfiles existentes en el material: Cold Formed	31
Figura 33: Configuración Box Section Cold Formed	32
Figura 34: Propiedades de la sección "Auto Select List"	33
Figura 35: Ventana configuración Auto Selection Sections	34
Figura 36: Recomendación de configuración Auto Selection List	35
Figura 37: Apartados para definir las cargas	35
Figura 38: Definición patrones de carga	36
Figura 39: Definición casos de carga.....	37
Figura 40: Modificación casos de carga	38

Figura 41: Configuración combinación de carga	39
Figura 42: Herramientas pestaña Draw	40
Figura 43: Propiedades de las herramientas Frame	41
Figura 44: Propiedades de la herramienta "Quick Draw Braces"	42
Figura 45: Creación viga principal de la cubierta.....	42
Figura 46: Generación barras con herramienta "Quick Frame"	43
Figura 47: Dividir barras	44
Figura 48: Esqueleto con las barras divididas	44
Figura 49: Esqueleto base	45
Figura 50: Ventana réplica radial	46
Figura 51: Geometría final de la cubierta.....	46
Figura 52: Visibles los ejes locales de los nodos.....	47
Figura 53: Modificación ejes locales.....	48
Figura 54: Geometría con ejes locales modificados.....	48
Figura 55: Ruta asignación condiciones de contorno	49
Figura 56: Cubierta con restricciones aplicadas.....	50
Figura 57: Información del nodo	51
Figura 58: Ventana creación superficies	52
Figura 59: Creación superficie entre zuncho y anillo intermedio	52
Figura 60: Superficies creadas de la cubierta	53
Figura 61: Creación del grupo	54
Figura 62: Aplicación fuerzas a nodos.....	56
Figura 63: Aplicación desplazamientos a nodos.....	56
Figura 64: Carga gravitacional	57
Figura 65: Carga puntual	57
Figura 66: Carga distribuida	58
Figura 67: Ventana Area Uniform "Shell"	59
Figura 68: Ventana Area uniform Loads to Frames	59
Figura 69 Información de una superficie	60
Figura 70: Ventana cálculo de los casos de carga	61
Figura 71 Menú deformada de la estructura	62
Figura 72: Ventana reacciones en nodos.....	63
Figura 73: Ventana para visualizar tensiones del caso de carga seleccionado	64
Figura 74: Diagrama axial en una barra	65
Figura 75 Diagramas de tensiones S11 en una barra	65
Figura 76 Definir parámetros de diseño.....	67
Figura 77: Selección grupos de diseño.....	67
Figura 78: Primer resultado del diseño	68
Figura 79: Ventana del resultado de dimensionamiento	69
Figura 80: Diagrama tensiones en el primer cálculo.....	70
Figura 81: Resultados segunda iteración.....	71
Figura 82: Resultados tercera iteración	71

Figura 83: Vista estructura con colores en función de los perfiles.....	72
Figura 84: Resultados de diagramas esfuerzos internos tercera iteración: (a) Axial, (b) Torsión, (c) Cortante 2, (d) Cortante 3, (e) Flector 2, (f) Flector 3	74
Figura 85: Diagrama tensiones tercera iteración	75
Figura 86: Diagrama tensiones máximas tercera iteración	76
Figura 87: Deformada tercera iteración	77
Figura 88: Configuración caso carga pandeo.....	78
Figura 89: Comprobación pandeo de la estructura	78
Figura 90: Diagrama de Gantt.....	80
Figura 91: Configuración rejilla para las comprobaciones.....	84
Figura 92: Sección tubo cuadrado conformado en frío	85
Figura 93: Geometría para la comprobación.....	86
Figura 94: Reacciones en apoyos aplicando presión Q con la herramienta "Uniform (Shell)".....	87
Figura 95: Vista global de cortantes y momentos aplicando presión Q con la herramienta "Uniform (Shell)".....	87
Figura 96: Diagrama de esfuerzos internos aplicando presión Q con la herramienta "Uniform (Shell)".....	88
Figura 97: Diagrama de tensiones de la barra aplicando presión Q con la herramienta "Uniform (Shell)".....	88
Figura 98: Deformada aplicando presión Q con la herramienta "Uniform (Shell)".....	89
Figura 99: Reacciones aplicando una carga distribuida (P) sobre las vigas	90
Figura 100: Vista cortantes y flectores aplicando una carga distribuida (P) sobre las vigas	90
Figura 101: Diagrama de esfuerzos internos de la barra aplicando una carga distribuida (P) sobre las vigas.....	91
Figura 102: Diagrama de tensiones de la barra aplicando una carga distribuida (P) sobre las vigas.....	91
Figura 103: Deformada aplicando una carga distribuida (P) sobre las vigas	92
Figura 104: Esquema cargas F sobre los nodos.....	92
Figura 105: Reacciones en apoyos aplicando fuerzas puntuales F en cada nodo.....	93
Figura 106: Vista global de cortantes y flectores aplicando fuerzas puntuales F en cada nodo	93
Figura 107: Diagrama de esfuerzos internos aplicando fuerzas puntuales F en cada nodo	94
Figura 108: Deformada aplicando fuerzas puntuales F en cada nodo	94
Figura 109: Reacciones en los apoyos aplicando una carga de presión (Q) "Uniform to Frame (Shell)" en las superficies tipo "None"	95

Figura 110: Vista global de cortantes y momentos aplicando una carga de presión (Q) “Uniform to Frame (Shell)” en las superficies tipo “None.....	95
Figura 111: Diagrama de esfuerzos internos de la barra aplicando una carga de presión (Q) “Uniform to Frame (Shell)” en las superficies tipo “None ...	96
Figura 112: Diagrama de tensiones de la barra aplicando una carga de presión (Q) “Uniform to Frame (Shell)” en las superficies tipo “None.....	96
Figura 113: Deformada aplicando una carga de presión (Q) “Uniform to Frame (Shell)” en las superficies tipo “None	97

Índice de Tablas

Tabla 1: Tipos de acero estructural.....	11
Tabla 2: Peso propio de elementos constructivos [1].....	17
Tabla 3: Valores característicos de las sobrecargas de uso [1].....	18
Tabla 4: Sobrecarga de nieve en capitales de provincia y ciudades autónomas [1]	19
Tabla 5: Resumen de las cargas	19
Tabla 6: Resumen secciones de los grupos estructurales	72
Tabla 7: Resumen costes del proyecto	82
Tabla 8: Valores de las comprobaciones	97

Capítulo 1: Introducción

1.1. Antecedentes

En este trabajo se realizará el predimensionamiento de una cubierta para un depósito cilíndrico localizado en el municipio de Valladolid. Para llevar a cabo esta tarea se utilizarán los conocimientos obtenidos en las asignaturas de Resistencia de Materiales, Elasticidad y Resistencia de Materiales I y II, y Estructuras y Construcciones Industriales cursadas en el Grado en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Valladolid. El programa de cálculo estructural que se ha utilizado es SAP2000.

En la actualidad cualquier buen ingeniero necesita saber de software de cálculo, los cuales sustituyen los cálculos que se hacen a mano. De esta forma se obtiene agilidad y fiabilidad, aunque de igual forma siempre se deberá tener en cuenta las bases de la teoría y realizar una interpretación de los resultados obtenidos.

Durante este grado se ha utilizado el programa de SAP2000 que permite calcular estructuras de acero, hormigón, madera o cualquier otro material del que se tengan sus propiedades, y realizar el cálculo en diferentes geometrías. Todo esto requiriendo un menor esfuerzo de aprendizaje en comparación con otros softwares disponibles en el mercado.

En este trabajo se ha querido profundizar en el manejo de este gran programa y mejorar las aptitudes del futuro ingeniero debido a que durante el grado en Ingeniería Mecánica se realizan cálculos en 2D y el objetivo es aprender sobre el cálculo 3D y las normativas que se deberán aplicar en el desarrollo de la actividad profesional como ingeniero calculista.

Durante este proyecto se seguirá la normativa del Código Técnico de la Edificación (CTE), en concreto el documento DB-SE-AE [1]. De esta forma se asegura el cumplimiento de las exigencias y que este proyecto sea un ejercicio realista.

Para este proyecto se utilizará como fuente de inspiración el depósito situado en AV. Valle de Esgueva 6, 47011 Valladolid. El objetivo de este depósito es un sistema acumulador de energía térmica para la red de calor de la Universidad de Valladolid. [2]

Durante el transcurso de este trabajo quedará reflejado la metodología seguida durante la realización de mismo. De la misma se mostrarán las primeras pruebas hasta llegar al objetivo final junto con las conclusiones y recomendaciones del camino seguido.

Para concluir, se realizará una estimación de los costes incluyendo el tiempo del ingeniero y los materiales a utilizar como si este fuera un proyecto real que se fuese a ejecutar.

1.2. Planteamiento del problema

- Paso 0: Comprobaciones SAP2000

Se realizarán comprobaciones de las cargas aplicadas a superficies tipo “None” utilizando problemas más sencillos para analizar el comportamiento de estas en SAP2000. Todo lo anterior se encontrará desarrollado en el Anexo 1: Comprobaciones en SAP2000.

- Paso 1: Definición de la estructura

En esta primera etapa se definirá el esqueleto de la cubierta, junto con sus secciones y el material del que estará hecha la cubierta.

- Paso 2: Cálculo de cargas aplicadas

Mediante la normativa (CTE [1] y normativa específica para depósitos [3]) se calcularán las cargas aplicadas sobre la cubierta junto con las combinaciones de carga aplicadas.

- Paso 3: Dimensionamiento de la cubierta en SAP2000

Se creará una guía detallada con todos los pasos que se han realizado y se mostrarán las iteraciones realizadas hasta llegar al resultado final.

- Paso 4: Discusión de los resultados obtenidos

Para finalizar se evaluarán los resultados obtenidos y se extraerán las conclusiones del trabajo.

1.3. Objetivos del trabajo

Este trabajo se enfocará en los objetivos principales que se definirán a continuación y por el camino se encontrarán otros objetivos secundarios también importantes para la realización con éxito del trabajo.

Los objetivos principales son los siguientes:

- Entender el funcionamiento de la tipología de una cubierta cónica.
- Identificar unas acciones realistas conforme a la normativa.
- Modelar correctamente el esqueleto estructural como las condiciones de contorno de la estructura mientras.
- Seleccionar los perfiles adecuados que cumplan con las exigencias de la normativa respecto al análisis elástico lineal y al pandeo.

Los objetivos secundarios son los siguientes:

- Afianzar los conocimientos de cálculo estructural y ampliar los mismos a estructuras 3D con diferentes morfologías.
- Adquirir nuevas habilidades en SAP2000, incluyendo capacidades como el autodimensionado y el empleo de superficies virtuales, tipo “None” en SAP2000.
- Aunar de forma preliminar todas las capacidades que se deben desarrollar en un anteproyecto de cálculo estructural.
- Guiar a futuros alumnos con la guía creada

De la misma forma se realizarán una serie de ejercicios para entender el comportamiento que tiene SAP2000, respecto a las cargas aplicadas en superficies virtuales (tipo “None”) para comprender este comportamiento de forma clara.

Capítulo 2: Tipología estructural y Metodología de Cálculo

En este segundo capítulo se describirá qué es una cubierta junto con los tipos que existen. De la misma forma se comentará sobre el programa de cálculo estructural utilizado llamado SAP2000. Posteriormente, se mencionará la normativa que se ha seguido durante este proyecto. Por último, se mencionarán los materiales existentes en el mercado y se desarrollará la elección del material escogido para esta estructura.

Una cubierta es un elemento constructivo de cerramiento, este se encuentra situado sobre una construcción, de manera que funcionan como un cerramiento exterior, protegiendo al edificio de una serie de factores. Las principales funciones de una cubierta son: la protección contra agentes climáticos como el sol, el viento y/o la lluvia asegurando una estanqueidad frente a esta; de la misma forma mejoran el aislamiento térmico y acústico de la estructura para generar un mayor confort y ahorro energético; y por último, contribuye a la estética general de la construcción.

2.1. Tipos de cubiertas

A. Cubierta planas:

Son cubiertas horizontales o con pendientes inferior al 5%. El principal inconveniente de esta tipología de cubierta es que se debe evacuar correctamente el agua o nieve para que se pueda depositar en un sumidero. Es imprescindible asegurar la estanqueidad utilizando materiales impermeabilizadores. En la Figura 1 se puede apreciar esta tipología, es habitual encontrarse este tipo de cubiertas en edificios de uso público y a veces en edificios residenciales.



Figura 1: Cubierta plana [4]

B. Cubiertas a un agua:

Estas cubiertas están caracterizadas por tener un solo faldón inclinado hacia un lado con una inclinación entre $5^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$. En la Figura 2 se puede apreciar la tipología descrita y también se puede encontrar en edificios residenciales.



Figura 2: Cubierta a un agua [4]

C. Cubiertas dos aguas:

Son cubiertas inclinadas que presentan dos faldones que pueden ser simétricos o asimétricos y tener distintos grados de inclinación ya sea con un ángulo positivo o negativo. En la Figura 3 se puede apreciar esta tipología, de igual forma se puede apreciar este tipo de cubierta en las naves industriales y también en multitud de edificios residenciales.



Figura 3: Cubierta a dos aguas [5]

D. Cubiertas cilíndricas o bóvedas:

Estas cubiertas presentan un eje curvilíneo conferido por el equipamiento de fabricación y complementada por un sistema de tirantes. Presenta una estructura en forma de arco con un tirante interior que recoge los esfuerzos horizontales, de esta forma la cubierta solo transmite esfuerzos verticales a los apoyos. Esta tipología de cubierta es habitual verlas en instalaciones deportivas, como se aprecia en la Figura 4 como en pistas de pádel y tenis, entre otros deportes.



Figura 4: Cubierta cilíndrica [6]

E. Cubiertas cónicas:

Estas cubiertas presentan una tipología en forma de cono. Es decir, circular en planta y que se eleva para terminar en un punto. Este tipo de cubiertas se montan en el suelo y posteriormente van añadiendo capas para ganar altura. Es muy habitual verlas en depósitos en fábricas y depósitos agrícolas como silos, como se aprecia en la Figura 5.



Figura 5: Cubierta cónica [7]

F. Cubiertas esféricas o cúpulas

Estas cubiertas están compuestas por una bóveda en forma de media esfera o de una esfera completa aproximada con la que suele cubrirse todo un edificio. En la Figura 6 se puede apreciar la Cúpula del Milenio ubicada en Valladolid, se puede observar que presenta una bóveda de media esfera.



Figura 6: Cubierta esférica [8]

2.2. SAP 2000

El SAP2000 es un programa de elementos finitos. Este presenta una interfaz gráfico 3D orientada a objetos y preparada para realizar el modelado, el análisis y el dimensionamiento de un amplio conjunto de problemas de estructurales con variadas tipologías.

Este programa es un gran aliado para el ingeniero calculista debido a que es muy intuitivo. Presenta las normativas internacionales, una biblioteca con gran multitud de materiales y plantillas para los distintos tipos de estructuras comunes.

2.3. Normativa aplicable

Para la realización de este trabajo se han utilizado las siguientes normativas:

- Código Técnico de la Edificación en España (CTE) en concreto el documento DB-SE-AE [1]
- Normativa específica para depósitos y silos: UNE-EN-1991-1-4 EC1P1-4, Eurocódigo 1 Parte 4 y UNE-ENV 1998-4 Eurocódigo 8 Parte 4 [3].

Según normativa se pide comprobar los siguientes requisitos de seguridad estructural:

- a) Coeficientes de seguridad
- b) Estados límite último y de servicio

2.4. Selección de los materiales

Es muy importante la selección del material, debido a que afectará en varios factores como la resistencia, la facilidad en el montaje y el precio, este último el más dominante. El principal protagonista en las edificaciones de carácter industrial es el acero, debido a las ventajas que posee sobre otros materiales como la madera y el hormigón. Como referencia existen estructuras de madera, como la Figura 7, que ha servido de inspiración para crear este proyecto.



Figura 7: Estructura de madera en tejado cónico, Cantalejo (Segovia) [9]

La madera y el hormigón han sido descartados para esta aplicación debido a las principales propiedades en las que destaca el acero como material para crear estructuras.

El acero presenta una alta resistencia tanto a tracción como a compresión, esto es una ventaja debido a que no es necesario reforzarlo con otros elementos para que trabaje como se requiera como por ejemplo con el hormigón. El acero posee una alta resistencia mecánica, por lo tanto, su peso propio es reducido permitiendo usar menores secciones resistentes mientras que puede abarcar grandes luces en las construcciones.

Una desventaja que tiene el acero es la inestabilidad local que presenta, sin agotar la capacidad resistente debido a su ligereza y esbeltez. Se realizan arriostramientos en los diferentes elementos estructurales para evitar

inestabilidades globales como el pandeo con deformaciones de flexión entre otras y por eso cuando se construyen naves industriales se utilizan las cruces de san Andrés y nudos rígidos.

El acero es un material dúctil, entonces antes de alcanzar el límite de rotura este presenta previamente una deformación plástica hasta llegar a un límite donde se produce rotura.

La durabilidad del acero se ve afectada por la corrosión del material. Para evitar este fenómeno se aplican tratamientos químicos como puede ser: aplicar una pintura especial para la corrosión, un tratamiento térmico como el pavonado o galvanizado ya sea en frío o en caliente. Por lo tanto, habrá que realizar un mantenimiento periódico de la estructura para que no pierda sus propiedades.

Entre otras características el reciclaje del acero es muy simple debido a que la mayoría del acero empleado es secundario y solamente se necesitará llevar a una siderurgia para su fusión y obtener de nuevo acero secundario.

El acero es sensible al fuego debido a su alta conductividad térmica. Las propiedades mecánicas del acero menguan rápidamente con la temperatura, por lo que se deben proteger del fuego mediante recubrimientos intumescentes. Los recubrimientos intumescentes son pinturas especiales que al exponerse al calor esta reacciona de forma química y crea una barrera térmica ralentizando la transferencia de calor al acero. Primero se aplicaría el intumescente y luego puede aplicarse una pintura posteriormente.

Las principales virtudes del acero es que presenta una gran facilidad de montaje y transporte. Esto facilita que la ejecución de la obra sea rápida y las uniones entre los distintos elementos sean eficaces debido a la unión mediante soldadura o atornillada. De la misma forma, se puede ejecutar con facilidad un control de la ejecución y calidad de estas uniones. Otra gran ventaja es que se pueden realizar modificaciones o ampliaciones de las estructuras con gran facilidad provocando que el coste de estas ampliaciones sea más económico. Por último, el acero presenta una alta precisión dimensional de los perfiles debido a los estándares establecidos y existe una gran variedad de tipologías, como por ejemplo perfil hueco o macizo; cuadrado, rectangular o redondo; y otros perfiles para construcciones industriales como perfil IPE entre otros.

En la Tabla 1, se muestran los diferentes tipos de acero comúnmente utilizados.

Tabla 1: Tipos de acero estructural

S235JR	S235J0	S235J2
S275JR	S275J0	S275J2
S355JR	S355J0	S355J2

La nomenclatura que siguen es la siguiente: S viene de “Steel” que es acero en inglés, los siguientes números significan el valor del límite elástico en MPa y las últimas siglas indican su soldabilidad y la sensibilidad a la rotura frágil:

- JR para construcciones ordinarias
- J0 cuando estas construcciones requieren alta soldabilidad y resistencia a rotura frágil
- J2 para exigencias especiales de soldabilidad, resiliencia y resistencia.

En este caso se elegirá el S275JR debido a que es el perfil más habitual y el más barato. De igual forma si nos guiamos por el factor dimensionante no presentará ninguna diferencia respecto a los otros tipos de acero.

Capítulo 3: Diseño estructural

En este capítulo se definirán las características que presentará la cubierta cónica junto con las cargas aplicadas. De igual forma se mostrarán los pasos que se han seguido para el modelado de esta cubierta. A continuación, se describirá la ubicación y el tamaño del depósito sobre el que se apoyará la cubierta desarrollada en este trabajo.

3.1. Descripción y ubicación

Durante este proyecto se ha utilizado como inspiración el depósito que tiene el sistema acumulador de energía térmica para la red de calor de la Universidad de Valladolid. Esta actuación consistía en la instalación de un depósito de almacenamiento de energía térmica, en forma de agua caliente, para la red de calor de la Universidad de Valladolid. [2]

El depósito se encuentra en la parcela de referencia catastral 7734733UM5173D0001FK situada en la Av. Valle de Esgueva 6,47011 (Valladolid), tal y como se muestra en la Figura 8.

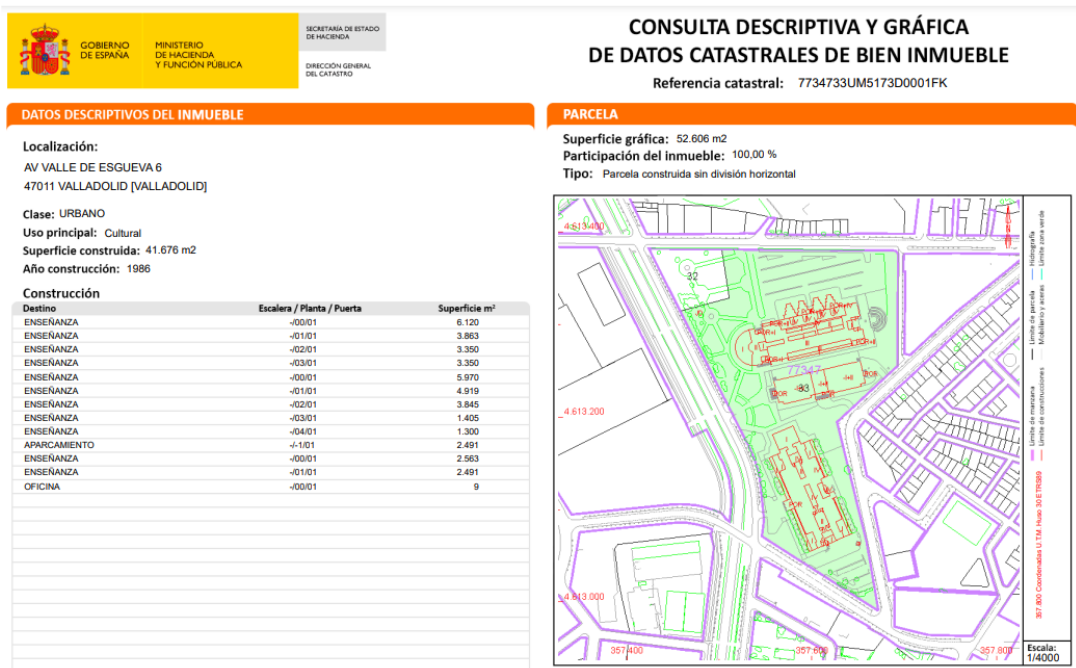


Figura 8: Ubicación del depósito [2]

En las siguientes figuras (Figura 9, Figura 10, Figura 11) se puede apreciar la geometría del depósito que se utiliza como base de inspiración:

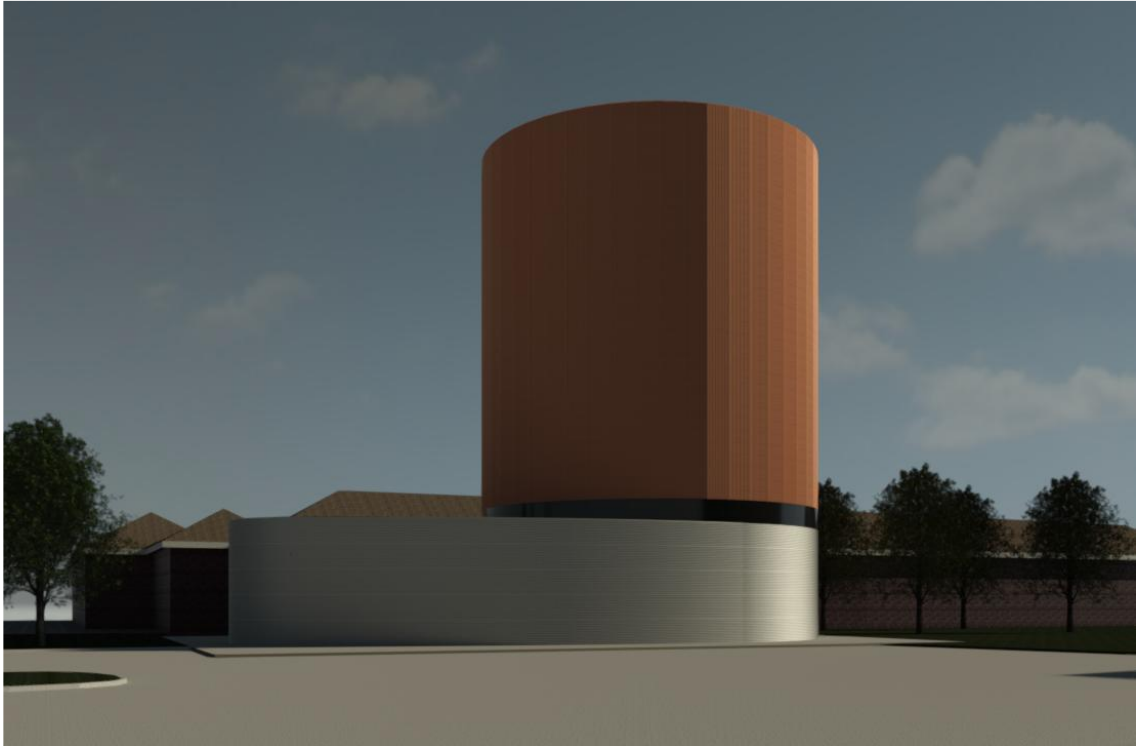


Figura 11: Render entorno del depósito [1]

Este depósito cuenta con una cubierta propia, con forma ligeramente abovedada, formada por un panel sándwich colocado encima permitiendo que esté aislada y soportada sobre una estructura metálica por el exterior del depósito. Debido a que este documento sirve como un ejercicio académico, se ha planteado otra cubierta diferente que se explicará a continuación.

3.2. Esqueleto de la cubierta

La cubierta va a presentar una tipología cónica. Esta se agrupará en 5 elementos estructurales como se puede observar en la Figura 12:

- a) Vigas radiales principales (VRP) en color verde.
- b) Vigas radiales secundarias (VRS) en color azul claro.
- c) Zuncho (anillo inferior) en color rojo.
- d) Anillo intermedio en color rosa.
- e) Cumbre en color azul oscuro.

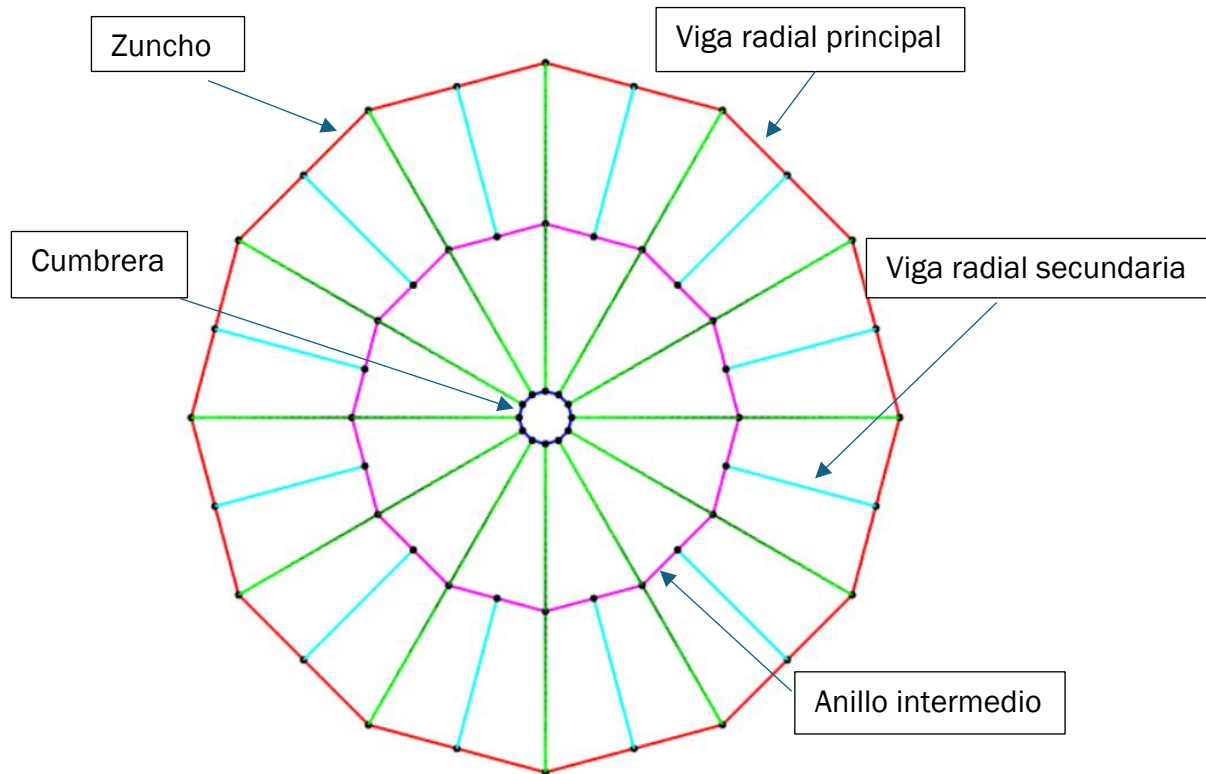


Figura 12: Vista cenital del esqueleto de la cubierta

3.3. Cargas consideradas sobre la cubierta

Este trabajo es un ejercicio académico por lo que no se estudiarán todas las cargas que se tendrían que aplicar sobre la estructura según la normativa, pero a continuación se mostrarán algunas de las cargas que según el CTE [1] se tendrían que aplicar. Aunque se realicen simplificaciones, las cargas aplicadas se asemejan a un trabajo realista evitando que pierda credibilidad.

A. Acciones permanentes

- **Peso propio**

El peso propio es la carga generada por el peso de la propia estructura y actúa de forma permanente debido a que esta carga es constante a lo largo de la vida de la estructura. En este caso, es el peso de las vigas radiales (principales y secundarias) y los anillos (zuncho, anillo intermedio y cumbrera). Este programa tiene la capacidad de incluir el peso propio real en los cálculos en función del perfil y el material escogido.

- **Peso del cerramiento**

En este caso se ha elegido un cerramiento de la cubierta formado por láminas de panel sándwich, en la Tabla 2 que forma parte del CTE-DB-SE-AE [1], el peso del panel es 1 kN/m^2 , pero el peso del panel será 300

N/m² debido a que la normativa es más conservadora. Esta carga se modelará como una carga vertical distribuida uniformemente.

Tabla 2: Peso propio de elementos constructivos [1]

Elemento	Peso
Forjados	kN / m²
Chapa grecada con capa de hormigón; grueso total < 0,12 m	2
Forjado unidireccional, luces de hasta 5 m; grueso total < 0,28 m	3
Forjado uni o bidireccional; grueso total < 0,30 m	4
Forjado bidireccional, grueso total < 0,35 m	5
Losa maciza de hormigón, grueso total 0,20 m	5
Cerramientos y particiones (para una altura libre del orden de 3,0 m) incluso enlucido	kN / m
Tablero o tabique simple; grueso total < 0,09 m	3
Tabicón u hoja simple de albañilería; grueso total < 0,14 m	5
Hoja de albañilería exterior y tabique interior; grueso total < 0,25 m	7
Solados (incluyendo material de agarre)	kN / m²
Lámina pegada o moqueta; grueso total < 0,03 m	0,5
Pavimento de madera, cerámico o hidráulico sobre plastón; grueso total < 0,08 m	1,0
Placas de piedra, o peldañado; grueso total < 0,15 m	1,5
Cubierta, sobre forjado (peso en proyección horizontal)	kN / m²
Faldones de chapa, tablero o paneles ligeros	1,0
Faldones de placas, teja o pizarra	2,0
Faldones de teja sobre tableros y tabiques palomeros	3,0
Cubierta plana, recrecido, con impermeabilización vista protegida	1,5
Cubierta plana, a la catalana o invertida con acabado de grava	2,5
Rellenos	kN / m³
Agua en aljibes o piscinas	10
Terreno, como en jardineras, incluyendo material de drenaje ⁽¹⁾	20

B. Acciones variables

- Sobrecarga de uso

"La sobrecarga de uso es el peso de todo lo que puede gravitar sobre el edificio por razón de su uso." [1]

En este caso al ser una cubierta solo se accederá para mantenimiento. Entonces utilizando [1] esta estructura forma parte de la categoría de uso G1 porque la cubierta tiene una inclinación menor a 20°. Asimismo, se puede ver como el valor de carga uniforme es 1 kN/m² según la Tabla 3.

Tabla 3: Valores característicos de las sobrecargas de uso [1]

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

- Viento

Al ser un ejercicio académico no se van a tener en cuenta las cargas de viento debido a que implicarían un estudio más complejo y como el depósito está rodeado de unos parapetos entonces la acción del viento se considerará despreciable.

- Nieve

Según el apartado 3.5 de CTE-DB-SE-AE [1] para determinar la carga de nieve se hace mediante la Ecuación 1:

$$q_n = \mu * s_k \quad (1)$$

μ : es el coeficiente de forma de la cubierta. Según el apartado 3.5.2 de CTE-DB-SE-AE [1] el coeficiente de forma toma el valor de 1 para cubiertas con inclinación menor o igual que 30°.

s_k : valor característico de la carga de nieve sobre el terreno horizontal, apartado 3.5.2 en CTE-DB-SE-AE [1]. En la Tabla 4 se observa el valor que tomaría para la localización escogida es $s_k = 0,4$.

Tabla 4: Sobrecarga de nieve en capitales de provincia y ciudades autónomas [1]

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

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

Según el apartado 3 3.5.1.3 de CTE-DB-SE-AE [1] se podría reducir la carga de nieve en un 20% debido a que la construcción está protegida de la acción de viento, pero no se reducirá.

C. Resumen de las cargas

En la Tabla 5 se encuentra un resumen de las cargas que se han extraído según el CTE [1] que se aplicarían en este proyecto.

Tabla 5: Resumen de las cargas


Peso de la cubierta	300 N/m ²
Sobrecarga de uso	1 KN/m ²
Nieve	400 N/m ²

A modo de simplificación se podría reducir por simetría la estructura de la cubierta en una porción de 15° que conforma un segmento de zuncho, media viga principal, media viga secundaria, el segmento de la cumbrera y el segmento de los anillos intermedios.

3.4. Modelado de la estructura

En este apartado, se iniciará el proceso del modelado de la cubierta cónica. A mayores, se creará una guía sobre cómo se ha llevado a cabo el modelado de toda la estructura de la cubierta cónica junto con su cálculo gracias a las herramientas que ofrece el programa de cálculo estructural SAP2000.

3.5. Creación de la malla

Según se inicia el programa en la parte superior izquierda de la pantalla en el símbolo () o bien “File” /”New model” o con el comando *Ctrl+N*. Se abrirá una ventana como se puede observar en la Figura 13

En la parte superior se elegirá el sistema de unidades y la plantilla que se utilizará para este proyecto. En este caso se ha elegido la opción de “N,m,C” (Newton, metros y grados Celsius) y como plantilla en el apartado “Template” se ha escogido la segunda opción de la primera fila llamada “Grid Only”.

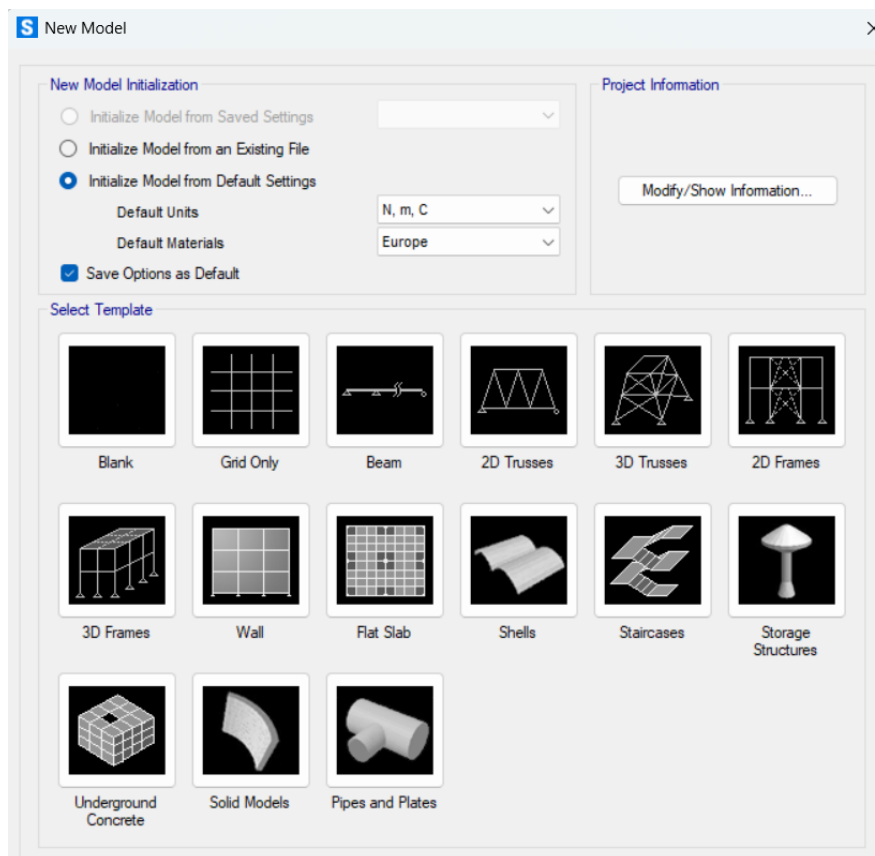


Figura 13: Ventana de configuración del modelo SAP2000

En este documento no se va a profundizar sobre el resto de las plantillas que se encuentran como opciones en este programa.

Al pulsar sobre “Grid only” emerge otra ventana para configurar la rejilla. Como se puede apreciar en la Figura 14 existen dos sistemas de coordenadas: cartesianas y cilíndricas. En este caso se ha seleccionado la ventana de “Cylindrical” (coordenadas cilíndricas) y se observan tres apartados principales:

- “Number of Grid Lines”: Indica el número de líneas por cada eje. Al ser coordenadas cilíndricas no se encuentran los ejes X, Y, Z; y serán

R, θ y Z. Existen ciertas particularidades respecto a este sistema de coordenadas que se describirán a continuación.

- “*Along Radius*”: serán el número de anillos que tendrá la rejilla. El origen se cuenta como un anillo, entonces se deberá poner N+1 líneas para obtener el número de anillos que se desean.
- “*Along Theta*”: serán el número de líneas que se cortarán con los anillos. Por ejemplo, serán los trozos en los que dividimos una pizza.
- “*Along Z*”: será el número de líneas en el eje Z.
- “*Grid Spacing*”. Indica la separación entre las líneas respecto a cada dirección del sistema de coordenadas elegido. La distancia será la misma para todos los huecos, pero después se podrá modificar esta separación a la conveniencia del usuario.
- “*First Grid Line Location*”. Indica la posición del origen del sistema de coordenadas.

Sabiendo esto la rejilla necesitará 3 líneas sobre el radio, 2 líneas sobre Theta y 4 líneas sobre el eje Z. La separación respecto el radio será de 4 m debido a que la cubierta tiene un diámetro de 16 m. La separación respecto a “*Theta*” que se utilizará es el cociente de una vuelta completa (360°) y el número de líneas que se ha elegido, en este caso 12. El resultado de dicho cociente es de 30° . Respecto Z dependerá de la altura final que tendrá la cubierta, en este caso 4 m y se pondrá una separación por cada metro. En la Figura 14 se puede observar la configuración inicial que se ha seguido para generar la rejilla para la cubierta cónica que se quiere realizar.

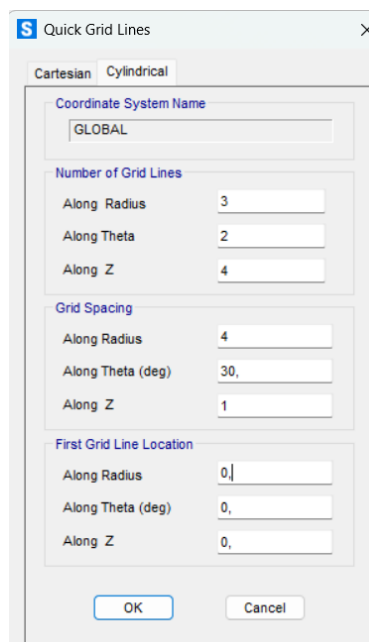


Figura 14: Configuración inicial de la rejilla

Después se presionará el botón de “OK” y se iniciará un modelo como el que se encuentra en la Figura 15. En esta ventana se encuentran dos ventanas. La ventana de la izquierda mostrará en 2D la rejilla pudiendo moverse sobre las tres direcciones en función de los botones existentes en la parte superior izquierda de la barra de herramientas marcada en rojo en la Figura 15 y para desplazarse sobre los niveles sobre ese mismo 2D se hará con ayuda de las flechas que se encuentran a la derecha de estos botones. En la ventana de la derecha aparecerá una vista 3D de la rejilla.

Ahora se profundizará respecto a los tres botones que se han marcado previamente en la barra de herramientas (**rt rz tz**) para una vista 2D que se encuentran señalados con un recuadro rojo en la Figura 15.

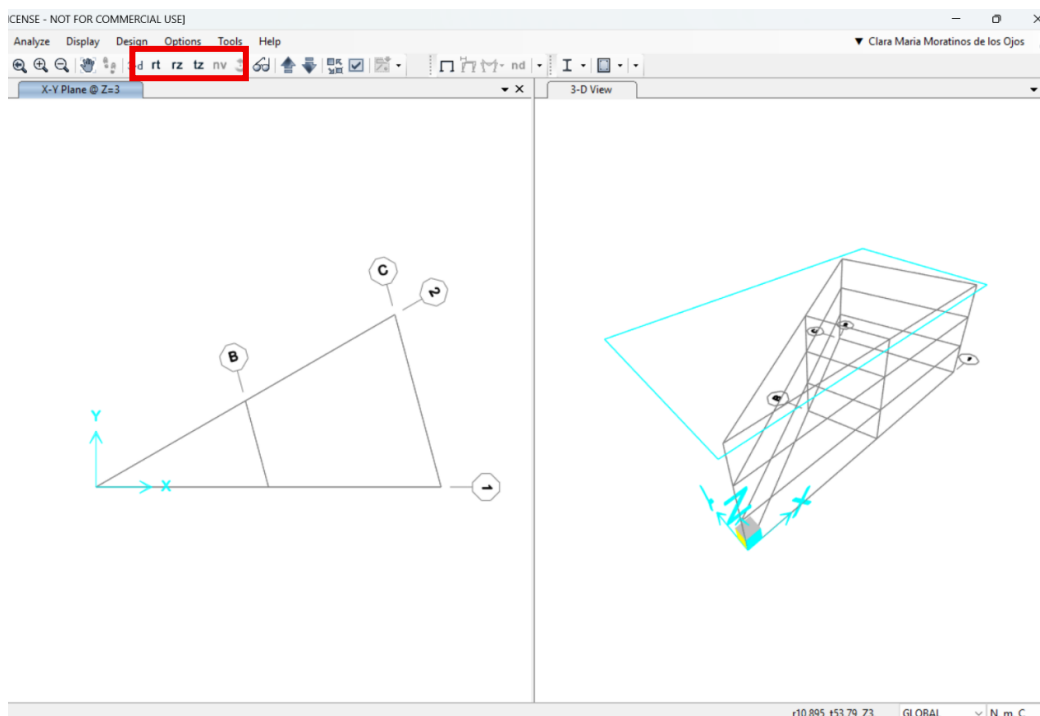



Figura 15: Interfaz SAP 2000 después de configurar la rejilla

La opción “rt” sería el plano con los ejes radial y Theta, un símil al plano XY en coordenadas cartesianas. Las flechas (), que aparecen a la derecha, permiten desplazarse en este plano “rt” respecto a los distintos valores de Z definidos por la rejilla como se puede ver en el lado izquierdo superior como se encuentra recuadrado en rojo en la Figura 16.

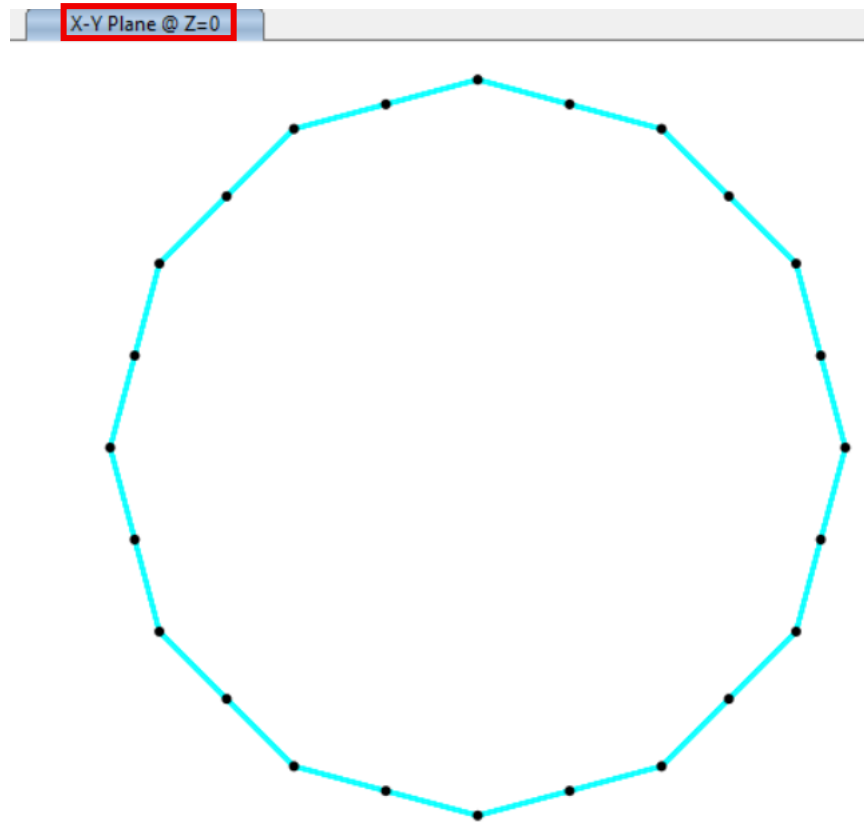



Figura 16: Vista del modelo en plano "rt"

La opción "rz" se realizará el desplazamiento respecto al plano radial y z. De la misma forma las flechas () permiten el desplazamiento sobre los distintos ángulos ("Theta") que se hayan definido en la rejilla, tal y cómo se puede apreciar recuadrado en rojo en la Figura 17.

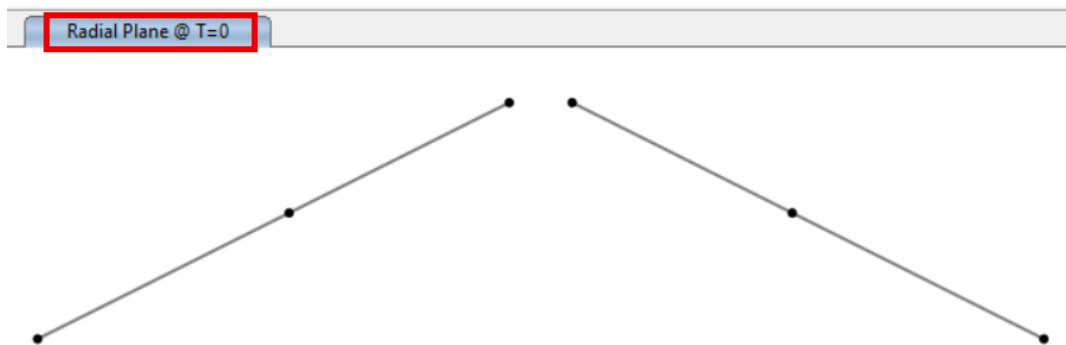



Figura 17: Vista del modelo en plano "rz"

La opción "tz" es el plano formado entre el plano *theta* y z. De la misma forma las flechas () permiten el movimiento respecto a los distintos anillos definidos, tal y como se puede apreciar con un recuadro en rojo en la Figura 18.

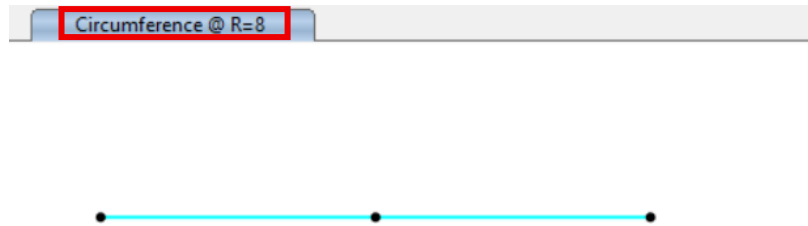


Figura 18: Vista del modelo en plano "tz"

3.6. Modificación de la rejilla existente

Si se hace clic con el botón derecho del ratón en cualquier espacio en blanco de la pantalla, aparecerán las siguientes opciones que se muestran en la Figura 19. Con la opción "Edit Grid Data" se podrá modificar la rejilla. Al marcar esta opción saldrá una ventana como en la Figura 20 y se hará clic sobre la opción "Modify/Show System...".

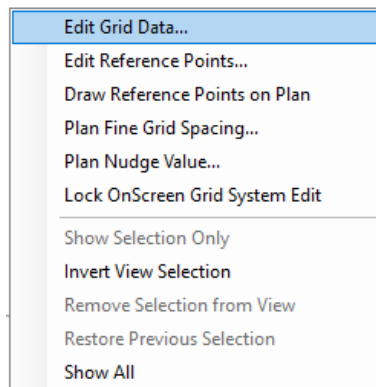


Figura 19: Opciones del menú

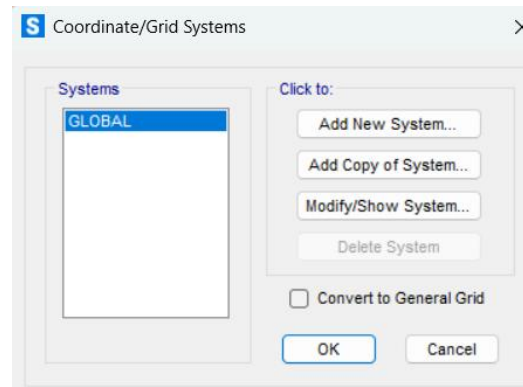


Figura 20: Ventana rejilla estructura

Posteriormente emerge una ventana similar a la Figura 21. Sobre esta última ventana se podrán cambiar los valores de la rejilla respecto a cada eje. Existe la opción de añadir, eliminar o modificar cualquier línea de rejilla en el sistema de coordenadas que se haya elegido.

Se ha creado una nueva línea rejilla en el apartado "R Grid" y el valor que se ha dado es de 0,5 m. Este será el plano donde se encontrará la cumbrera. En el plano de la rejilla con valor 4 m se encontrará el anillo intermedio y el plano del zuncho será el de 8 m.

En el apartado "T Grid" no se ha modificado ningún valor, debido a que posteriormente se replicará de forma radial la estructura. Por lo tanto, sólo

se necesitarán estas dos líneas, en 0° y 30°, para generar las barras y después proceder con la replicación.

Se ha creado una nueva línea rejilla en el apartado “Z Grid” y el valor que se ha dado es de 3,75 m. Este será el plano donde se encontrará la cumbrera. En el plano de la rejilla con valor 4 m se encontrará el final de la cumbrera (que no se modelará), el anillo intermedio se encontrará en 2 m y el plano del zuncho será el de 0 m. En la Figura 21 se muestra la configuración final de la rejilla que se ha utilizado durante el proyecto.

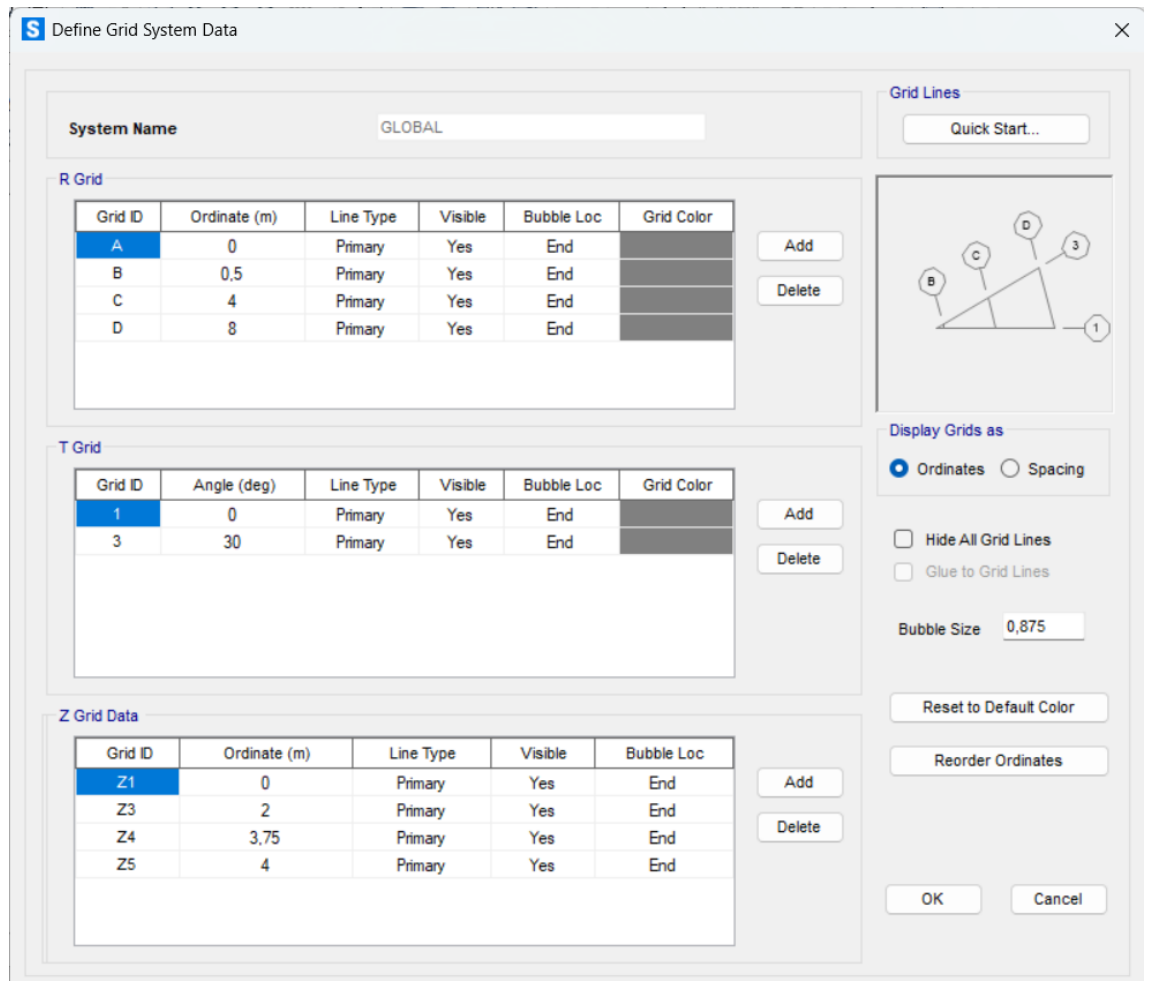


Figura 21: Ventana configuración rejilla existente

En el caso de que los globos de las rejillas molesten al usuario, estos se podrían dejar en blanco siempre que se eliminen las letras/números que tiene ese globo en la primera columna de cada tabla. Una vez que esté todo a gusto de usuario se hará clic en “OK” en ambas ventanas para que la configuración se guarde.

3.7. Definición del material

Para definir y/o crear las características de los materiales que se van a utilizar habrá que ir al apartado superior izquierdo llamado “Define” / “Materials” como se aprecia en la Figura 22.

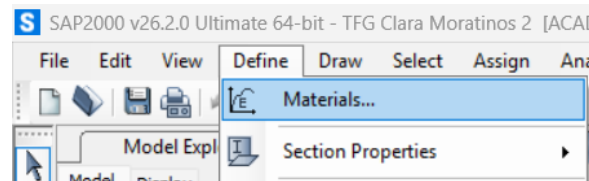


Figura 22: Ventana definición material

Al hacer clic se abrirá una nueva ventana como la Figura 23. En esta pestaña se podrán apreciar todos los materiales que se han implementado en el proyecto. Para crear un material se hará clic en el botón “Add New Material”.

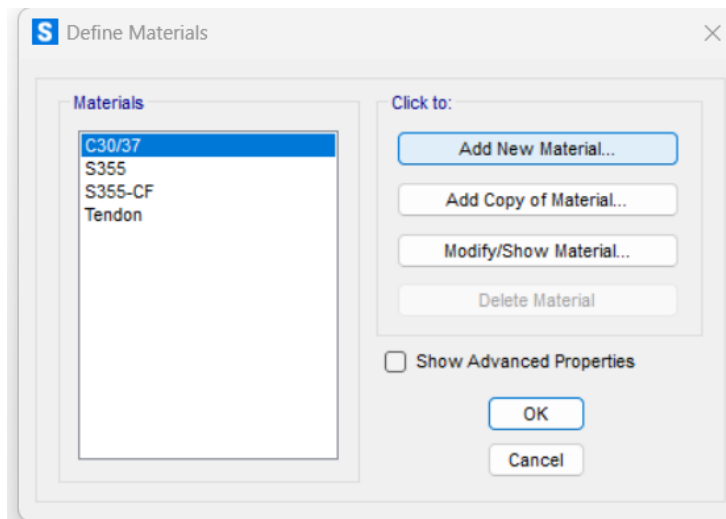


Figura 23: Ventana Definición de materiales

De nuevo se abrirá otra pestaña como la Figura 24 y a continuación, se explicará las opciones de cada apartado junto con las opciones escogidas.

- “Region”: es la región/país del que se extraerán los datos de los materiales a aplicar. En este caso “Europe” debido a que el emplazamiento está en Europa. También existe la opción “Spain” pero es mejor la opción escogida.
- “Material Type”: el tipo de material que se utilizará. El programa ofrece las siguientes opciones: “Steel”, “Concrete”, “Aluminium”, “ColdFormed”, “Rebar”, “Tendon”, “Other”. En este caso “ColdFormed”, porque las secciones que se utilizarán después serán de este tipo.
- “Standard”: es la norma del material que se utilizará. En este caso “EN 1993-1-3 per EN 10025-2”.

“Grade”: es el tipo y la resistencia del material. En este caso se ha elegido “S355-CF” porque es la opción que viene por defecto en el programa, como se muestra en la Figura 24.

A modo resumen en la Figura 24 se pueden apreciar las opciones que se han elegido para este proyecto. Cuando se haya marcado todo se hará clic la opción “Ok” y “Ok” para que se guarden las opciones escogidas.

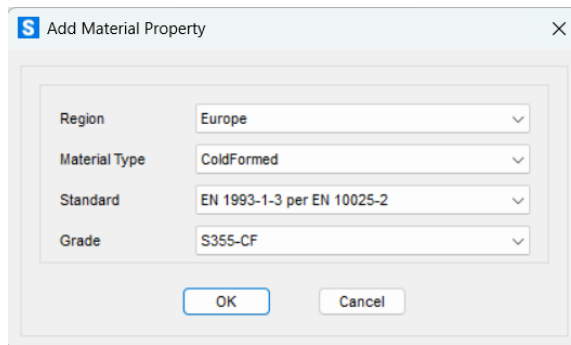


Figura 24: Definición propiedades del material

El material escogido en el apartado 2.4 fue el S275. Por lo tanto, habrá que modificar las características del material que se acaba de crear. Para ello, se seleccionará previamente el acero S355-CF y se modificará para que tenga las mismas propiedades que aparecen en la Figura 25. Esto es importante debido a que el material tiene que ir vinculado a la familia de la lista de iteración que se creará en este proyecto.

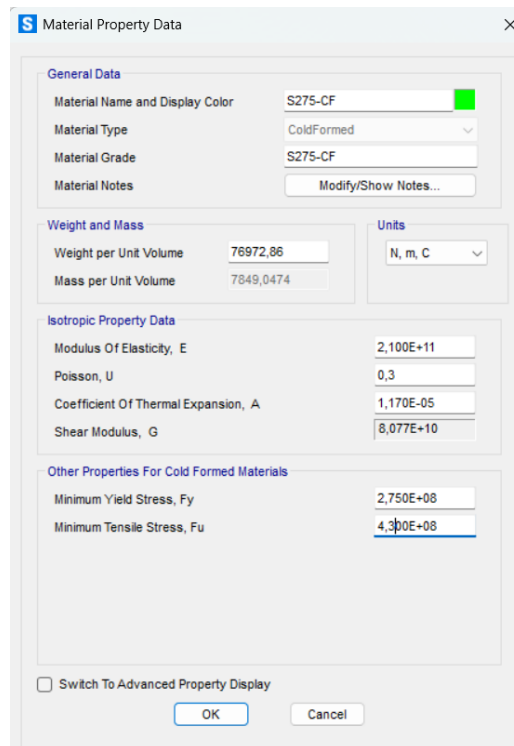


Figura 25: Propiedades del acero S275

3.8. Definición de perfiles y creación de “Auto Select List”

El programa SAP2000 contiene una gran biblioteca con los perfiles más utilizados, dependiendo de las necesidades del diseño se importarán desde las bases del programa las secciones necesarias. El programa dispone de una biblioteca en función del país/continente donde se vaya a realizar el proyecto, en este caso Europa. Una vez que se hayan importado los perfiles necesarios, estos se podrán atribuir a las barras que se creen para la estructura.

Para definir las secciones se seguirá la ruta “Define” / “Section Properties” / “Frame Sections”. Se abrirá una pestaña como la Figura 26 en donde se hará clic en el botón “Import New Property” y aparecerán las siguientes opciones por tipo de familia (“Steel”, “Concrete”, “Aluminium” y “Others”) y luego se asignará el material a las secciones creadas.

Al pinchar una de las opciones que aparece en la Figura 26 se abrirá una ventana de Microsoft dónde se elegirá el país/continente en el que se vaya a trabajar. Esto solo ocurrirá la primera vez, aunque si se desea cambiar de fichero del país/continente se deberá de hacer clic en el botón “Open File” y se accederán a los datos de la caché que se descargan junto con el programa. A continuación, se explicará cada tipo de sección. Primero se empezarán por las opciones dentro de la familia “Steel”.

Dentro de la familia “Steel” se observan las diferentes geometrías atribuidas por defecto a cada familia según la región escogida. En este caso no se utilizarán debido a que no es el material escogido para el proyecto.

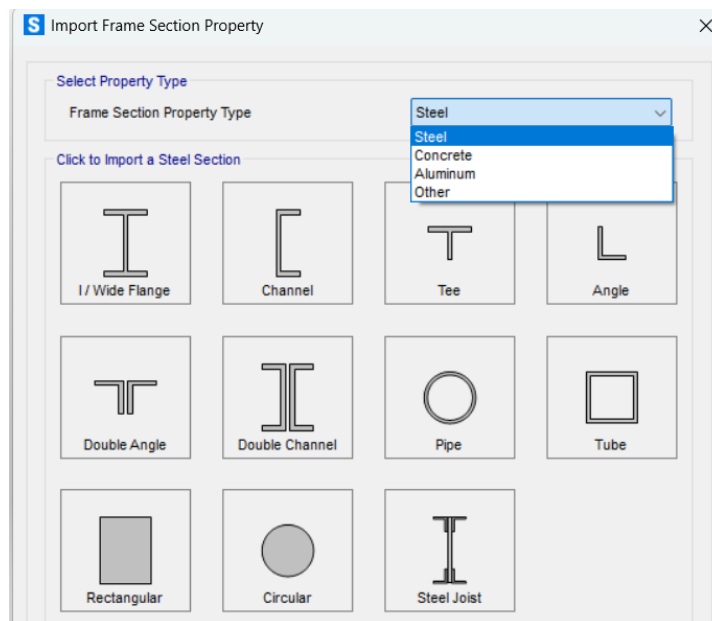


Figura 26: Tipos de secciones en función del material

Secciones de hormigón (“Concrete”)

En la Figura 27 se puede apreciar las diferentes geometrías que están asignadas a la familia (“Concrete”), estas secciones tipo serán muy útiles a la hora de proyectos de obra civil para calcular los pilares y vigas de hormigón. En este caso no se utilizarán debido a que no es el material escogido para el proyecto.

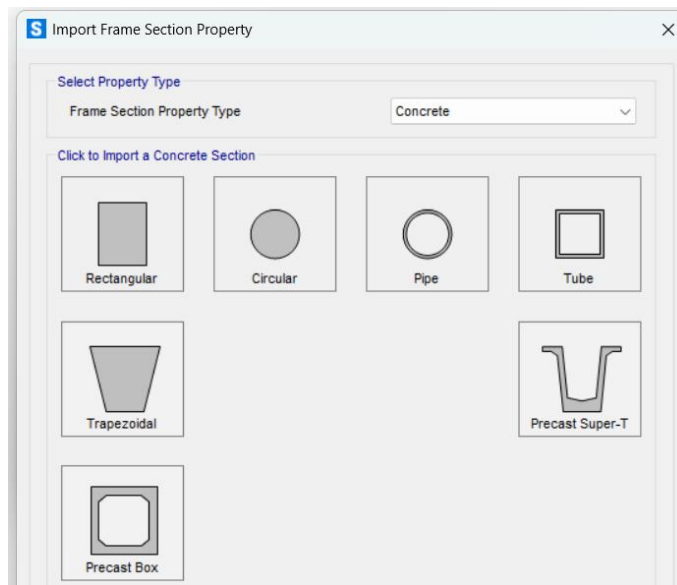


Figura 27: Tipos de perfiles existentes en el material: Hormigón

Secciones de aluminio (“Aluminium”)

Esta familia es similar a la familia “Steel”, pero existen menos opciones de tipologías de secciones como se puede observar en la Figura 28, debido a la poca rigidez de este material y a que se utiliza principalmente para otras aplicaciones. En este caso no se utilizarán debido a que no es el material escogido para el proyecto.

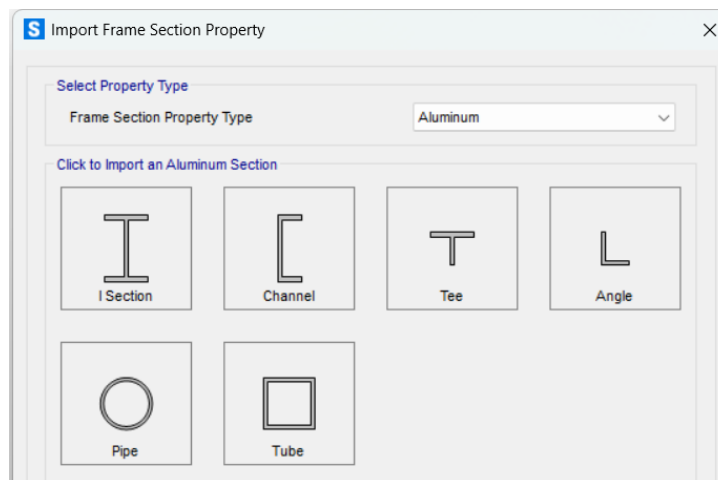


Figura 28: Tipos de perfiles existentes en el material: Aluminio

Otras secciones (“Others”)

Solamente hay una opción en esta familia debido a que se pueden generar las condiciones de la geometría a gusto del usuario definiendo las dimensiones de esta. En la Figura 29 se puede observar la ventana de perfiles existentes. En este caso no se utilizarán debido a que no es el material escogido para el proyecto.

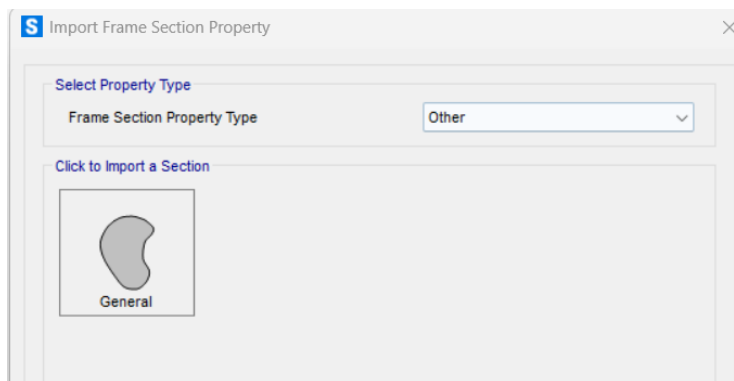


Figura 29: Tipos de perfiles existentes en el material: Otras secciones

Conformado en frío (“Cold Formed”)

Esta familia solamente aparece cuando se da al botón “Add New Property”. Una vez pulsando ese botón se abrirá una ventana y se seleccionará la familia “Cold Formed” como aparece en la Figura 30. Se aprecia que hay multitud de perfiles predefinidos para esta familia.

En este proyecto se ha decidido que las barras sean la sección de tubo rectangular conformado en frío. A continuación, se explicará cómo generar esa sección.

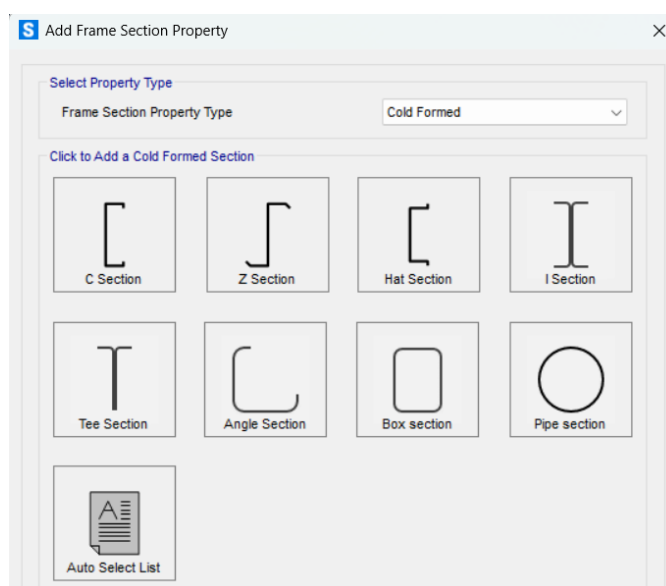


Figura 30: Tipos de perfiles existentes en el material: Cold Formed

En la ventana de “Frame Properties” de la Figura 31 se ha marcado “Add New Property”/”Frame Section Property Type”/”Cold Formed”, como en la Figura 32, donde se pueden apreciar todas las geometrías que están asignadas a la familia “Cold Formed”.

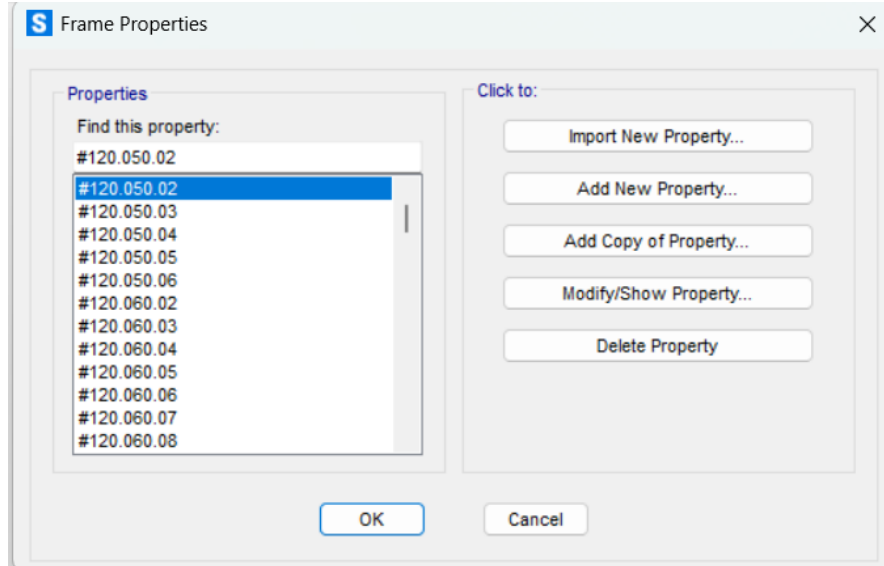


Figura 31: Ventana propiedades de la sección de la barra

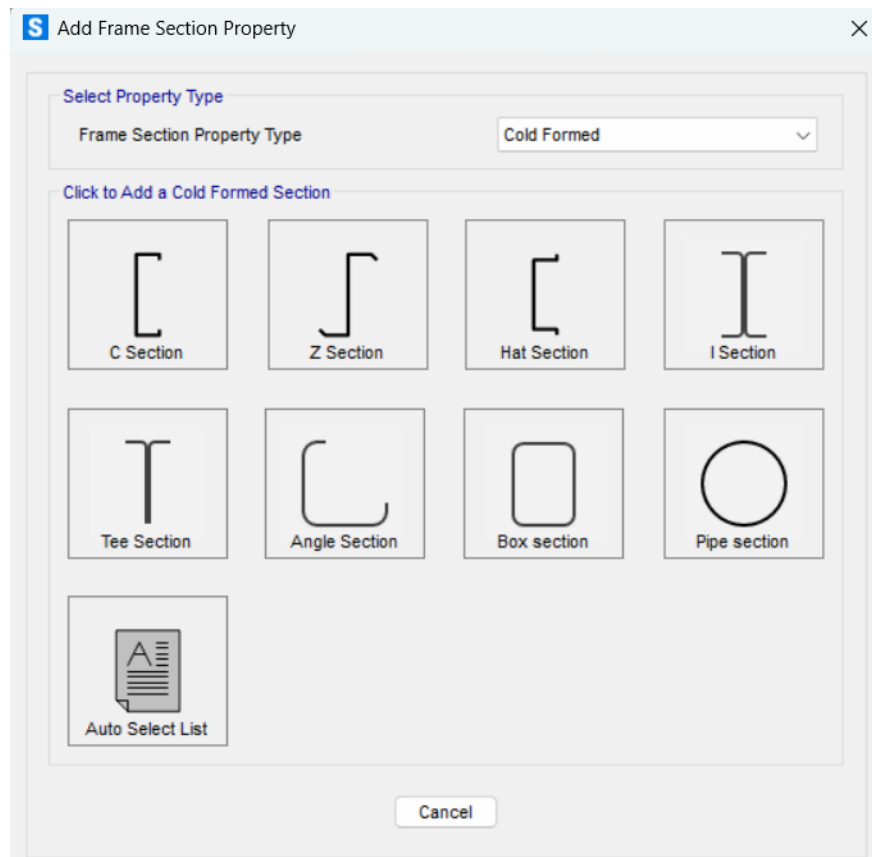


Figura 32: Tipos de perfiles existentes en el material: Cold Formed

Ahora eligiendo la opción “Box Section” de la Figura 32. Se abrirá una ventana como la Figura 33 dónde se ha rellenado la altura, la anchura, el espesor y el radio del tubo. Una vez configurado todo lo anterior se hará clic en “Ok” y de esta forma quedará definido el perfil. Todas las dimensiones de los perfiles se han extraído de un catálogo comercial de cualquier proveedor que tenga esta perfilería. Se crearán muchos perfiles debido a posteriormente se creará una lista de iteración para dimensionar el perfil que soporte las cargas que tiene la cubierta. En este caso se crearán por perfiles de altura 200 mm y anchura 100 mm como aparece en la Figura 33.

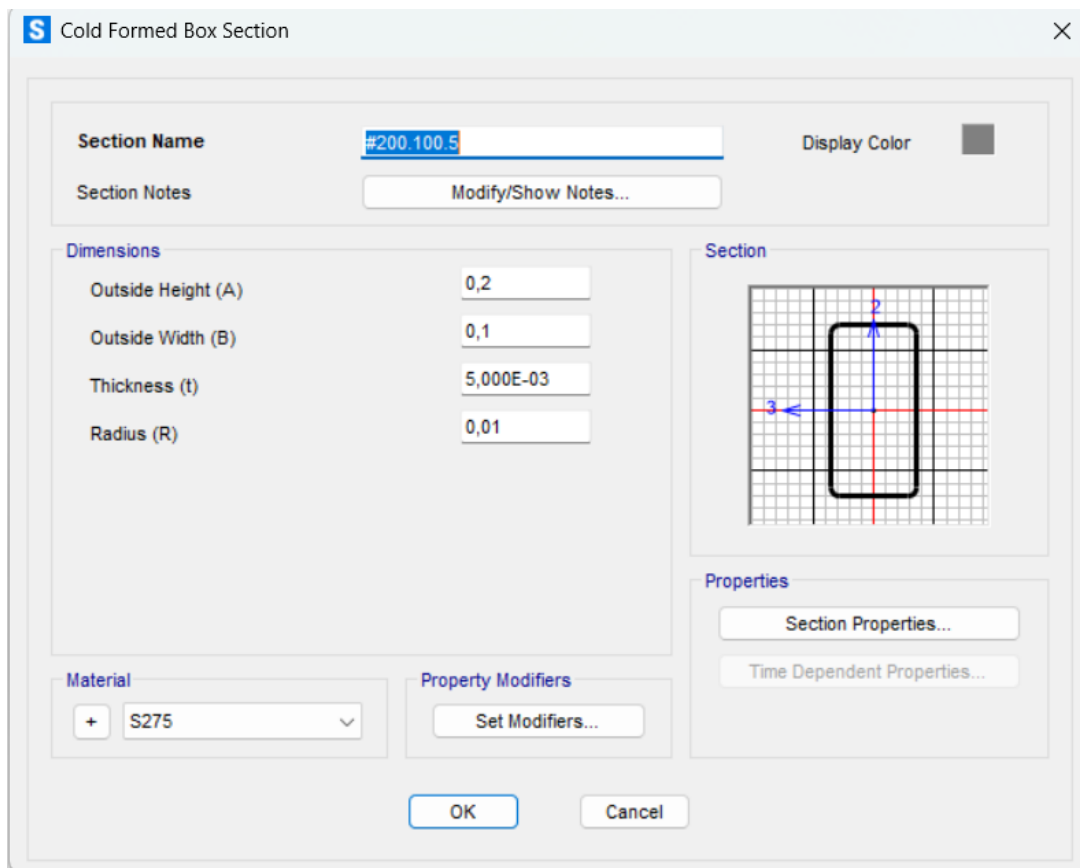


Figura 33: Configuración Box Section Cold Formed

Nota: se recomienda que el nombre del perfil tenga la misma denominación que el comercial, debido a que después se creará una lista de iteración para dimensionar el perfil para las cargas aplicadas sobre la cubierta y así será más fácil saber el perfil al que se refiere en el cálculo. Es importante la nomenclatura debido a que se puede saltar algún perfil si no está nombrado correctamente.

A continuación, se hará hincapié en la sección “Auto Select List” que aparece en la familia del “Cold Formed” que está marcada en la Figura 34. Esta herramienta creará una lista con los perfiles que tengan el material asignado

de “Cold Formed” para que después el programa itere con los perfiles para extraer cuál es el más favorable para las cargas aplicadas sobre la cubierta.

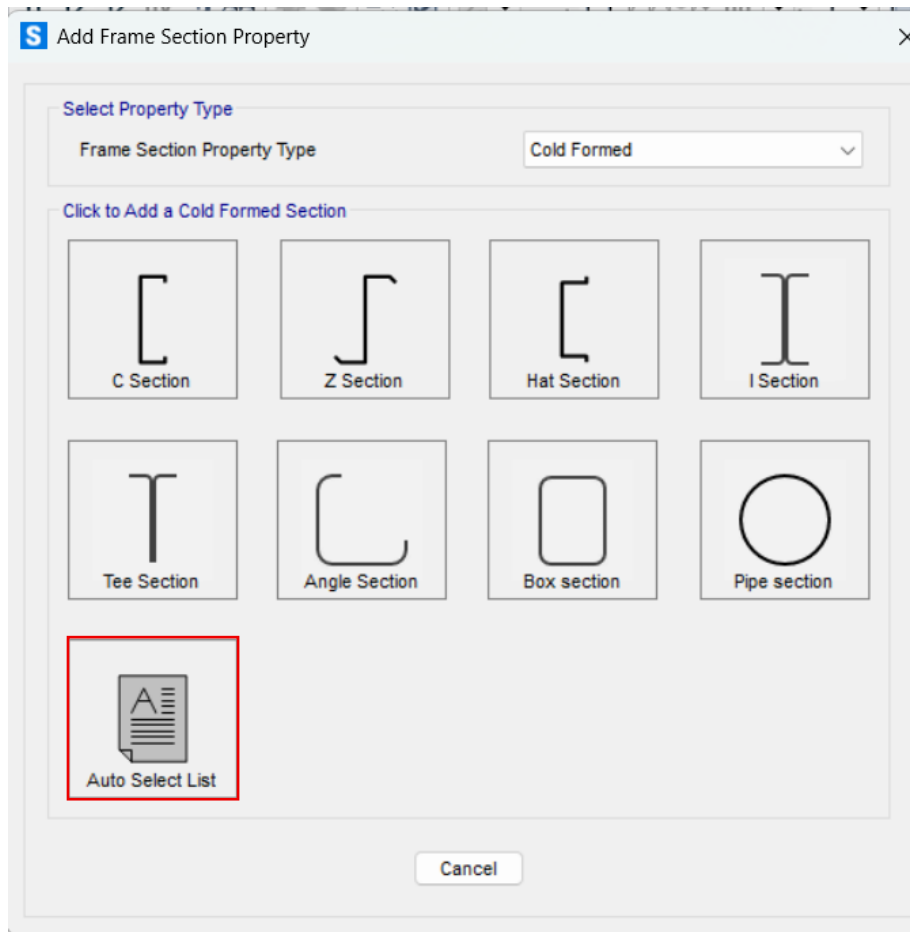


Figura 34: Propiedades de la sección "Auto Select List"

Al marcar esta opción saldrá una nueva ventana, como la Figura 35, con dos columnas:

- “List of Sections”: en esta tabla aparecen todos perfiles que se han creado para el proyecto.
- “Auto Selections”: son todos los perfiles que se utilizarán en la lista de iteración.

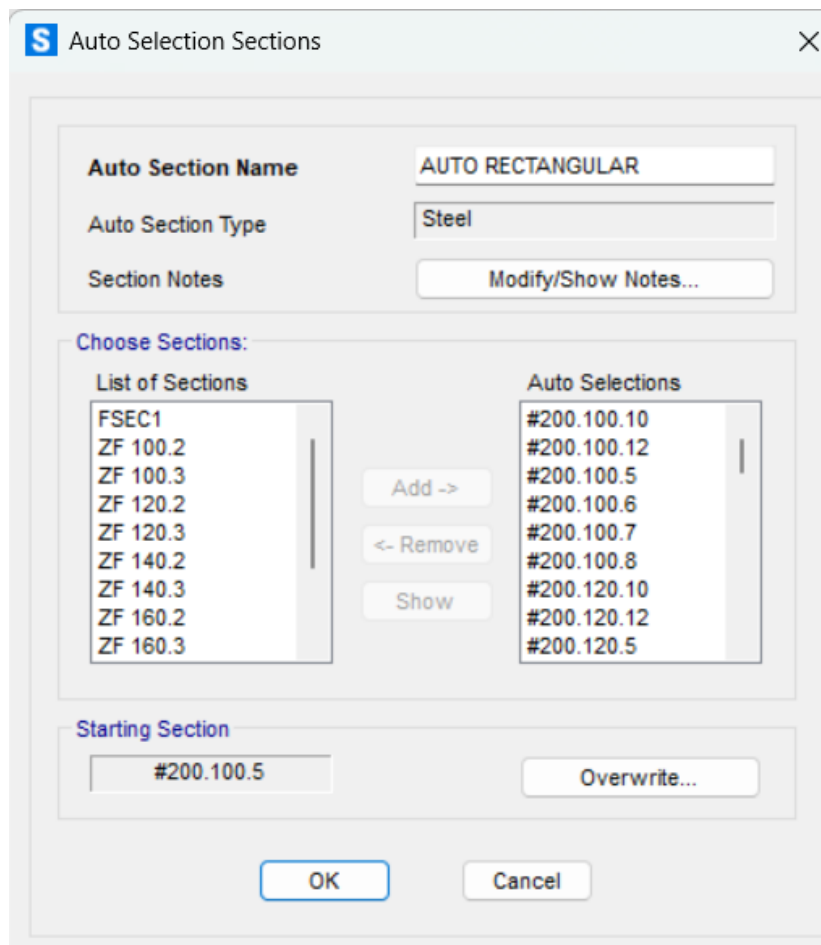


Figura 35: Ventana configuración Auto Selection Sections

Primero se marcarán los perfiles que se encuentran en la columna de la izquierda, se pasarán a la columna de la derecha y se hará clic en el botón “Add”. Después se definirá con qué perfil se quiere empezar la iteración, para ello se pulsará el botón “Overwrite” y se elegirá con qué perfil se iniciará la iteración. Una vez hecho todo lo anterior se hará clic en “OK”.

En este caso se recomienda que los elementos estén ordenados correctamente en función de la característica que interese (área, I_y , I_z , J , ...). Entonces cuando el SAP2000 baje por la lista se encontrará con un perfil válido, pero al no estar integrado en la biblioteca del programa existe el riesgo de que salte un perfil con dimensiones menores, pero con un espesor mayor debido a la nomenclatura. Por lo tanto, en este caso se introducirán los perfiles dentro de la lista de iteración con la misma anchura y altura, pero cambiando los espesores para no correr dicho riesgo, como se muestra en la Figura 36, donde se han introducido todos los perfiles de tubo rectangular #200.100 y los espesores de 3 hasta 12 mm.

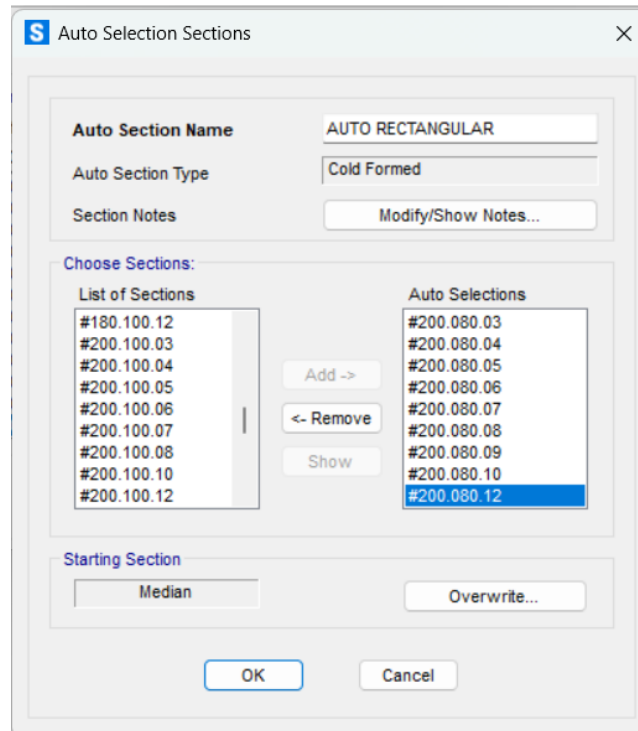


Figura 36: Recomendación de configuración Auto Selection List

De igual forma, cuando se emplea perfiles tipo IPE el programa sigue la lista correctamente y no es necesario que se agrupen las secciones como en este caso.

Nota: es importante remarcar que se podrán añadir tantos perfiles como se quiera y existe la posibilidad de repetir este proceso las veces que se quiera, incluso incluir unas listas de iteración en otras. Esto último se desaconseja, debido a que en el cálculo habrá muchos más datos y aumentará el tiempo de cálculo. Se recuerda que es importante la nomenclatura a seguir con los perfiles, para evitar los problemas respecto a si saltan elementos por la nomenclatura.

3.9. Definición de Patrones/Casos y Combinaciones de Carga

En el menú “Define” existen tres apartados para definir lo relativo a las cargas en SAP2000, como se observa en la Figura 37. A continuación, se explicará cada apartado.

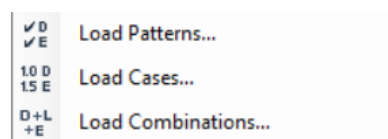


Figura 37: Apartados para definir las cargas

Patrones de carga “Load Pattern”

Los **patrones de carga** serán las distintas **cargas que actuarán en el modelo** como por ejemplo las acciones permanentes (pretensado, acciones del terreno), acciones variables (sobrecarga de uso, acciones sobre barandillas y elementos divisorios, viento, acciones térmicas y nieve) y las acciones accidentales (sismo, incendio e impacto).

Se abrirá la siguiente ventana como la Figura 38 y habrá que definir las siguientes propiedades para cada carga:

- “*Load Pattern Name*”: es el nombre de la carga que se creará.
- “*Type*”: es tipo de carga que se crea. Existen las siguientes opciones: “*Dead*,” “*Live*,” “*Roof Live*,” “*Quake*,” “*Wind*,” “*Snow*,” “*Sea State*” y “*Other*”. En este caso solamente se va a tener la sobrecarga de uso que es la carga más desfavorable y es de tipo “*Other*”. El factor multiplicador será igual o mayor a 1 en las cargas como peso propio, en conclusión
- “*Self Weight Multiplier*” es el factor multiplicador de peso propio. En todas aquellas cargas que sean tipo “*DEAD*” tendrá el valor de 1 y en el resto de los casos, el factor multiplicador deberá ser 0 para que no se contemple el peso propio de nuevo.
- “*Auto Lateral Load Pattern*” es el listado de normas que se utilizan para las cargas tipo “*Wind*,” “*Quake*” y “*Sea State*”. No se va a entrar en detalle debido a que no se utilizarán en este proyecto.

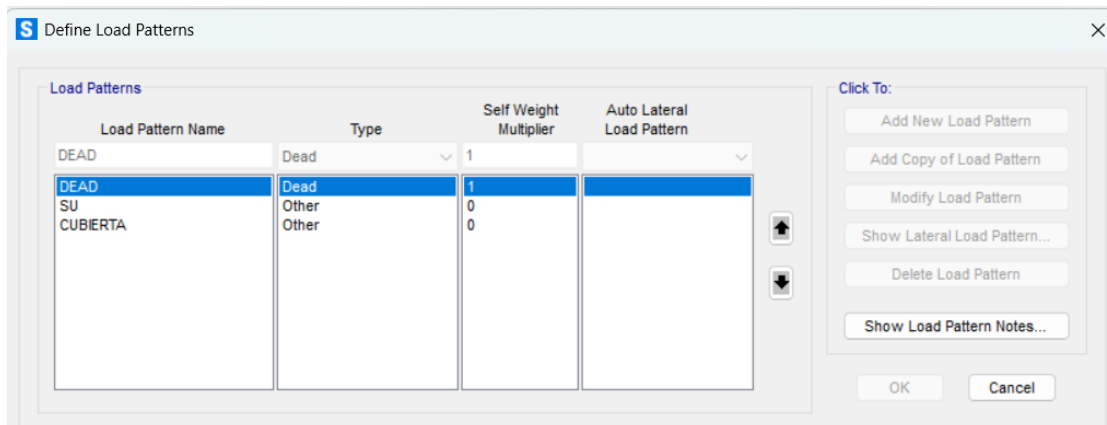


Figura 38: Definición patrones de carga

En este proyecto se crearán los patrones de carga SU, que hace referencia a la sobrecarga de uso y CUBIERTA referido al peso del panel y otros elementos que actúan de forma constante en el tiempo. El valor de la sobrecarga de uso es de 1 kN/m². Este valor se ha definido al principio del capítulo en el apartado 3.3 y el valor de los elementos de la cubierta se ha estimado en 300 N/m².

Casos de carga “Load Cases”

En el menú “Define” /” Load Cases” se abrirá una ventana como la Figura 39. En esta ventana se añadirán los casos de carga y se definirá el tipo del caso de carga para los patrones de carga definidos previamente. Los casos “DEAD” y “MODAL” vienen creados por defecto. El caso “DEAD” ejecutará un análisis estático de la estructura actuando como carga solamente el peso propio de la estructura y en el caso “MODAL” se realizará un análisis modal que no es objeto de estudio de este trabajo.

El programa crea de forma automática un caso de carga estático lineal (“Linear Static”) asociado al patrón de carga.

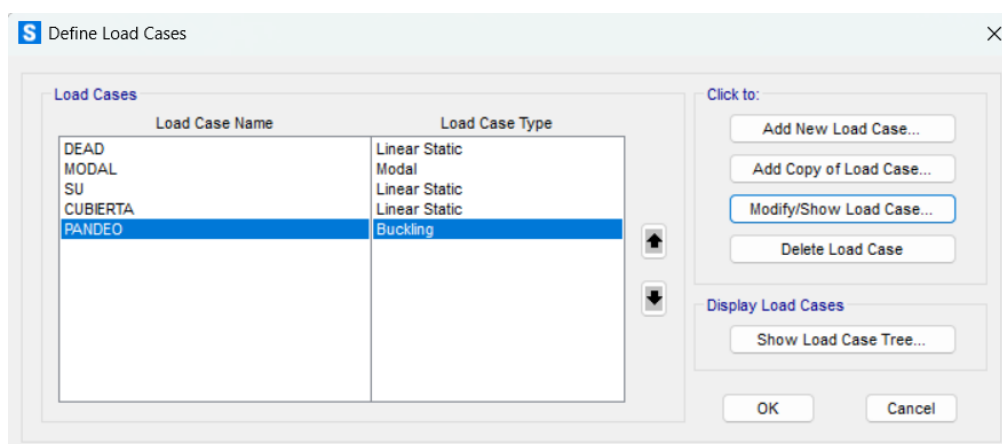


Figura 39: Definición casos de carga

A mayores se ha creado un nuevo caso de carga llamado PANDEO, para ello se crea haciendo clic en el botón “Add New Load Case”. Se inicia una pestaña como la Figura 40 donde en el apartado “Load Case Type”, este se encuentra a la derecha y el tipo de caso de carga es “Buckling” para realizar un análisis de pandeo y obtener la carga crítica. Después, en la tabla que aparece en la parte izquierda de la ventana, en la Figura 40, se añadirán los casos de carga CUBIERTA, DEAD Y SU. Debido a que cuando se realice el análisis del pandeo solo se puede realizar mediante casos de carga y no con combinaciones de carga. De momento no se profundizarán con los factores multiplicativos.

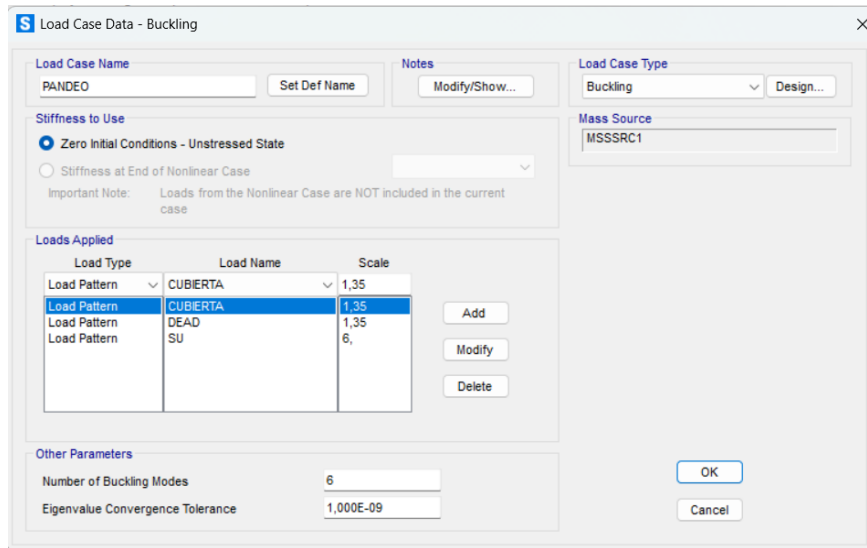


Figura 40: Modificación casos de carga

Combinaciones de carga “Load Combinations”

Primero se definirán los tipos de combinaciones de carga que presenta el programa y después se creará la combinación de carga que se aplicará.

Tipos de Combinaciones:

- “Linear Add”: los resultados de todos los distintos casos de carga se multiplicarán por su factor y se sumarán incluyendo su signo. Esto se utilizará en cargas gravitacionales, de viento o sísmicas.
- “Envelope”: se realiza una envolvente de máximos y mínimos de los casos de carga creados para cada resultado de los elementos y puntos del modelo.
- “Absolute Add”: se suman todos los resultados aplicando la raíz cuadrada de los valores al cuadrado.
- “SRSS”: todos los resultados de los casos o combinaciones son sumados de manera positiva.
- “Range Add”: se crea un informe “Máximo” proveniente de la suma de los valores máximos positivos que contribuyen. Y también genera un informe mínimo negativo de la suma de los valores mínimos negativos.

En la nueva combinación de carga se involucrarán las caras DEAD, CUBIERTA y SU. Se ha estimado que la Ecuación 2 será la siguiente:

$$1,35 \text{ DEAD} + 1,35 \text{ CUBIERTA} + 1,5 \text{ SU} \quad (2)$$

A continuación, se explicará el modo a proceder. Para ello en el menú “Define” se elegirá la opción patrones de carga “Load Combinations”. Estos

combinan los resultados de los distintos casos de carga. Se creará un caso de combinación de carga en el botón “Add New Combo” llamado DESFAVORABLE, como se muestra en la Figura 41. En la tabla que se encuentra al final de la ventana se añadirán la carga DEAD, SU y CUBIERTA cada una con el valor de “Scale Factor” de 1,35; 1,5 y 1,35 respectivamente.

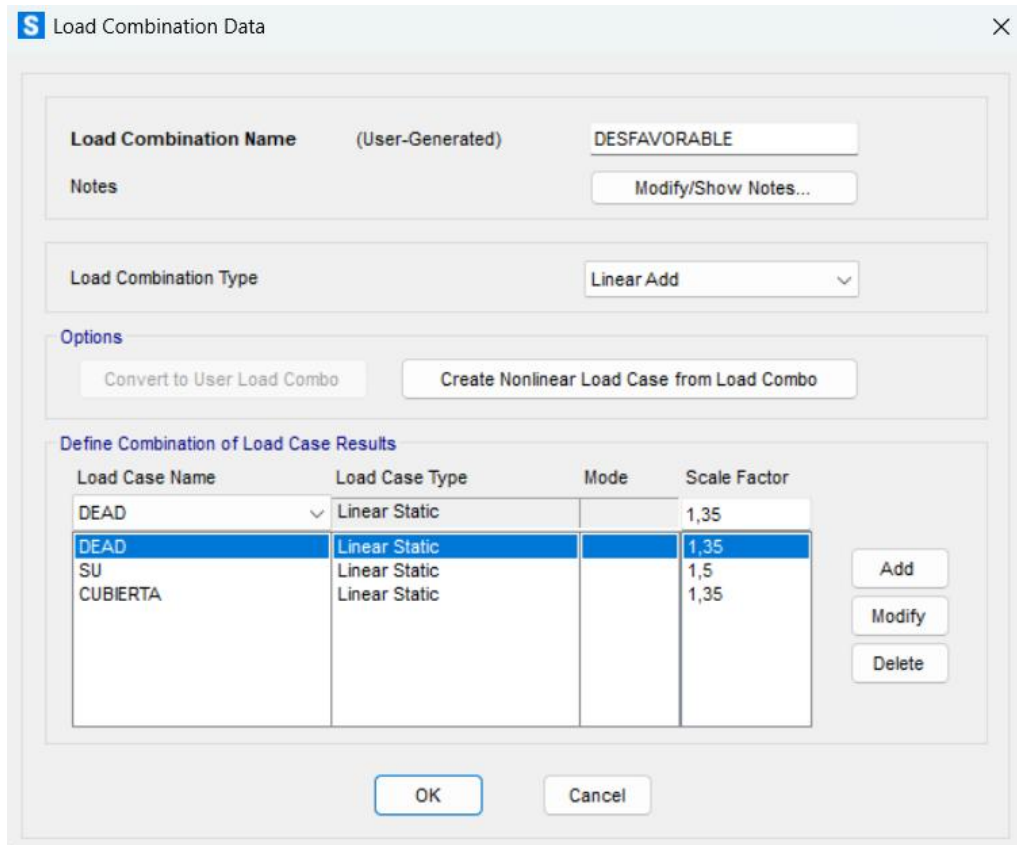


Figura 41: Configuración combinación de carga

3.10. Creación de la estructura

Una vez ya definidos la rejilla, el material, las secciones y las cargas del modelo, el siguiente paso será modelar la geometría del problema. Para ello SAP2000 tiene las siguientes herramientas en el lateral izquierdo de la pantalla o en el menú en la pestaña “Draw”, como se ve en la Figura 42.

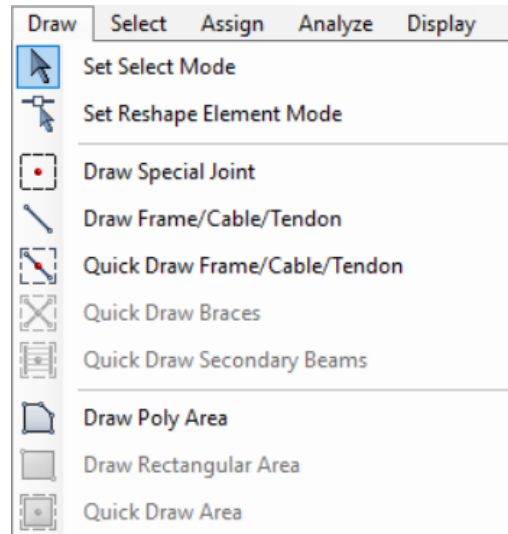




Figura 42: Herramientas pestaña Draw

-  “Draw Frame/Cable/Tendon”: esta herramienta se utilizará cuando la barra/cable/tendón que se quiera crear no coincida con una línea de la rejilla. Siempre se podrá crear una línea basando sus extremos en los nodos de la rejilla.
-  “Quick Draw Frame/Cable/Tendon”: esta herramienta se utilizará cuando la barra coincida con una línea de la rejilla. Para crear la barra se hará clic en la línea de la rejilla y se creará la barra.

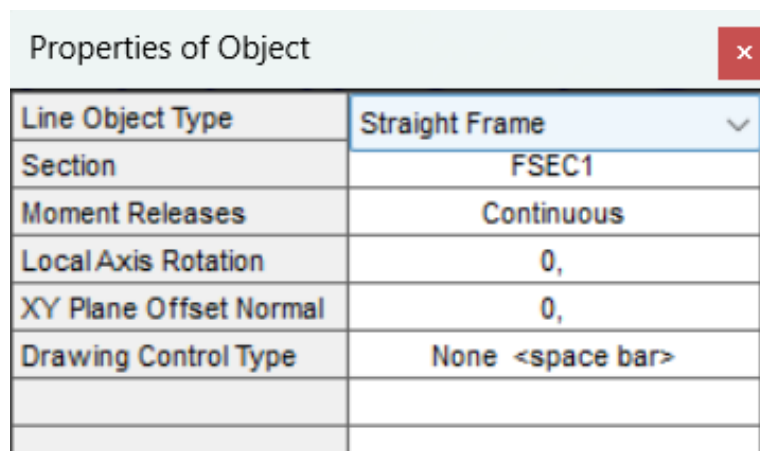
Con las herramientas “Draw Frame” o “Quick Draw Frame” se abrirá un cuadro de diálogo con las siguientes opciones como se muestra en la Figura 43:

- “Line Object Type”:
 - “Straight Frame”: se creará una barra recta.
 - “Curved Frame”: se creará una barra curva.
 - “Cable”: se creará un cable. Este elemento trabajará solamente a tracción o compresión.
 - “Tendon”: se creará un cable que estará pretensado.
- “Section”: se asignará el tipo de sección que tendrá esa barra.
- “Moment Releases”: definirán si los extremos son continuos (“Continuous”) o existen rótulas en los extremos (“Pinned”).
- “Local Axis Rotation”: se define si hay rotación de los ejes locales.
- “XY Plane Offset Normal”: Distancia perpendicular al plano
- “Drawing Control Type”: si se elige la herramienta “Draw Frame” se desbloquean las siguientes opciones de control del dibujo para generar diferentes barras sin necesitar la rejilla:
 - “Horizontal”

- “Vertical”
- “Parallel to Angle”: se crea una barra paralela a un ángulo
- “Fixed Length” se crea una barra con una longitud ya definida.
- “Fixed Length and Angle” se crea una barra con una longitud y ángulos fijados.

Los dos últimos apartados no servirán cuando la rejilla no coincide con la longitud y el ángulo que se necesita. La sección y la rotación local de los ejes son propiedades que se pueden cambiar posteriormente en caso de haberse hecho de forma incorrecta.

Para el botón “Quick Frame Sections” tiene menos opciones debido a que se crea la barra siguiendo la propia línea de la rejilla del modelo.



Properties of Object	
Line Object Type	Straight Frame
Section	FSEC1
Moment Releases	Continuous
Local Axis Rotation	0,
XY Plane Offset Normal	0,
Drawing Control Type	None <space bar>

Figura 43: Propiedades de las herramientas Frame

-  “Quick Draw braces”

Esta opción es rápida a la hora de dibujar unos tirantes. Se abrirá el siguiente cuadro de diálogo de la Figura 44:

- “Section”: se elige la sección que se asignará a la nueva barra.
- “Moment Releases”: definirán si los extremos son continuos (“Continuous”) o existen rótulas en los extremos (“Pinned”).
- “Local Axis Rotation”: se define si hay rotación de los ejes locales
- “Bracing”: se elige la tipología de los tirantes.
 - X
 - “Inverted V” (V Invertida): teniendo opción de definir las coordenadas de las juntas.
 - V
 - “Eccen Back” (Viga inferior)
 - “Eccen Forward” (Viga superior)

Properties of Object	
Section	FSEC1
Moment Releases	Continuous
Local Axis Rotation	0.
Bracing	X
	X
	Inverted V
	V
	Eccen Back
	Eccen Forward

Figura 44: Propiedades de la herramienta "Quick Draw Braces"

Una vez explicadas las opciones que existen para crear una barra se procederá a la creación de la estructura de la cubierta. Primero se creará la viga principal del modelo con la herramienta "Draw Frame" debido a que la dirección de la barra no seguirá el recorrido de la rejilla. Sin embargo, se ha de apoyar en dos puntos de la rejilla: el nodo del corte de la rejilla D con 1 haciendo clic en el botón izquierdo del ratón; y después se hará clic en el nodo que corta con las líneas de rejilla B con Z en 3,75. La barra debería quedar como en la Figura 45.

Nota: Es **importante** que a la hora de crear barras **se sigan siempre las mismas pautas** de izquierda a derecha y de abajo arriba para que los ejes de las barras estén correctamente y después no haya problemas con los diagramas una vez se haya realizado el cálculo del modelo.

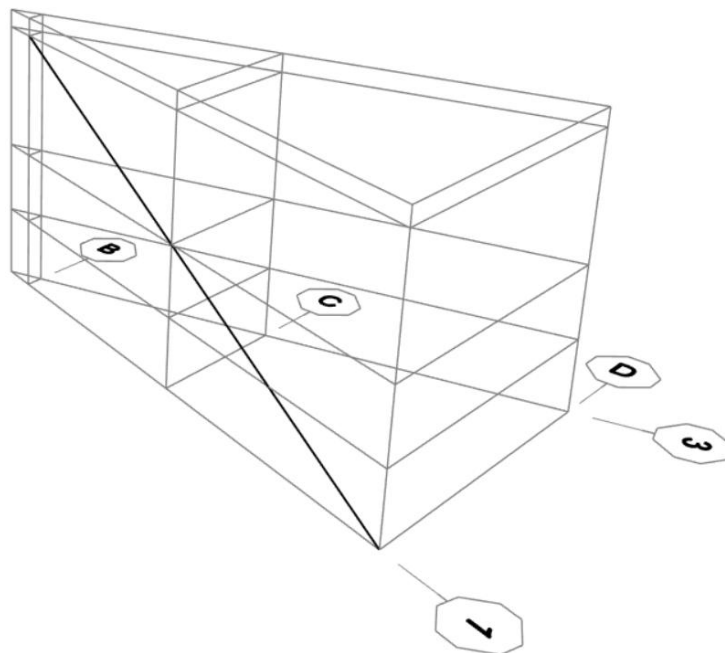


Figura 45: Creación viga principal de la cubierta

Una vez creada la viga radial principal, se crearán las siguientes 3 barras con la herramienta *"Quick Frame Sections"* como se muestra en la Figura 46. Estas barras creadas serán los distintos anillos que conformarán la cubierta. El primer anillo será donde se ubique la cumbrera, el siguiente será el anillo intermedio y el último será el zuncho. Sobre este se encontrarán los apoyos de la cubierta. Esta geometría se explicó previamente en el apartado 3.2 Esqueleto de la cubierta.

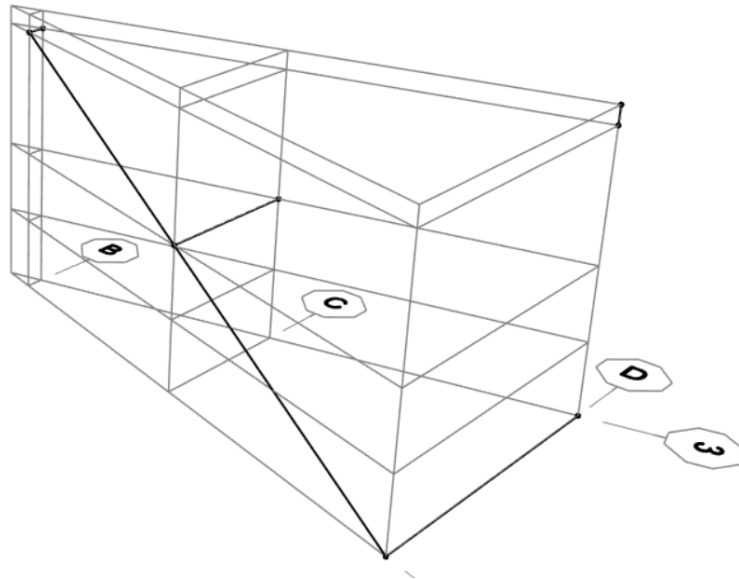


Figura 46: Generación barras con herramienta "Quick Frame"

Después se creará la viga radial secundaria. Para ello primero se deberá dividir en dos trozos el anillo intermedio y el zuncho para que los extremos de la nueva barra estén correctamente unidos y así no cometer el fallo de que se crucen en el espacio y no funcione correctamente el modelo.

Para dividir las barras en dos tramos se tendrán que seleccionar previamente las barras, se seguirá la siguiente ruta: *"Edit" / "Edit Lines" / "Divide Frames"* y se abrirá una ventana como en la Figura 47 donde se marcará la opción *"Divide into Specified Number of Frames"* y se escribirá el valor de 2 en la opción *"Number of Frames"*. Después se hará clic en *"Ok"* y aparecerán las barras divididas como en la Figura 48. La herramienta que se acaba de utilizar permite: dividir las barras en el número de lados que se quiera, romper la intersección con los elementos seleccionados, dividir las barras en función de una longitud, dividir con la intersección de un plano y dividirlo con la intersección con las líneas de rejilla.

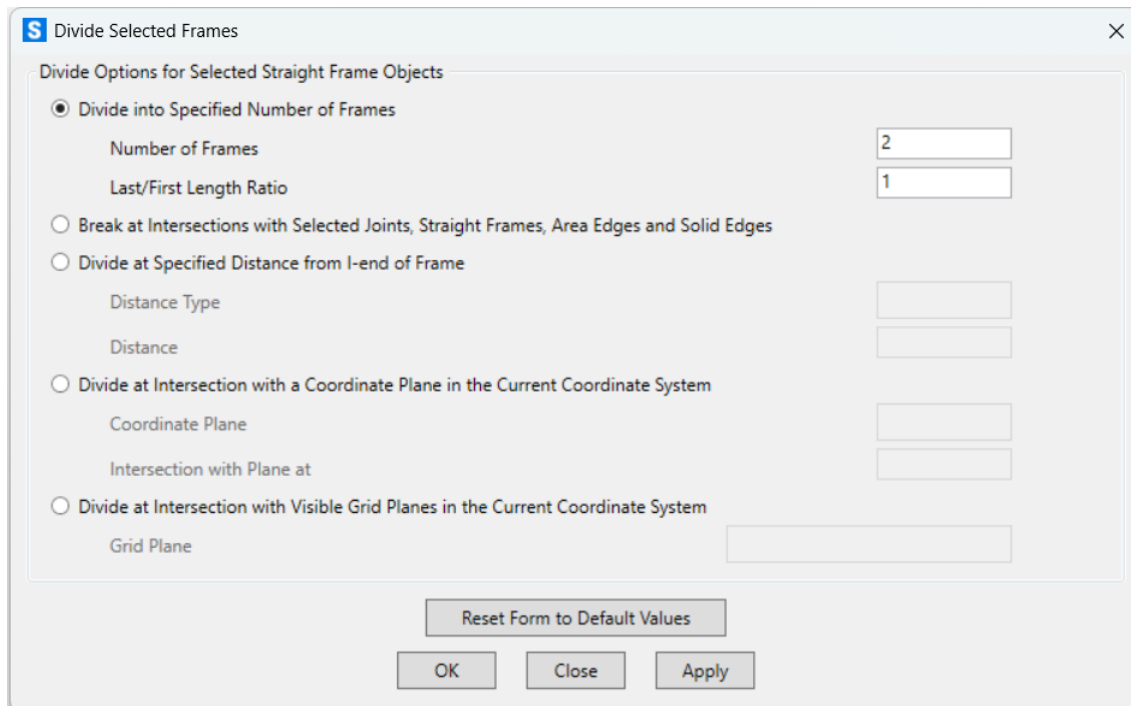


Figura 47: Dividir barras

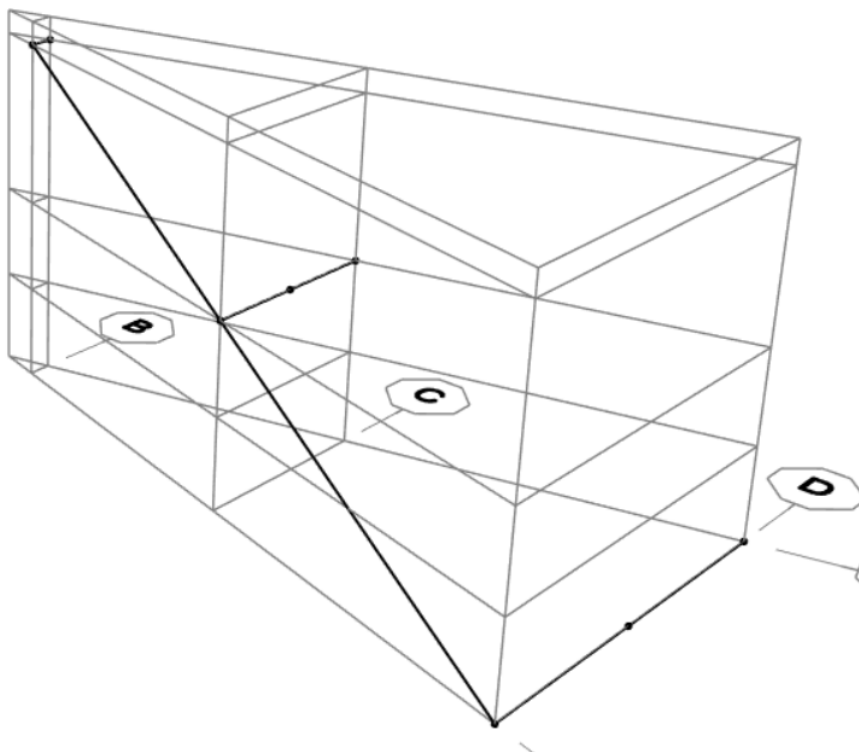


Figura 48: Esqueleto con las barras divididas

Después con la herramienta “Draw Frame” se creará la viga secundaria que irá entre los dos nodos creados tras la división de las barras y siguiendo la dirección de abajo a arriba o la misma que se haya seguido con la viga radial principal. El esqueleto debería quedar como en la Figura 49.

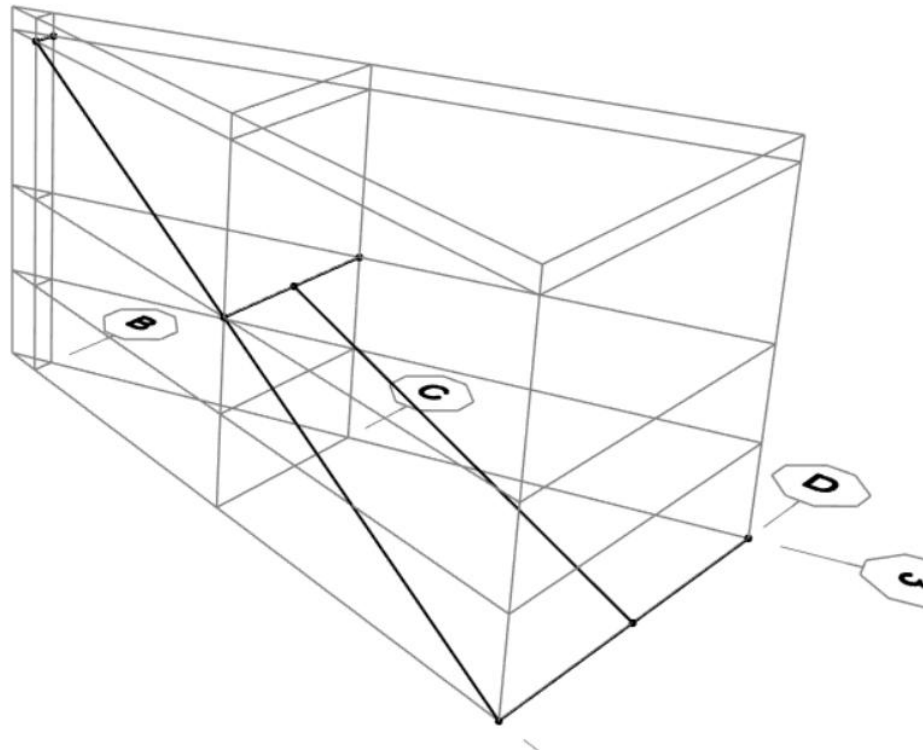


Figura 49: Esqueleto base

3.11. Replicación de la estructura

Ahora se procederá a realizar una réplica de forma radial de la estructura para agilizar el modelado. Con toda la estructura seleccionada se seguirá la siguiente ruta: "Edit" / "Replicate" y aparecerá una ventana como la Figura 50. En esta ventana se deberá marcar la opción "Radial" y poner los siguientes valores que se muestran en la Figura 50. El número de veces que se va a replicar la estructura es N-1 debido a que ya se ha realizado una porción. Y para finalizar se hará clic en el botón "Ok" y aparecerá la cubierta como en la Figura 51.

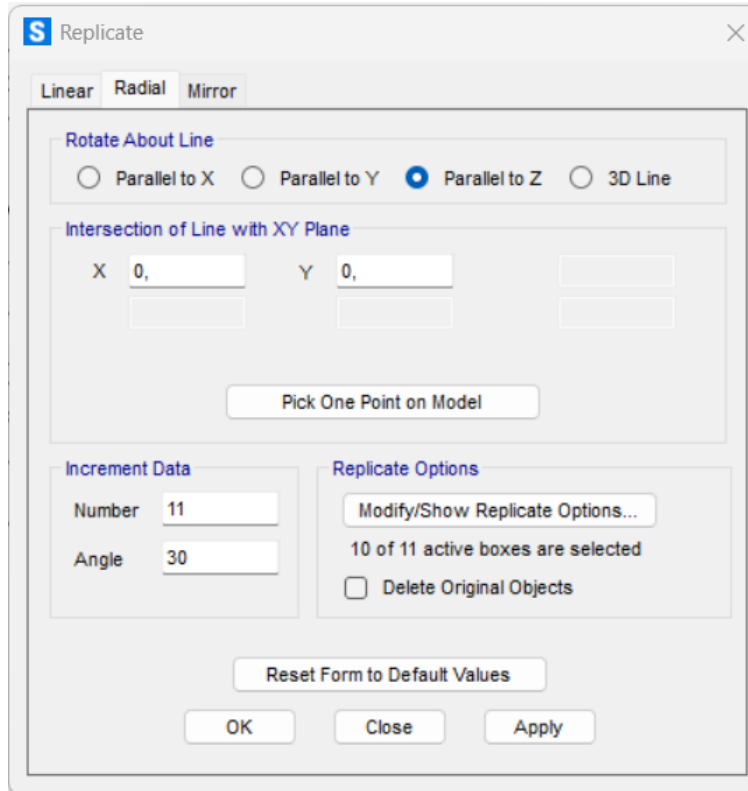


Figura 50: Ventana réplica radial

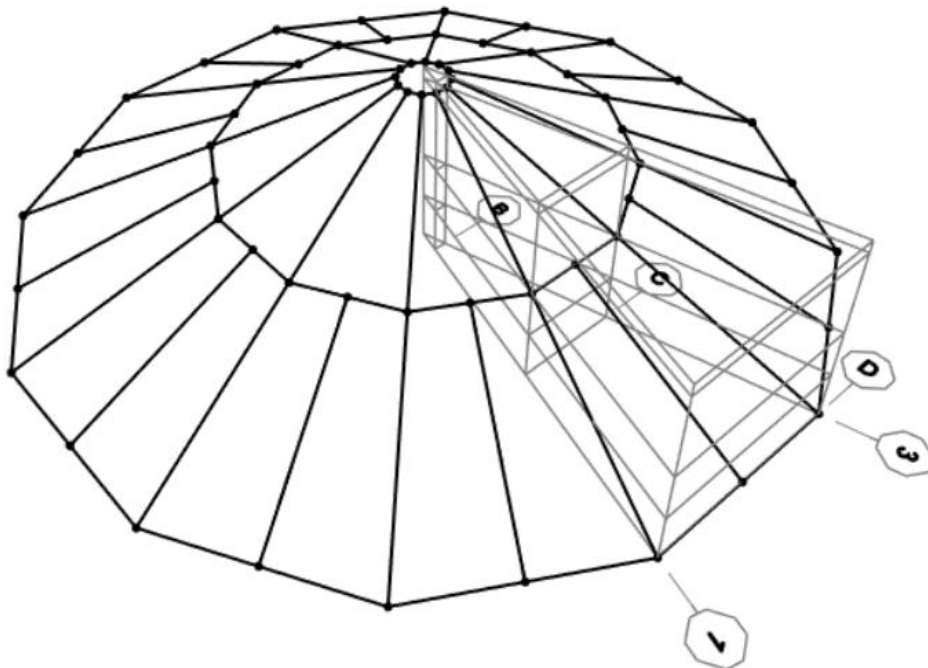


Figura 51: Geometría final de la cubierta

3.12. Rotación de los ejes locales

Ahora se procederá a girar los ejes locales de los nodos para posteriormente definir y asignar las condiciones de contorno de la estructura creada.

Primero se selecciona el icono () "Display Options" para observar los ejes locales de los nodos. Se abrirá una nueva ventana y en el apartado "Joint" se marcará la opción "Local Axes" y después se hará clic en el botón "Ok". Para una visualización más sencilla se marcará el botón "rt" para visualizar la estructura en el plano en Z=0 donde se mostrará el zuncho de la estructura como se aprecia en la Figura 52.

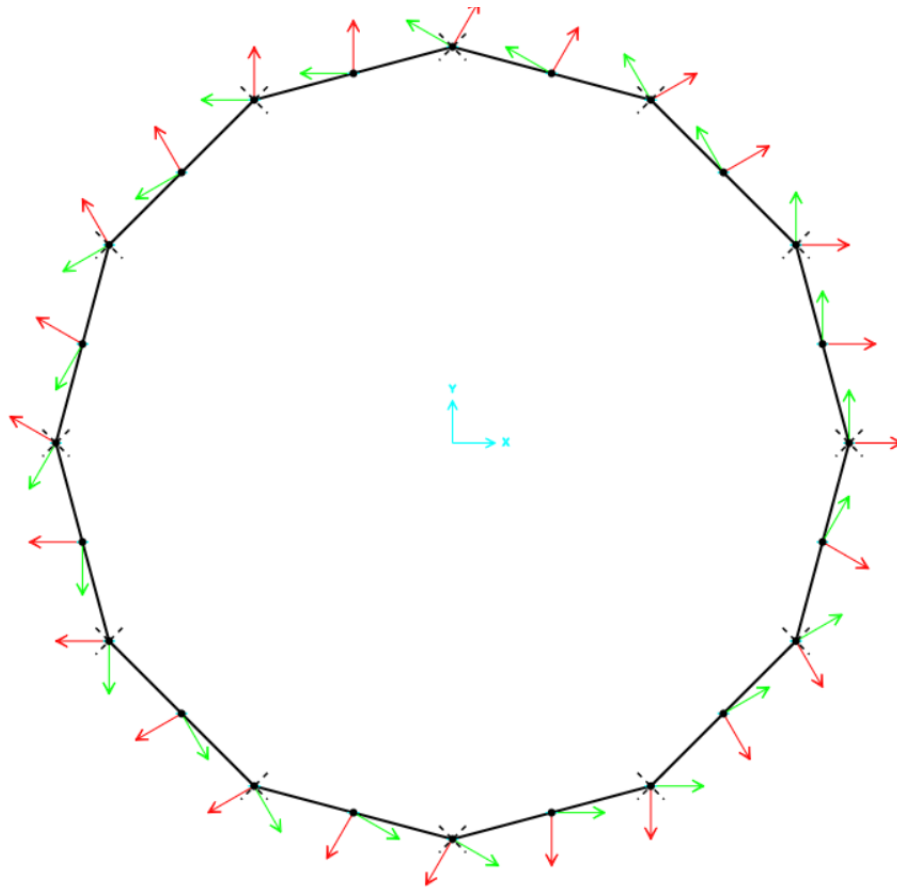


Figura 52: Visibles los ejes locales de los nodos

Para modificar los ejes locales de cada nodo se seguirá la ruta "Assign" / "Joint" / "Local Axes" y se abrirá una pestaña como la Figura 53. Para ello se rotarán 15° los ejes entorno al eje Z por cada nodo que aparece sucesivamente hasta completar los 360° . El resultado final será como en la Figura 54.

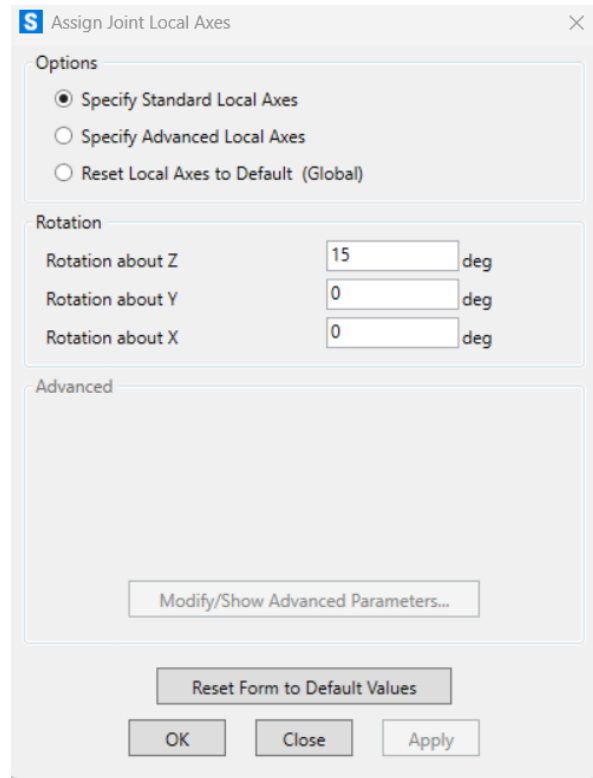


Figura 53: Modificación ejes locales

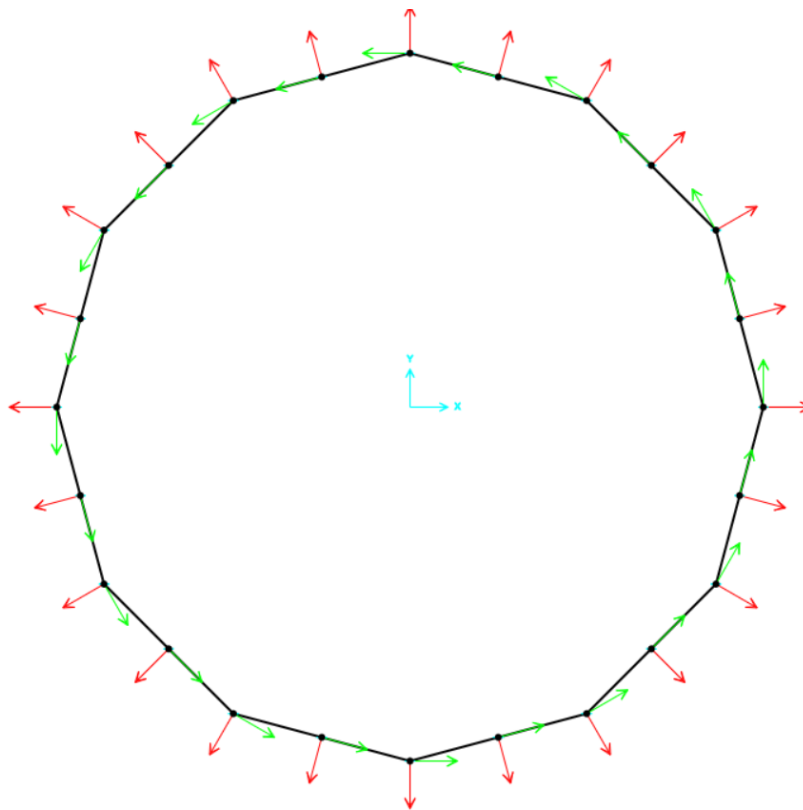


Figura 54: Geometría con ejes locales modificados

3.13. Condiciones de contorno

Ahora se definirán las condiciones de contorno para la cubierta. Este programa entiende las condiciones de contorno como propiedades de un punto (*Joint*). Por lo tanto, se asignarán a los puntos. Los pasos a seguir son: *Assign* / *Joint* / *Restraints* que se puede observar en la Figura 55. Después, aparecerá una ventana donde se pueden apreciar las opciones de apoyos más habituales como *Fast Restraints* como: apoyo móvil, apoyo fijo, empotramiento...); o también se pueden marcar las restricciones de traslación y giros en las direcciones que el usuario quiera que sean cero para su estructura.

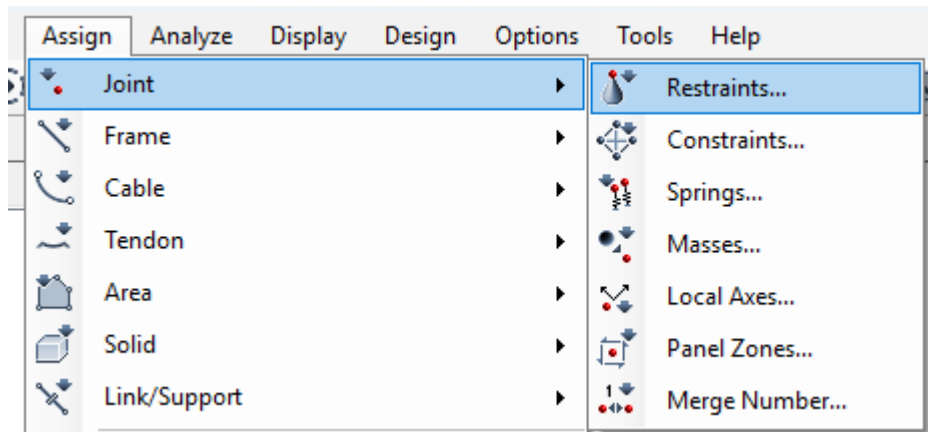


Figura 55: Ruta asignación condiciones de contorno

En este caso, para emular las condiciones de contorno realistas que tendrá el cono encima del depósito, se elegirá poner unos “rodillos radiales” que simulará la deformación que evita el zuncho al estar apoyado sobre el cilindro. Para ello se marcarán previamente los nodos a lo que se quiera aplicar las restricciones de contorno. En este caso estarán marcadas las restricciones de traslación en el eje 2 y el eje 3. Después se marcará *Apply* y *Ok*. La cubierta debería quedar como en la Figura 56 dado que SAP2000 visualiza los nodos donde se hayan aplicado las restricciones.

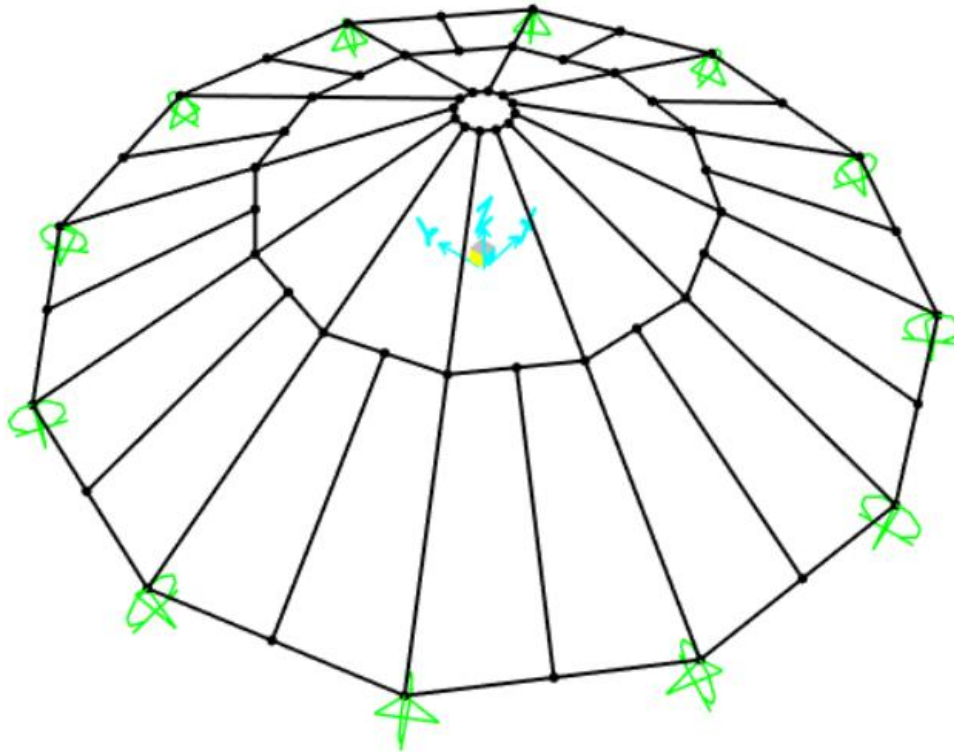


Figura 56: Cubierta con restricciones aplicadas

Nota: Otra forma de asegurarse que se ha hecho todo correctamente es seleccionando el nodo, hacer clic en el botón derecho y se abrirá una ventana como la de la Figura 57. En esta ventana se observan los desplazamientos en las direcciones que tiene impedidas, la ubicación del punto y las cargas aplicadas al mismo. En la Figura 57 también se puede apreciar como solamente se ha restringido el desplazamiento longitudinal en el eje 3 (eje z) y de la misma forma se aprecia cómo se ha rotado 150° respecto al eje Z los ejes locales de la barra.

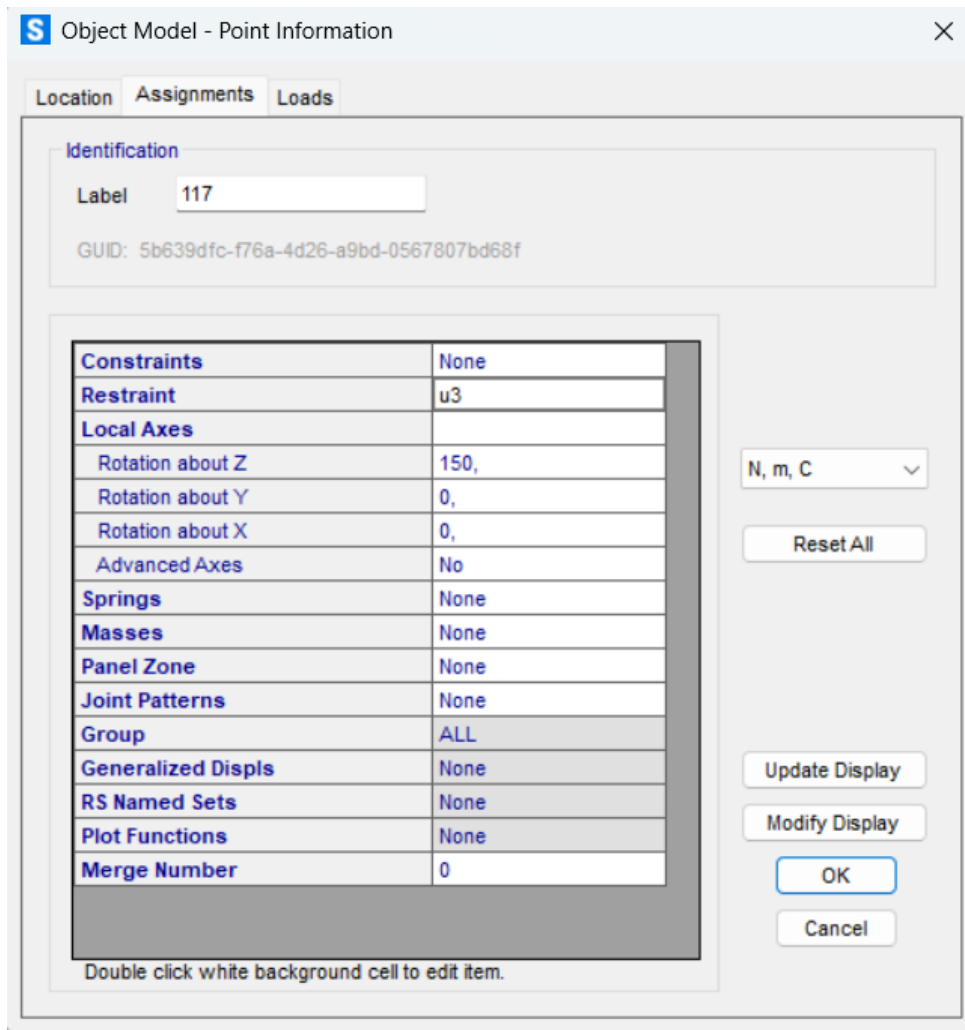




Figura 57: Información del nodo

3.14. Creación de superficies

Ahora se crearán unas superficies donde se aplicarán las cargas para realizar el cálculo de la estructura debido a que sería muy complicado hacerlo por cargas aplicadas sobre barras, como se suele ejecutar cuando se calculan naves industriales. A continuación, se detallarán los pasos a seguir para crear una superficie. Existen las siguientes dos opciones:

-  : “Draw Rectangular Area”: esta herramienta se utilizará cuando la superficie que se quiera crear tenga una forma rectangular.
-  ” Draw Poly Area”: esta herramienta se utilizará cuando la superficie que se quiera crear no tenga una forma rectangular. Esta opción nos permite adaptarnos a los polígonos que tenga la estructura.

Una vez que se ha hecho clic en uno de los dos iconos anteriores se abrirá una ventana como la Figura 58, donde se podrá elegir la sección que tendrá la superficie creada y unas ayudas que presenta el programa para crear una superficie con las siguientes opciones: en vertical, horizontal, paralela a un ángulo, con una longitud y/o ángulo fijado.

Es importante que en la Figura 58 se haya marcado la sección tipo “None”. Se elige esta opción y en el Anexo 1: Comprobaciones en SAP2000 se explica el comportamiento que tiene este tipo de superficie.

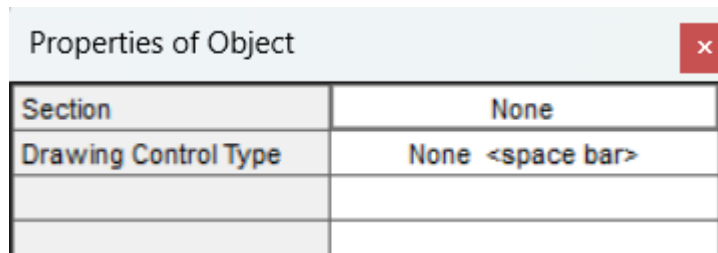


Figura 58: Ventana creación superficies

A continuación, se crearán 3 superficies para las porciones que tiene la cubierta que se están modelando, debido a que el cerramiento provisto se realizará con panel sándwich.

Para ello la primera superficie a crear será la que una la cumbrera con el anillo intermedio. Los nodos que se utilizarán para crear esta superficie serán los marcados en la Figura 59. Se irán marcando los nodos en orden horario o antihorario y una vez seleccionado todo se pulsará la tecla “Enter”.

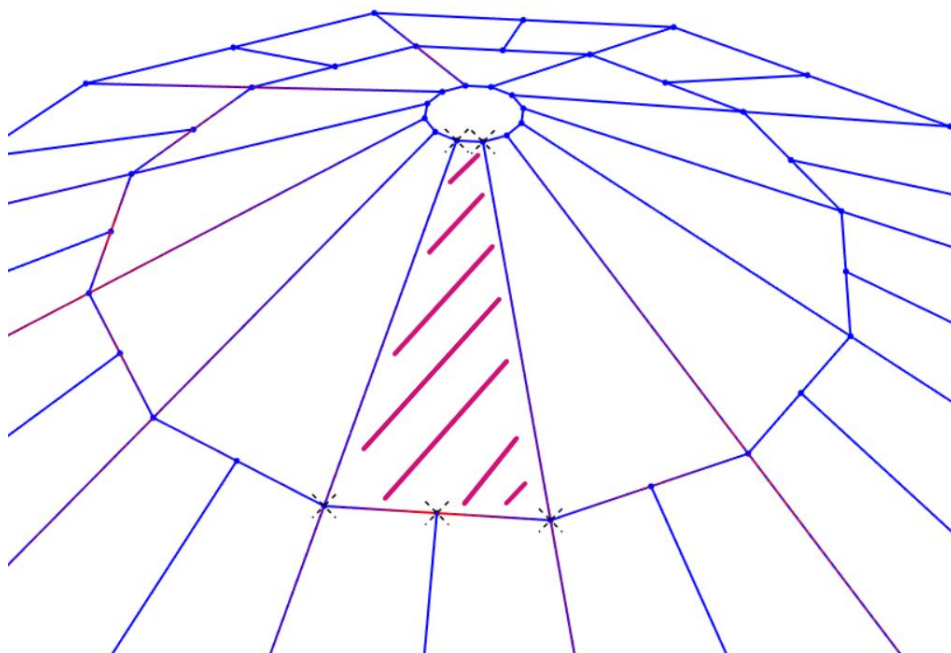


Figura 59: Creación superficie entre zuncho y anillo intermedio

Nota: a medida que se vayan marcando los puntos se visualizará la superficie que se está creando. Una vez creada se puede seleccionar el interior de esta superficie y aparecerá señalada con una línea punteada la superficie.

Después se crearán las dos superficies que forman el polígono entre el anillo intermedio, el zuncho, la viga radial principal y la secundaria. Las tres superficies que se acaban de crear quedarían como se muestra en la Figura 60.

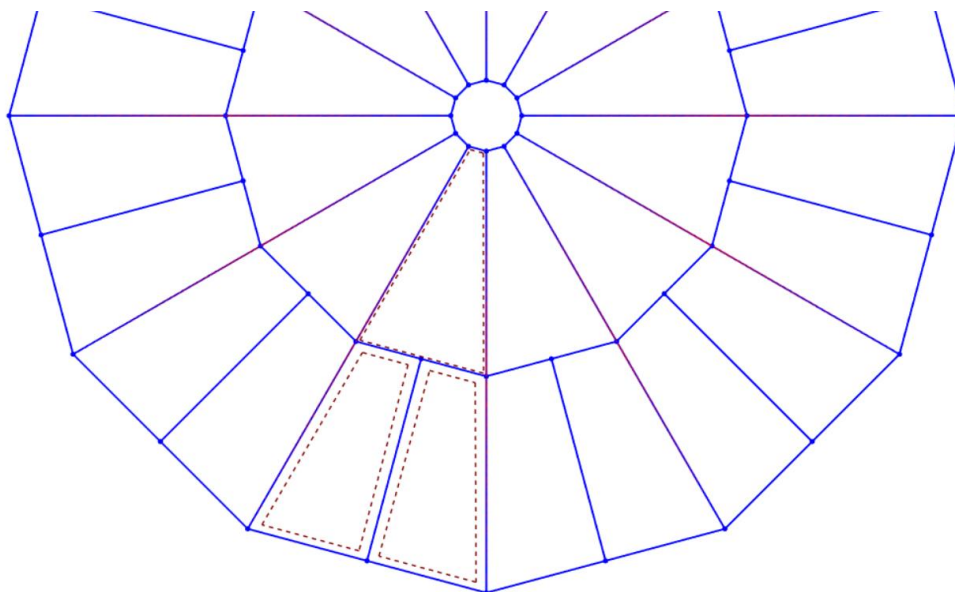


Figura 60: Superficies creadas de la cubierta

Una vez hecho esto, para agilizar el modelado, se replicará de forma radial las tres superficies previamente seleccionadas utilizando la misma configuración que se utilizó previamente para replicar las barras de la estructura.

3.15. Asignación de grupos

El programa SAP2000 entiende los grupos como una asociación de barras que desempeñan una misma función en la estructura. En este caso se definió previamente los grupos estructurales que tendrá la estructura en el apartado 3.2.

Para realizarlo se seguirá la ruta "Define" / "Groups", donde se abrirá una pestaña donde se visualizarán todos los grupos que se hayan creado. Ahora se pinchará en el botón "Add New Group" y aparecerá una pestaña como la Figura 61. En esta ventana se escribirá el nombre del grupo y se marcarán los apartados mostrados en la Figura 61. En este caso es importante que el

apartado “Cold Formed Design Group” quede marcado porque si no está marcado después no se podrá utilizar esta herramienta del SAP2000.

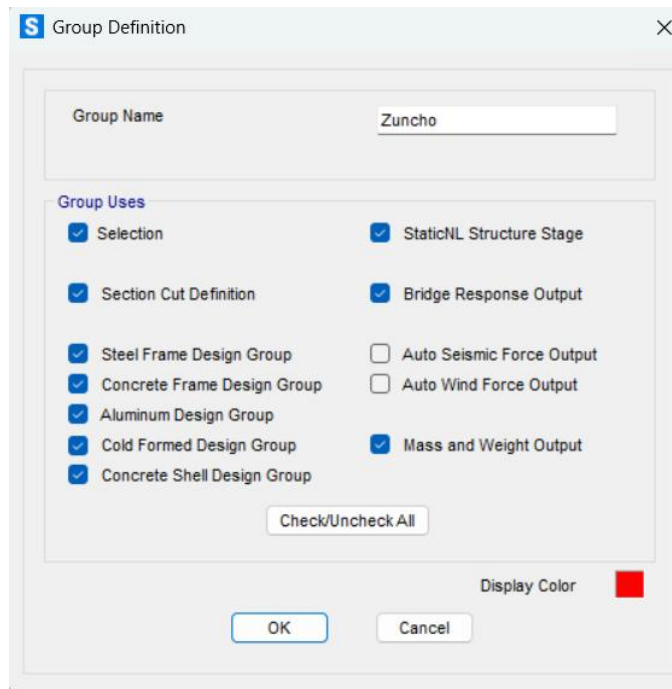



Figura 61: Creación del grupo

Una vez creados todos los grupos se asignarán las barras que pertenecen a cada grupo. Para ello siguiendo la ruta “Assign” / “Assign to Group” se abrirá una pestaña donde aparecen los grupos creados para el proyecto y abajo existen tres opciones:

- “Add to group”: los elementos seleccionados se añadirán al grupo marcado.
- “Replace Group”: los elementos seleccionados se añadirán al grupo marcado y en caso de pertenecer a un grupo estos se cambiarán al grupo marcado.
- “Delete from Group”: los elementos marcados se eliminarán del grupo seleccionado.

Primero se deberá marcar el grupo y posteriormente las barras que pertenecerán a ese grupo. Una vez seleccionado todo se elegirá la opción que el usuario decida y hará clic en “Apply” y “Ok”.

Para visualizar por colores los distintos grupos con la herramienta  “Display Options” en la pestaña “General Options” en la primera columna “View by Colors of” se seleccionará la opción “Selected Groups” y después en el botón inferior “Selected Groups” se marcarán los grupos a visualizar y se pulsará el botón “Ok” dos veces. La estructura quedará como la Figura 12 agrupada por grupos.

Nota: este paso es muy importante debido a que agrupar las barras ayudará cuando se haga la iteración de los perfiles.

3.16. Aplicación de las cargas

Ahora se procederá a explicar cómo se aplican las cargas en SAP2000. Durante este proyecto solamente se aplicarán cargas superficiales.

Las cargas pueden ser aplicadas a nodos, barras o superficies. Primero hay que definir a qué elemento se va a aplicar la carga y cómo va a ser esta. Existen las siguientes opciones:

- Carga aplicada a un punto
- Carga aplicada a una barra:
 - Gravitacional
 - Puntual
 - Distribuida
 - Temperatura
- Carga aplicada a una superficie
 - Uniforme
 - Uniforme a la barra

Carga aplicada a un punto:

Se elegirá esta opción cuando la carga que vaya a actuar sea una fuerza o un desplazamiento sobre un nodo. Para ello se seguirá la ruta “Assign” / “Joint Loads” y se elegirá si se aplica una fuerza (“Force”) o un desplazamiento (“Displacement”). Con la opción “Force”, se abrirá una ventana como la Figura 62 donde se elegirá el patrón de carga, el sistema de coordenadas que tendrá la carga que se vaya a aplicar, ya sea GLOBAL o LOCAL. Existe la opción de elegir entre fuerza y momento en los diferentes ejes del sistema. Para ello se deberá introducir el valor de la carga a aplicar en la fila correspondiente pudiendo introducir un valor negativo si la fuerza va en sentido contrario al sistema escogido. Al final de esta ventana existen tres opciones para aplicar la carga: añadir la nueva carga a cargas existentes (“Add to Existing Loads”), reemplazar las cargas existentes (“Replace Existing Loads”) y eliminar cargas existentes (“Delete Existing Loads”). De la misma forma se pueden asignar desplazamientos a los puntos si se elige la opción “Displacement” como se muestra en la Figura 63. En esta ventana, se puede elegir entre desplazamiento o giro y el procedimiento para configurar la carga es el mismo que se ha explicado anteriormente.

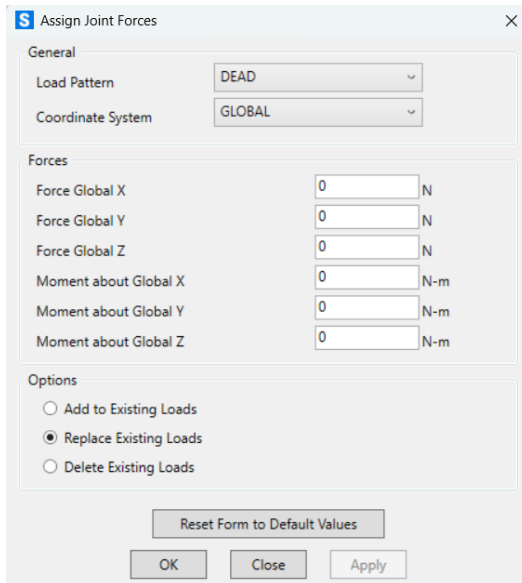


Figura 62: Aplicación fuerzas a nodos

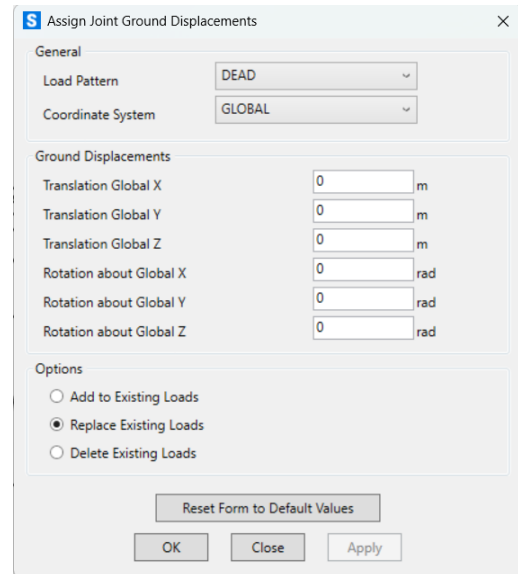


Figura 63: Aplicación desplazamientos a nodos

Carga aplicada a una barra:

Se elegirá esta opción cuando se vaya a aplicar una fuerza a una barra ya sea esta una fuerza puntual o distribuida. La ruta será “Assign” / “Frame Loads”, en esta opción aparecen distintos tipos de cargas a aplicar a una barra. A continuación, se detallarán algunas de ellas:

- **“Gravity” o Cargas gravitacionales:** de forma habitual esta opción no se elige debido a que hay otras opciones más completas en el SAP2000. El procedimiento será el siguiente: se elegirá el patrón de carga de la fuerza a aplicar y se asignará el valor de dicha fuerza en función de la dirección a la que se vaya a aplicar en función del sistema de coordenadas, ya sea GLOBAL o LOCAL, tal y como se muestra en la Figura 64. Una vez asignados los parámetros y valores explicados anteriormente se hará clic en el botón “Apply” o “Ok” en función de si se quiere que se cierre la pestaña o no.

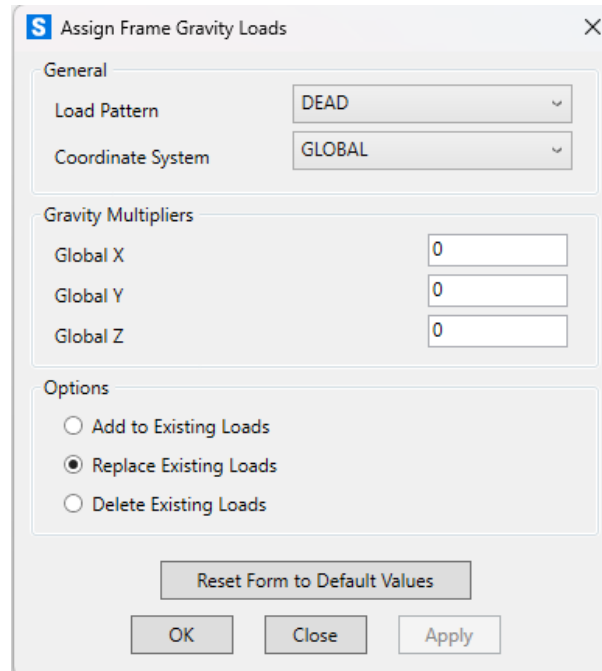


Figura 64: Carga gravitacional

- **“Point” o cargas puntuales:** se abrirá una ventana como la Figura 65, donde se elegirá lo siguiente: el tipo de patrón que tendrá la fuerza a aplicar; el sistema de coordenadas, ya sea GLOBAL o LOCAL; la dirección de la carga a aplicar; el tipo de carga, ya sea una fuerza o un momento aplicada a lo largo la distancia de la barra, ya sea de forma relativa o absoluta y el valor de la carga. Una vez asignados los parámetros y valores explicados anteriormente se hará clic en el botón “Apply” o “Ok” en función de si se quiere que se cierre la pestaña o no.

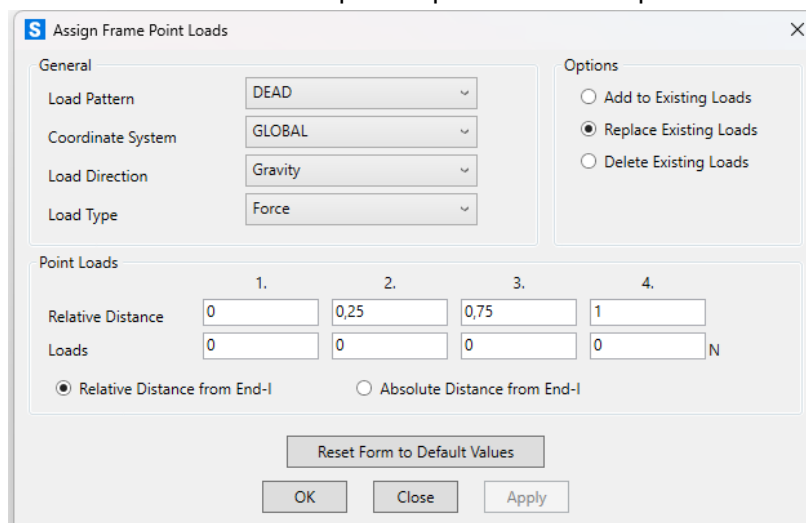


Figura 65: Carga puntual

- **“Distributed” o Cargas distribuidas:** se abre una ventana como la Figura 66, con una estructura similar a la explicada en el apartado anterior. En este caso, al ser una carga distribuida se podrá elegir entre aplicar una carga distribuida uniforme rellenando la casilla que se encuentra en la esquina derecha superior, debajo de *“Uniform Load”* o aplicar una carga trapezoidal ayudándonos también de la carga uniforme. Una vez asignados los parámetros y valores explicados anteriormente se hará clic en el botón *“Apply”* o *“Ok”* en función de si se quiere que se cierre la pestaña o no.

Figura 66: Carga distribuida

3.17. Carga aplicada a una superficie.

A continuación, se van a profundizar las opciones que presenta el programa: *“Uniform (Shell)”* y *“Uniform to Frame (Shell)”*

La primera opción *“Uniform (Shell)”*, se seguirá la ruta *“Assign” / “Area Loads” / “Uniform (Shell)”*. Aparecerá una ventana como la Figura 67, donde habrá que configurar lo siguiente: el patrón de la carga a utilizar, el sistema de coordenadas de la carga a aplicar ya sea GLOBAL o LOCAL, la dirección de la carga. En la casilla que se encuentra al final se asignará el valor de la carga. Es importante haber marcado previamente las áreas donde se quieren aplicar las cargas. Después se hará clic en el botón *“Ok”*.

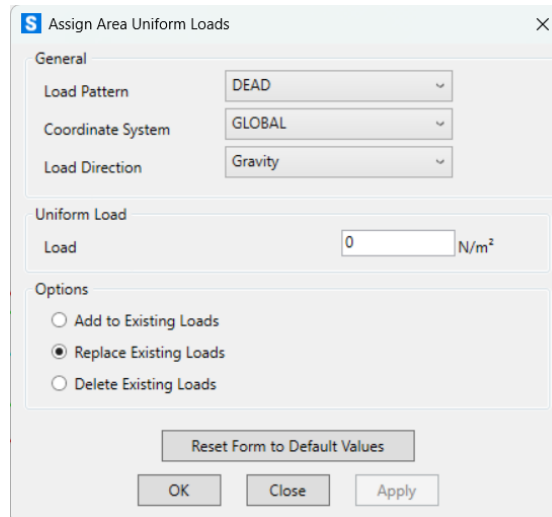


Figura 67: Ventana Area Uniform “Shell”

En la segunda opción de carga superficial “Uniform to Frame (Shell)”, se seguirá la ruta “Assign” / “Area Loads” / “Uniform to Frame (Shell)”. Se ha elegido esta opción. La explicación de esta elección junto con los ejercicios de comprobación se encuentra en el Anexo 1: Comprobaciones en SAP2000.

Aparecerá una ventana como la Figura 68 donde habrá que configurar lo siguiente: el patrón de la carga a utilizar, el sistema de coordenadas de la carga a aplicar ya sea GLOBAL o LOCAL, la dirección de la carga, la distribución de la carga ya sea en “One Way” o “Two Ways” y en la casilla que se encuentra al final se asignará el valor de la carga. Es importante haber marcado previamente las áreas donde se quieren aplicar las cargas. Después se hará clic en el botón “Ok”.

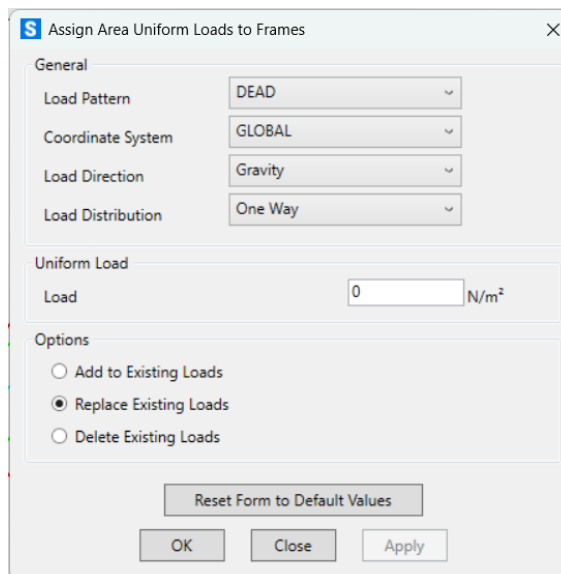


Figura 68: Ventana Area uniform Loads to Frames

Se aplicarán dos tipos de cargas superficiales. La primera será con el patrón de carga SU, con valor de 1000 N/m², en la dirección de la gravedad y la distribución “Two Way”. La segunda será con el patrón de carga CUBIERTA, con valor de 300 N/m², en la dirección de la gravedad y la distribución “Two Way”.

Una vez hecho lo anterior, SAP2000 nos indicará el valor de la carga y la dirección de esta. De igual forma, siempre se podrá visualizar la carga que está aplicada en un área seleccionándola previamente y después haciendo clic con el botón derecho del ratón. A continuación, en la parte superior aparecerán diferentes pestañas: “Location”, “Assignments” y “Loads”. En la pestaña “Loads” se mostrará si hay cargas aplicadas sobre ese elemento junto con el valor y dirección de esta. En la Figura 69 se aprecia el patrón de carga aplicado, en este caso “SU”; la opción de carga superficial aplicada, la dirección de la carga, el valor de la misma y el tipo de distribución que tiene.

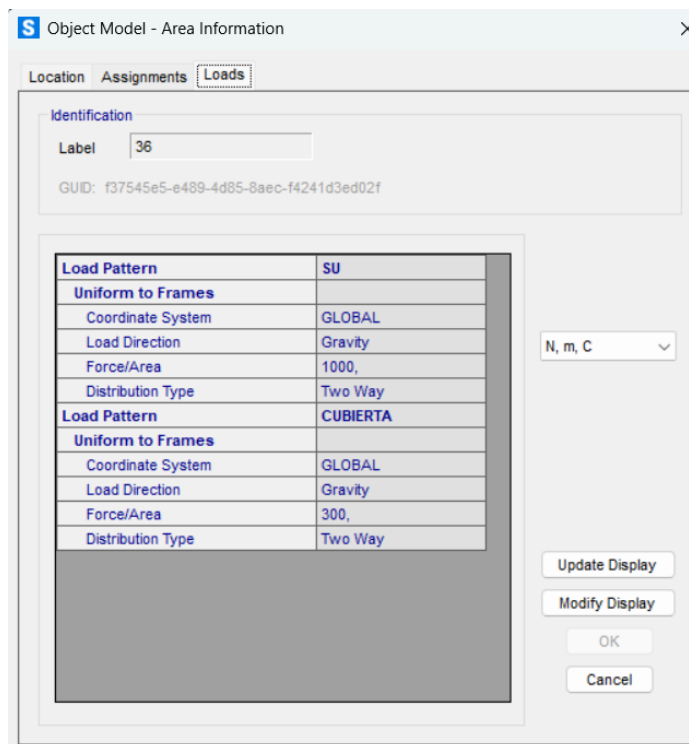


Figura 69 Información de una superficie

3.18. Cálculo e interpretación de los resultados

Primero antes de calcular habrá que asegurarse que las barras tengan asignadas la lista de iteración de los perfiles que se han creado con anterioridad para el modelo. Para ello se seleccionarán todas las barras haciendo un recuadro con el clic derecho y arrastrando. Después con la ruta “Assign” / “Frame” / “Frame Sections” seleccionará el nombre de la lista de

perfiles en este caso (AUTO RECTANGULAR) y después “OK”. Una vez hecho esto se podrá observar la etiqueta que aparece encima de cada barra con el nombre de la lista y el perfil con el que se inicia la lista.

Nota: en la lista de iteración de los perfiles solamente se incluirán los perfiles con las mismas dimensiones de anchura y altura, pero con distintos espesores para que el programa siga el orden correcto y no se salte ningún perfil válido.

Una vez hecho todo lo anterior, para realizar el cálculo se hará clic en el icono (▶) que se encuentra en la barra de herramientas o en el menú “Analyze”/”Run Analysis”. A continuación, aparecerá una ventana como en la Figura 70, donde se observan todos los patrones de carga que se han creado para el proyecto y existe la opción de decidir si se realiza el cálculo para todas las cargas o no. En este trabajo la carga MODAL no se calculará. Por lo tanto, se marca esta carga que no se quiere calcular y se hará clic en el botón “Run/Do Not Run Case”. Una vez hecho esto, en la columna “Action” y en la fila de la carga “MODAL” se observa que pone “Do not Run”

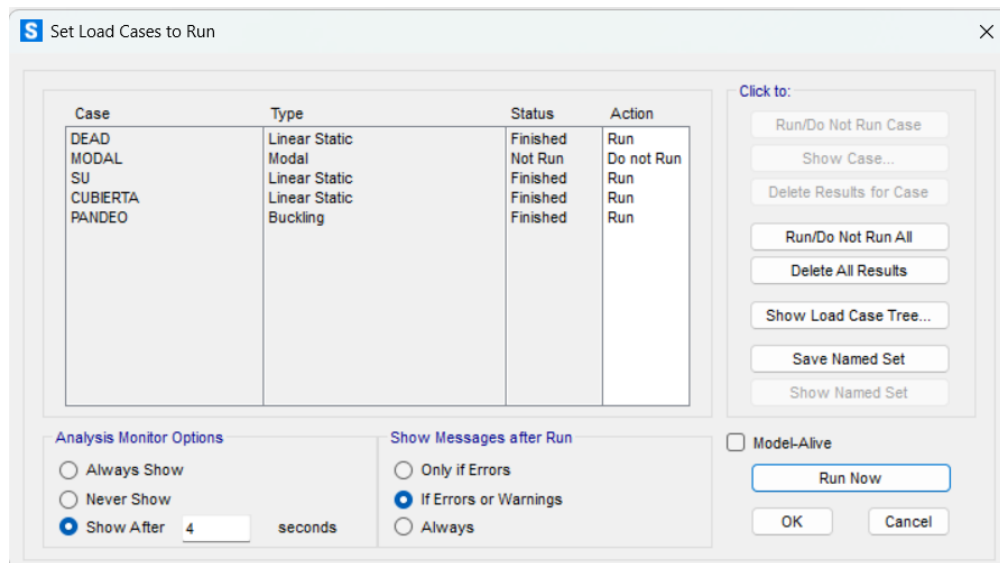





Figura 70: Ventana cálculo de los casos de carga

Después se hará clic en el botón “Run Now”. El programa pedirá guardar el modelo si no se ha hecho previamente. Una vez guardado el cálculo se realizará y aparecerá la deformada asociada a uno de los casos de carga. Cuando se realiza el cálculo, el modelo se bloquea para evitar modificaciones accidentales. En el caso de querer modificar algo, se debería pulsar el icono (🔒). Una vez pulsado este botón, no se podrán acceder a los resultados del análisis porque estos se eliminarán. En el caso de querer acceder a estos resultados se realizaría de nuevo el cálculo del modelo.

Una vez realizado el cálculo se procederá a analizar el modelo obteniendo la deformada, tensiones y desplazamientos. Para ello se utilizarán estos dos botones: “Show Deformed Shape” () y “Show Forces/Stresses” ().

En el icono “Show Deformed Shape” () se podrá apreciar la deformada de la estructura y obtener los desplazamientos y giros. Se abrirá una ventana como la Figura 71. En la parte superior de la ventana se elegirá el caso de carga o combinaciones de carga que deseen visualizar. En el apartado “Contour Options” se podrán observar con colores los desplazamientos, una resultante o el desplazamiento normal a las superficies. Si se desea ver la estructura sin deformar para compararla se deberá marcar la opción “Wire Shadow”. Una vez hecho esto se hará clic en el botón “Apply” en caso de querer que se realice el cambio y no se cierre la ventana o el botón “Ok” en caso de querer que se cierre la ventana. Existe la posibilidad de extraer la información de los tres giros y desplazamientos sobre los nudos si se pasa el cursor por encima de los nudos.

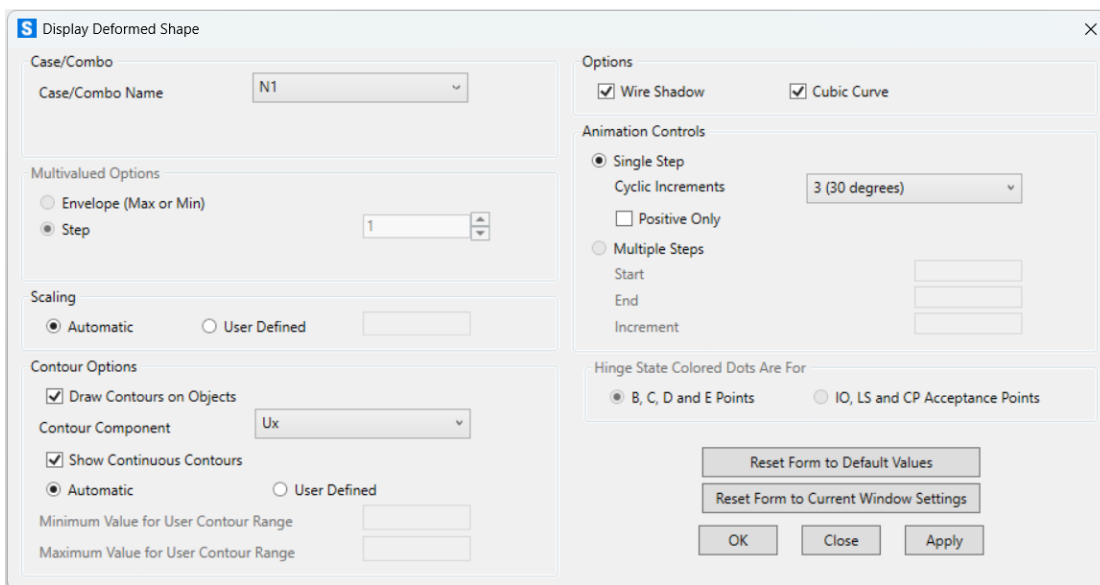



Figura 71 Menú deformada de la estructura

Ahora se hará clic en el botón “Show Forces/Stresses” () y se abrirá un desplegable con las siguientes opciones:

- “**Joints**”: se elegirá esta opción cuando se quiera saber las reacciones en los nodos del modelo. Se abrirá una ventana, como la Figura 72, donde se elegirán los patrones de carga que se quieren visualizar y la forma de visualizarlos.

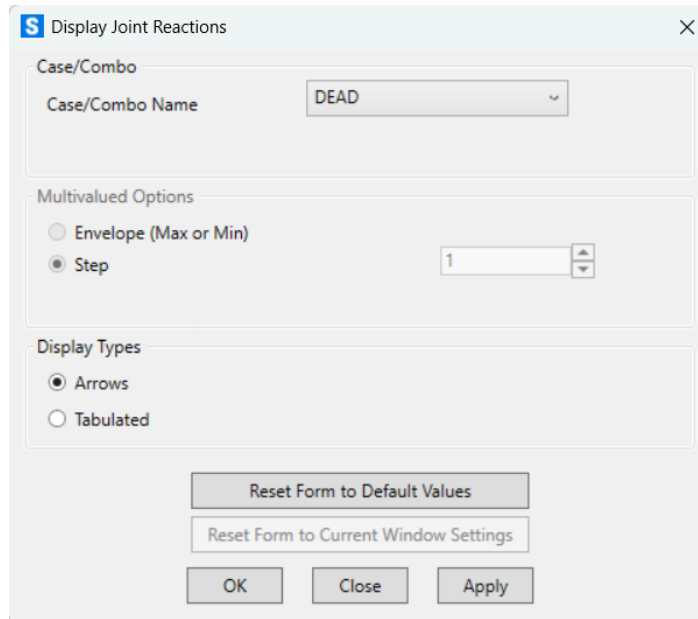


Figura 72: Ventana reacciones en nodos

- **“Frames/Cables/Tendons”**: se abrirá una ventana, como la Figura 73. En esta ventana se elegirá el patrón de cargas o combinaciones de cargas, en el apartado *“Display Type”* se deberá entre *“Force”* para los esfuerzos internos o *“Stress”* para las tensiones. En función de si se quieren ver los esfuerzos internos (*“Forces”*) ya conocidos como: axil, cortantes y momentos. *“Shear 2-2”* es el cortante en la dirección local 2 de la barra y ocurriría lo mismo con *“Shear 3-3”*. *“Moment 2-2”* y *“Moment 3-3”* sería lo mismo, pero obteniendo los momentos respecto a cada eje de la barra.

En el caso de que la estructura planteada fuera un problema plano solo interesarían las componentes *“Shear 2-2”* y *“Moment 3-3”*.

En caso de elegir la opción *“Stress”* se podrá escoger entre las tres tensiones no nulas de la barra (*“S11”* es la tensión normal en la dirección 1 de barra y *“S12”* y *“S13”* son las tensiones tangenciales en las direcciones 2 y 3 de la barra); también está la opción de *“Smax”*, *“Smin”* y *“SVM”*; siendo esta última opción la tensión de plastificación de Von Mises. Se pueden calcular las tensiones en cada punto dentro de una sección.

SAP2000 proporciona gráficos sobre la línea media, pero existe la posibilidad de escoger el punto de la sección por el que se muestra la tensión.

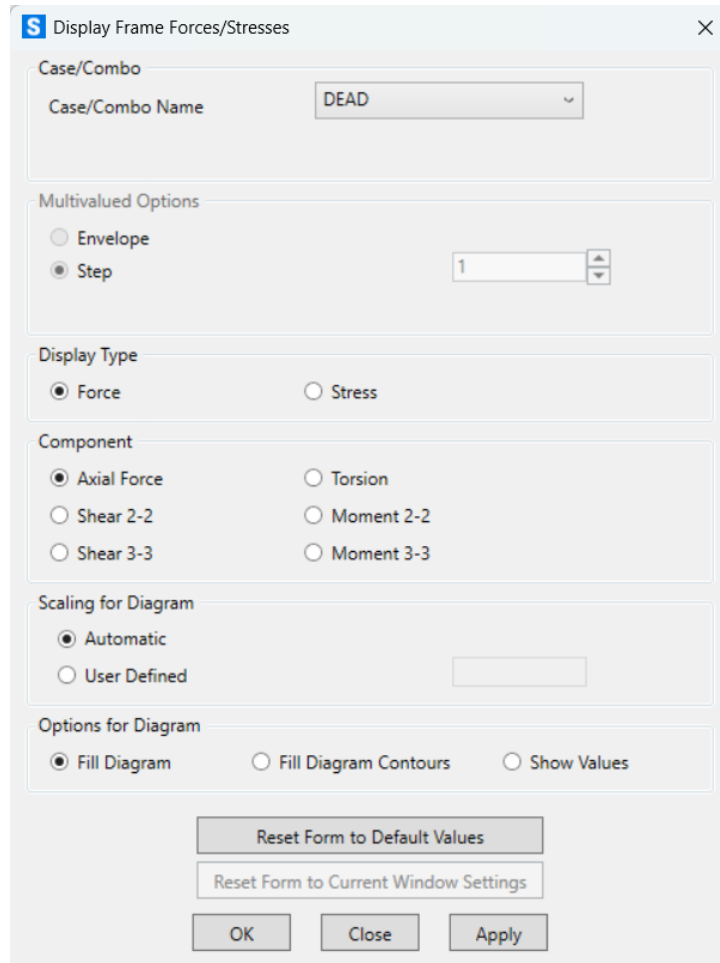


Figura 73: Ventana para visualizar tensiones del caso de carga seleccionado

Para visualizar los valores de los diagramas se puede pasar el cursor encima de las barras o hacer clic con el botón derecho para acceder a una ventana, como la Figura 74. De esta forma se accede a toda la información que tiene la barra. En la Figura 74, se puede apreciar el axil de la barra. El usuario se puede mover a lo largo de la barra para ver los valores que tienen los diagramas gracias a la barra vertical gris que aparece en el diagrama. Para poder utilizar esta herramienta debe estar marcada en el apartado “*Display Options*” la opción “*Scroll for Values*” y en el apartado “*Location*” se puede ver en la posición que se elija de forma local en la barra y siguiendo la dirección de la barra.

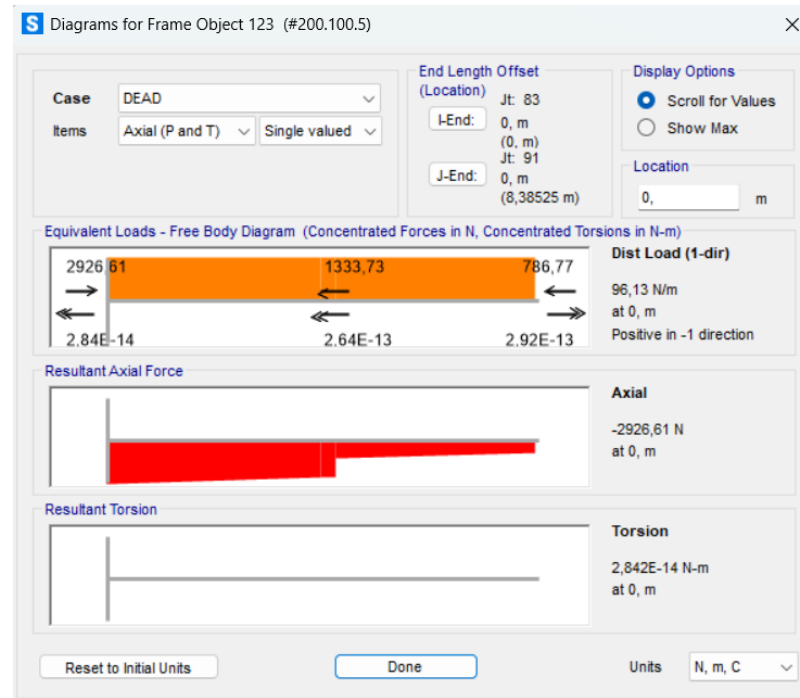


Figura 74: Diagrama axial en una barra

En la Figura 75 se ha marcado en el menú “Display Type” la opción de “Stress” para observar las tensiones de las barras.

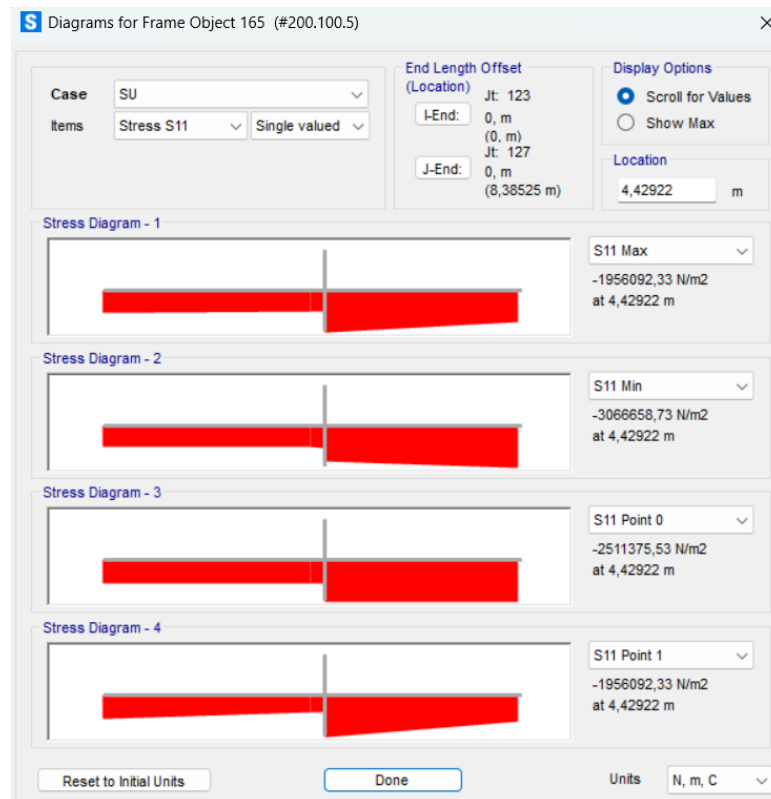







Figura 75 Diagramas de tensiones S11 en una barra

3.19. Herramienta Start Steel design/Check of structure

La herramienta “*Start Steel Design/Check of Structure*” permite calcular el perfil más adecuado para las cargas y combinaciones de cargas que presenta la estructura mediante las comprobaciones de estados límites de servicio y estados límites últimos. Para ello utilizará la lista de iteración de los perfiles que se ha creado previamente y se debe saber el material con el que están hechos los perfiles de la lista de iteración. A continuación, se mencionarán los tipos herramienta “*Start Steel design/Check of structure*” que hay:

- “*Steel Frame Design*”  : se utilizará para barras cuyo material asignado sea el acero.
- “*Concrete Frame Design*”  : se utilizará para barras cuyo material asignado sea el hormigón.
- “*Aluminium Frame Design*”  : se utilizará para barras cuyo material asignado sea el aluminio.
- “*Cold-Formed Steel Frame Design*”  : se utilizará para barras cuyo material asignado sea el acero laminado en frío.

En este caso la lista de iteración está creada con perfiles cuyo material es “*Cold-Formed Steel*” y además la sección utilizada pertenece a esta familia. Por lo tanto, la herramienta que se utilizará es “*Cold-Formed Steel Frame Design*” .

Primero se deberá configurar la herramienta, para ello se seguirá la ruta “*Design*” / “*Cold-Formed Steel Frame Design*” / “*View/Revise Preferences*” y se abrirá una nueva ventana, como la Figura 76, que se deberá configurar.

De esta tabla se modificarán algunos parámetros. El primer parámetro que se va a modificar será la fila “*Design Code*” en donde se elige la norma a aplicar para que haga el cálculo del perfil. En este caso se modifica a “*Eurocode 3 1-3 2006*”. Después se modificará el parámetro “*Consider Deflection*” se cambia a “*Si*” para que compruebe la deflexión.

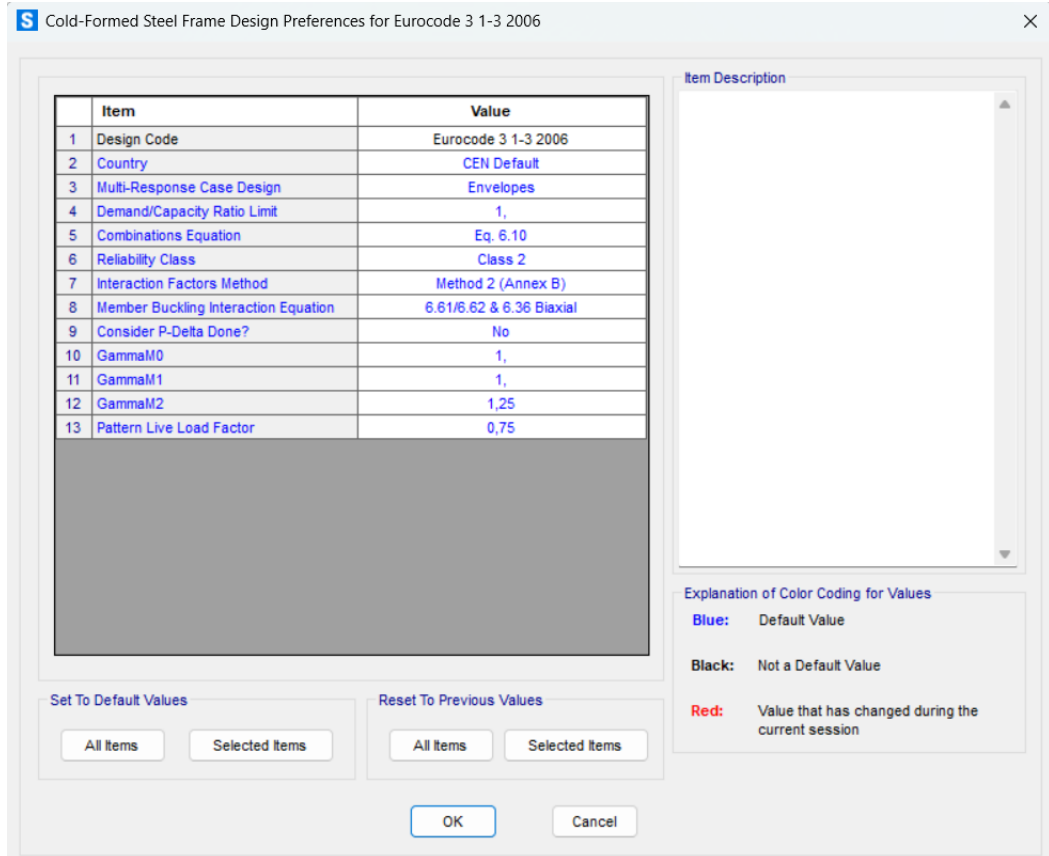


Figura 76 Definir parámetros de diseño

Después seleccionarán los grupos de diseño siguiendo la ruta “Design” / “Cold-Formed Steel Frame Design” / “Select Design Groups” para añadir los grupos deseados para el cálculo y se abrirá una ventana, como la Figura 77, donde se elegirán todos los grupos que se han creado para que los tenga en cuenta a la hora de agrupar los perfiles respecto a los grupos en función de las necesidades que tenga cada uno en función de las cargas aplicadas.

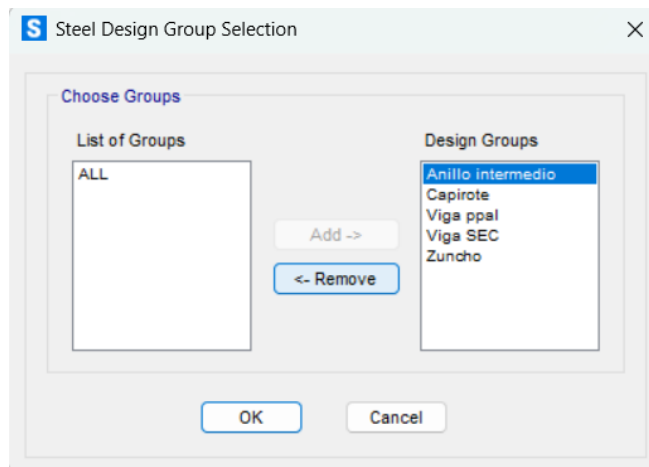


Figura 77: Selección grupos de diseño

Ahora se seguirá la ruta “Design” / “Cold-Formed Steel Frame Design” / “Select Design Combos” para añadir las combinaciones de carga al cálculo. En este caso se añadirá la combinación de carga que se ha creado previamente llamada DESFAVORABLE.

Ahora ya está todo configurado y se procederá con el cálculo, para ello siguiendo la ruta “Design” / “Cold-Formed Steel Frame Design” / “Start Design/Check of Structure” y las barras empezarán a parpadear mientras se carga una barra verde en la zona inferior derecha de la pantalla.

3.20. Análisis del primer resultado del cálculo

Cuando el SAP2000 finaliza el cálculo, muestra el resultado y asigna el perfil a cada barra de la estructura junto a un color como aparece en la Figura 78. Antes de analizar el resultado es importante calcular, dimensionar el perfil y realizar este paso las veces que sean necesarias hasta que la iteración converja y los valores permanezcan constantes o hasta que salga una ventana que ponga que ya no hay más casos a analizar o “Not cases to run”. El color que presentan las barras de la estructura significa el “rendimiento” que tiene la estructura, es decir, el aprovechamiento del perfil para las cargas aplicadas. Como se puede apreciar el valor que tienen las barras es inferior a 0,9, lo que significa que el perfil con el que se ha empezado la iteración es demasiado grande y se puede optimizar más el perfil. Entonces, se crearán más perfiles para introducir en la lista de iteración e ir mejorando el rendimiento de la estructura y de esta forma se abaratan los costes del proyecto.

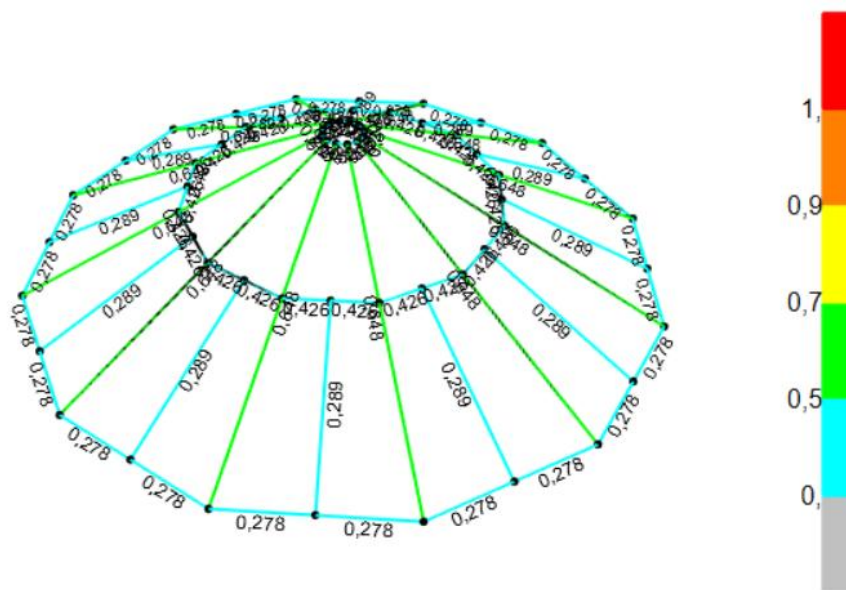


Figura 78: Primer resultado del diseño

Si se hace clic derecho sobre cualquiera de las barras aparecerá una nueva ventana, como la Figura 79. En esta ventana se muestra el perfil asignado y subrayado en azul está la combinación de carga más desfavorable con la que dimensiona el perfil (DESFAVORABLE).

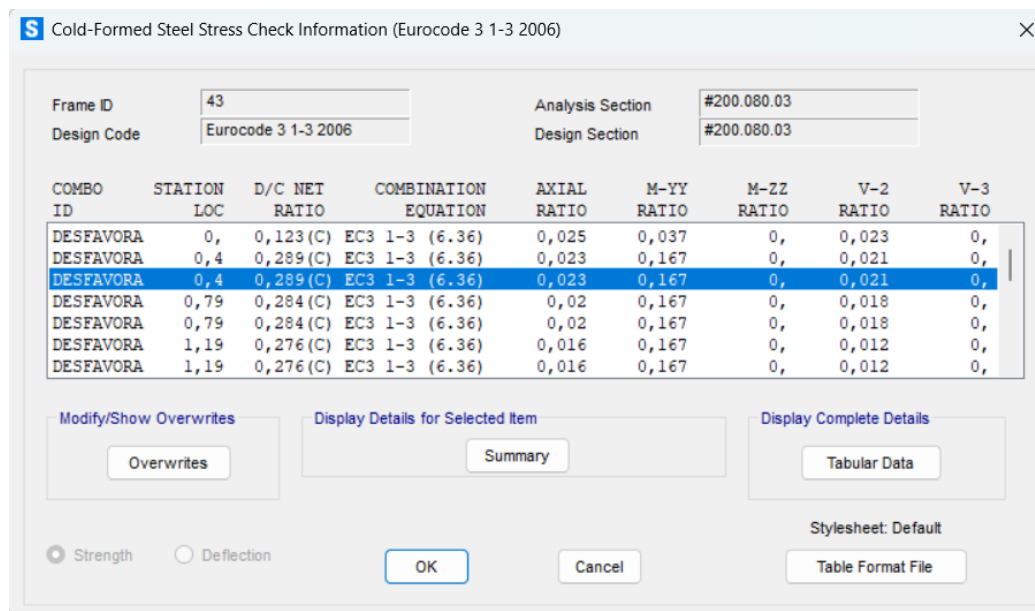



Figura 79: Ventana del resultado de dimensionamiento

El parámetro más interesante del recuadro es el “RATIO” equivalente al rendimiento de ese elemento de construcción. Para determinar si este elemento cumple el valor debe ser exclusivamente menor que 0,95. Este parámetro está compuesto por las contribuciones de los esfuerzos axiales, cortantes y flectores. En el botón “Summary” aparece un resumen con todas las cuentas que ha realizado el SAP2000 hasta llegar al resultado mostrado.

Según la normativa aplicada hay que fijarse en los parámetros definidos en el CTE-DB-SE-A [1]. Estos se encuentran definidos por el CTE para comprobar el fallo de la Estructura (N_{Ed} , V_{Ed} , M_{Ed} , $N_{c,Rd}$, $V_{p,Rd}$, $M_{d,Rd}$). En función de cada subíndice presentan un significado distinto: el subíndice (Ed) es el parámetro al que está sometido la barra; (Rd) es el Axil, cortante o flector máximo que puede resistir esa barra. El CTE-DB-SE-A [1] establece que $N_{Ed} < N_{c,Rd}$, en los datos mostrados en el botón “Summary” se puede apreciar que los esfuerzos cumplen con esta regla. Pasaría lo mismo con el cortante y con el flector.

De igual forma para reafirmar que los perfiles tienen un tamaño excesivo para las cargas aplicadas, se puede obtener el diagrama de tensiones del patrón de carga siguiendo la ruta “Show Forces/Stresses” (). Tal y como se muestra en la Figura 80 se puede observar que el valor de las tensiones

está muy lejos del valor de la tensión de plastificación del material que es 355 MPa porque es S355.

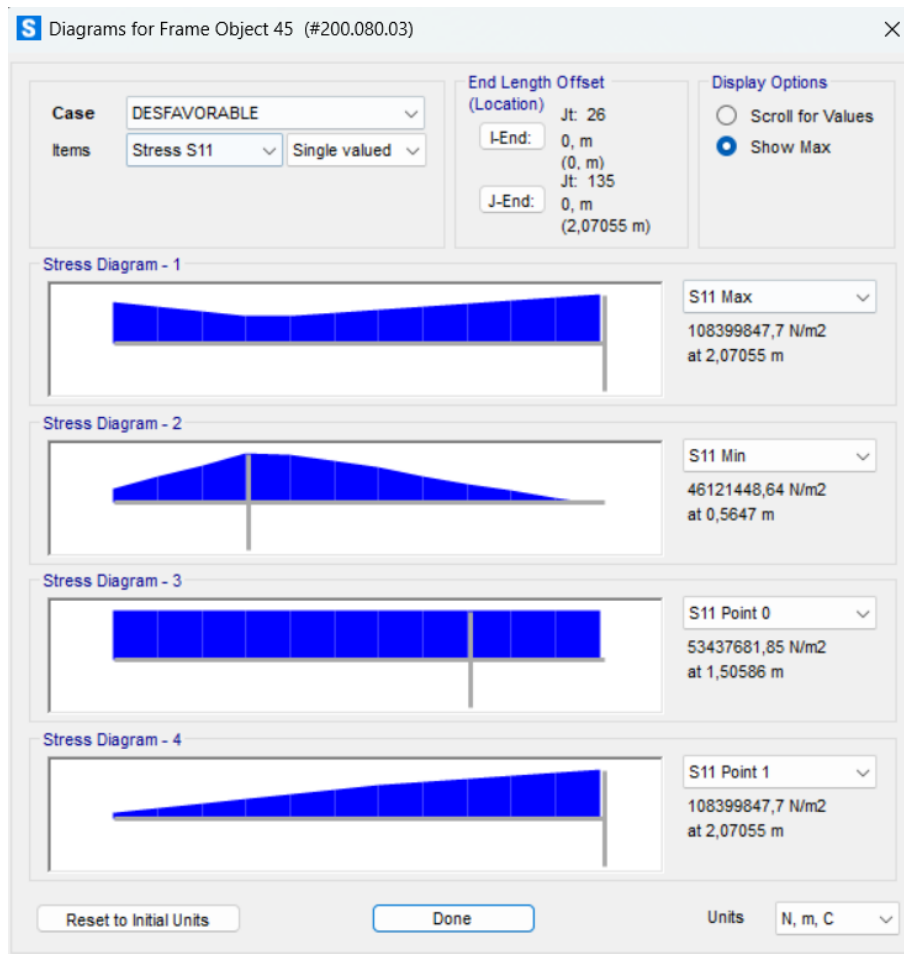


Figura 80: Diagrama tensiones en el primer cálculo

3.21. Segunda Iteración

En este caso se han añadido perfiles #180.100 con distintos espesores. Para ello se introducen estos perfiles en la lista de iteración que se ha creado "Define" / "Section Properties" / "Frame Sections". Después se seleccionan todas las barras y se asigna de nuevo la lista de iteración AUTO RECTANGULAR ("Assign" / "Frame" / "Frame Sections"), con especial atención en que la lista comience con el perfil #180.100.3. Se procede de nuevo a calcular y redimensionar hasta que aparezca la ventana "Not cases to run" y a continuación se evaluarán los resultados obtenidos.

Como se muestra en la Figura 81 el rendimiento es próximo a 0,7 pero aún se puede aprovechar más los perfiles. Entonces se procederá a realizar las iteraciones necesarias, mientras se mantienen las mismas cargas y combinación de estas, hasta que el rendimiento sea próximo a 1 y existan

varias secciones diferentes en función de los grupos que más esfuerzos internos tengan.

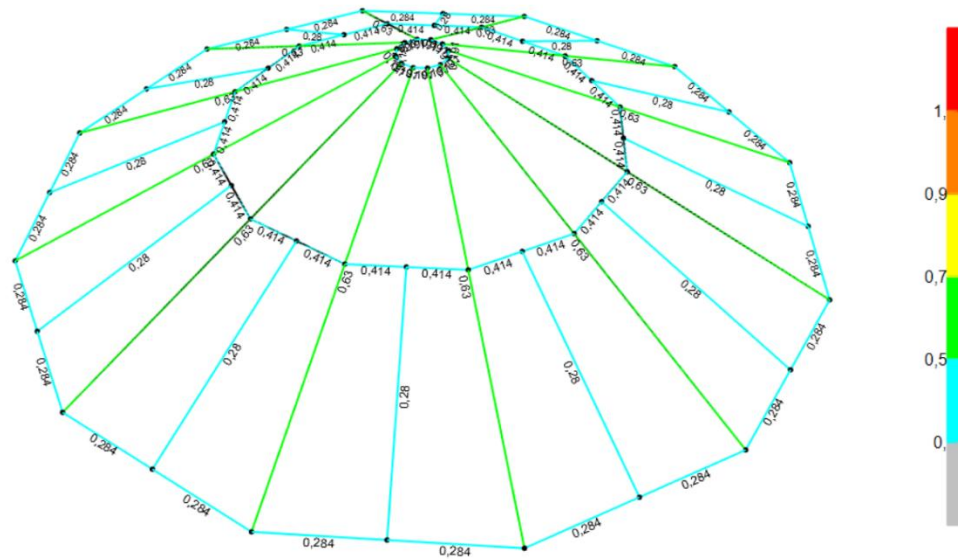


Figura 81: Resultados segunda iteración

Tras realizar varias iteraciones se han obtenido estos resultados. Primero la altura es 120 mm y la anchura es 60 mm. Se ha llegado a este perfil porque se ha optimizado al máximo para obtener el mismo perfil con tres diferentes espesores. En la Figura 82 se puede observar el rendimiento que se ha conseguido tras realizar el cálculo.

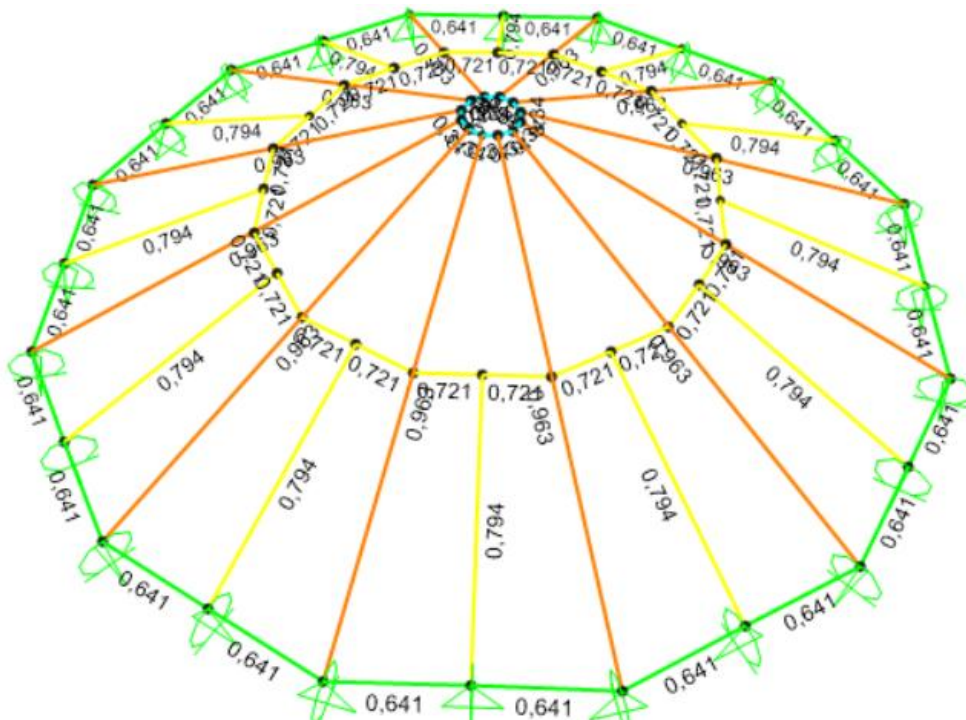


Figura 82: Resultados tercera iteración

En la Figura 83 se muestra una vista global de la estructura donde se ven 3 colores diferentes que implica que hay secciones diferentes. La leyenda de las secciones es la siguiente: el perfil en color gris implica que tiene el espesor de 6 mm, el perfil en color amarillo tiene un espesor de 2 mm y el perfil azul claro tiene un espesor de 1,5 mm.

Por lo tanto, los grupos estructurales de la Figura 83 quedan de la siguiente forma como en la Tabla 6:

Tabla 6: Resumen secciones de los grupos estructurales

Grupo estructural	Sección
Zuncho	#120.060.02
Anillo intermedio	#120.060.03
Cumbrera	#120.060.02
VRP	#120.060.06
VRS	#120.060.02

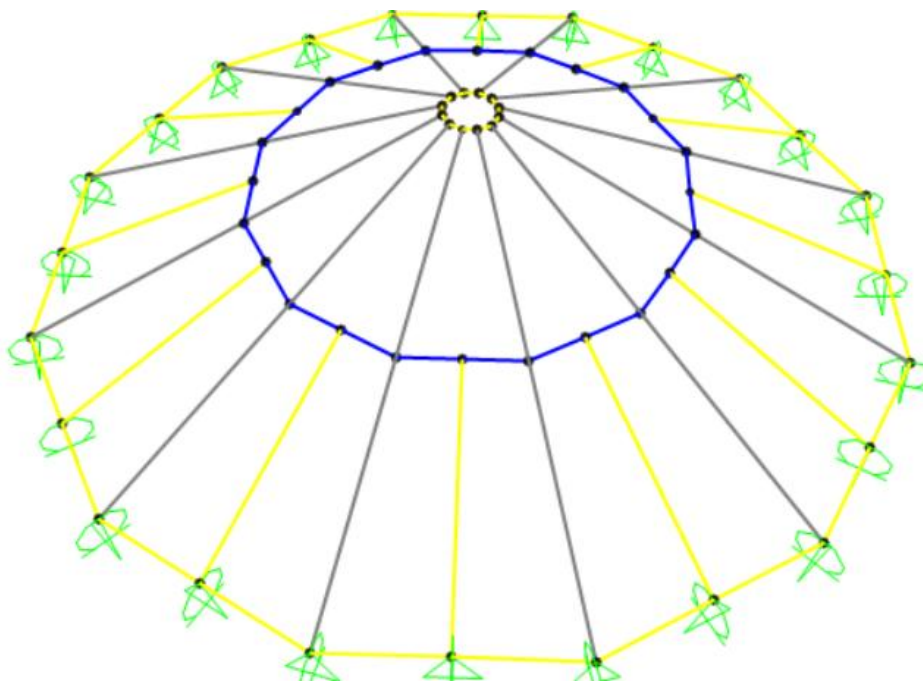
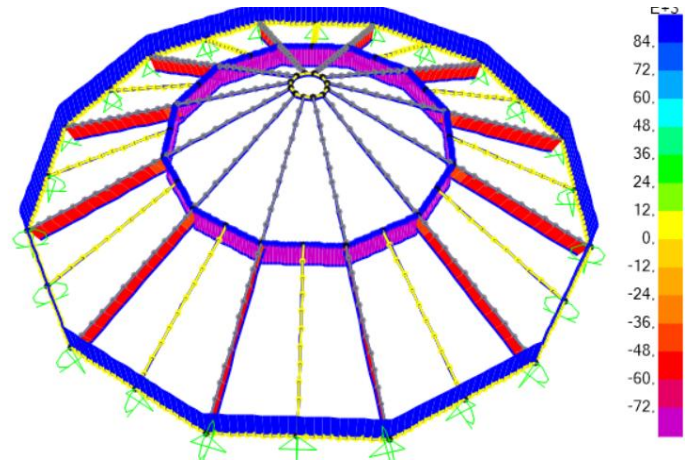
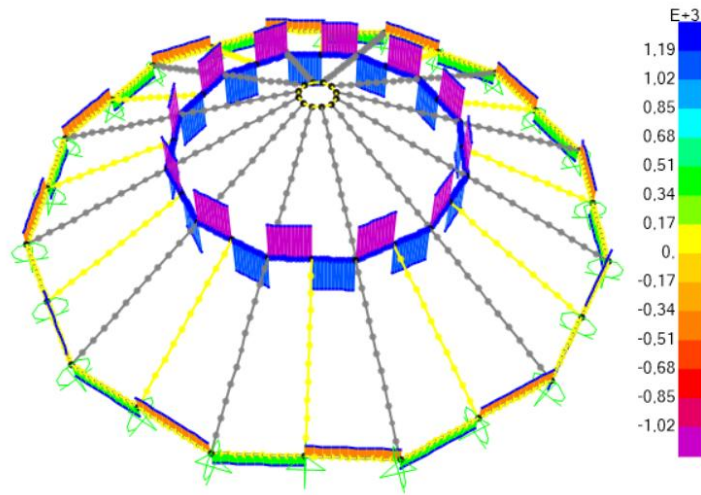


Figura 83: Vista estructura con colores en función de los perfiles

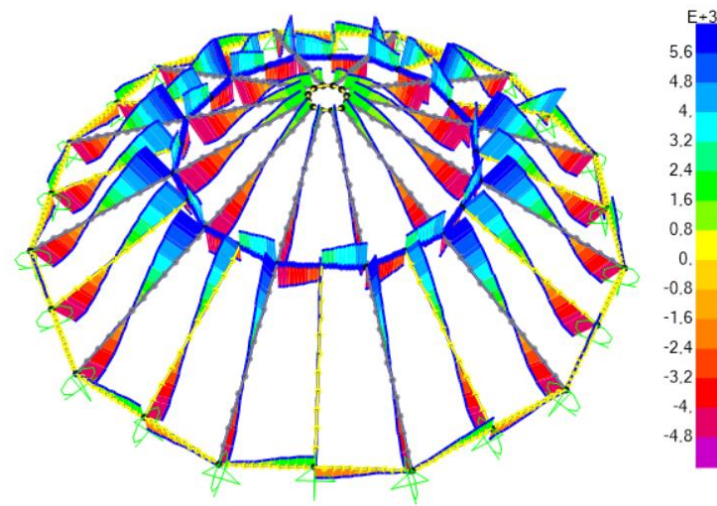
Después se han extraído los diagramas de esfuerzos internos como se muestra en la Figura 84, se presentan los diagramas de esfuerzos: axial (a), torsión (b), cortantes en las direcciones 2 y 3 (c y d), y los flectores en las direcciones 2 y 3 (e y f). De la misma forma se extrajeron los diagramas de tensiones como aparece en la Figura 85.



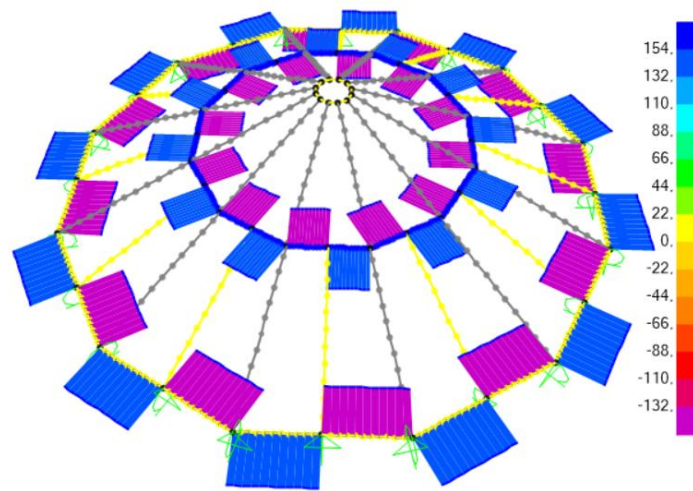
(a)



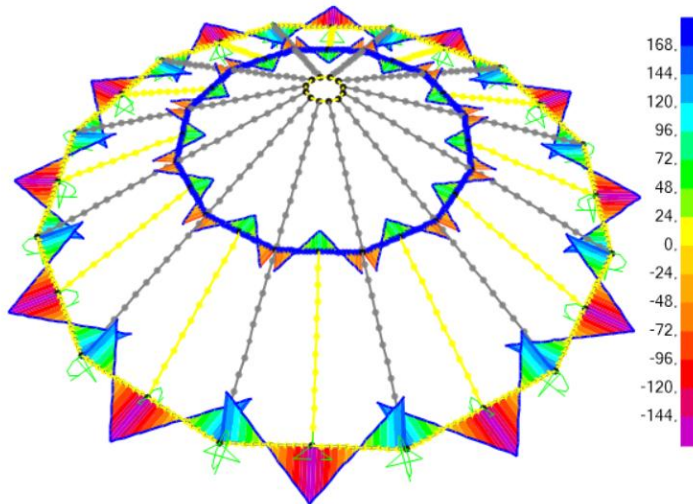
(b)



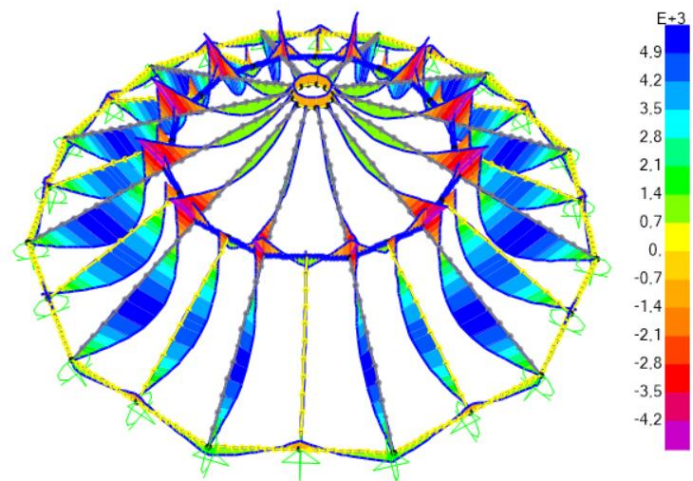
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 84: Resultados de diagramas esfuerzos internos tercera iteración: (a) Axial, (b) Torsión, (c) Cortante 2, (d) Cortante 3, (e) Flector 2, (f) Flector 3

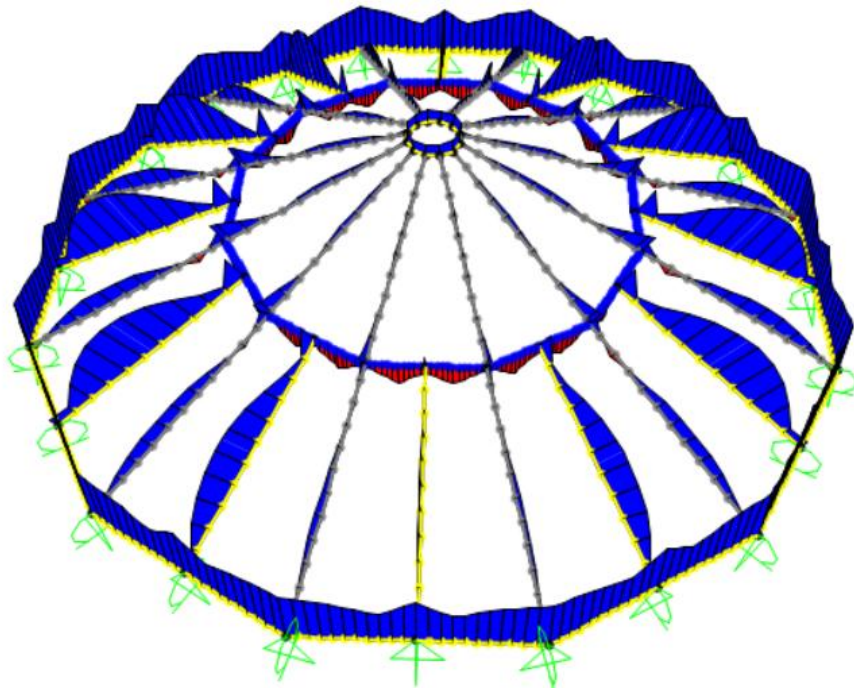


Figura 85: Diagrama tensiones tercera iteración

Entonces una vez realizado el cálculo, se realizarán una serie de comprobaciones según exige la normativa. Se tienen que comprobar ELU (Estado Límite Último) y ELS (Estado Límite de Servicio). A mayores se analizará el pandeo de la estructura en el apartado 3.22.

ELU se utiliza para realizar un análisis estático en tensiones que cumplir con la resistencia del material ($\sigma < 275$ MPa) y una flecha de la estructura.

En la Figura 86 se muestra como la tensión máxima que soporta la estructura es de 206 MPa mientras que la resistencia del material es de 275 MPa, por lo que se cumple esta primera parte.

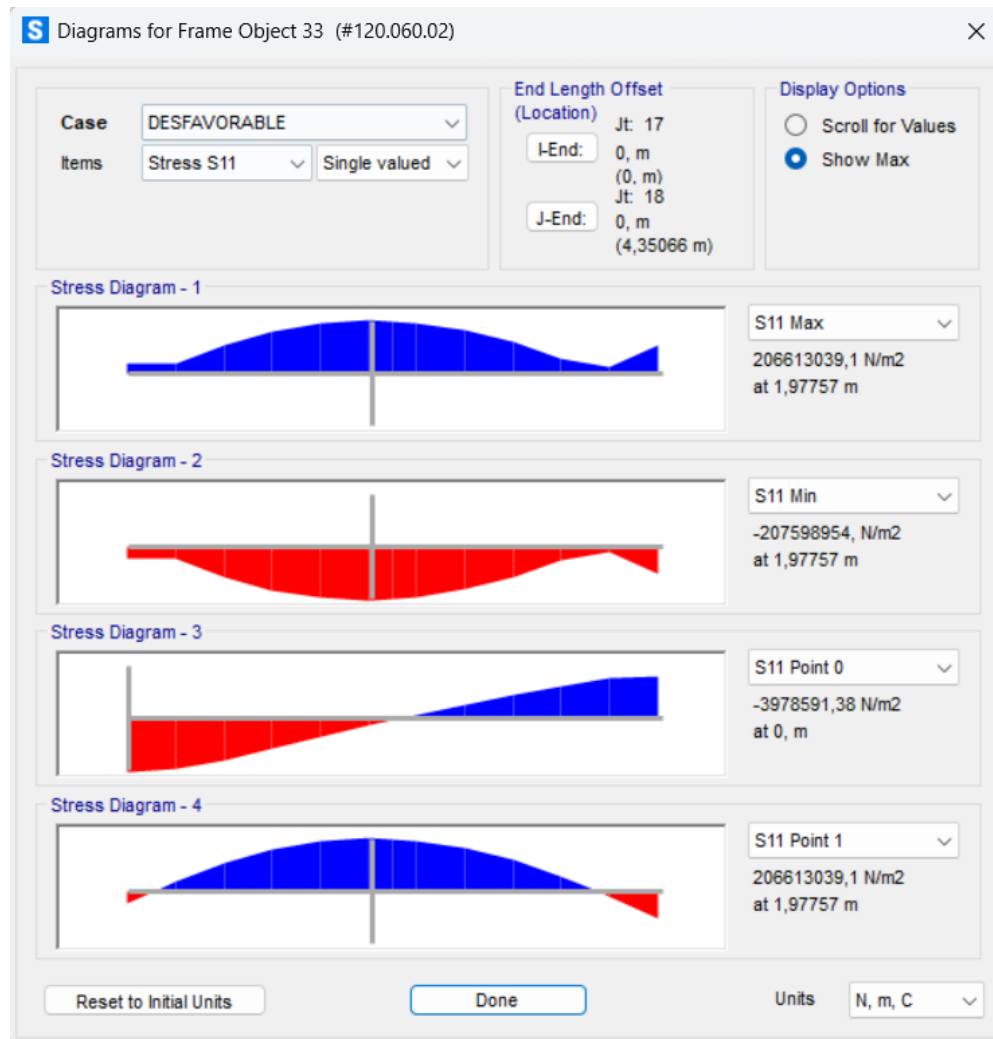


Figura 86: Diagrama tensiones máximas tercera iteración

Después la comprobación ELS implica si la flecha de la estructura es pequeña. Para ello se extrae la flecha de la estructura sobre la combinación de carga llamada DESFAVORABLE como se muestra en la Figura 87. El máximo desplazamiento son 15,4 mm. Por lo tanto, siguiendo la Ecuación 3:

$$\frac{\delta_{max}}{L} = \frac{0,0112}{4,35} = 0,0025 < \frac{1}{150} = 0,0066 \quad (3)$$

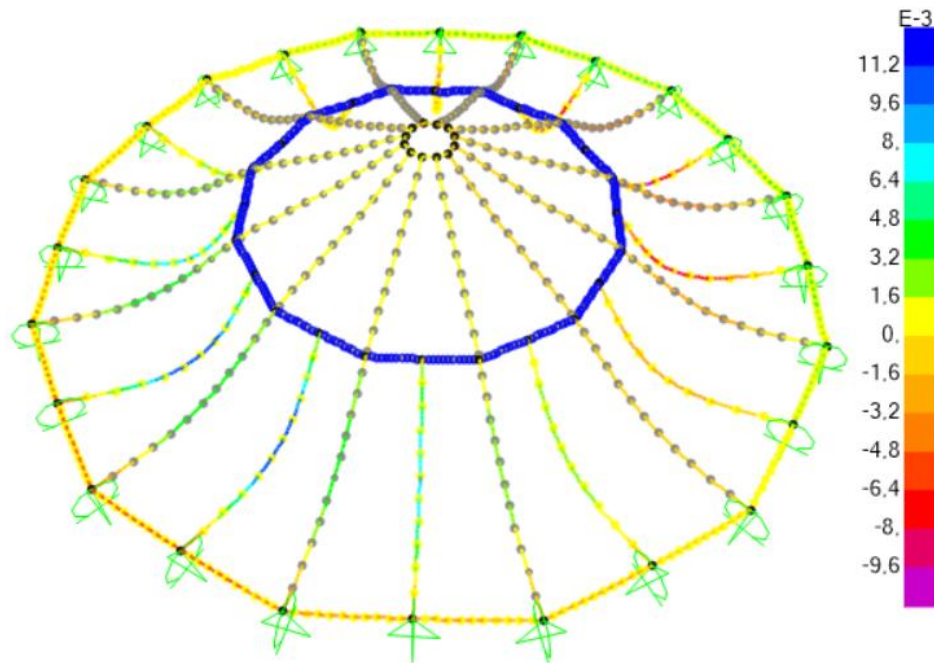


Figura 87: Deformada tercera iteración

Por lo tanto, ELU y ELS está confirmado que se cumplen.

3.22. Comprobación pandeo de la estructura

A continuación, se creará un caso de carga con las cargas DEAD, CUBIERTA Y SU; donde se comprobará el factor de carga en pandeo (λ) cumple la Ecuación 4 teniendo que ser $\lambda > 1$.

$$N_{crit} = \lambda * P_{crit} \quad (4)$$

El caso de carga PANDEO se creó cuando se crearon los patrones de carga, casos de carga y combinaciones de cargas en el apartado 3.9. Ahora cada patrón de carga tiene que estar configurado como aparece en la Figura 88. La columna "Scale" implica los factores multiplicativos que se han asignado cuando se han creado la combinación de cargas.

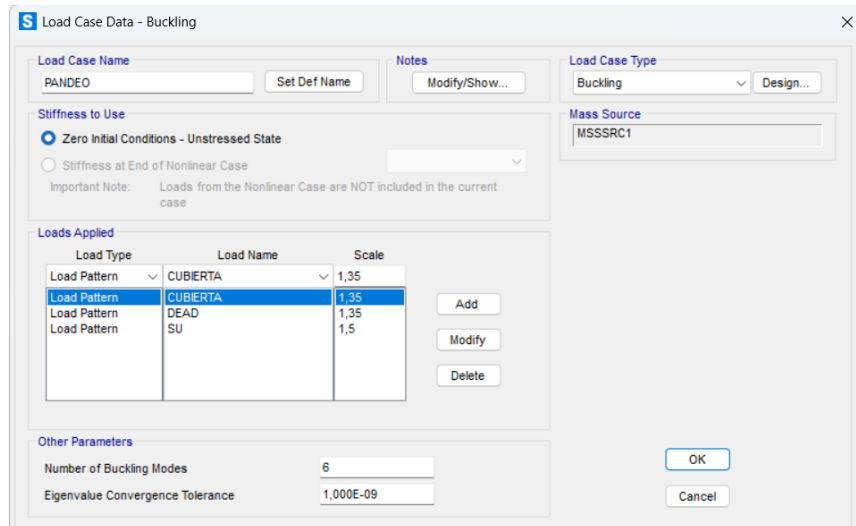


Figura 88: Configuración caso carga pandeo

Una vez hecho esto, se ejecuta de nuevo el cálculo en el modelo y se extrae la deformada de la estructura para el caso de carga pandeo.

En la Figura 89 se muestra como en la parte superior izquierda de la ventana aparece un factor cuyo valor es 2,85. Por lo tanto, la cubierta cumple con la condición dicha anteriormente.

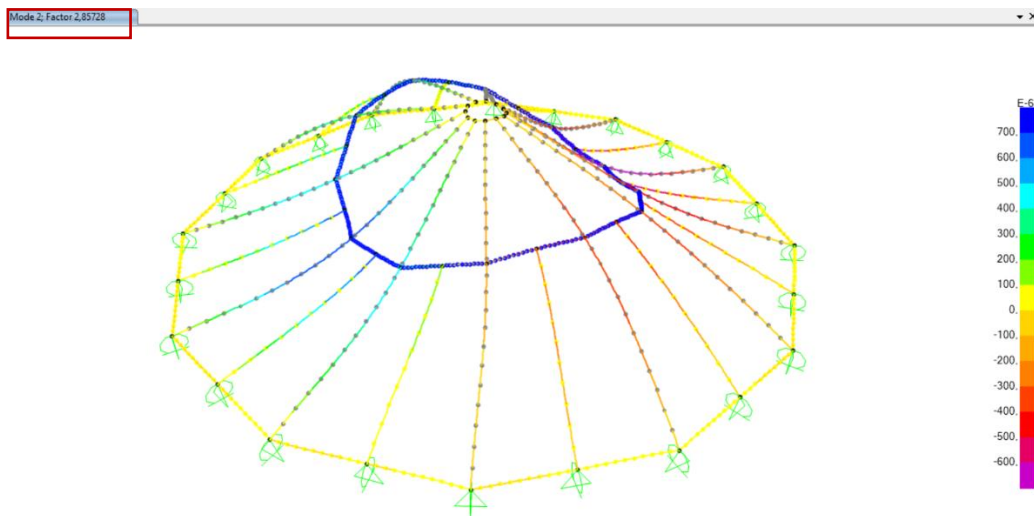


Figura 89: Comprobación pandeo de la estructura

Capítulo 4: Conclusiones y otras consideraciones

4.1. Conclusiones

En este apartado se comentarán las conclusiones obtenidas después de realizar el predimensionado de una cubierta cónica para un depósito vertical de 16 m de diámetro.

Durante este proyecto se ha trabajado con SAP2000 que es un gran software para el cálculo estructural y con él se ha podido realizar un predimensionamiento del perfil para la cubierta cónica. Debido a que se han aprendido nuevas herramientas en el programa como han sido el autodimensionado y el empleo de superficies virtuales para este cálculo estructural.

Durante este proceso se ha entendido el funcionamiento de una cubierta con tipología cónica que presenta esta estructura y se han aplicado unas acciones realistas basadas en las cargas que establece el CTE [1]. De la misma se forma se ha garantizado el cumplimiento de los criterios de fallo (ELU y ELS) establecidos en la normativa y se ha realizado una comprobación del pandeo de la estructura para los perfiles calculados.

En el Anexo 1: Comprobaciones en SAP2000 se ha explicado el comportamiento que tiene SAP2000 cuando se aplican cargas a una superficie en función de la herramienta escogida.

El camino seguido para obtener el resultado es complejo, ya que se han de tener en cuenta muchos factores a la hora de realizar el modelado debido a que una mala configuración del modelo o no tener un dominio y/o experiencia suficiente del programa haría que los resultados fuesen erróneos y poco fiables.

Como conclusión, se puede afirmar que los resultados obtenidos son correctos si se ejecuta una buena configuración del modelo y se conocen las particularidades del programa. Además, este proyecto sirve como una guía didáctica para conocer el SAP2000 y saber el orden correcto a proceder para otros futuros proyectos.

4.2. Recomendaciones para futuros estudios

En este apartado se comentarán las posibles alternativas para seguir con este trabajo de fin de grado.

Una posible opción es realizar un dimensionamiento completo de las cargas establecidas en las diferentes normativas utilizadas durante este proyecto,

debido a que se ha realizado un predimensionado de la estructura y no se han tenido en cuenta otras cargas como el viento y las cargas térmicas. Otra hipótesis sería reducir la carga de uso a la mitad y agregar una carga puntual en algún lugar desfavorable y comprobar si cumple o no.

Otra propuesta sería realizar un estudio modal y/o pandeo completo de esta estructura en SAP2000. Como última propuesta sería realizar el cálculo de las uniones atornilladas entre las vigas y crear una guía con el procedimiento a seguir para el dimensionamiento de estas uniones.

4.3. Consideraciones adicionales

Planificación del trabajo. Diagrama de Gantt.

A continuación, se explicará cuál ha sido el desarrollo del trabajo de fin de grado realizado. Para ello se realizará un diagrama de Gantt como se muestra en la Figura 90 mostrando en la primera columna el listado de tareas que se han realizado y el eje horizontal se muestra el avance temporal en función de los meses hasta la entrega final.

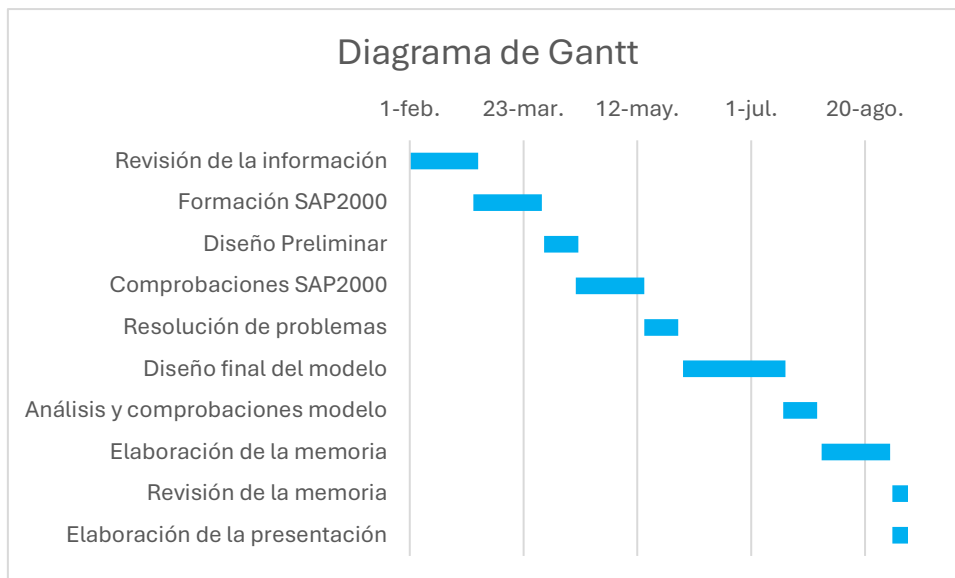


Figura 90: Diagrama de Gantt

Coste del trabajo

En este apartado se realizará una estimación del total de horas invertidas durante la realización de este trabajo y se realizará un presupuesto de los materiales a utilizar, junto con una estimación de horas del trabajo. Hay que tener en cuenta que un TFG son 12 ECTs que suponen 300 h de trabajo del estudiante. La distribución de horas de trabajo queda de la siguiente manera:

- Planificación, propuestas de ideas e investigación: 40 horas de trabajo.
- Revisión de la información (normativa): 60 horas de trabajo.
- Formación en SAP2000: 30 horas de trabajo.
- Diseño del modelo: 50 horas de trabajo.
- Elaboración de la memoria y presentación: 180 horas de trabajo.

La suma es de 360 horas dedicadas a este proyecto. El salario de un ingeniero es de 21.000 anuales-. Según el Boletín Oficial del Estado la jornada laboral anual máxima en el año 2025 será de 1.770 horas. Extraemos que el precio de una hora de trabajo es de 11,86 euros.

Por lo tanto, el coste del trabajo realizado sería 4.270 euros.

Ahora se procederá a calcular el precio de los materiales de la estructura, donde los paneles y mano de obra no estarán incluidos.

La cubierta estaba compuesta por tres secciones diferentes:

- Las 12 vigas principales con una longitud de 8,4 m y la sección de espesor 6 mm en S275.
- El anillo intermedio compuesto por 12 barras de 2,1 m y la sección de espesor 3 mm en S275.
- Las 12 vigas secundarias con una longitud de 4,4 m, las 12 barras del zuncho con una longitud de 4,2 m en S275 y las 12 barras de la cumbrera con una longitud de 0,3 m y todo lo anterior con una sección de espesor 2 mm en S275.

Debido a que las vigas principales superan los 6 m, se necesitan barras de 12 m debido a que es la siguiente medida que se adapta a este caso.

Por lo tanto, como recuento final los materiales serán los siguientes:

- 12 barras de 12 m de tubo #120.060 y espesor 6 mm en S275 con un precio de 19,7 euros/m.
- 6 barras de 6 m de tubo #120.060 y espesor 3 mm en S275 con un precio de 6,7 euros/m.
- 24 barras de 6 m de tubo #120.060 y espesor 2 mm en S275 y con un precio de 10 euros/m.

El coste de los materiales asciende a 4.161,60 euros.

El coste total se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Resumen costes del proyecto

Resumen del presupuesto	
Coste horas ingeniero	4.270,00 euros
Materiales	4.161,60 euros
Total	8.431,60 euros

Bibliografía


- [1] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, «Codigo Tecnico,» Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, 04 2009. [En línea]. Available: <https://www.codigotecnico.org/>. [Último acceso: 11 02 2025].
- [2] C. Blanco Gutiérrez, Escritor, *Proyecto Básico Implantación de sistema acumulador de energía térmica para la red de calor de la Universidad de Valladolid*. [Performance]. Sociedad Pública de Infraestructuras y Medio Ambiente de Castilla y León S.A, 2022.
- [3] AENOR, «UNE-ENV 1991-4,» de *Eurocódigo 1_ Bases de Proyecto y acciones en estructuras* , Marzo 1998.
- [4] Cupa Pizarras, «CupaPizarras,» 16 09 2023. [En línea]. Available: <https://www.cupapizarras.com/>. [Último acceso: 13 05 2025].
- [5] Iron Lux, «Iron Lux,» [En línea]. Available: <https://www.ironlux.com/>. [Último acceso: 13 05 2025].
- [6] Celabasa Sport, «Celabasa Sport,» [En línea]. Available: <https://www.celabasa.es>. [Último acceso: 06 09 2025].
- [7] Silos Spain, «Silos Spain,» Silos Spain, 8 06 2023. [En línea]. Available: <https://silosspain.com>. [Último acceso: 13 5 2025].
- [8] DAD Arquitectura, «DAD Arquitectura,» 2010. [En línea]. Available: <https://dadarquitectura.com/>. [Último acceso: 06 09 2025].
- [9] El Talon Sierte, «El Talon Sierte,» 18 10 2015. [En línea]. Available: <https://eltalonsierte.blogspot.com/>. [Último acceso: 05 05 2025].

Anexo 1: Comprobaciones en SAP2000

En este capítulo se profundizará sobre el comportamiento que tiene SAP2000 frente a cargas aplicadas a superficies tipo “None”. Para ello se realizarán una serie de modelos equivalentes con cargas aplicadas sobre las barras que se utilizarán como comprobaciones de que la resolución del modelo es correcta.

Comprobación comportamiento superficie “None” en SAP2000

Se debe asegurar que es igual aplicar una presión (N/m²) sobre una superficie o paño que cargar una carga distribuida equivalente sobre una

barra. Para ello se creará un nuevo modelo “File” / “New Model” o . Se elegirá la plantilla “Grid Only” y las unidades “N,m,C” y el país “Europe”. Posteriormente se configurará la rejilla como aparece en la Figura 91.

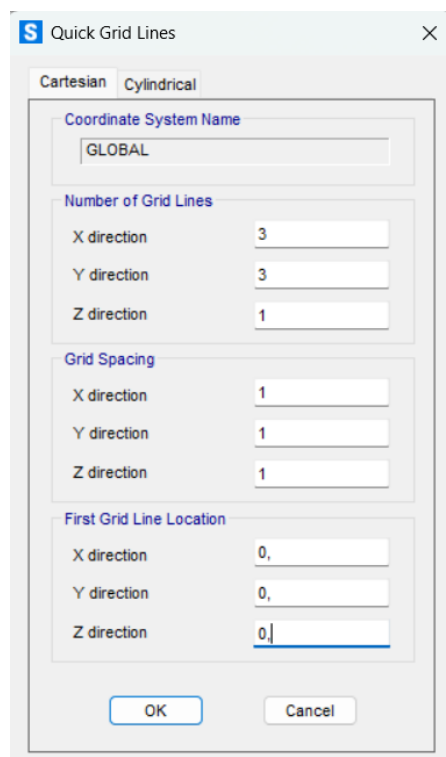


Figura 91: Configuración rejilla para las comprobaciones

Una vez creada la rejilla se definirá el material (“Define” / “Materials”) y será S355-CF y la sección de la barra (“Define” / “Section Properties” / “Frame Sections”) igual que en la Figura 92, un tubo cuadrado conformado en frío de anchura 100 mm, espesor 3 mm y el material S355-CF.

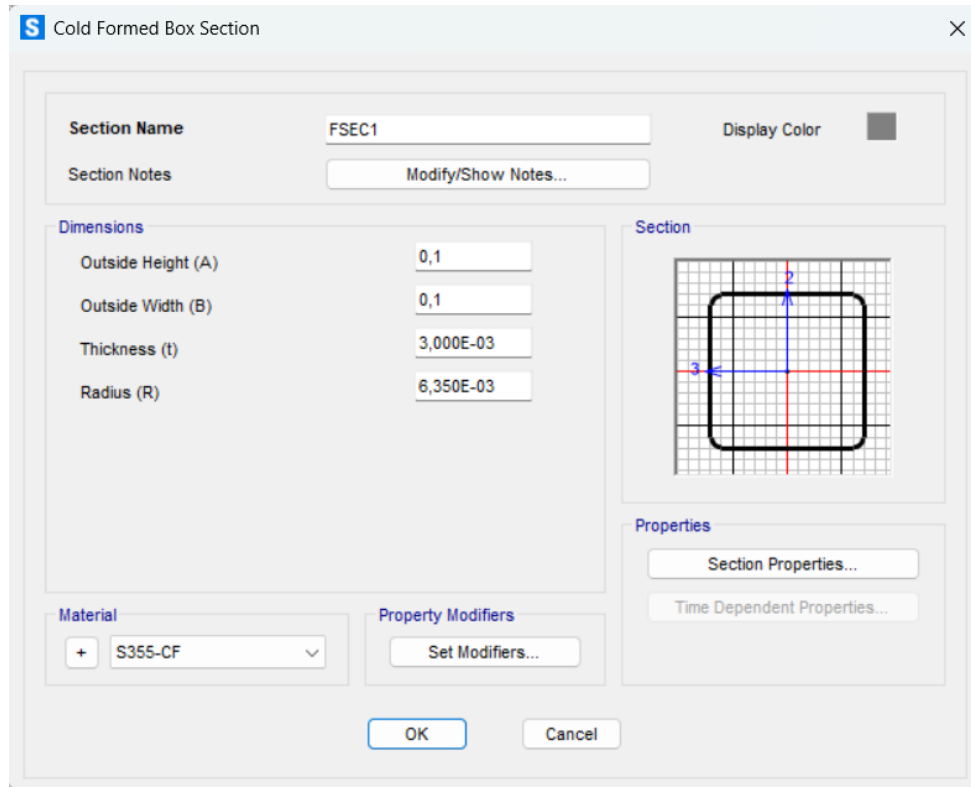



Figura 92: Sección tubo cuadrado conformado en frío

Para lograr este objetivo se ha planteado un cuadrado de lado $2L$ dividido en 4, con los nodos (A, B, C, D, E, F, G, H y J) y 12 barras (marcadas en color azul) que unen los nodos tal y cómo se muestra en la Figura 93. Para ello con la plantilla que se ha generado se dibujarán las barras descritas anteriormente con la herramienta “Quick Draw Frame/Cable” . Ahora aparecerá una tabla que habrá que configurarla de la siguiente forma: “Line Object Type” tendrá que estar con la opción “Straight Frame”, “Section”, tendrá que estar seleccionada la sección que se ha creado previamente, “Moment Releases” deberá estar en “Continuous” para que la barra sea continua porque si se elige la opción “Pinned” aparecerán rótulas en los extremos y las filas “Local Axis Rotation” junto con “XY Plane Offset Normal” deberán estar a 0, debido a que no se necesitará rotar ningún eje de las barras que se vayan a crear y luego no se necesitará tener un desplazamiento de la barras a la hora de crearlas. Una vez hecho lo anterior se crearán las barras haciendo clic en cada línea de la rejilla.

A mayores se asignarán 4 apoyos fijos (marcados en verde) (“Assign” / “Joint” / “Restrains”) en los nodos B, D, F y H. En la Figura 93 se puede apreciar la geometría que se ha descrito.

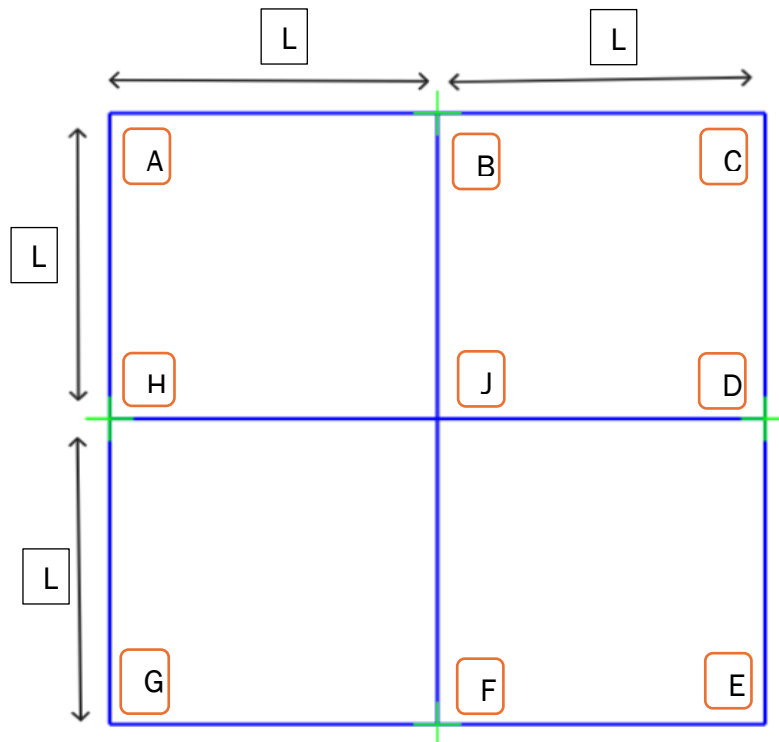



Figura 93: Geometría para la comprobación

Ahora se crearán 4 superficies: ABJH, BCDJ, DEFJ y FGHJ. Para crear estas superficies se hará con la herramienta “Quick Draw Area”  debido a que es una superficie albergada dentro de una rejilla con la particularidad de que la sección de la superficie a crear sea tipo “None”.



A continuación, se crearán los dos casos de carga a utilizar: “Q” y “P”. Para ello con la ruta “Define” / “Load Patterns” el tipo de patrón “Other” para ambos casos.

Para realizar las comprobaciones se han creado los siguientes casos:

- Aplicar una carga de presión (Q) “Uniform (Shell)” en las superficies tipo “None”.
- Aplicar una carga distribuida (P) sobre las vigas.
- Aplicar fuerzas (F) en cada nodo.
- Aplicar una carga de presión (Q) “Uniform to Frame (Shell)” en las superficies tipo “None”.

En cada caso se harán dos tipos de comprobaciones: la primera comprobando que las reacciones en los apoyos sean las mismas y la segunda comprobando que los esfuerzos internos de las barras sean iguales o lo más próximos posibles, debido a posibles redondeos que afectarán en el cálculo final.

Aplicar una carga de presión (Q) "Uniform (Shell)" en las superficies tipo "None"

En este primer caso se ha aplicado una carga de presión distribuida $Q=1000$ N/m² en la superficie. Para asignar esta carga a la superficie se ha seguido la siguiente ruta "Assign" / "Area Loads" / "Uniform". Una vez hecho esto se resuelve el modelo pulsando en el icono . Las reacciones en los apoyos (B, D, F y H) se obtienen del icono "Show Forces/Stresses"  eligiendo la opción "Joints" y eligiendo el caso de carga Q. Las reacciones de los apoyos tienen un cortante con valor 1000 N como se puede ver en la Figura 94 y el diagrama de cortantes y flectores que aparece en la Figura 95, Figura 96 y Figura 97. En la Figura 98 se muestra la deformada de la estructura y el valor del desplazamiento en su extremo.

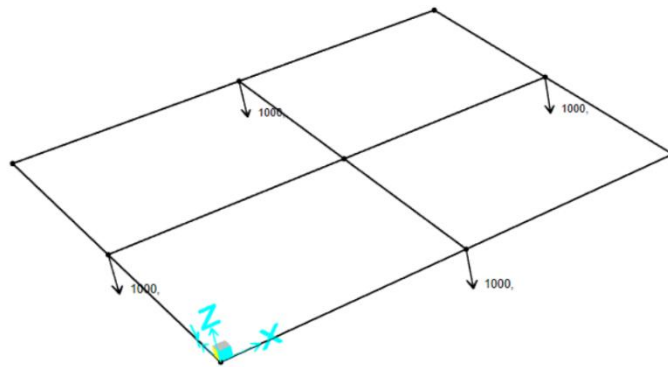


Figura 94: Reacciones en apoyos aplicando presión Q con la herramienta "Uniform (Shell)"

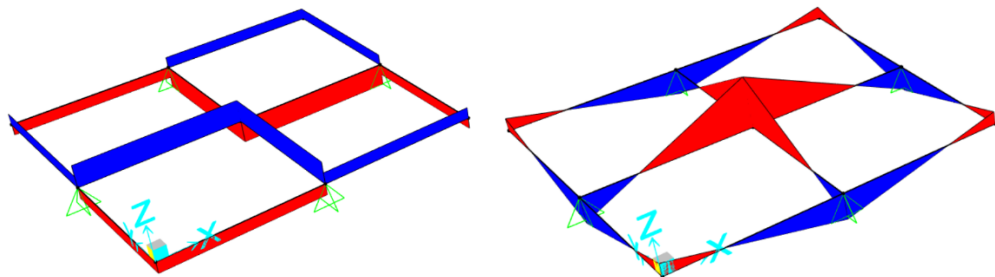


Figura 95: Vista global de cortantes y momentos aplicando presión Q con la herramienta "Uniform (Shell)"

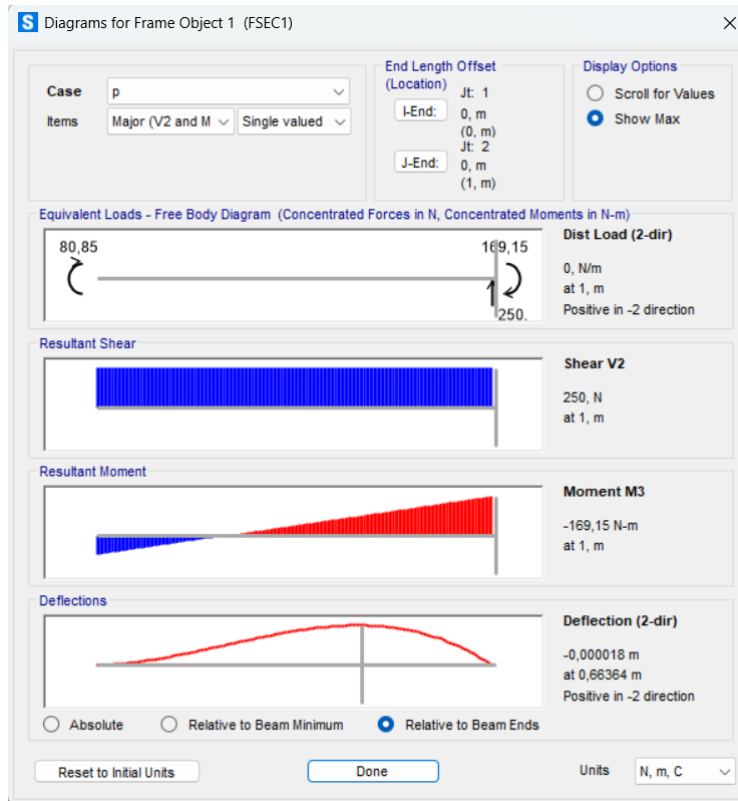


Figura 96: Diagrama de esfuerzos internos aplicando presión Q con la herramienta "Uniform (Shell)"



Figura 97: Diagrama de tensiones de la barra aplicando presión Q con la herramienta "Uniform (Shell)"

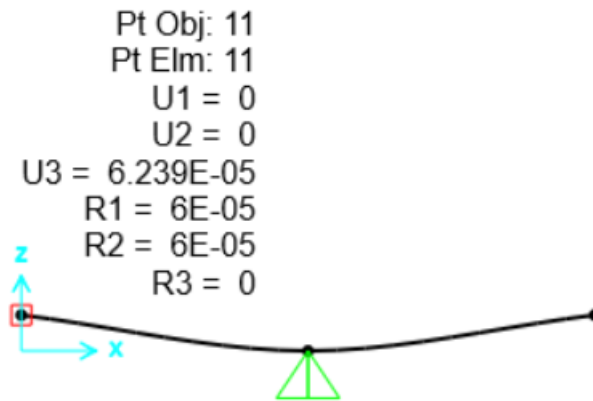


Figura 98: Deformada aplicando presión Q con la herramienta "Uniform (Shell)"

Al haber aplicado una carga superficial entonces tendría que salir un diagrama de cortantes de orden 0 (constante) y un diagrama de flectores de orden 1 (lineal). Estos resultados son debido a la herramienta que se ha empleado para asignar las cargas sobre la superficie. Esta solamente carga en los extremos y pasa el cálculo a los vértices.

Nota: para que el cálculo de la superficie sea correcto SAP2000 nos obliga a que la superficie debe de estar perimetrada por barras.

Aplicar una carga distribuida (P) sobre las vigas

En este segundo caso se mantiene la geometría descrita anteriormente por lo que se hará una réplica de la estructura completa para agilizar y tener los todos los casos para evaluar y comparar a la vez. Se ha aplicado una carga distribuida P sobre las vigas. Para asignar esta carga se ha seguido la siguiente ruta "Assign" / "Frame Loads" / "Distributed". Para calcular el valor de P se ha seguido la siguiente ecuación:

$$Q * Area = P * n_{barras} * L_{barra}$$

$$Q * (2L)^2 = P * 16 * L \Rightarrow Q * 4L^2 = P * 16 * L \Rightarrow$$

$$P = \frac{4 * Q * L}{16} = \frac{QL}{4} = \frac{1000 \left(\frac{N}{m^2}\right) * 1(m)}{4} = 250\left(\frac{N}{m}\right)$$

Se han realizado dos tipos de comprobaciones: la primera comprobando que las reacciones en los apoyos sean las mismas y la segunda comprobando que los esfuerzos internos de las barras sean iguales o lo más próximos.

Las reacciones en los apoyos (B, D, F y H) tienen un valor de 1000 como se puede ver en la Figura 99. Al haber aplicado una carga distribuida el diagrama de cortantes es de orden 1 (lineal) como se aprecia en la Figura

100 y Figura 101. El diagrama de flectores es de orden 2 (parabólico) como se puede apreciar en la Figura 100 y Figura 102. En la Figura 103 se muestran los desplazamientos de los nodos junto con la deformada de la estructura.

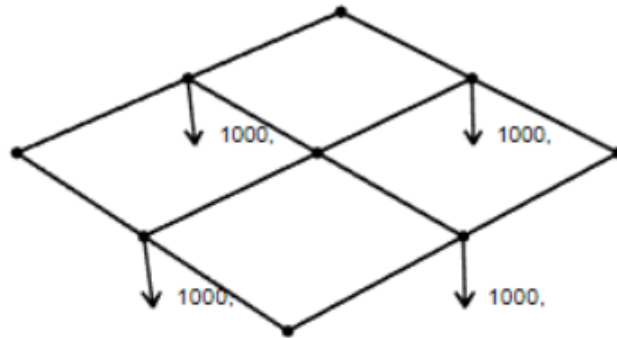


Figura 99: Reacciones aplicando una carga distribuida (P) sobre las vigas

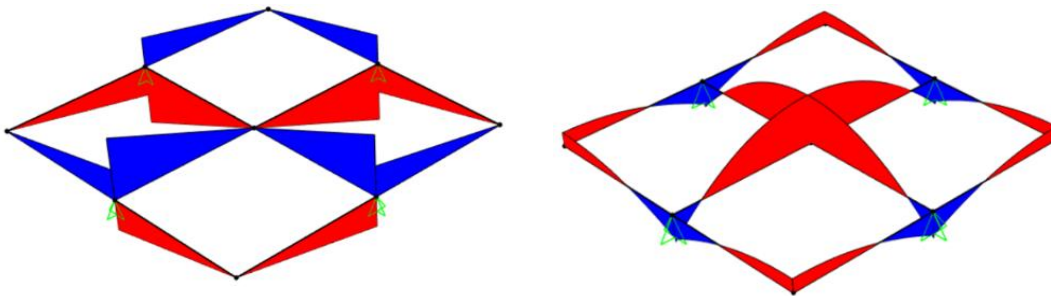


Figura 100: Vista cortantes y flectores aplicando una carga distribuida (P) sobre las vigas

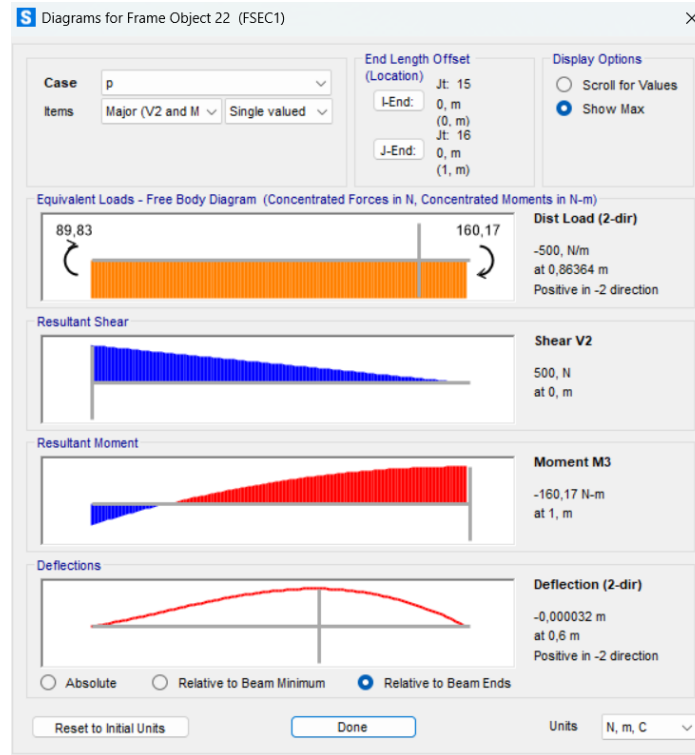


Figura 101: Diagrama de esfuerzos internos de la barra aplicando una carga distribuida (P) sobre las vigas

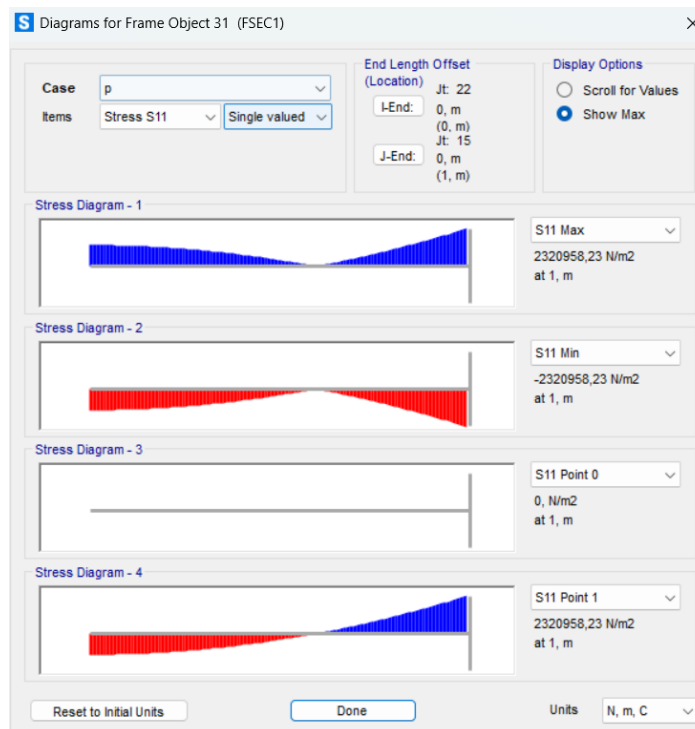


Figura 102: Diagrama de tensiones de la barra aplicando una carga distribuida (P) sobre las vigas

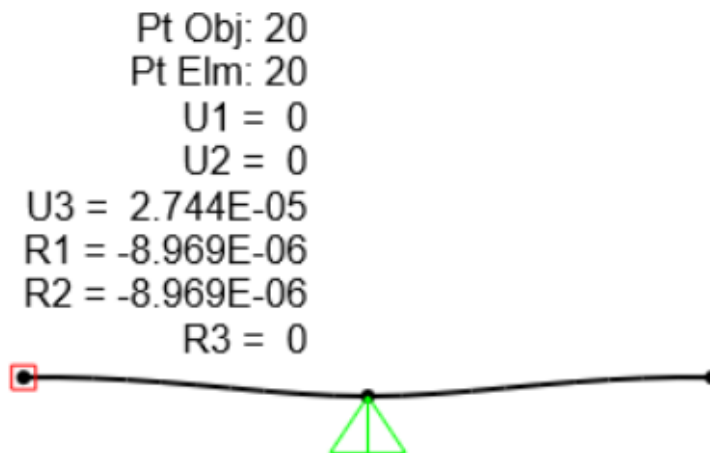


Figura 103: Deformada aplicando una carga distribuida (P) sobre las vigas

Aplicar fuerzas (F) en cada nodo

En este tercer caso se ha aplicado una fuerza F aplicada sobre cada nodo. Se debe tener en cuenta que cada nodo recibe el valor F, pero donde convergen dos superficies esos puntos tendrán el valor de 2F y el punto donde convergen las cuatro superficies tendrá un valor de 4F, tal y como aparece en la Figura 104.

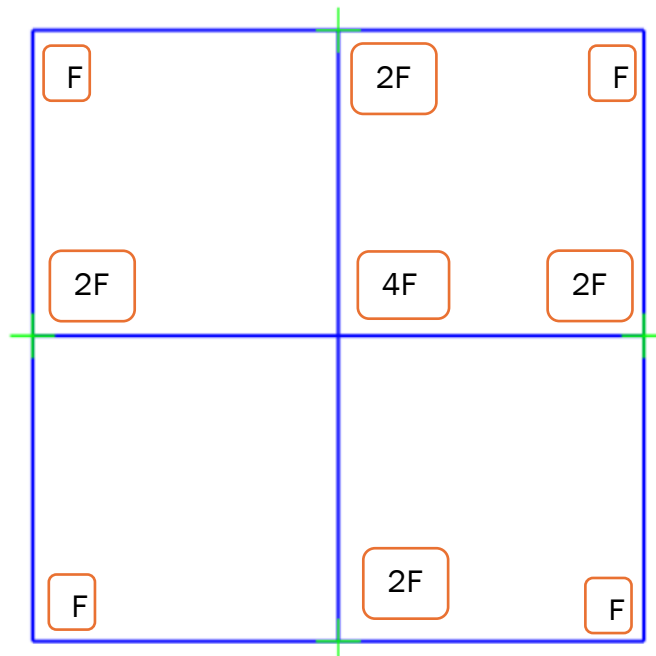


Figura 104: Esquema cargas F sobre los nodos

Para asignar esta carga se ha seguido la siguiente ruta "Assign" / "Joint Loads" / "Forces". Se ha calculado el valor de F mediante la siguiente ecuación:

$$p * Area = F * n_{barras} \Rightarrow F = \frac{p * (2L)^2}{16} = \frac{1000 \left(\frac{N}{m}\right) * 4 * 1(m^2)}{16}$$

$$F = 250 N$$

Las reacciones en los apoyos (B, D, F y H) tienen un valor de 1000 como se puede ver en la Figura 105. Al haberse aplicado fuerzas puntuales el diagrama de cortantes es tipo 0 (constante) y el diagrama de flectores es tipo 1 (lineal), como se aprecia en la Figura 106 y en la Figura 107. Mientras que los diagramas de tensiones se muestran en la Figura 108 y la deformada de la estructura junto con los desplazamientos de los nodos se encuentran en la Figura 108.

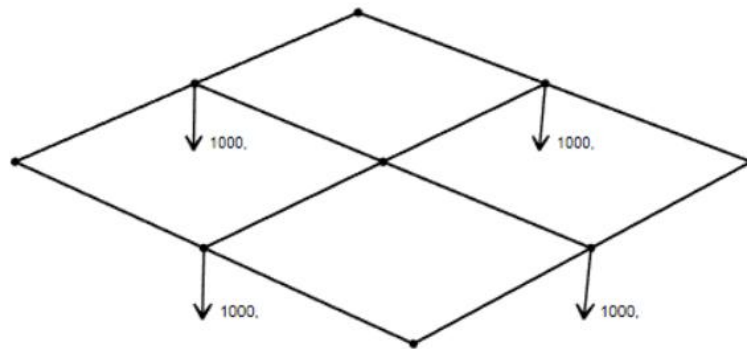


Figura 105: Reacciones en apoyos aplicando fuerzas puntuales F en cada nodo

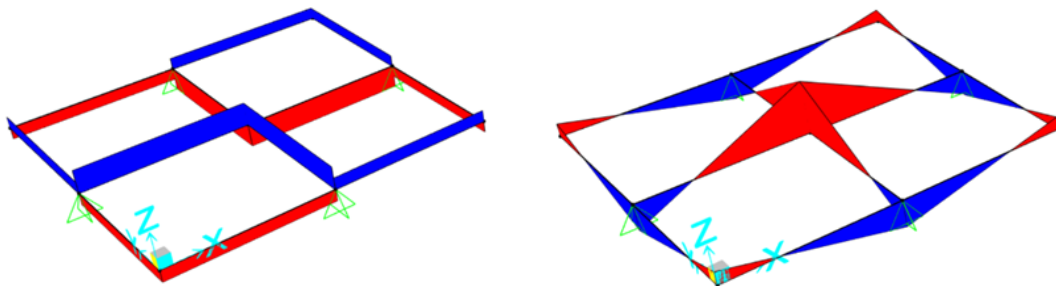


Figura 106: Vista global de cortantes y flectores aplicando fuerzas puntuales F en cada nodo

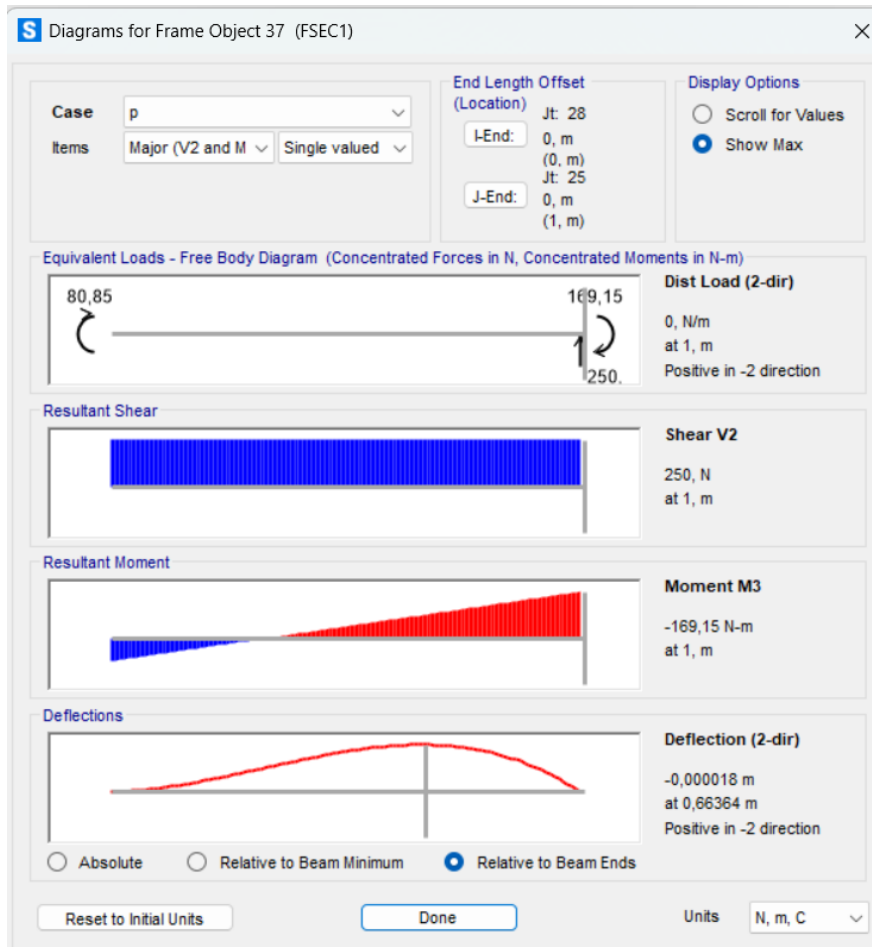


Figura 107: Diagrama de esfuerzos internos aplicando fuerzas puntuales F en cada nodo

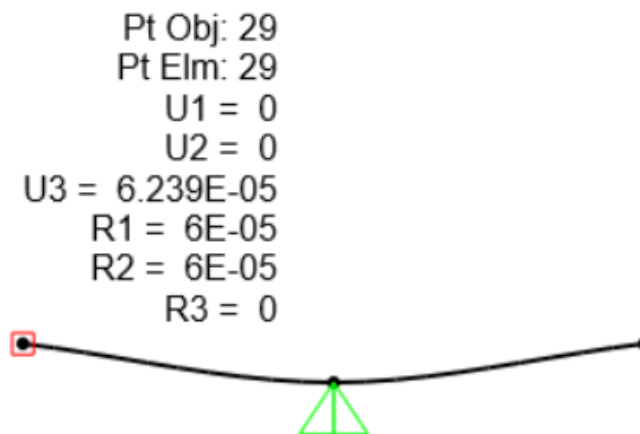


Figura 108: Deformada aplicando fuerzas puntuales F en cada nodo

Aplicar una carga de presión (Q) "Uniform to Frame (Shell)" en las superficies tipo "None"

Este caso es similar al primer caso, excepto porque la carga superficial se aplica mediante otra herramienta siguiendo la ruta "Assign" / "Area Loads"

/ "Uniform to Frame (Shell)". De esta forma la superficie "None" transmite la carga distribuida de manera correcta como ocurre en el segundo caso cuando aplicamos una carga distribuida P sobre la barra. Para mejorar la precisión de los cálculos dividiremos las barras en cuatro trozos.

En la Figura 109 se muestran que las reacciones sobre los apoyos tienen el valor de 1000 N, como ha ocurrido en los casos anteriores. El diagrama de cortantes es de orden 2 (parabólico) y el diagrama de momentos flectores es de orden 3 como se muestra en la Figura 110 y la Figura 111. El diagrama de tensiones se muestra en la Figura 112. La deformada de la estructura junto con los desplazamientos de los extremos de la estructura se encuentran en la Figura 113.

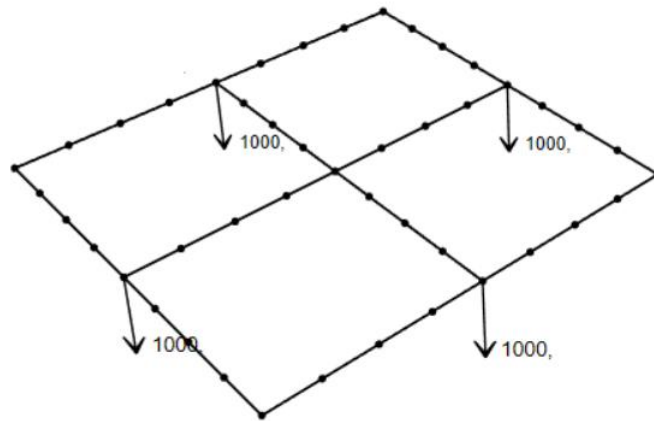


Figura 109: Reacciones en los apoyos aplicando una carga de presión (Q) "Uniform to Frame (Shell)" en las superficies tipo "None"

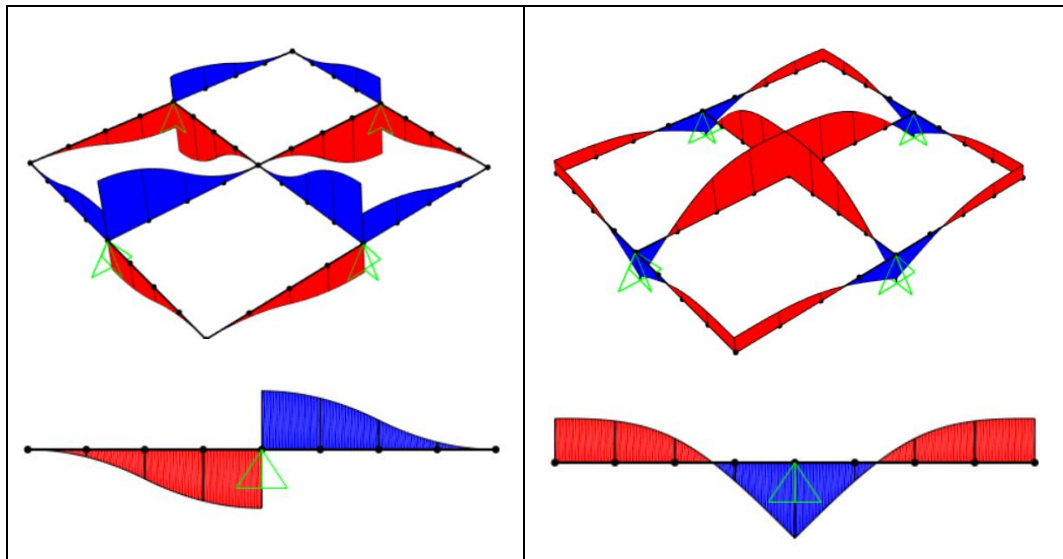


Figura 110: Vista global de cortantes y momentos aplicando una carga de presión (Q) "Uniform to Frame (Shell)" en las superficies tipo "None"

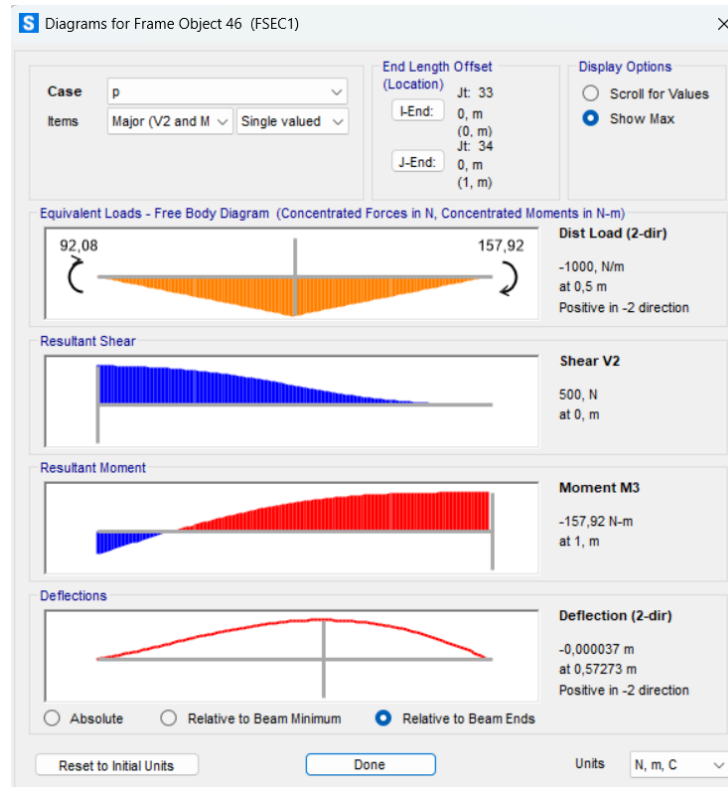


Figura 111: Diagrama de esfuerzos internos de la barra aplicando una carga de presión (Q) "Uniform to Frame (Shell)" en las superficies tipo "None"

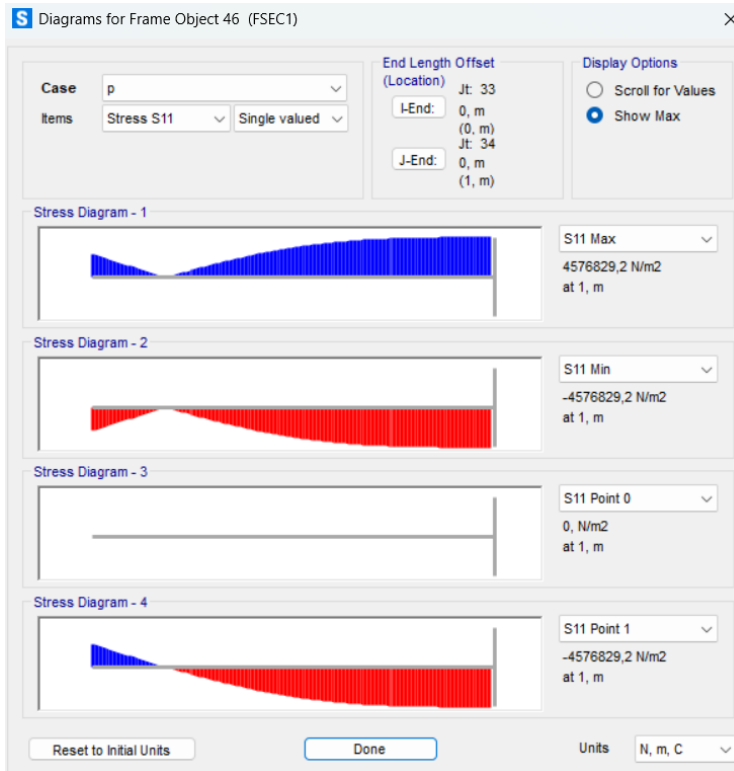


Figura 112: Diagrama de tensiones de la barra aplicando una carga de presión (Q) "Uniform to Frame (Shell)" en las superficies tipo "None"

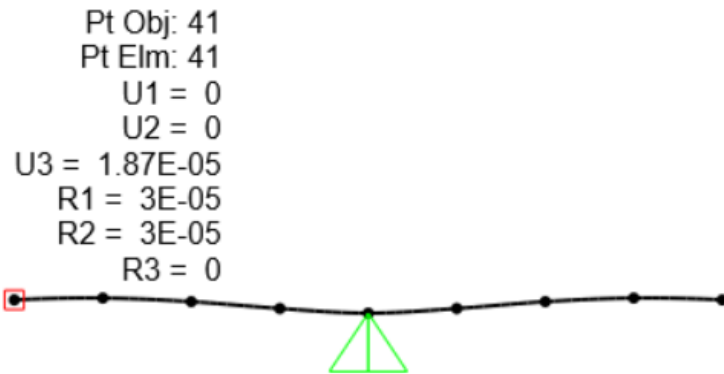


Figura 113: Deformada aplicando una carga de presión (Q) "Uniform to Frame (Shell)" en las superficies tipo "None"

Resumen conclusiones de los casos de comprobación

Para finalizar se creará la Tabla 8 para resumir las conclusiones extraídas en cada apartado de este anexo. La conclusión es que se debe utilizar la herramienta "Uniform to Frame", para aplicar cargas sobre superficies virtuales (tipo "None") debido a que los esfuerzos internos y las tensiones en las barras se distribuyen de forma correcta, ya que distribuyen los esfuerzos de forma correcta siguiendo el orden de los cortantes y flectores..

Tabla 8: Valores de las comprobaciones

	Q Uniform	P distribuida	F puntual	Q Uniform to Frame
Reacciones apoyos	1000	1000	1000	1000
Orden del cortante	0	1	0	2
Orden de los flectores	1	2	1	3
U3	6,239E-05	2,744E-05	6,239E-05	1,87E-05
R1	6E-05	8,969E-06	6E-05	3E-05