



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Dimensionamiento de estructuras
mediante CYPE y comparación de
resultados con SAP2000.**

Autor:

Yagüe Ortega, Álvaro

Tutores:

Magdaleno González, Álvaro.

García García, Ismael.

**Departamento de Construcciones
Arquitectónicas, Ingeniería del
Terreno y Mecánica de los Medios
Continuos y Teoría de Estructuras.**

Valladolid, septiembre, 2024.

Agradecimientos.

Me gustaría transmitir mis más sentidos agradecimientos a las siguientes personas:

-Mis tutores: Antolín Lorenzana Iban y Álvaro Magdaleno González, por haber aceptado y tutorizado mi propuesta de proyecto, por haberme ayudado y enfocado en la dirección correcta para conseguir un trabajo bien realizado.

-Mis familiares, por su apoyo incansable y por haberme impulsado a conseguir todos mis objetivos personales y académicos.

-Mis compañeros de universidad, por haber aprendido y disfrutado muchos momentos juntos, tanto en clase como fuera y haber hecho este camino más liviano.

-Todos los profesores de los que he tenido el placer de aprender y me han ayudado a formarme en la Universidad de Valladolid.

Resumen:

Este proyecto consiste en el dimensionamiento y cálculo de varias estructuras metálicas con distintas cargas aplicadas mediante el software CYPE. Una vez obtenido el dimensionamiento, se hará el cálculo de la estructura en el software SAP 2000 con las mismas cargas y realizará una comparación de resultados (desplazamientos, esfuerzos, deformada, modo de pandeo ...) entre ambos softwares.

Se realizarán tres estudios distintos, primero una barra rígida biapoyada con carga de "Sobrecarga de uso", un segundo caso de un pórtico rígido a dos aguas biempotrado con carga de "Sobrecarga de uso" y un tercero caso de un pórtico rígido a dos aguas biempotrado con cargas de peso propio, viento y nieve.

Palabras clave:

SAP 2000, CYPE, dimensionamiento, esfuerzos, cargas, estudio comparativo.

Abstract:

This project involves the sizing and calculation of various metal structures with different applied loads using CYPE software. Once the sizing is obtained, will perform a calculation of the structure in SAP 2000 software with the same loads and make a comparison of results (displacements, stresses, deformed shape, buckling multiplier factor, etc.) between both software programs.

Three different studies will be carried out, first a rigid double-supported bar with a "Use Overload" load, a second case of a rigid double-recessed gable frame with a "Use Overload" load and a third case of a rigid double-recessed gable frame with loads of its own weight, wind and snow.

Keywords:

SAP 2000, CYPE, sizing, stresses, loads, comparative study.

INDICE:

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1-MOTIVACIÓN.....	1
1.2-OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO.....	2
1.3- METODOLOGÍA DEL TRABAJO.....	2
CAPÍTULO 2. CONSIDERACIONES PREVIAS.....	3
2.1-ESTRUCTURA. CONCEPTOS BÁSICOS.....	3
2.2-CARGAS APLICADAS EN LAS ESTRUCTURAS.....	3
2.3-ELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA ESTRUCTURA.....	4
2.4-PROGRAMAS COMPUTACIONALES DE CÁLCULOS.....	5
2.4.1. CYPE:.....	5
2.4.2. SAP 2000:.....	5
CAPÍTULO 3. CASOS DE ESTUDIO.....	7
3.1-BARRA.....	7
3.2- PÓRTICO CON CARGA DE SOBRECARGA DE USO.....	7
3.3- PÓRTICO CON CARGAS DE VIENTO, NIEVE Y PESO PROPIO.....	8
CAPÍTULO 4. ESTUDIO.....	9
4.1-BARRA.....	9
4.1.1. CYPE:.....	9
4.1.2. SAP 2000:.....	18
4.2-PÓRTICO CON CARGA DE SOBRECARGA DE USO.....	29
4.2.1. CYPE:.....	29
4.2.2.SAP 2000:.....	42
4.3- PÓRTICO CON CARGAS DE VIENTO, NIEVE Y PESO PROPIO.....	59
4.3.1. CYPE:.....	59
4.3.2. SAP 2000:.....	81
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	101
5.1- BARRA.....	101
5.2- PÓRTICO CON CARGA DE SOBRECARGA DE USO.....	106
5.3- PÓRTICO CON CARGAS DE VIENTO, NIEVE Y PESO PROPIO.....	115
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	125
6.1- CONCLUSIONES FINALES.....	125
6.2- LÍNEAS DE MEJORA.....	125
6.3-CONSIDERACIONES ADICIONALES.....	126
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	127

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1-MOTIVACIÓN

En este trabajo se va a realizar el dimensionamiento y cálculo de varias estructuras con diferentes cargas. El material a utilizar será el metal, concretamente el acero, debido a que éste, ofrece grandes ventajas, respecto a otros. El acero presenta alta resistencia, capacidad de soportar grandes cargas, flexibilidad de diseño y construcción rápida. Estas características hacen que sea una opción perfecta para elaborar barras rígidas y pórticos y su posterior utilización en una futura o hipotética nave industrial.

El motivo por el que se ha elegido este tema para el Trabajo Final de Grado (TFG) ha sido el de poner en práctica parte de los conocimientos adquiridos durante el transcurso de los cuatro años de carrera, sobre todo, en la asignatura de “Estructuras y Construcciones industriales” de cuarto curso. Asignatura por la que el alumno ha mostrado gran interés, así como, por la realización de proyectos en ingeniería y el deseo de seguir adquiriendo nuevos conocimientos sobre cálculo estructural. Será el primer proyecto que realizará como “ingeniero” de forma autónoma.

Según la definición de Ingeniero” Es aquella persona que puede llevar a cabo cualquier servicio de ingeniería en una empresa. Tiene una titulación universitaria superior y puede diseñar materiales, estructuras, máquinas y sistemas”.

Esto, sumado también al empeño de ampliar y profundizar en el uso y dominio de algunos programas informáticos específicos, como son “CYPE”, “SAP2000” y también se utilizará el “Word” para la redacción del proyecto. En la sociedad actual y moderna, es muy importante en ingeniería el uso de software para el dimensionamiento y cálculo de las edificaciones. Éstos, facilitan el trabajo, haciéndolo más cómodo y fiable. Para finalmente analizar e interpretar los resultados obtenidos.

Por último, servirá para completar y obtener la titulación del grado en Ingeniería mecánica. Este documento tiene un valor de 12 créditos y es imprescindible para la obtención del título del grado anteriormente mencionado.

Todo ello, ha influido en la elección de dicho tema.

1.2-OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO.

○ Objetivo principal:

El objetivo principal del presente trabajo es el estudio comparativo de las distintas estructuras con las diferentes cargas mediante los programas de CYPE y SAP 2000.

○ Objetivos secundarios:

-Dimensionamiento de las distintas estructuras (barra y pórticos) con las diferentes cargas aplicadas (sobrecarga de uso y peso propio, viento y nieve) mediante CYPE.

-Cálculo y análisis de esfuerzos de las estructuras mediante ambos softwares.

-Cálculo y análisis a pandeo de las estructuras mediante ambos programas de cálculo.

-El estudio del pórtico de la hipotética nave se emplazará en España, en la ciudad de Valladolid, la edificación se construirá en el polígono industrial de San Cristóbal, a una altitud de 691 metros sobre el nivel del mar.

1.3- METODOLOGÍA DEL TRABAJO.

La metodología del proyecto ha consistido en varias etapas:

Una primera junto con los tutores para enfocar y definir los casos de estudio (en barra rígida y pórtico con carga de sobrecarga de uso y pórtico con cargas de viento, nieve y peso propio). Una segunda etapa de diseño preliminar en el que se selecciona el material, las restricciones y las acciones aplicadas.

Y una vez realizado esto, se procede a dimensionar respecto a las cargas aplicadas en CYPE. Se realiza también un estudio analítico de esfuerzos y deformaciones y un estudio a pandeo en CYPE y SAP 2000.

Para finalizar, una tercera etapa de comprobación, inspección del trabajo, comparación de los resultados obtenidos entre los diferentes softwares utilizados y propuestas de mejora.

CAPÍTULO 2. CONSIDERACIONES PREVIAS.

2.1-ESTRUCTURA. CONCEPTOS BÁSICOS

En el ámbito de la ingeniería y arquitectura se refiere a **estructura** a un sistema organizado de elementos diseñados para resistir cargas y proporcionar estabilidad. Estas cargas pueden ser de distintos tipos, como cargas gravitatorias, sísmicas, de viento, de nieve, entre otras. Las estructuras se diseñan meticulosamente para soportar estas cargas cumpliendo con los requisitos y normativas de seguridad y funcionalidad.

Las estructuras pueden ser de diferentes tipos, desde simples, como una viga o una columna, hasta complejas, como puentes, rascacielos o presas. Se clasifican según su función y cargas a las que están sometidas y pueden estar construidos con una variedad de materiales, como acero, hormigón, madera e incluso materiales compuestos.

De manera general, para el diseño de una estructura se deberán tener en cuenta los aspectos que se enumeran a continuación:

- Resistencia y estabilidad: los elementos se deberán dimensionar para que en ninguna situación se sobrepasen las tensiones admisibles en los materiales como consecuencia de la actuación de las cargas a las que están sometidos.
- Aptitud al servicio: las deformaciones y vibraciones de los elementos estructurales deberán mantenerse dentro de unos límites, de forma que se mantenga la integridad estructural y no se afecte al confort de los usuarios.
- Durabilidad: toda construcción se diseña para que la influencia de las posibles acciones químicas, físicas o biológicas que no comprometa la capacidad portante de la misma.
- Aspecto económico: no se deberá incurrir en costes innecesarios para no encarecer el precio de las construcciones. Como se sabe, afecta a todo tipo de proyectos.

También es importante tener en cuenta otros factores como la geometría, el tipo de material y las condiciones ambientales a la hora de diseñar una estructura. [1]

2.2-CARGAS APLICADAS EN LAS ESTRUCTURAS

En cuanto a las cargas que afectan a las estructuras, se clasifican en varias categorías según su naturaleza y cómo actúan sobre la estructura.[8]

- Cargas permanentes o cargas muertas: Se engloban las cargas como son el peso propio de la estructura (viga, losa...), el peso de los acabados (revestimientos, techos...) y el peso de las instalaciones (eléctricas, climatización...). Estas cargas son constantes, no cambian con el tiempo.
- Cargas variables o cargas vivas: Se engloban las cargas como son las personas y mobiliario (peso de personas, muebles...) y carga de uso. Pueden variar con el tiempo.
- Cargas dinámicas: Aquí se encuentran las cargas de impacto (golpes) y las vibraciones (maquinaria, tráfico, terremotos...). Son causadas por fuerzas que varían en el tiempo.
- Cargas ambientales: Aquí se engloban las producidas por viento, nieve, cambios de temperatura(térmicas) y sísmicas. Son fuerzas que actúan sobre la estructura debido a condiciones climáticas y naturales.
- Cargas accidentales: Son las producidas por explosiones y colisiones. Son fuerzas que resultan de eventos no planificados y poco frecuentes.

-Cargas de asentamiento: Desplazamientos desiguales del terreno debidas al movimiento del suelo bajo la estructura.

-Cargas especiales: Aquí se engloban las cargas de mantenimiento (equipos utilizados) y las cargas de construcción (material almacenado).

Como se puede ver hay una gran clasificación.

El estudio de los tres casos de este proyecto serán la carga de uso (sobrecarga de uso) para el primer y segundo caso y carga de peso propio, nieve y viento para el tercer caso.
[1]

2.3-ELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA ESTRUCTURA

El material utilizado para la realización de estructuras de una nave industrial, generalmente suele ser el hormigón, metálica(acero) o mixta.[4]

En este caso, el material utilizado para realizar las estructuras de este proyecto será el acero. Por tanto, se van a definir las ventajas y los inconvenientes de dicho material.

ACERO:

Ventajas:

-Resistencia estructural: El acero estructural es un material que posee alta resistencia a compresión como a tracción. Además de la alta resistencia mecánica, tiene un reducido peso propio, por lo que las secciones resistentes necesarias son de reducidas dimensiones.

-Uniformidad: las propiedades del acero no sufren cambios destacables a lo largo del tiempo.

-Durabilidad: las estructuras de acero duran indefinidamente, siempre que su mantenimiento sea el adecuado.

-Gran rapidez de montaje: debido a la posibilidad de prefabricar los elementos de la estructura.

-Gran facilidad de unión: Ya sea unión soldada o por medio de tornillos o remaches.

-Fiabilidad y calidad: Los elementos fabricados son conforme a un control de calidad, están normalizados y deben tener certificación.

-Reciclaje: Es el material reciclado por excelencia, se puede reciclar infinidad de veces sin perder ninguna de sus propiedades.

Desventajas:

-Elevado coste de mantenimiento: El acero es susceptible a la corrosión, al estar expuestos al aire y al agua, por lo tanto, precisan tratamientos que eviten esa corrosión.

-Mala resistencia al fuego: las propiedades de resistentes del acero a altas temperaturas se reducen considerablemente.

-Pandeo: Susceptibles a este fenómeno cuanto más esbeltos y largos sean los elementos sometidos a compresión.

-Fractura fácil: Bajo ciertas condiciones, el acero puede fallar de forma frágil provocando fallos catastróficos.[3]

2.4-PROGRAMAS COMPUTACIONALES DE CÁLCULOS.

El Trabajo Final de Grado se va a apoyar en los programas CYPE y SAP 2000 para la realización del cálculo.

2.4.1. CYPE:

Dentro del conjunto de programas CYPE, el estudio se va a centrar en “CYPE 3D”, que es una herramienta específica para el análisis y diseño tridimensional de estructuras. También se va a utilizar “Generador de Pórticos” para el estudio del segundo y tercer caso.

Algunas de las características y funcionalidades de CYPE 3D incluyen:

- Modelado tridimensional: Permite la creación de modelos detallados de estructuras en tres dimensiones.

- Análisis estructural: Realiza análisis estáticos y dinámicos de la estructura, teniendo en cuenta diferentes tipos de cargas como las provenientes del viento, sismo o cargas vivas.

- Generación de informes y documentación técnica.

En este trabajo, se ha utilizado CYPE para obtener el dimensionamiento de la estructura con las cargas aplicadas y posteriormente se ha realizado un análisis estático de la estructura.[2]

2.4.2. SAP 2000:

Es una herramienta ampliamente utilizada por ingenieros civiles y estructurales para el modelado, análisis y diseño de estructuras. En la universidad se ha trabajado con ella en varias asignaturas, por lo que ya existía un conocimiento previo del programa y el alumno ya está familiarizado con él.

Aquí hay algunos aspectos destacados sobre SAP 2000:

- Modelado tridimensional.

- Análisis estructural: El software realiza análisis estáticos y dinámicos de la estructura, teniendo en cuenta una variedad de cargas como las provenientes del viento, sismo, cargas vivas y más. Puede calcular los desplazamientos, esfuerzos, deformaciones y reacciones en la estructura.

- Diseño de miembros: SAP 2000 incluye herramientas para el diseño y optimización de miembros estructurales, como vigas y columnas, de acuerdo con los criterios de diseño y normativas internacionales.

- Interfaz gráfica amigable.

- Compatibilidad: SAP 2000 es compatible con una amplia gama de formatos de archivo para importar y exportar modelos, lo que facilita la colaboración con otros programas de diseño y análisis.

- Documentación y reportes: El software permite generar informes detallados sobre el análisis y diseño de la estructura, incluyendo cálculos, planos y resultados.

Se ha utilizado SAP2000 para realizar un análisis estático con el dimensionamiento obtenido en CYPE.[5][6]

CAPÍTULO 3. CASOS DE ESTUDIO.

Para los tres casos de estudio se van a describir el tipo de estructura, material, restricciones y acciones aplicadas.

Tanto para el caso de estudio 1 como para el caso de estudio 2 la carga aplicada es "Sobrecarga de uso" y en ambos casos es uniforme de valor 6kN/m.

Para el tercer caso de estudio la estructura es la misma que en el caso 2, un pórtico a dos aguas biempotrado, pero en este caso las acciones aplicadas son una combinación de cargas (peso propio, viento y nieve).

3.1-BARRA.

-Diseño y geometría:

Barra rígida apoyada a los extremos.
Longitud 20 metros.
Perfil IPE.



Figura 1.Barra rígida

-Propiedades del material:

Acero dúctil: S275.

-Restricciones:

Apoyos fijos.

-Acciones:

Sobrecarga de uso uniforme de 6kN/m.

3.2- PÓRTICO CON CARGA DE SOBRECARGA DE USO.

-Diseño y geometría:

Pórtico rígido a dos aguas biempotrado.
Perfil IPE.

-Propiedades del material:

Acero dúctil: S275.

-Restricciones:

Empotramientos fijos.

-Acciones:

Sobrecarga de uso uniforme de 6kN/m.

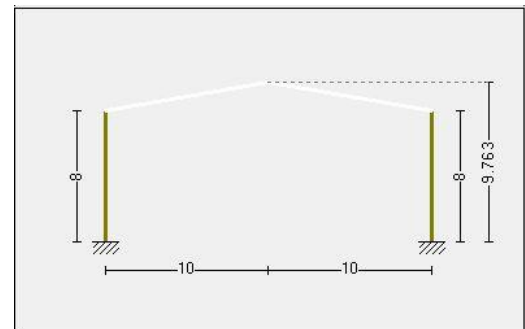


Figura 2.Pórtico1

3.3- PÓRTICO CON CARGAS DE VIENTO, NIEVE Y PESO PROPIO.

-Diseño y geometría:

Pórtico rígido a dos aguas biempotrado.

Perfil IPE.

-Propiedades del material:

Acero S275.

-Restricciones:

Empotramientos fijos.

-Acciones:

Peso propio, viento y nieve.

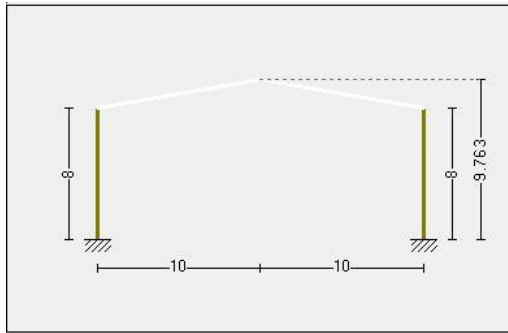


Figura 3. Pórtico 2

CAPÍTULO 4. ESTUDIO.

4.1-BARRA.

Primeramente, se va a realizar un estudio de una barra rígida mediante los programas de cálculo CYPE y SAP2000.

4.1.1. CYPE:

Para comenzar con el cálculo, lo primero es crear un archivo nuevo de CYPE, en el módulo de estructuras se trabajará CYPE 3D. Se van a explicar los pasos a seguir para obtener el dimensionamiento y posterior cálculo estático y cálculo a pandeo:

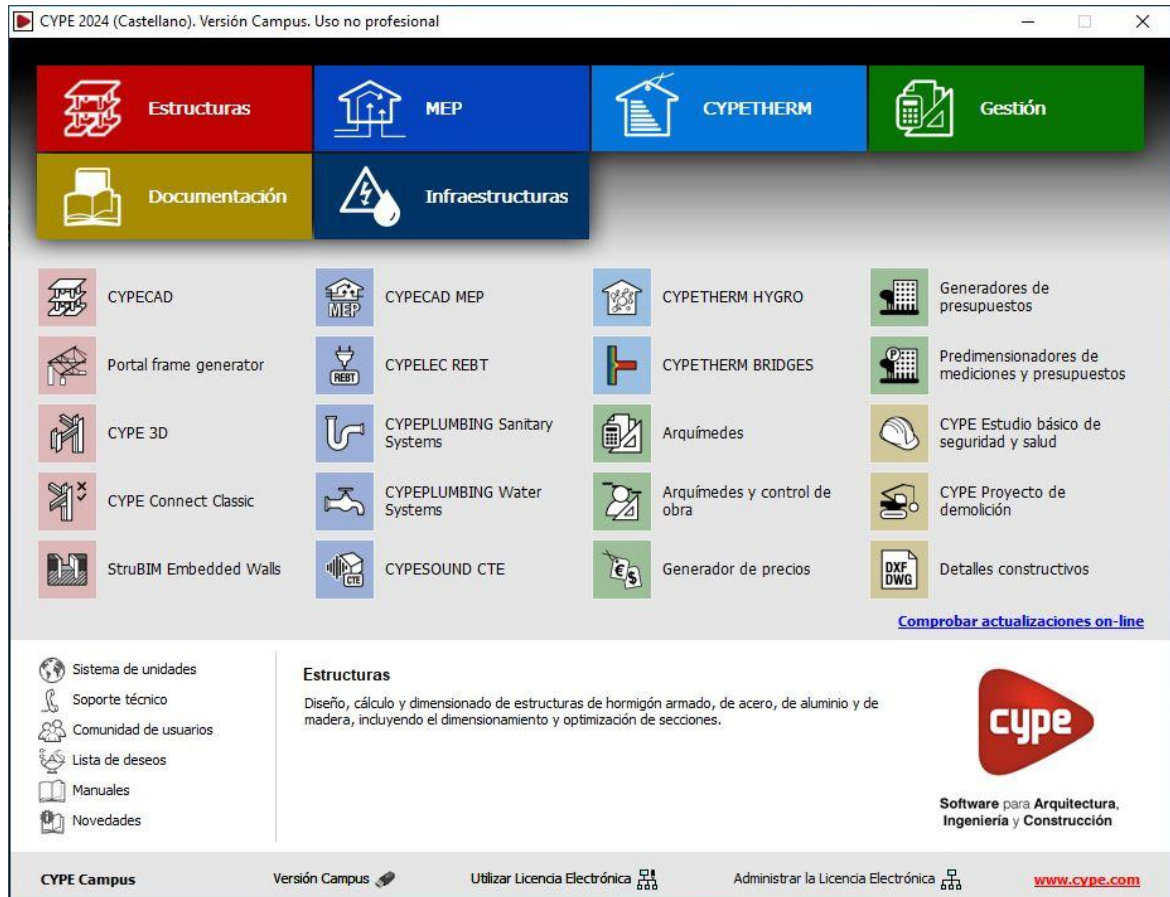


Figura 4. Pantalla de inicio CYPE.

Figura 5. Configuración general CYPE

Una vez creado el archivo nuevo, se van a configurar los distintos ajustes:

- La normativa a cumplir va a ser el Código Técnico de la Edificación.
- El perfil elegido para diseñar la estructura va a ser un perfil laminado tipo IPE.
- El tipo de acero elegido por sus propiedades y resistencia va a ser un acero dúctil S275.

En cuanto a las acciones aplicadas:

- La resistencia al fuego, no se va a considerar a la hora de dimensionar y calcular.
- En hipótesis adicionales hay que indicar la categoría de uso, que para los tres casos de estudio se considera "G2. Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento." La carga a estudiar va a ser "Sobrecarga de uso", por lo que aparece un coeficiente 1. La carga de peso propio aparece automáticamente, pero se va a desactivar una vez que esté diseñada la barra con restricciones, para estudiar únicamente la carga de sobrecarga de uso.

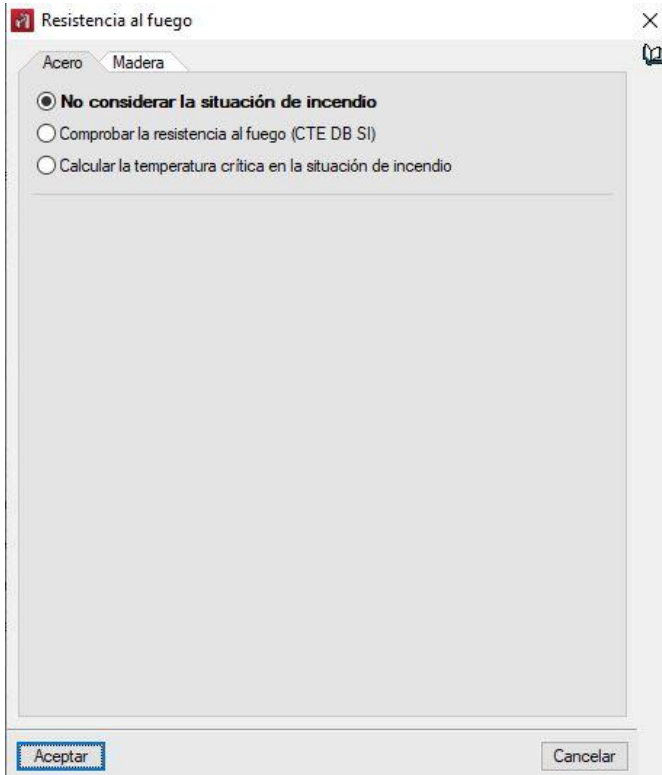


Figura 6-Configuración resistencia al fuego CYPE

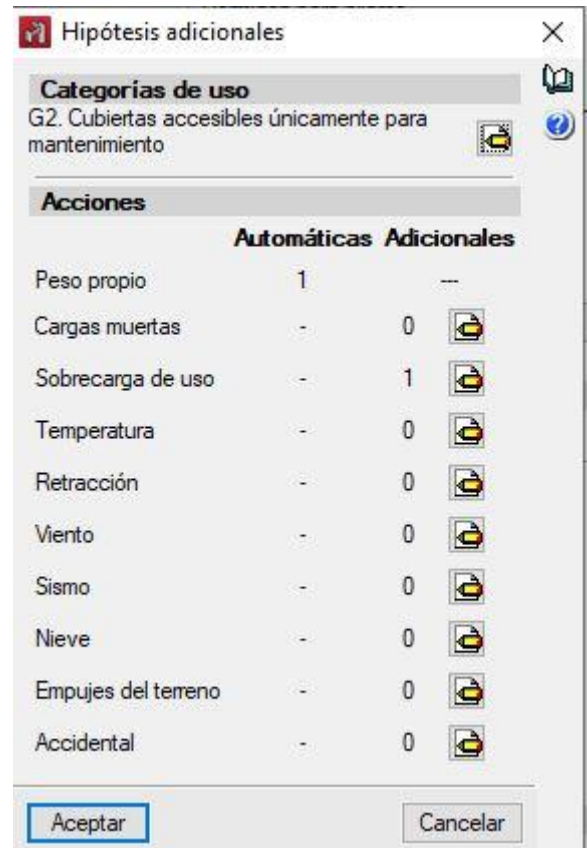


Figura 7. Configuración de cargas CYPE

Una vez configurado el archivo se pasa al espacio de trabajo tridimensional. Se trabaja en el plano YZ, ya que de esta forma se aprovecha la máxima inercia de los perfiles.

Este primer caso de estudio es una barra rígida de 20 metros de longitud. Para ello, se van a generar tres puntos (dos extremos y uno intermedio).

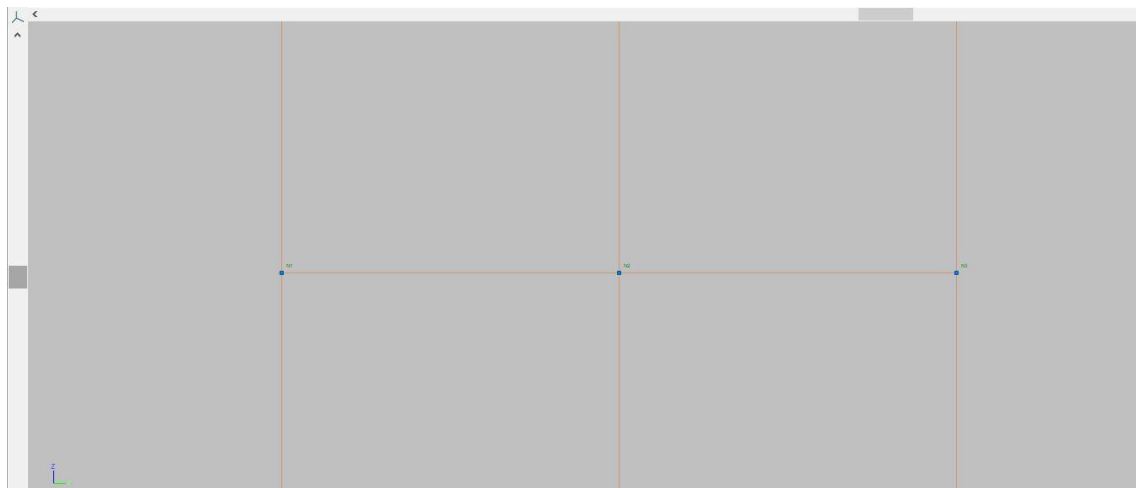


Figura 8. Espacio de trabajo

Se procede a generar una barra que pase por los tres puntos. Para ello se elige el perfil, que como se ha indicado anteriormente, será un perfil IPE y dentro de la serie de perfiles IPE, un IPE 300 (es un perfil provisional, ya que una vez definidas las cargas aplicadas sobre la barra, se dimensionará el perfil de forma que resista dichas cargas.)



Figura 9. Introducción de perfil

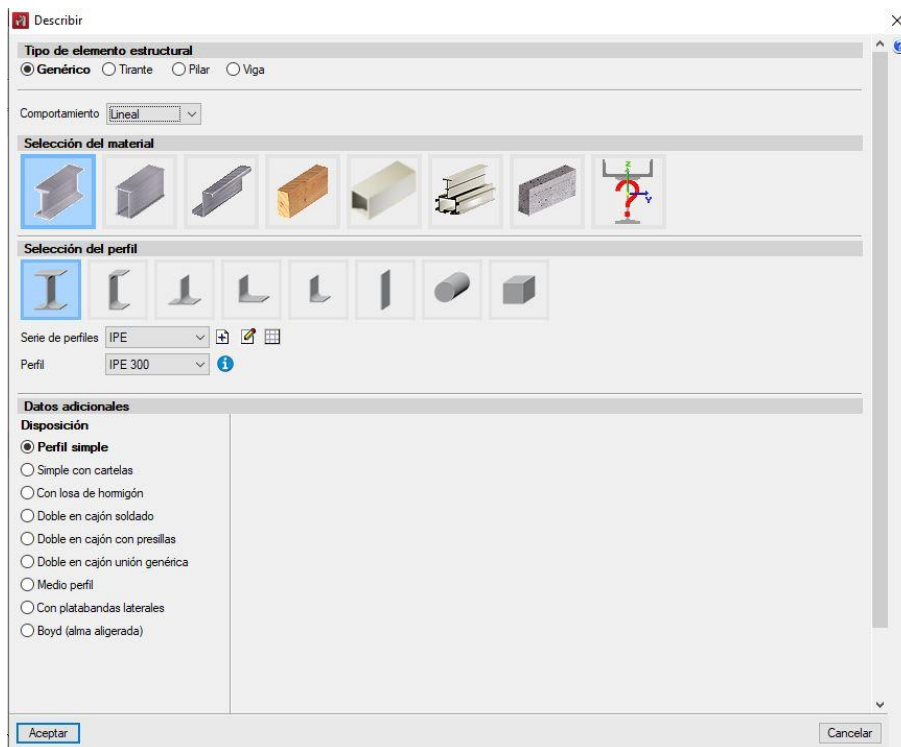


Figura 10. Elección de perfil

Una vez está la barra definida y en el plano de trabajo se procede a situar apoyos fijos en los nudos extremos que restrinjan los desplazamientos tanto verticales como horizontales.

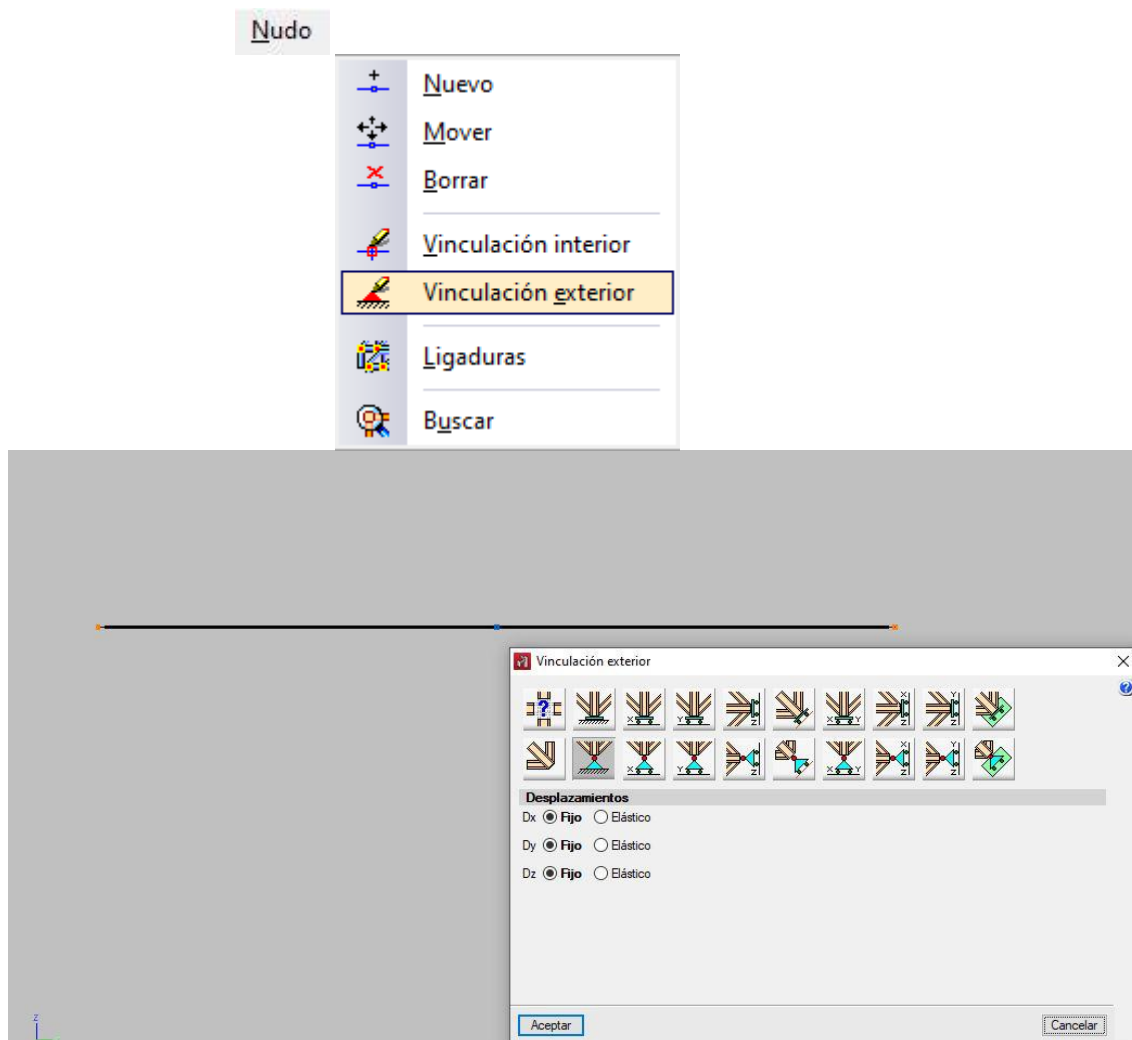


Figura 11. Introducción de apoyos

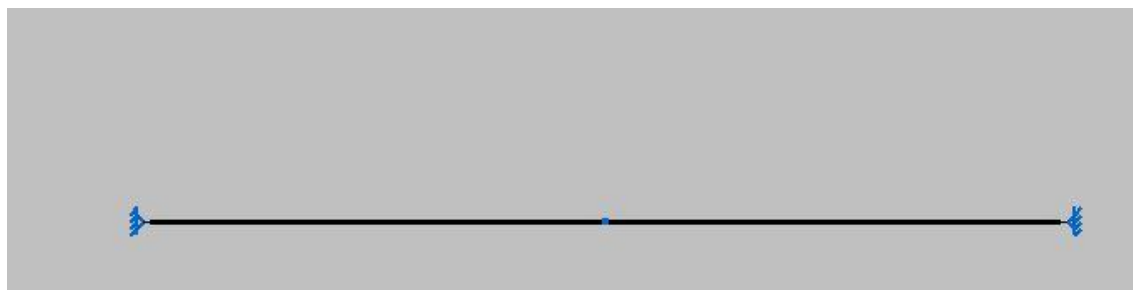


Figura 12. Estructura con apoyos aplicados

Ahora se procederá a la introducción de cargas. Se introduce la carga uniforme de 6kN/m de sobrecarga de uso. En el caso de que la carga de peso propio esté activada al generar la barra se desactiva ya que para este estudio se va a tener únicamente en cuenta la carga de sobrecarga de uso.

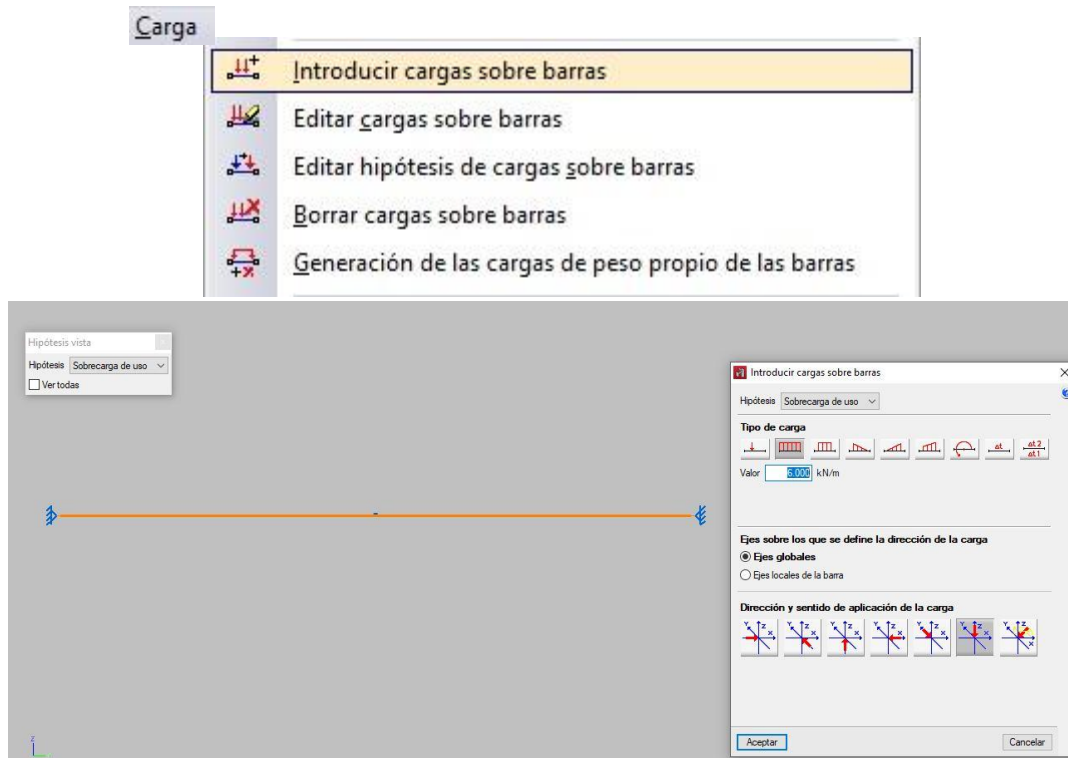


Figura 13. Introducción de cargas

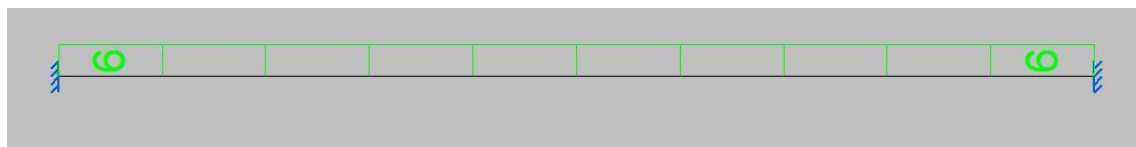


Figura 14. Estructura con carga aplicada

Una vez que está definida la carga de sobrecarga de uso y desactivada la carga de peso propio se pasa a configurar el pandeo lateral y el pandeo de la barra y posteriormente al dimensionamiento de la barra.

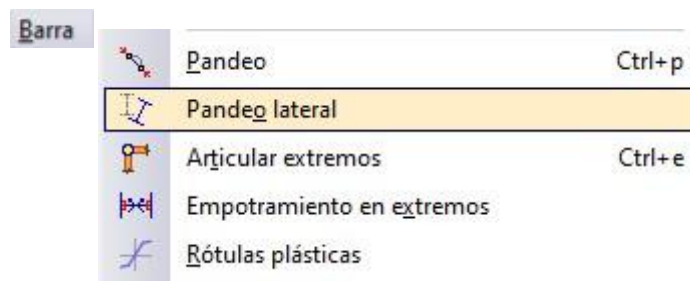


Figura 15. Configuración pandeo lateral

Se va a impedir el pandeo lateral tanto en el ala superior como en el ala inferior, por lo tanto, el coeficiente de pandeo en ambas alas es 0.

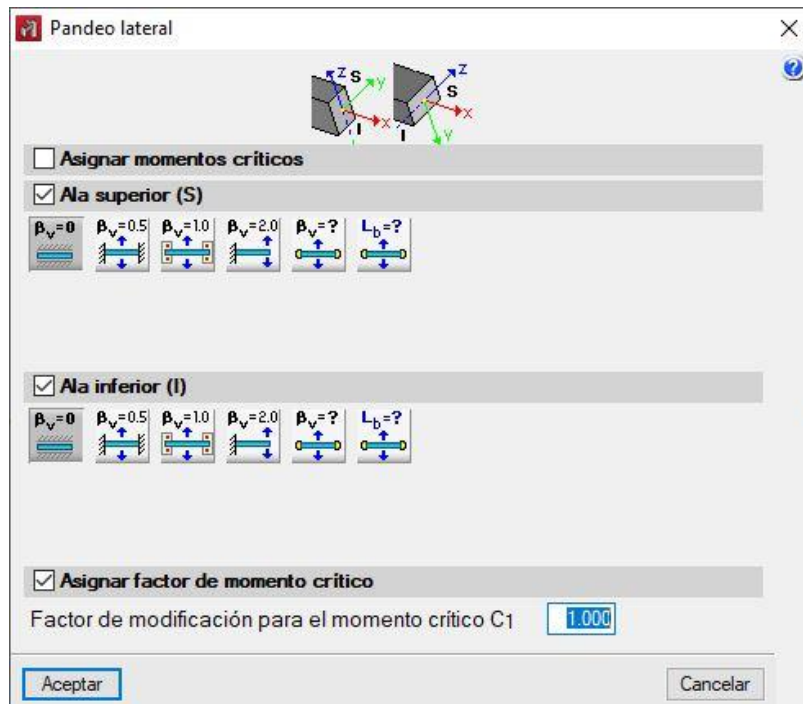


Figura 16. Pandeo lateral

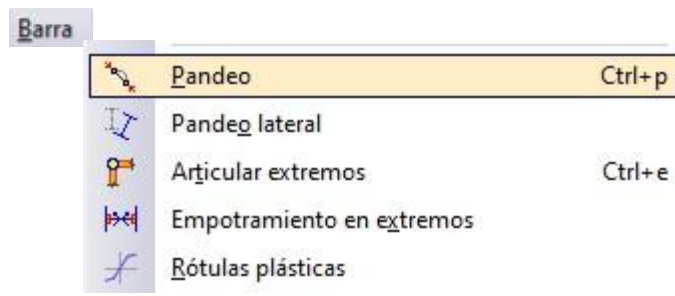


Figura 17. Configuración pandeo

En cuanto al pandeo, se va a impedir fuera del plano con un coeficiente de pandeo (β) nulo, pero en el plano de trabajo se considera como barra biapoyada con un coeficiente de pandeo (β) de la unidad.

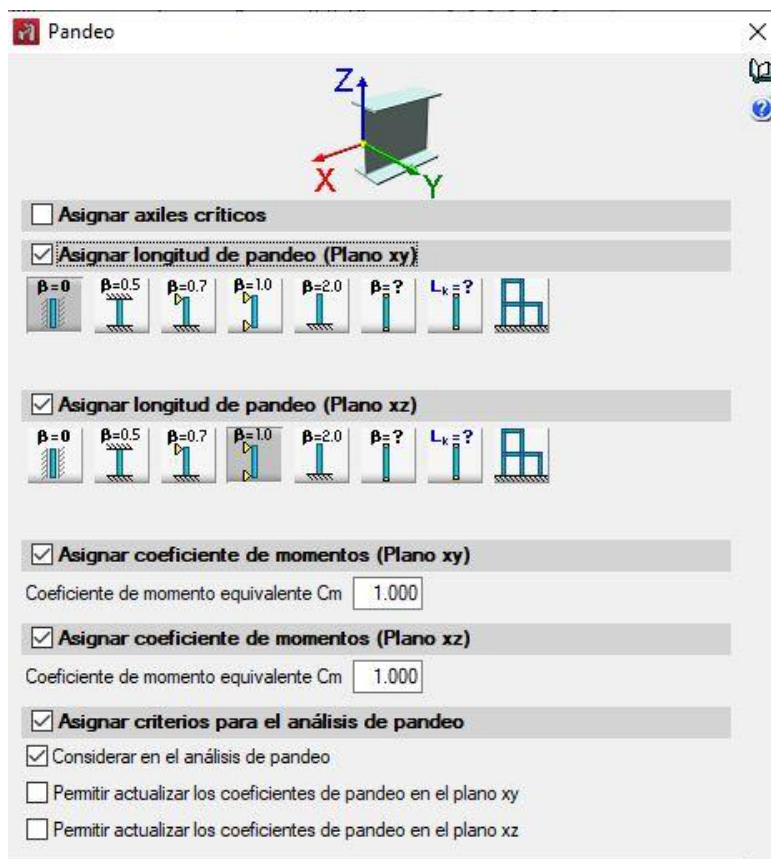


Figura 18. Pandeo

Se procede al cálculo con dimensionamiento de perfil.

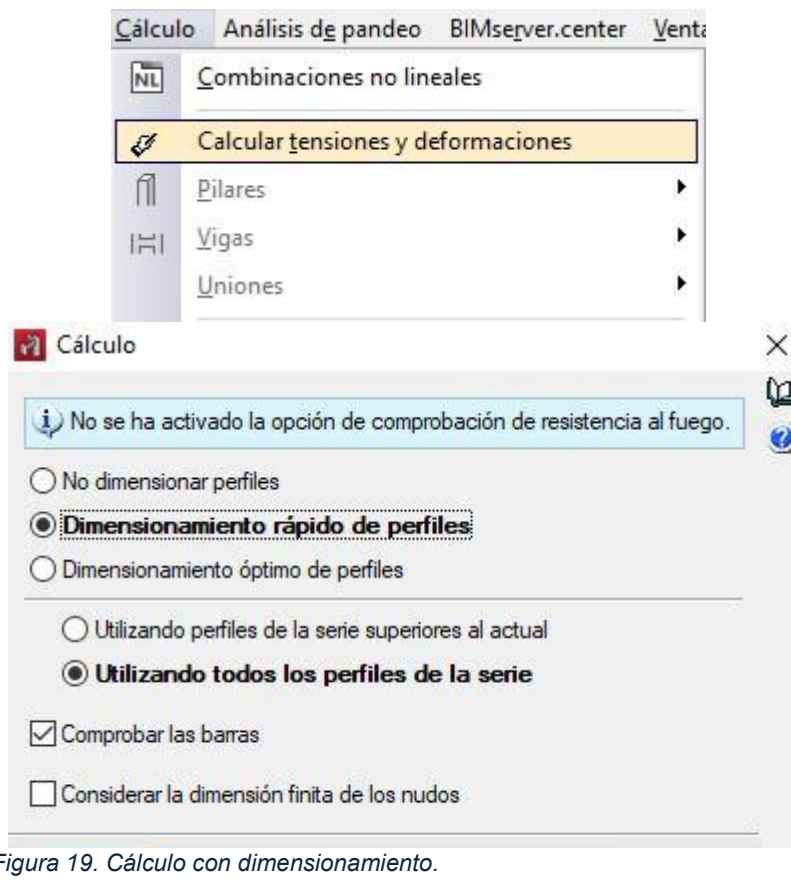


Figura 19. Cálculo con dimensionamiento.

Una vez dimensionado con respecto a las cargas aplicadas sobre la barra se puede observar la serie del perfil elegido al dimensionar:

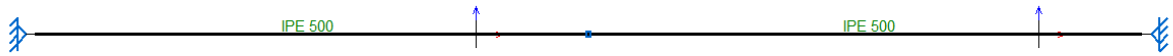


Figura 20. Dimensionamiento obtenido.

En la siguiente tabla se puede ver el aprovechamiento de la resistencia según las distintas series de perfiles. Como se puede ver en la comprobación, cumple a partir del IPE 500 en el que el aprovechamiento de la barra es inferior al 100%.

Perfil	Peso	Resistencia	Errores
✗ IPE 80	5.97	—	No es posible realizar la comprobación, ya que el cortante es excesivo y...
✗ IPE 100	8.09	—	No es posible realizar la comprobación, ya que el cortante es excesivo y...
✗ IPE 120	10.36	2830.61 %	
✗ IPE 140	12.87	1945.85 %	
✗ IPE 160	15.78	1385.63 %	
✗ IPE 180	18.76	1035.05 %	
✗ IPE 200	22.37	777.46 %	
✗ IPE 220	26.22	602.87 %	
✗ IPE 240	30.69	468.17 %	
✗ IPE 270	36.03	355.00 %	
✗ IPE 300	42.23	273.60 %	
✗ IPE 330	49.14	213.70 %	
✗ IPE 360	57.07	168.61 %	
✗ IPE 400	66.33	131.46 %	
✗ IPE 450	77.56	100.95 %	
✓ IPE 500	90.67	78.31 %	
✓ IPE 550	105.50	63.98 %	
✓ IPE 600	122.46	50.77 %	

No se han definido límites de flecha
Se ha seleccionado no realizar la comprobación de resistencia al fuego

Significado de los iconos

- ✗ Perfil que no cumple alguna comprobación.
- ✓ Perfil que cumple todas las comprobaciones.

Aceptar Cancelar

Figura 21. Comprobación de dimensionamiento

En este caso no se estudia a pandeo, ya que la barra sólo está sometida a flexión y no tiene cargas de compresión, por lo tanto, no va a pandear.

Posteriormente en el apartado de resultados se pueden observar los resultados del cálculo estático de la estructura.

Ahora se pasa a realizar el cálculo en el programa SAP 2000.

4.1.2. SAP 2000:

Ahora se va a explicar el cálculo de la barra en SAP 2000 con el dimensionamiento obtenido en CYPE.



Figura 22. Pantalla inicial SAP2000.

Para comenzar a configurar el archivo hay que elegir el tipo de plantilla que se va a usar de inicio. En este caso, se usará “Grid Only”, tiene una rejilla tipo cuadrícula en la que se pueden definir número de divisiones tanto verticales como horizontales en la que se apoyarse a la hora de definir la geometría.

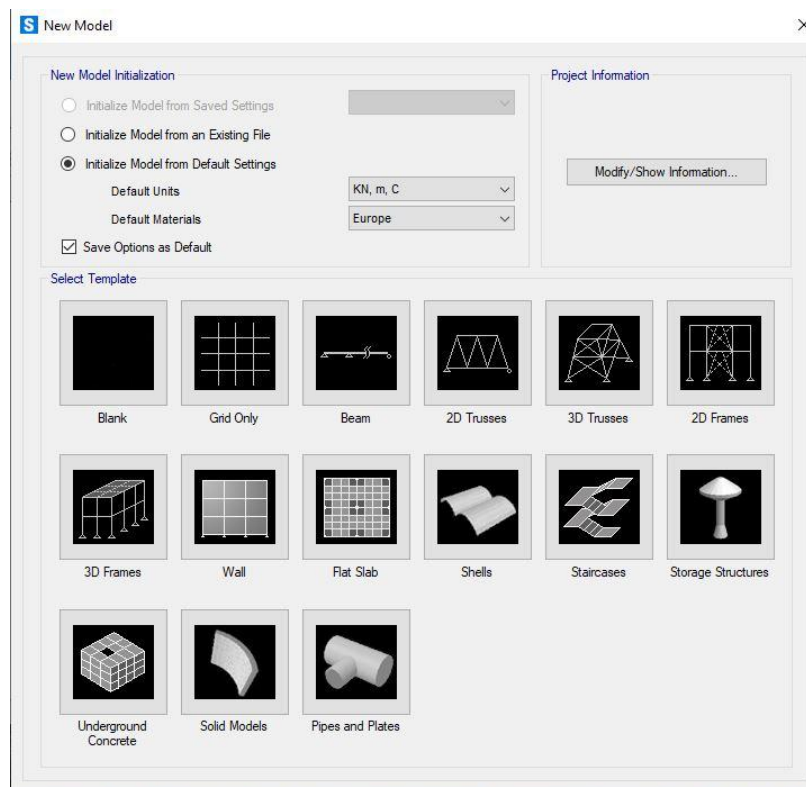


Figura 23. Configuración archivo SAP2000

Se va a configurar la rejilla. La rejilla consta de 3 líneas verticales distanciadas en 10 metros y una línea horizontal. La explicación de poner tres líneas verticales en lugar de dos es para tener localizado el punto intermedio de la barra.

El sistema de ejes globales se sitúa en el punto intermedio de la barra. En SAP 2000 se trabaja en el plano XZ, ya que de esta forma se consigue la máxima inercia de las barras.

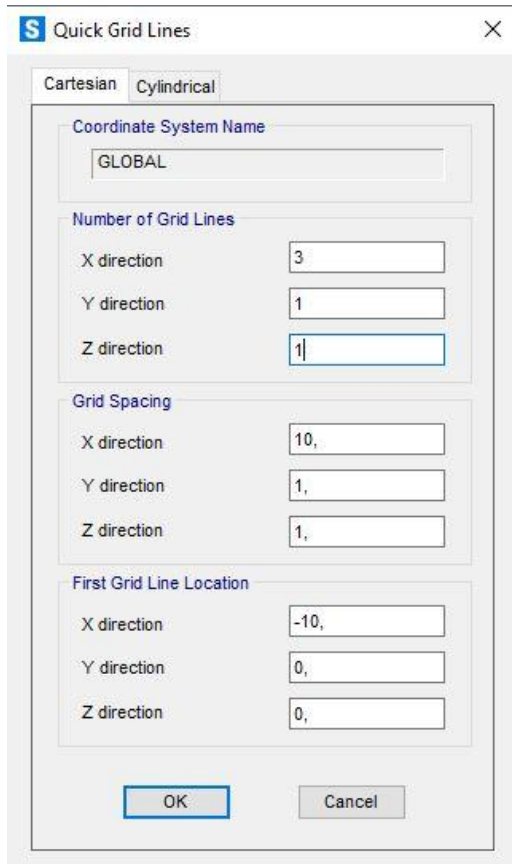


Figura 24. Configuración rejilla

Una vez configurada la rejilla se puede ver en el espacio de trabajo tridimensional y en el plano XZ, donde se seguirá diseñando la barra.

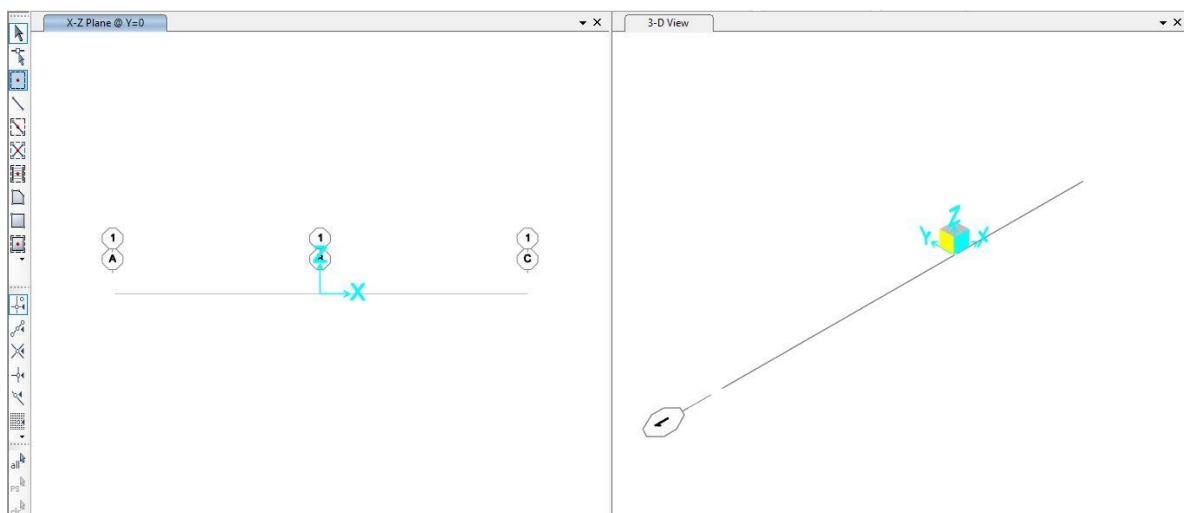


Figura 25. Espacio de trabajo

Se configura el material de la barra a estudiar en SAP2000.

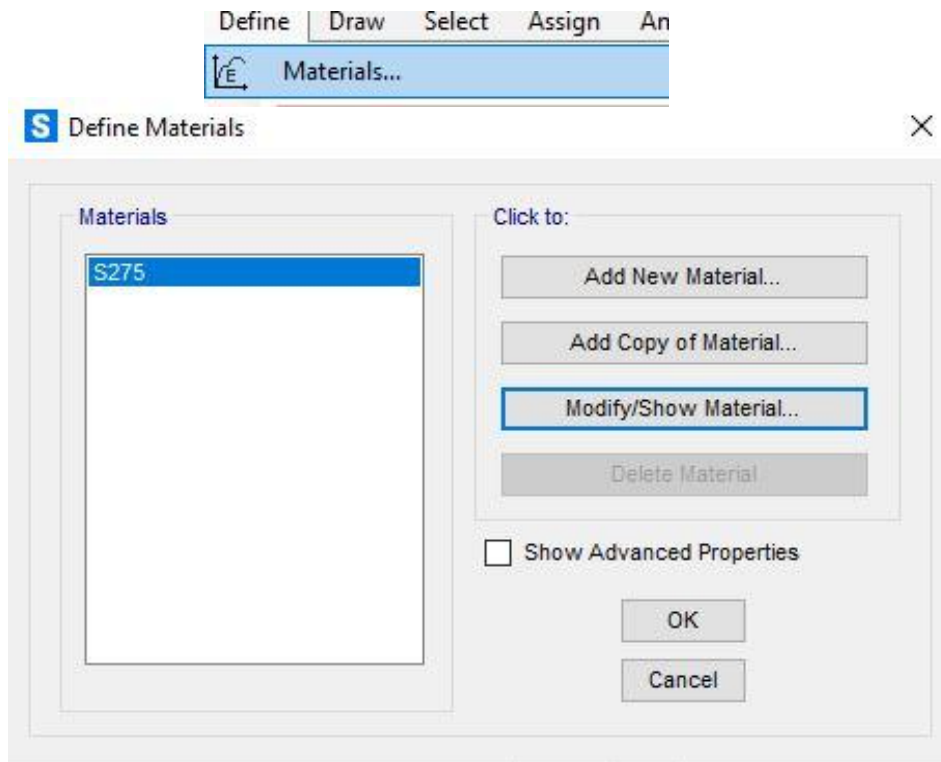
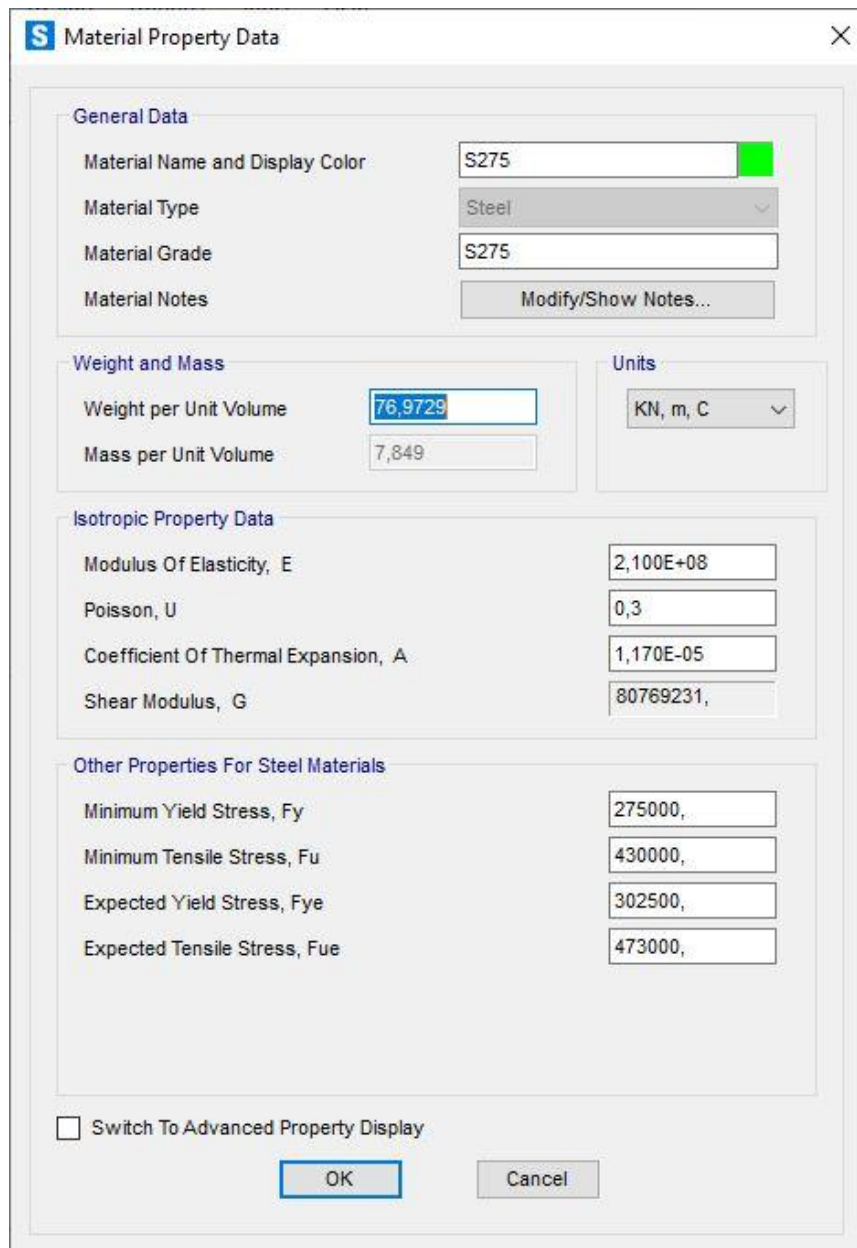


Figura 26. Definición de material

Aquí se pueden ver las propiedades del material elegido, acero S275.



S Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color	S275
Material Type	Steel
Material Grade	S275
Material Notes	Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume	76,9729
Mass per Unit Volume	7,849

Units

KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E	2,100E+08
Poisson, U	0,3
Coefficient Of Thermal Expansion, A	1,170E-05
Shear Modulus, G	80769231,

Other Properties For Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy	275000,
Minimum Tensile Stress, Fu	430000,
Expected Yield Stress, Fye	302500,
Expected Tensile Stress, Fue	473000,

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Figura 27. Propiedades del material

Una vez elegido el material, se procede a elegir el tipo de perfil y la serie del perfil.

Se va a definir un perfil IPE 500, ya que es el dimensionamiento obtenido anteriormente en CYPE.

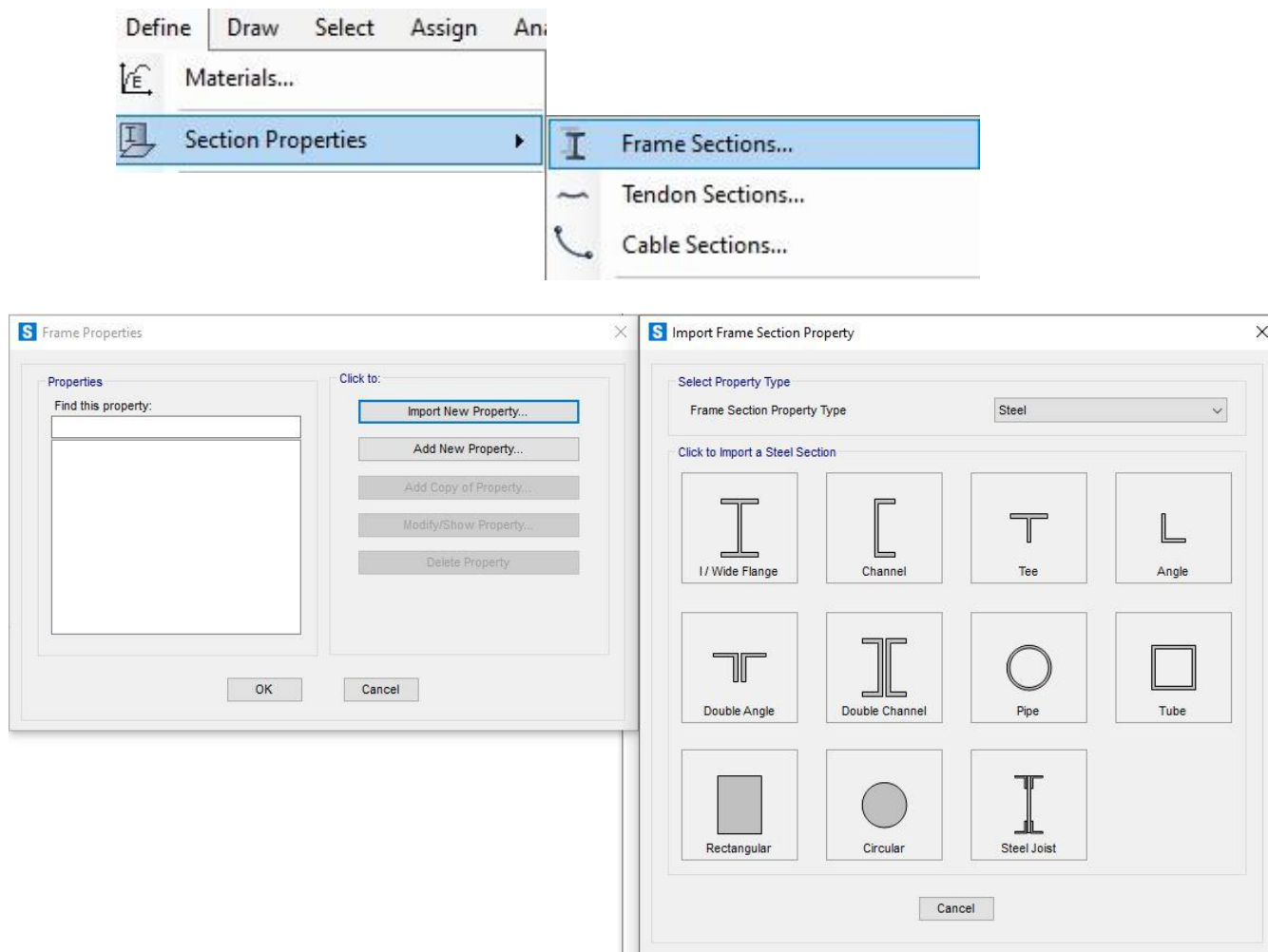


Figura 28. Definición de perfil

Para obtener la serie de perfiles se busca la biblioteca. En este caso se importa de la biblioteca europea “Euro.pro”.

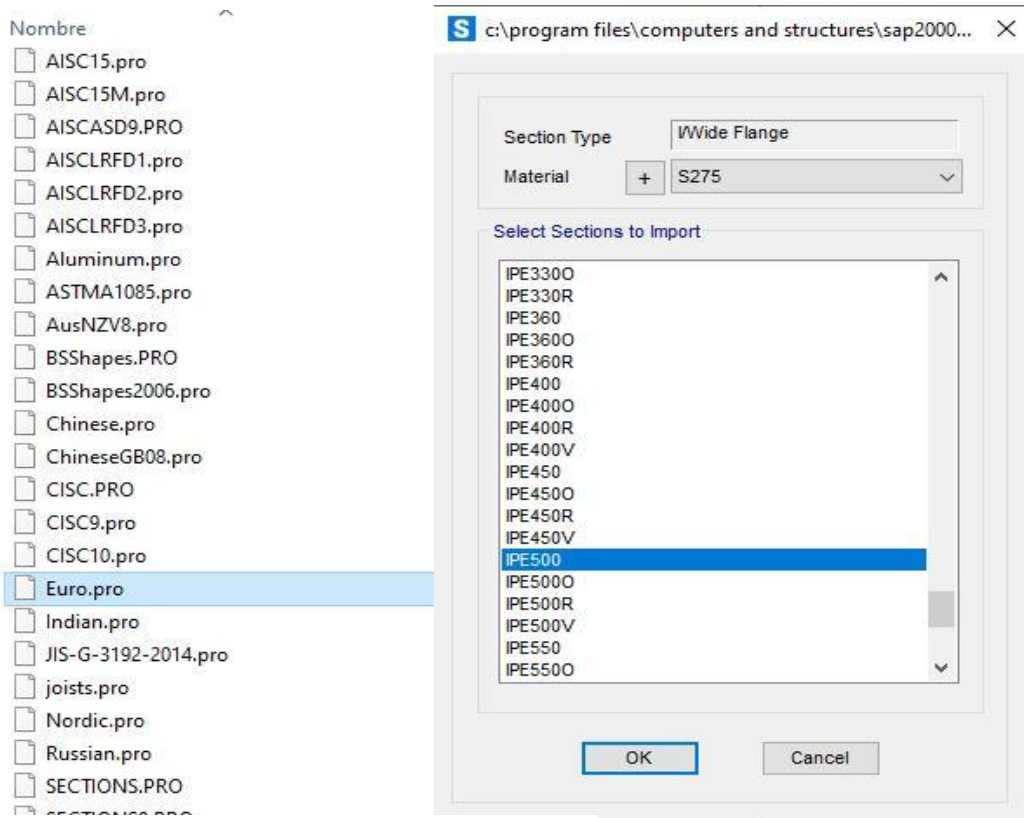


Figura 29. Serie de perfil

Aquí se pueden observar las características geométricas y propiedades del perfil IPE 500:

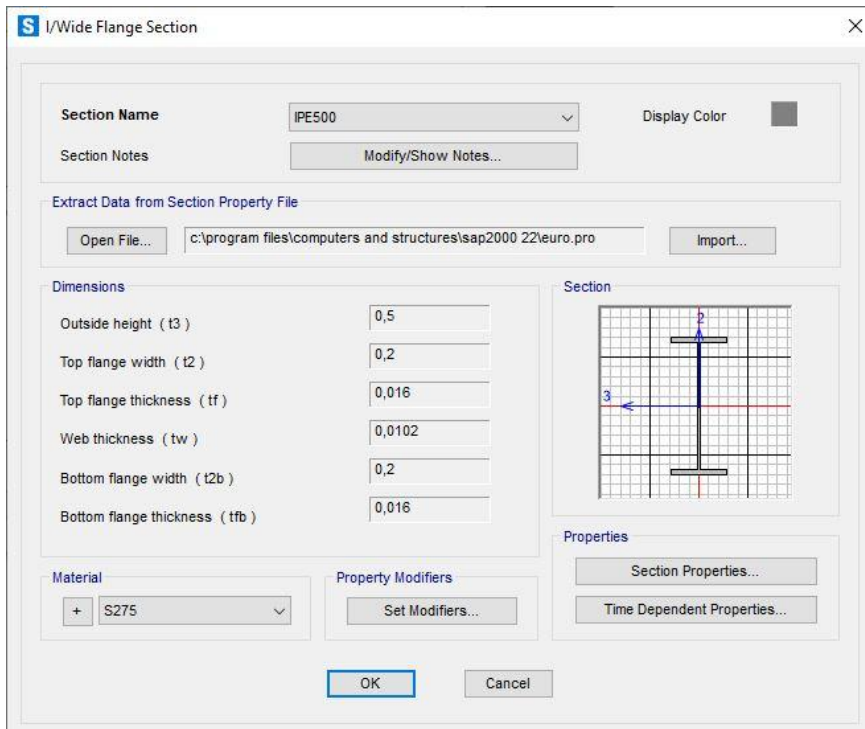


Figura 30. Dimensiones del perfil

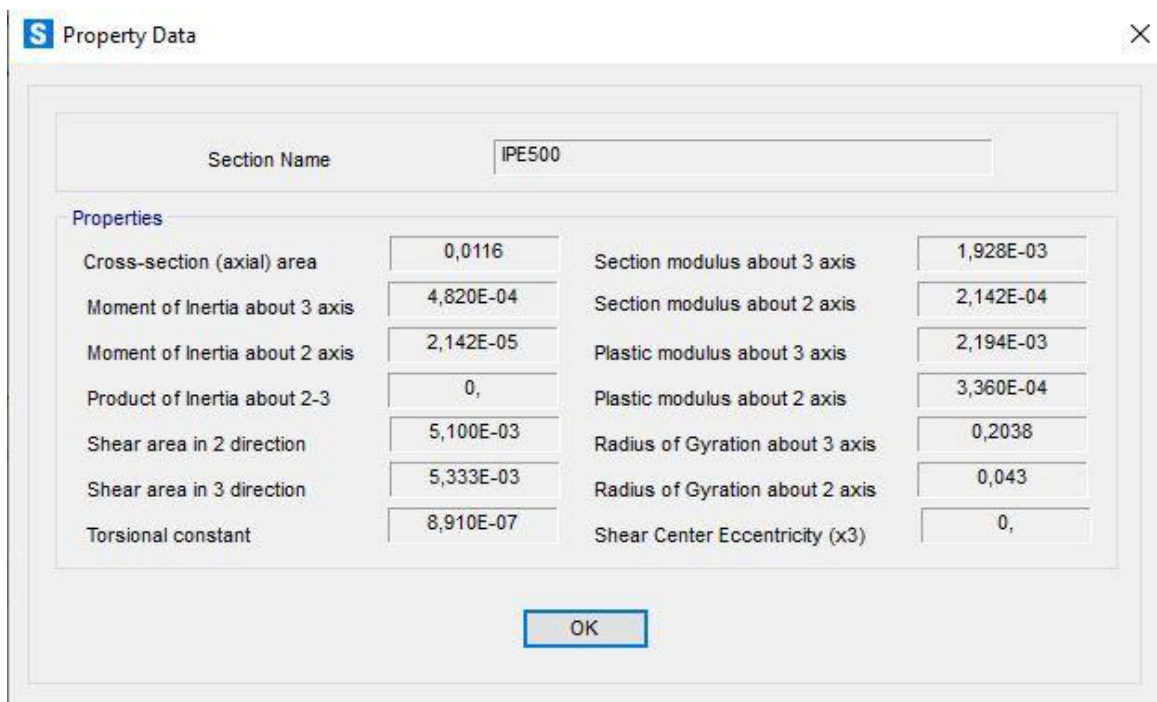


Figura 31. Propiedades geométricas del perfil

Una vez definida la sección se procede a diseñar la barra con ayuda de la rejilla.

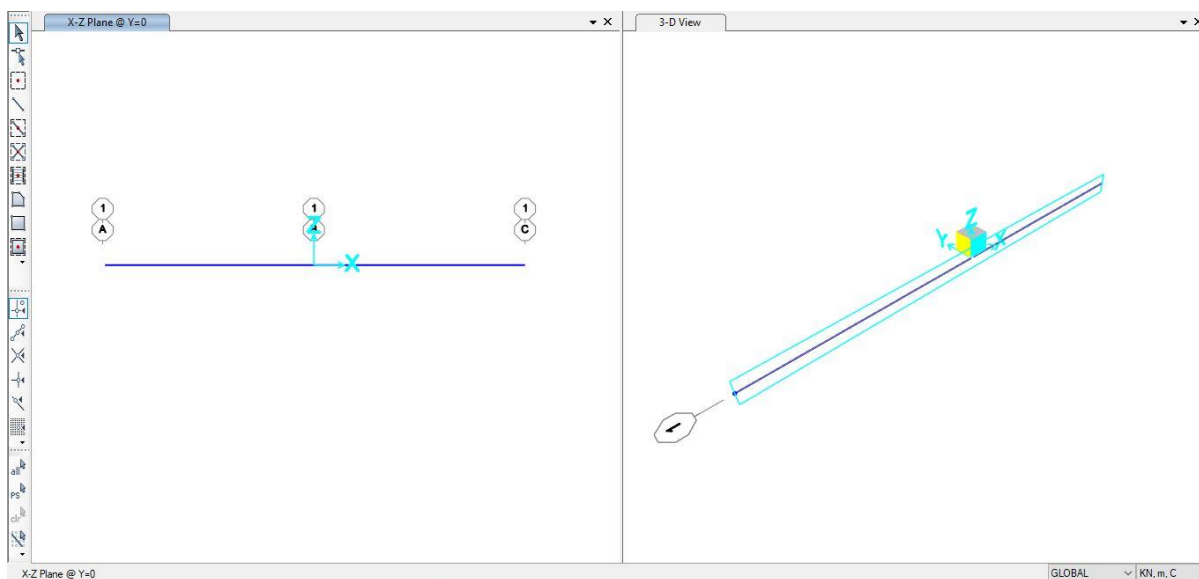


Figura 32. Estructura sin definir los apoyos

Ahora se definen los apoyos fijos en los nudos extremos que van a impedir los desplazamientos horizontales y verticales.

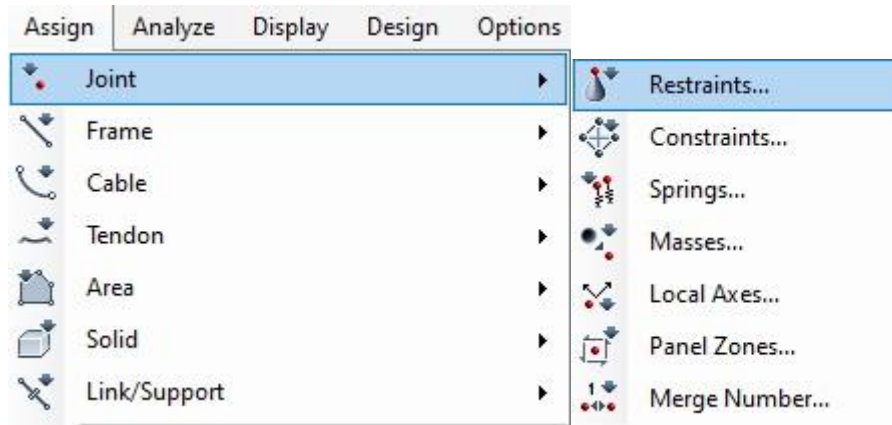


Figura 33. Introducción apoyos

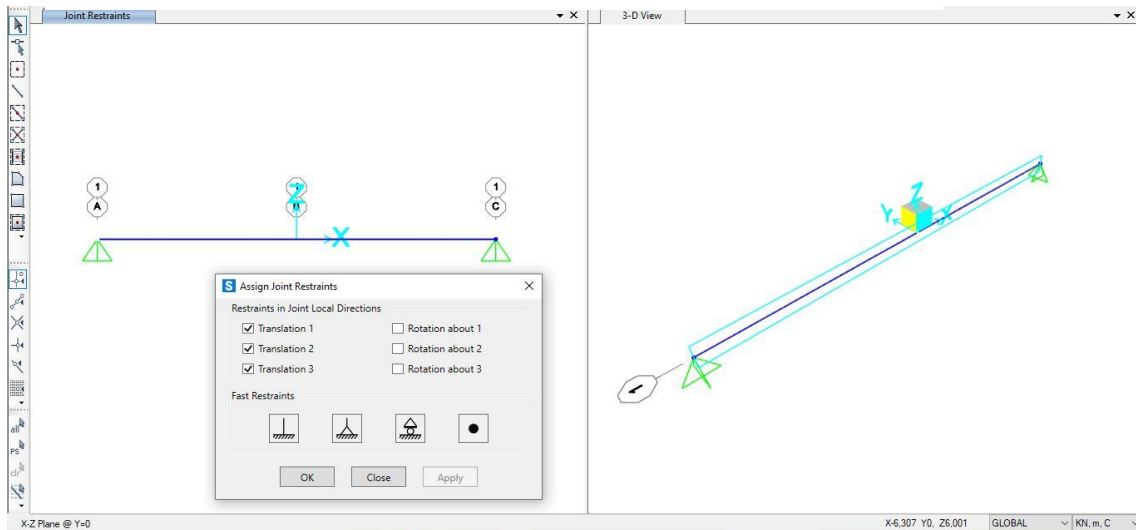


Figura 34. Estructura con apoyos definidos.

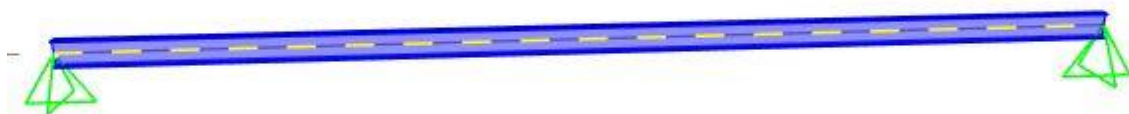


Figura 35. Estructura 3D con apoyos definidos

Se pasa a definir la carga “Sobrecarga de uso” que va a aplicarse en la barra.

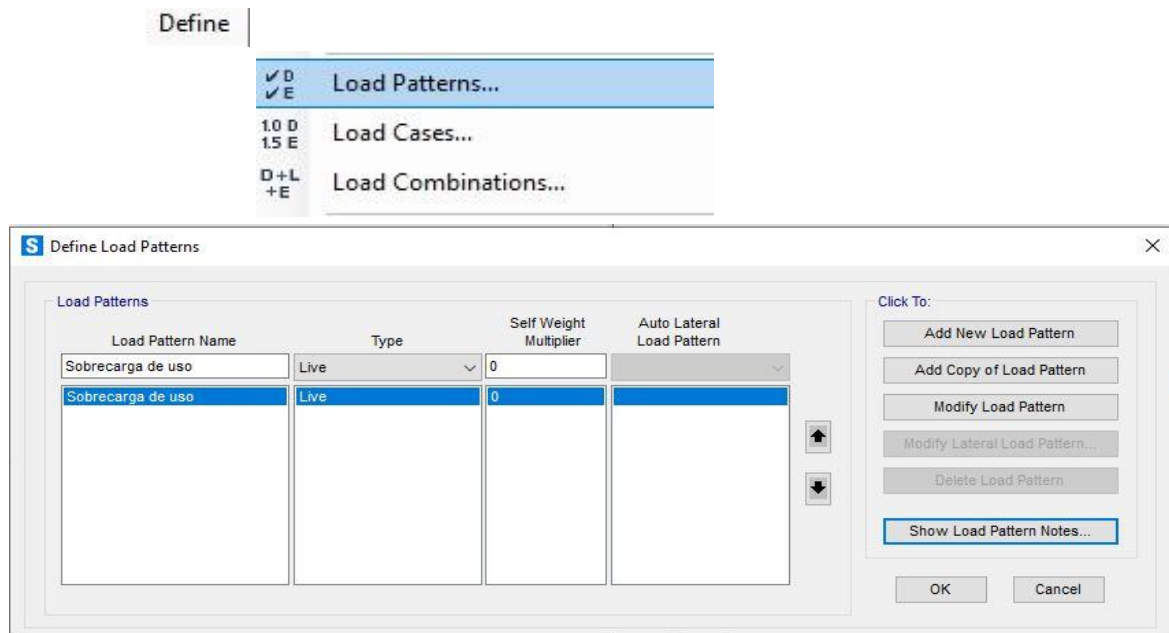


Figura 36. Definición de cargas

Se asigna la carga “Sobrecarga de uso” sobre la barra.

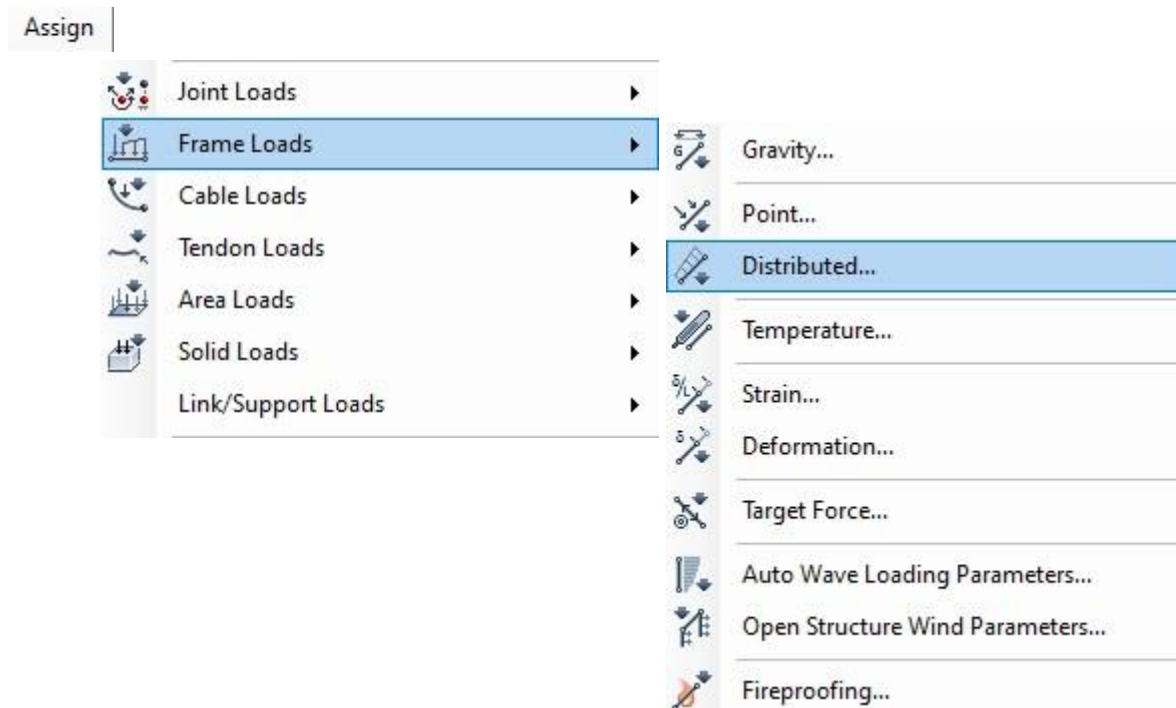


Figura 37. Introducción de carga

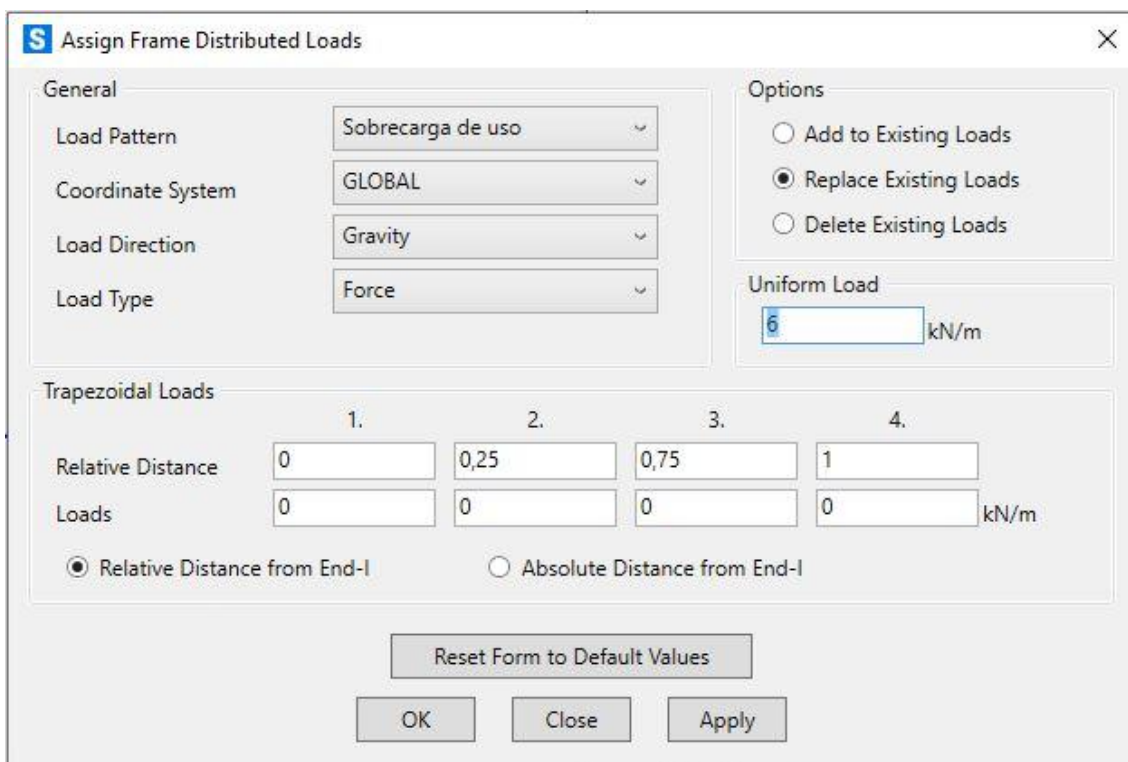


Figura 38. Introducción tipo de carga

Se puede apreciar la barra con la carga distribuida aplicada.

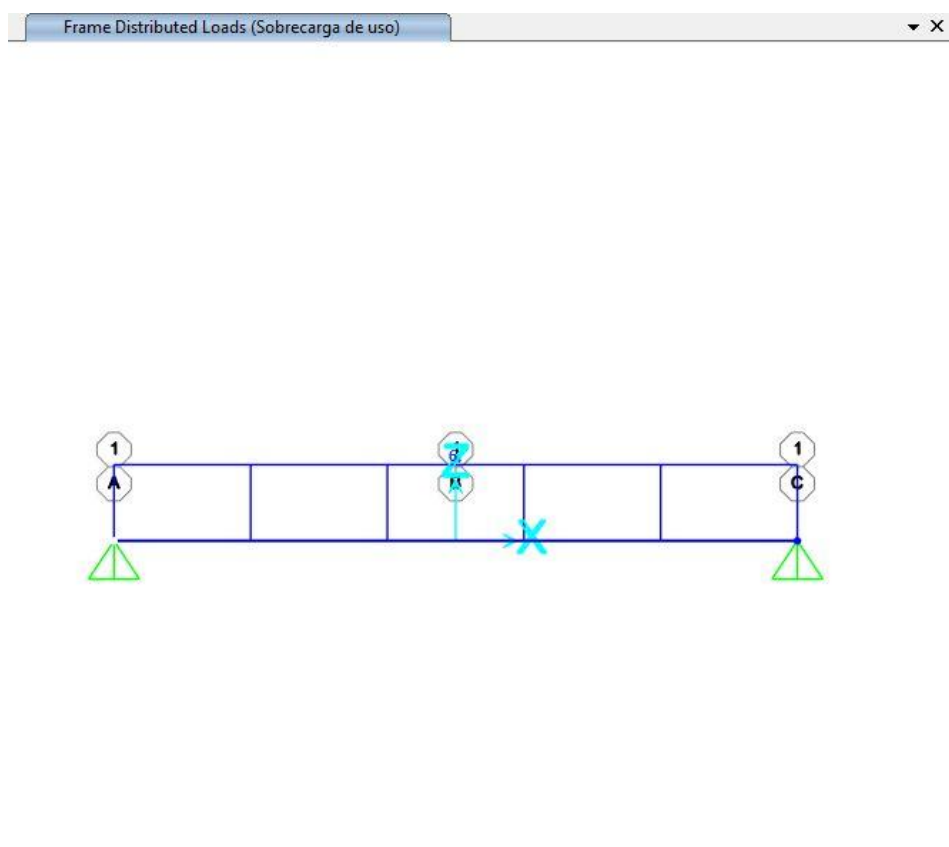


Figura 39. Barra con carga aplicada

Ahora se pasa al cálculo de la estructura:

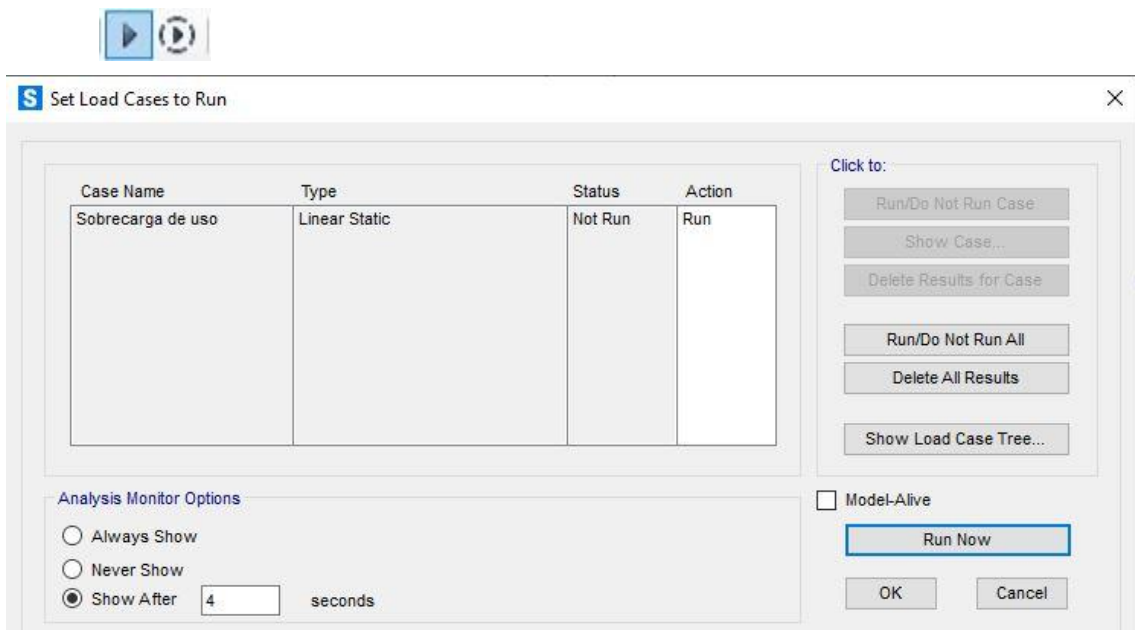


Figura 40. Cálculo estático

4.2-PÓRTICO CON CARGA DE SOBRECARGA DE USO.

Como segundo caso, se va a realizar un estudio de un pórtico rígido mediante los programas de cálculo CYPE y SAP2000.

4.2.1. CYPE:

Para comenzar con el cálculo, primero vamos a crear un archivo nuevo en CYPE.

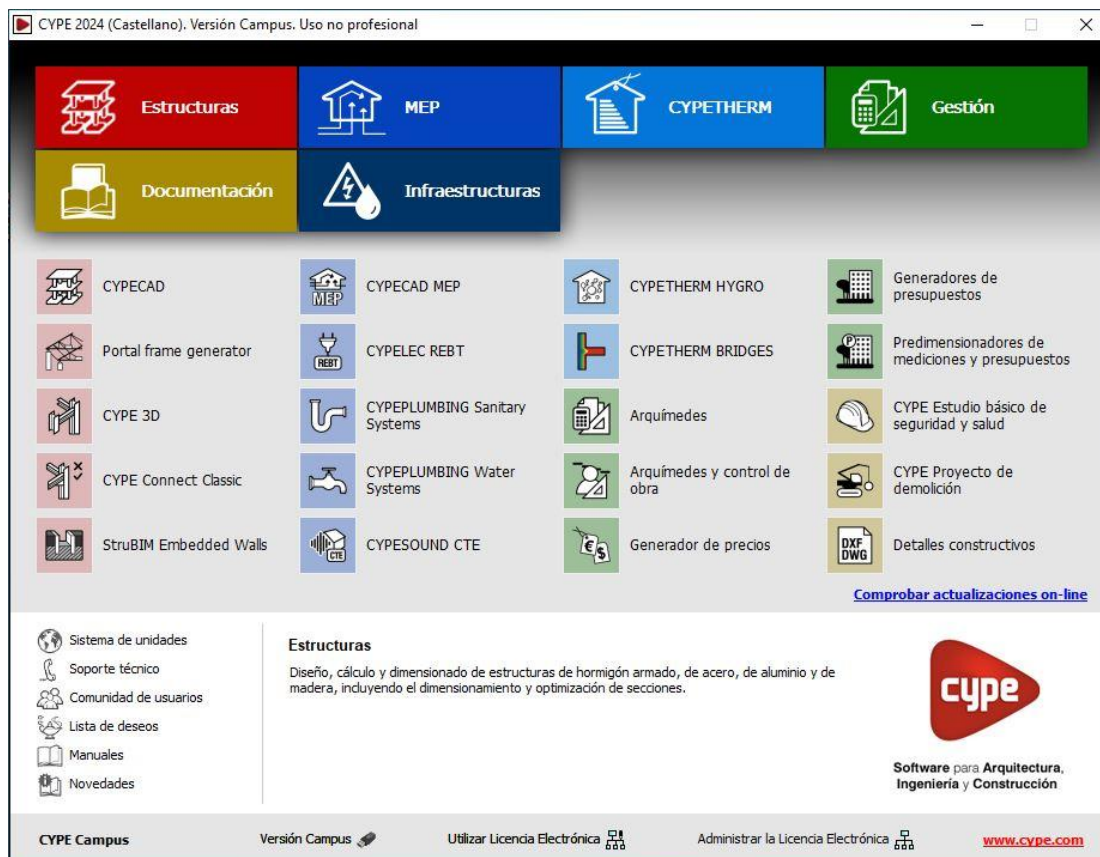


Figura 41. Pantalla de inicio programa CYPE

Se van a explicar los pasos a seguir para obtener el dimensionamiento:

Para explicar el dimensionamiento y cálculo mediante CYPE del pórtico rígido planteado se usarán los siguientes comandos de Estructuras dentro de CYPE, "Generador de pórticos" y "CYPE 3D". También se podría realizar únicamente con "CYPE 3D" y modelar el pórtico generando puntos, pero es más ágil usando ambos comandos.

Se comienza por “Generador de Pórticos”, en el que se define la geometría del pórtico.

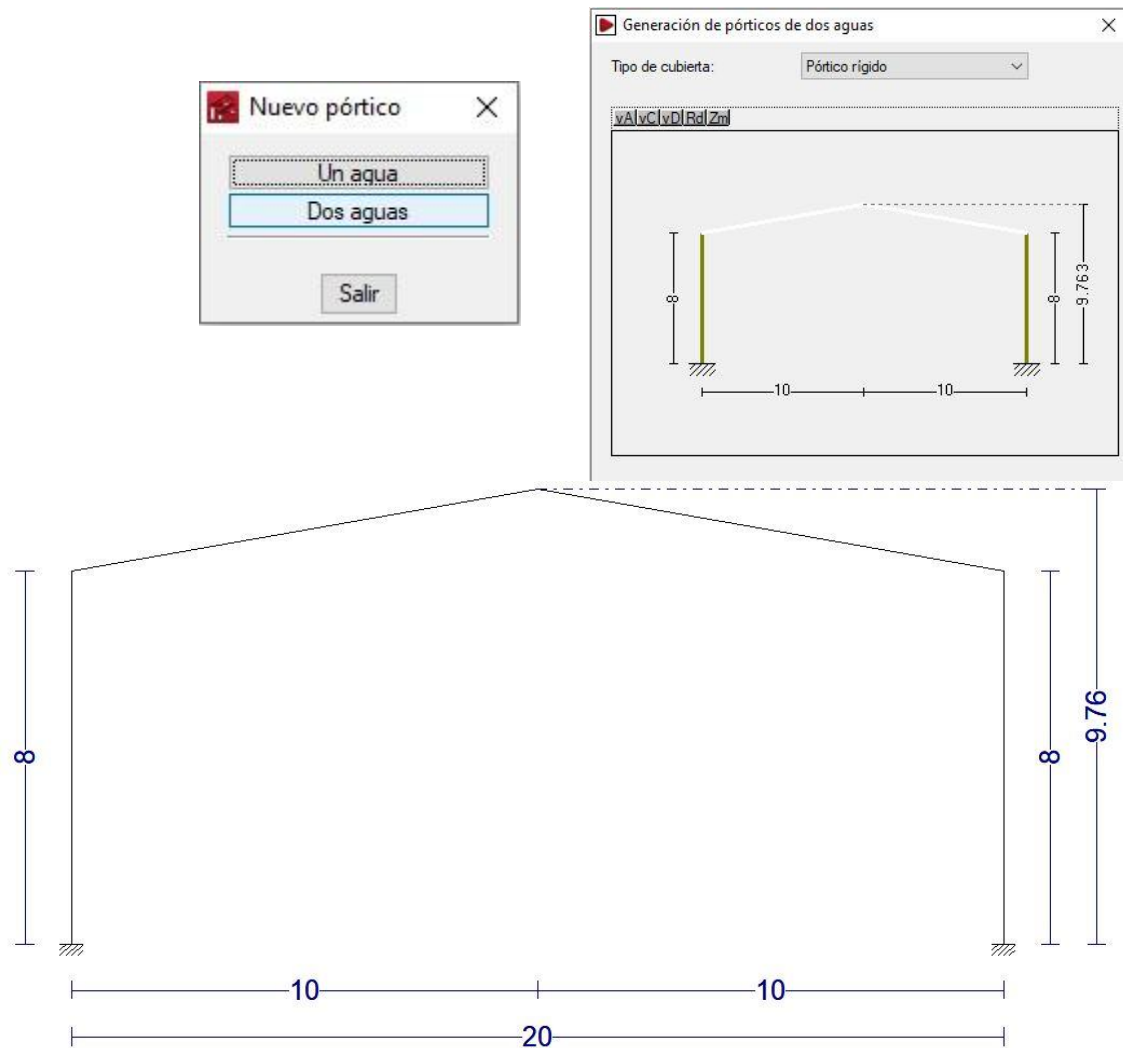


Figura 42. Diseño de pórtico rígido a dos aguas en Generador de pórticos.

Una vez definida la geometría, se procede a exportar el archivo a CYPE 3D.

Se realiza la exportación a CYPE 3D. En este proceso se elige la configuración de exportación:

- El tipo de apoyos, en este caso “pórtico biempotrado”.
- Las opciones de pandeo, en este caso “pandeo en pórticos traslacionales”.
- El tipo de generación, en este caso va a ser un pórtico aislado (2D) y se va a elegir el segundo pórtico de la supuesta nave industrial).
- Las opciones de agrupación, no agrupar planos.

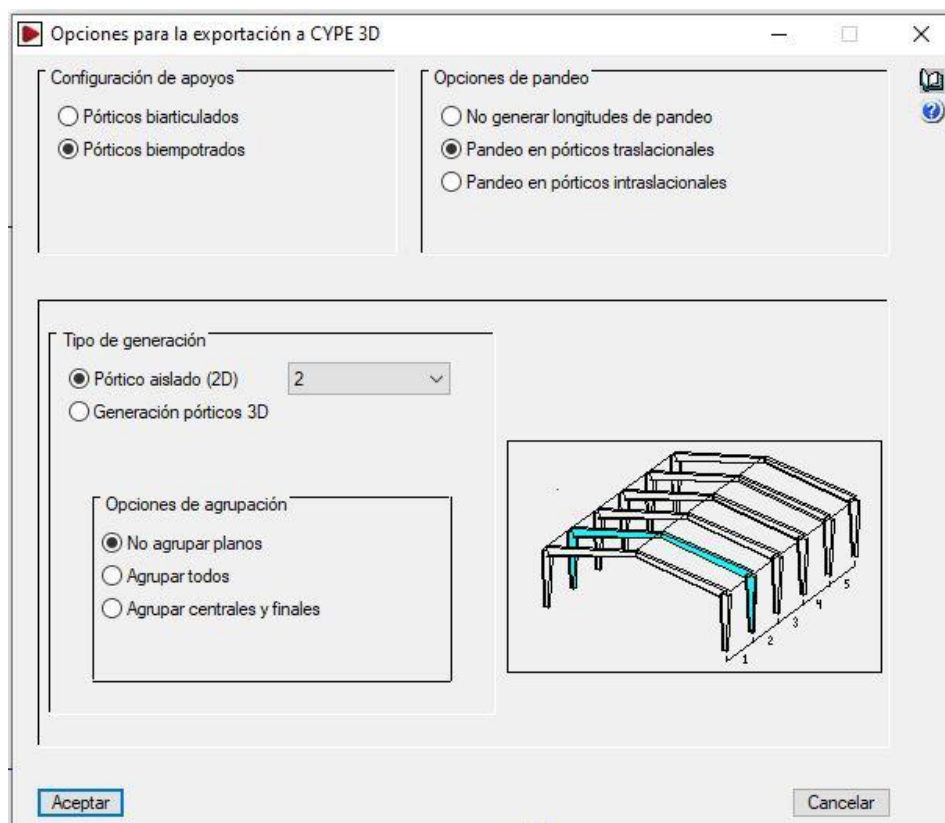


Figura 43. Exportación de Generador de pórticos a CYPE 3D.

El programa da dos opciones, la primera es realizar un estudio de los distintos pórticos que forman la nave (3D) y la segunda es estudiar únicamente un pórtico(2D). En este caso se va a optar por estudiar únicamente un pórtico(2D).

Al tratarse de un pórtico aislado(2D) el que vamos a estudiar nos informa que las cargas son uniformes.

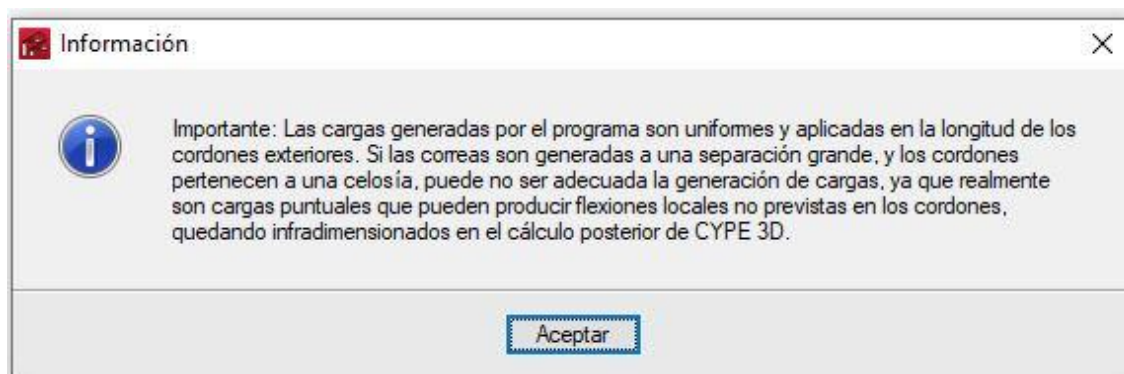


Figura 44. Aviso sobre cargas a la hora de la exportación.

Cuando se ha realizado la exportación a CYPE 3D hay que configurar el tipo de materiales y las acciones.

Figura 45. Configuración general CYPE.

Una vez creado el archivo nuevo, se van a configurar los distintos ajustes:

- La normativa a cumplir va a ser el Código Técnico de la Edificación.
- El perfil elegido para diseñar va a ser un perfil laminado tipo IPE.
- El tipo de acero elegido por sus propiedades y resistencia va a ser un acero dúctil S275.

En cuanto a las acciones aplicadas:

- La resistencia al fuego, no se va a considerar a la hora de dimensionar y calcular.
- En hipótesis adicionales hay que indicar la categoría de uso, que para los tres casos de estudio se considera "G2. Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento." La carga a estudiar va a ser "Sobrecarga de uso", por lo que aparece un coeficiente 1. La carga de peso propio aparece automáticamente, pero se va a desactivar una vez que esté diseñada la barra con restricciones, para estudiar únicamente la carga de sobrecarga de uso.



Figura 46. Configuración de cargas CYPE.

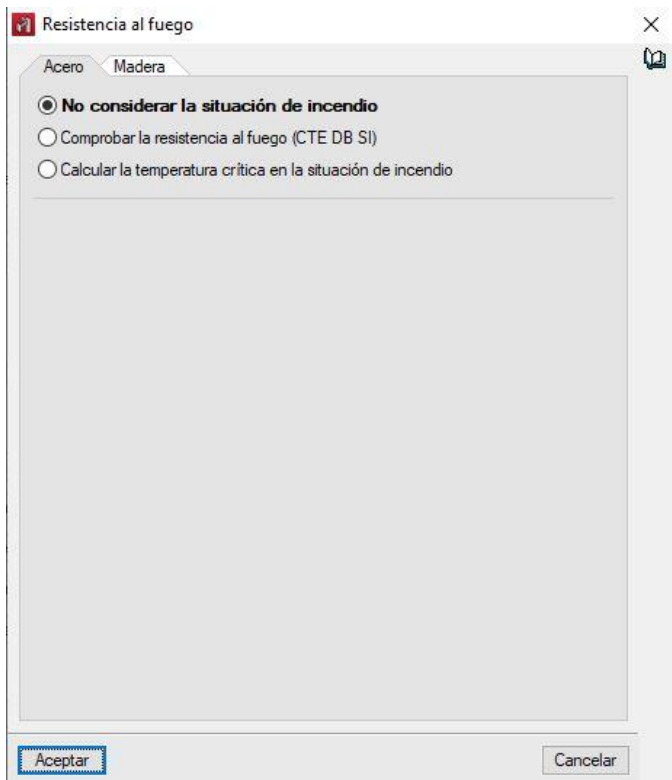


Figura 47. Configuración resistencia al fuego CYPE.

Una vez configurado el archivo se puede observar el pórtico en el espacio de trabajo tridimensional.

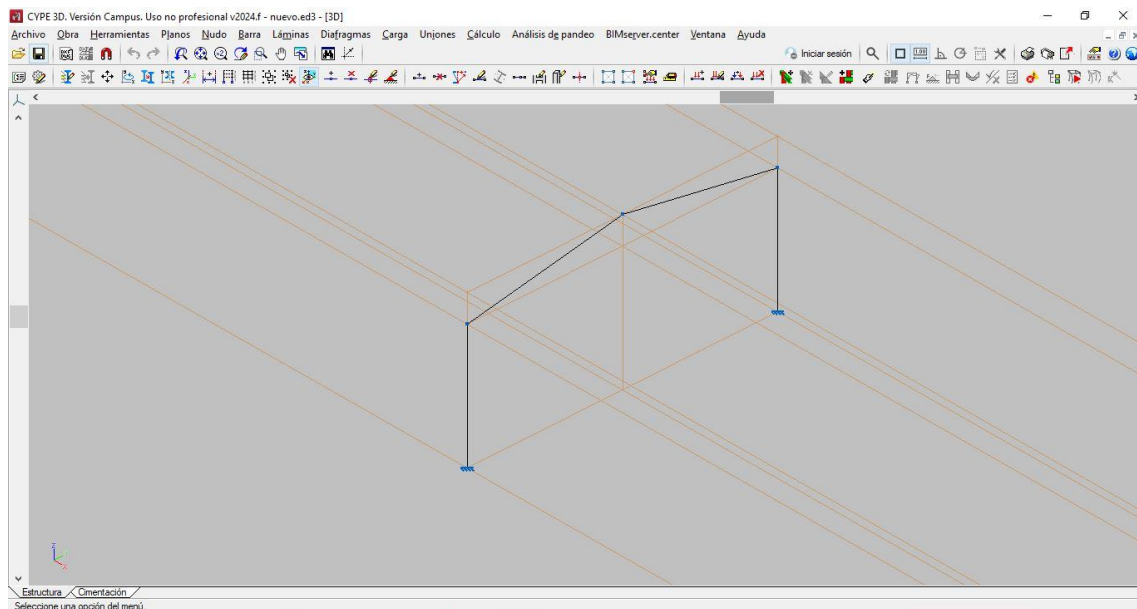


Figura 48. Espacio de trabajo CYPE.

Visto en el plano de trabajo XZ:

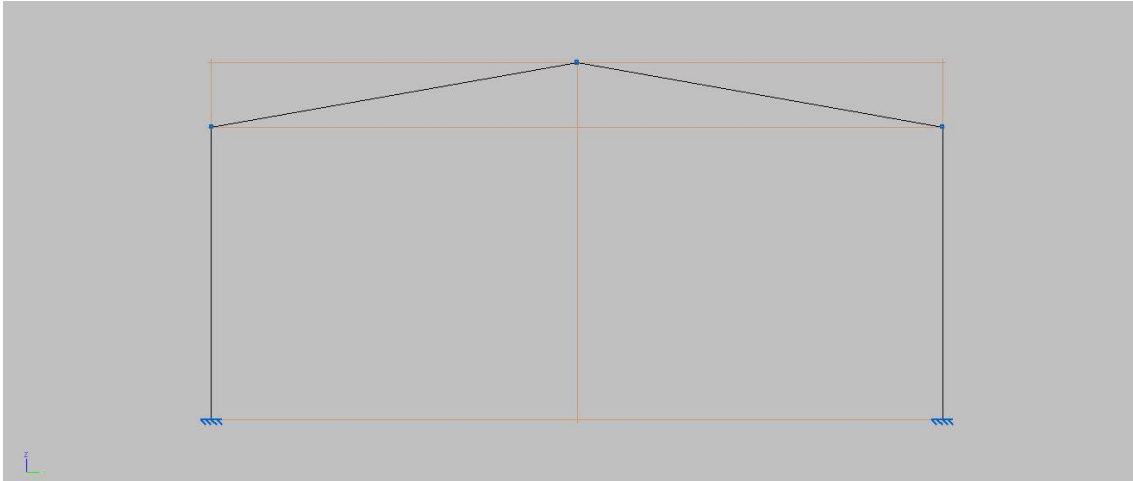


Figura 49. Plano de trabajo CYPE (plano XZ).

Se pasa a describir los perfiles del pórtico, es decir indicar el tipo y tamaño del perfil. Se va a poner un IPE300 tanto en pilares como en vigas y una vez dimensione el programa con la carga aplicada se comprueba si es suficiente para resistir o si por lo contrario, es necesario un perfil mayor de la serie.

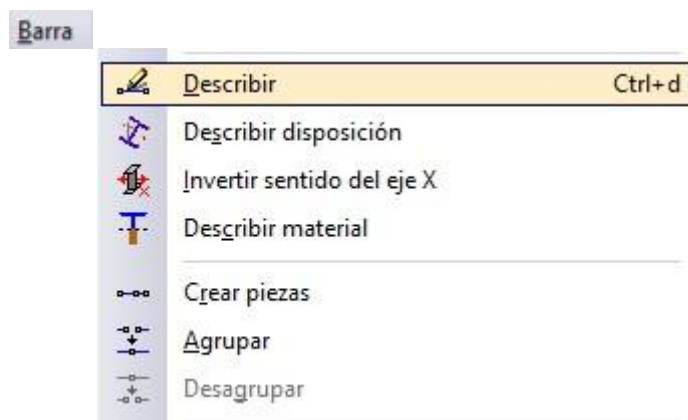


Figura 50. Elección de perfil CYPE.

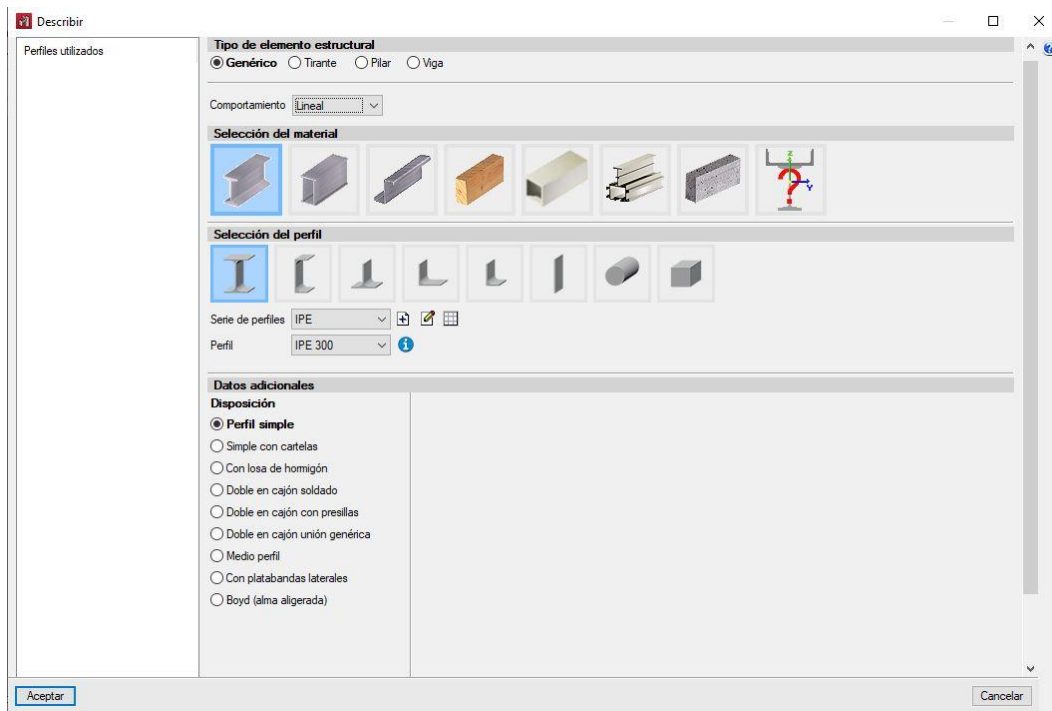


Figura 51. Elección de perfil.

Una vez definido el tamaño de la serie del perfil se pasa a definir e introducir las cargas.

En caso de estar activada la carga de peso propio al definir las barras hay que desactivarla.



Figura 52. Elección de perfil inicial.

Se introduce la carga “Sobrecarga de uso” de 6kN/m en las vigas del pórtico

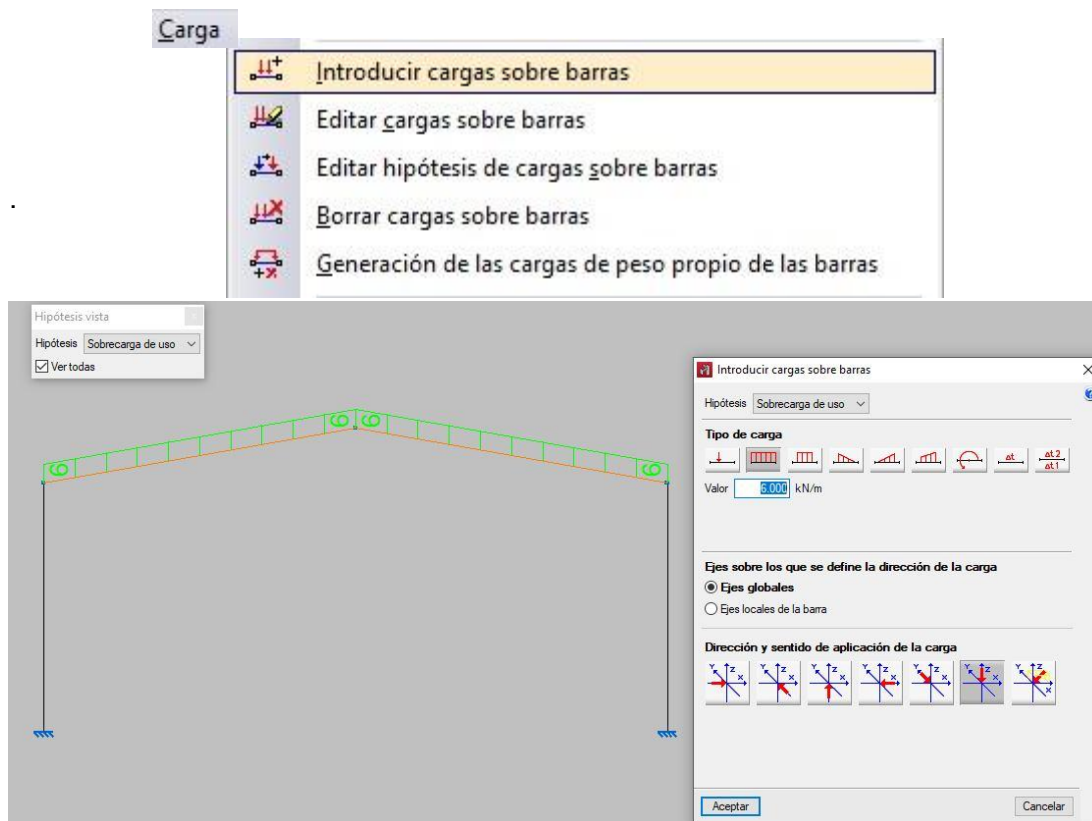


Figura 53. Introducción de cargas.

Una vez introducidas las cargas que van a estudiar, se procede a definir el pandeo y el pandeo lateral y posteriormente a dimensionar y calcular.

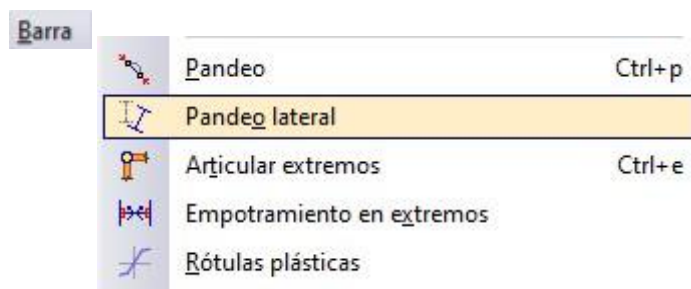


Figura 54. Configuración pandeo lateral.

El pandeo lateral se impide para todas las barras, tanto en el ala superior como en el ala inferior, coeficiente de pandeo (β) nulo.

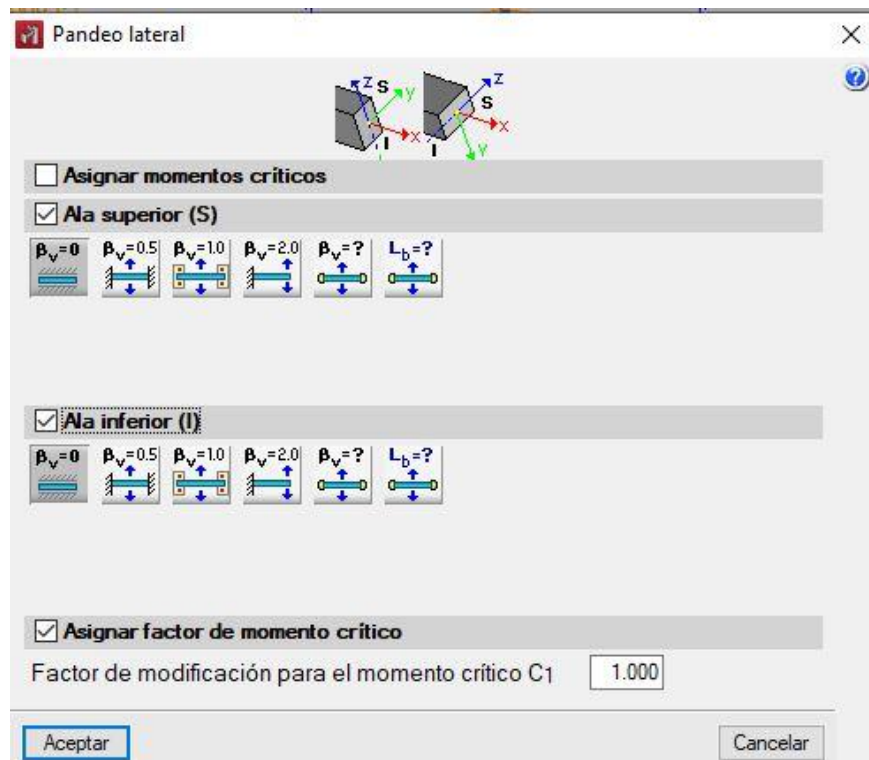


Figura 55. Pandeo lateral.

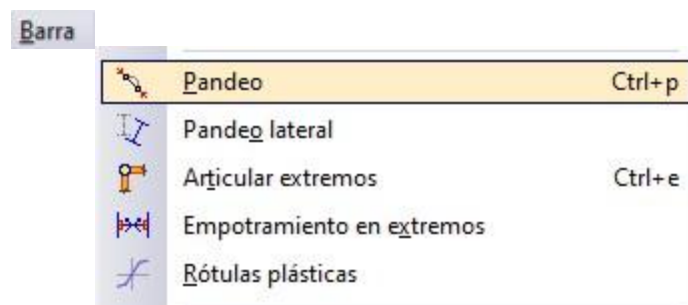


Figura 56. Configuración pandeo.

En el pandeo, se va a estudiar el pandeo en el plano de trabajo (plano XY) y pandeo fuera del plano (plano XZ) según la referencia de la imagen. En el plano XY está impedido ($\beta=0$), en el plano XZ se comporta como una barra biempotrada, coeficiente de pandeo ($\beta=0.5$).

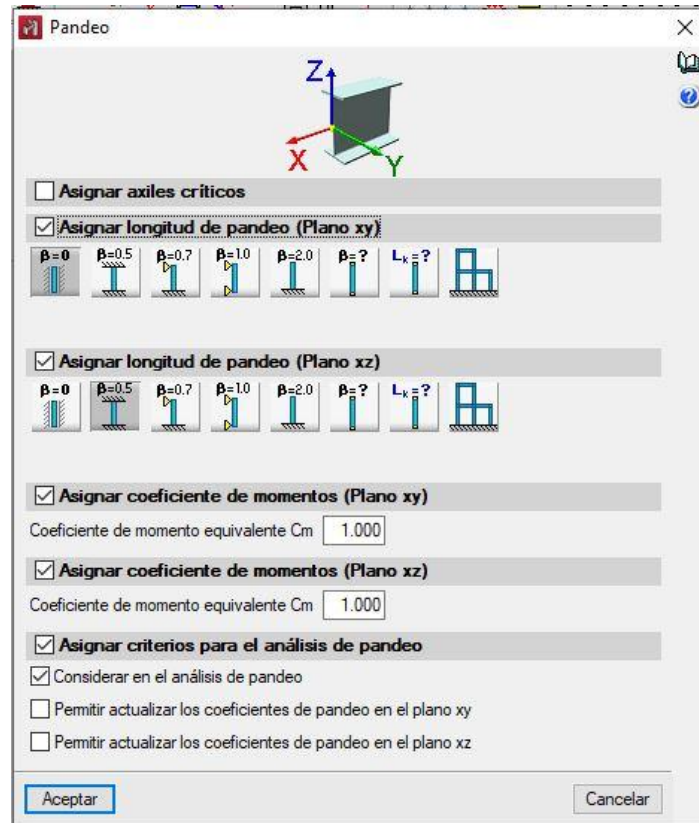


Figura 57. Pandeo.

Se procede a calcular y dimensionar el pórtico.

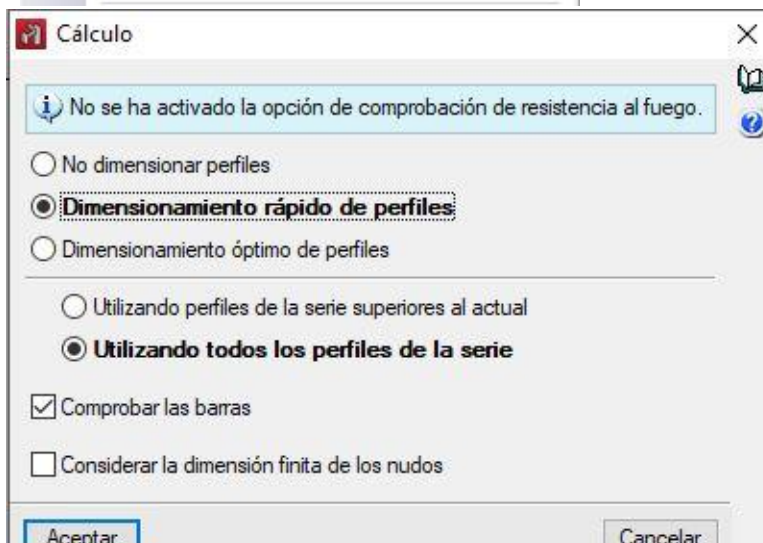
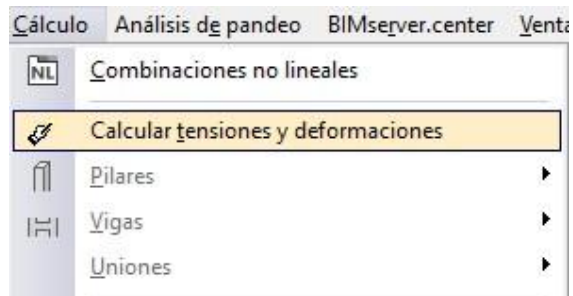


Figura 58. Cálculo de la estructura.

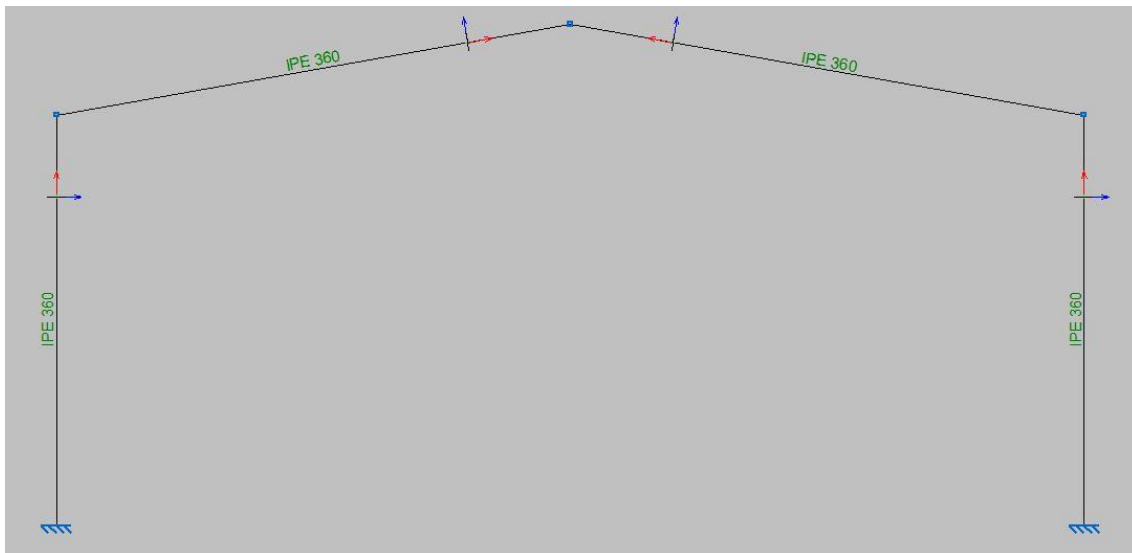


Figura 59. Dimensionamiento obtenido.

Una vez realizado el cálculo, se puede observar el dimensionamiento obtenido en el pórtico.

En este segundo caso hay barras sometidas a compresión, por lo tanto, es necesario realizar un estudio a pandeo.

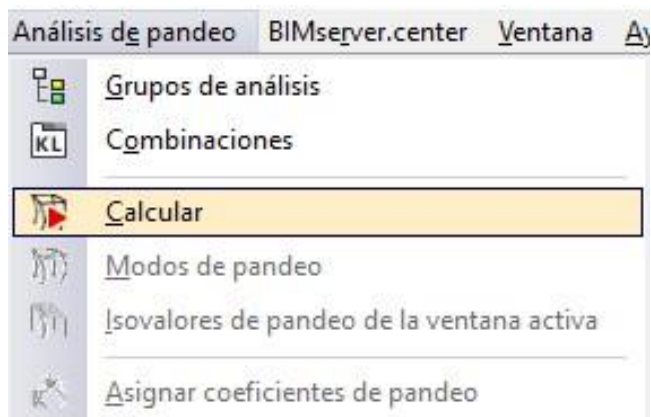


Figura 60. Cálculo a pandeo.

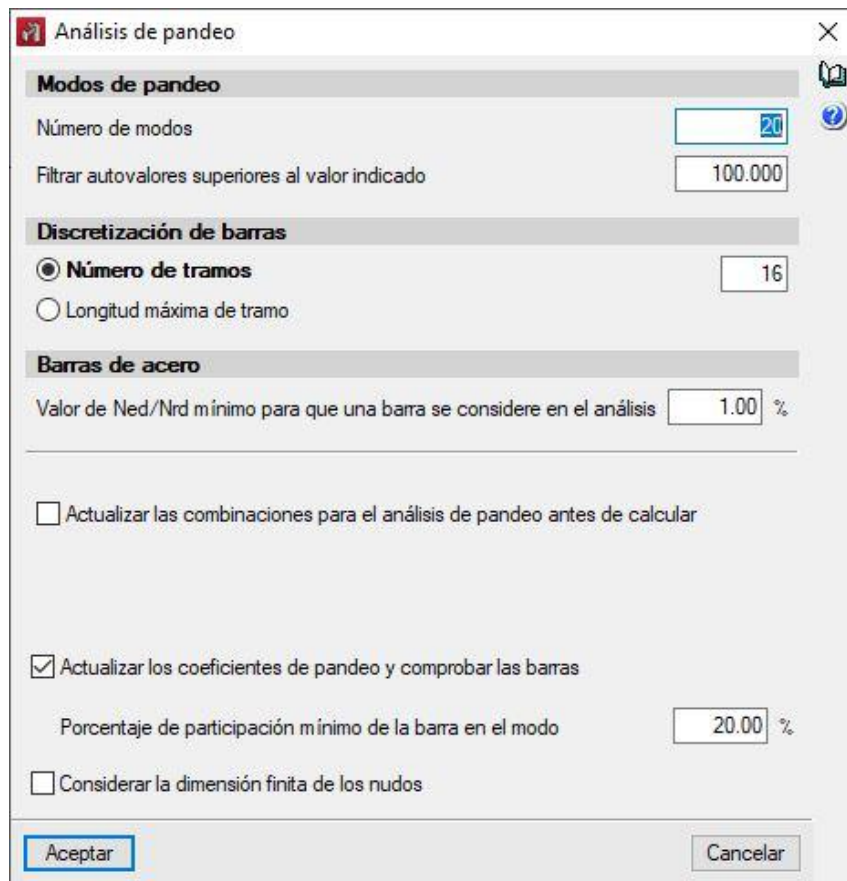


Figura 61. Configuración pandeo.

El número de modos de estudio va a ser 20.

El número de tramos a dividir la estructura va a ser 16. Cada barra se divide en 4 tramos.

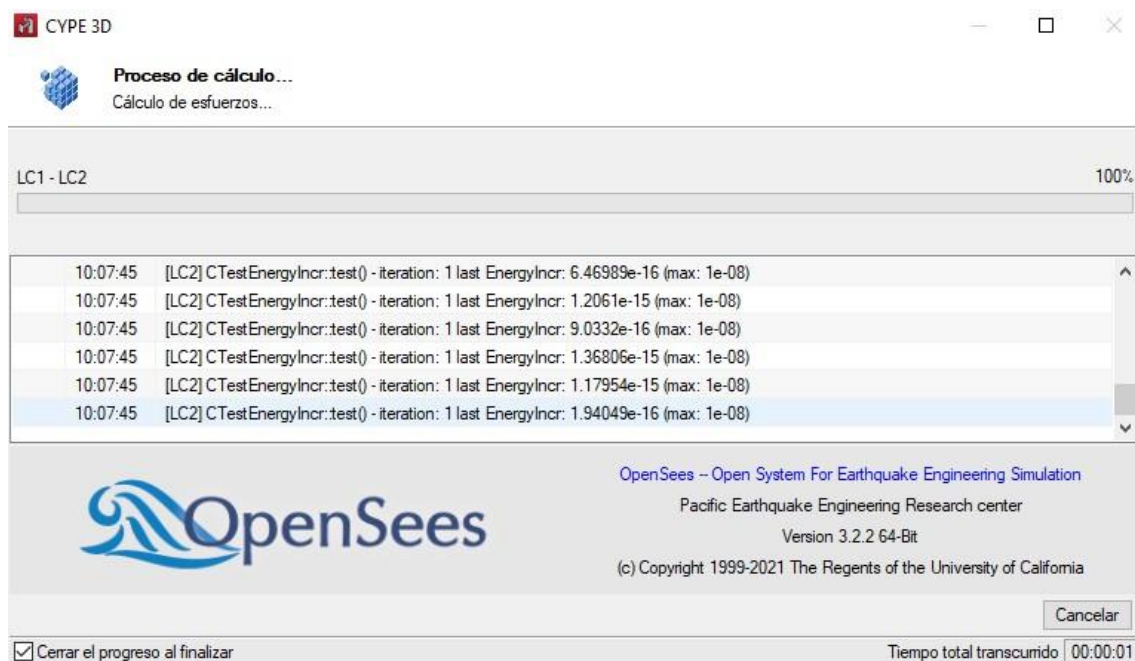


Figura 62. Proceso de cálculo a pandeo.

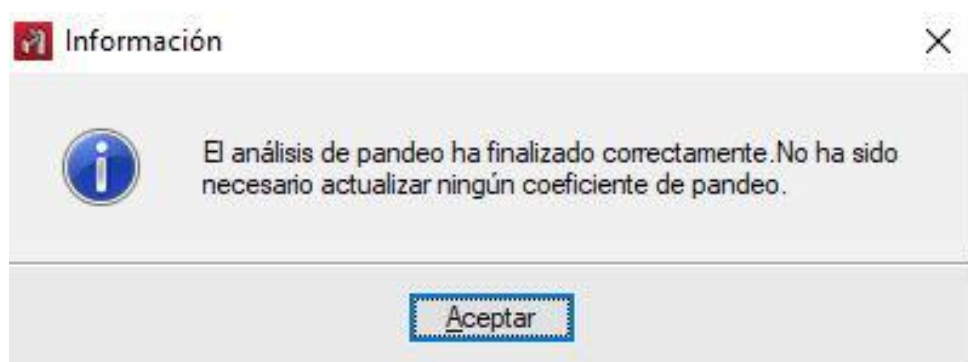


Figura 63. Pandeo calculado correctamente.

4.2.2.SAP 2000:

Ahora se va a explicar el cálculo del pórtico en SAP 2000 con el dimensionamiento obtenido en CYPE.



Figura 64. Pantalla inicial SAP2000.

Para comenzar a configurar el archivo hay que elegir el tipo de plantilla que se va a usar de inicio. En este caso, se usará “Grid Only”, tiene una rejilla tipo cuadrícula en la que se pueden definir número de divisiones tanto verticales como horizontales en la que apoyarse a la hora de definir la geometría. También podría realizarse con los comandos “2D Frames” o “Blank”.

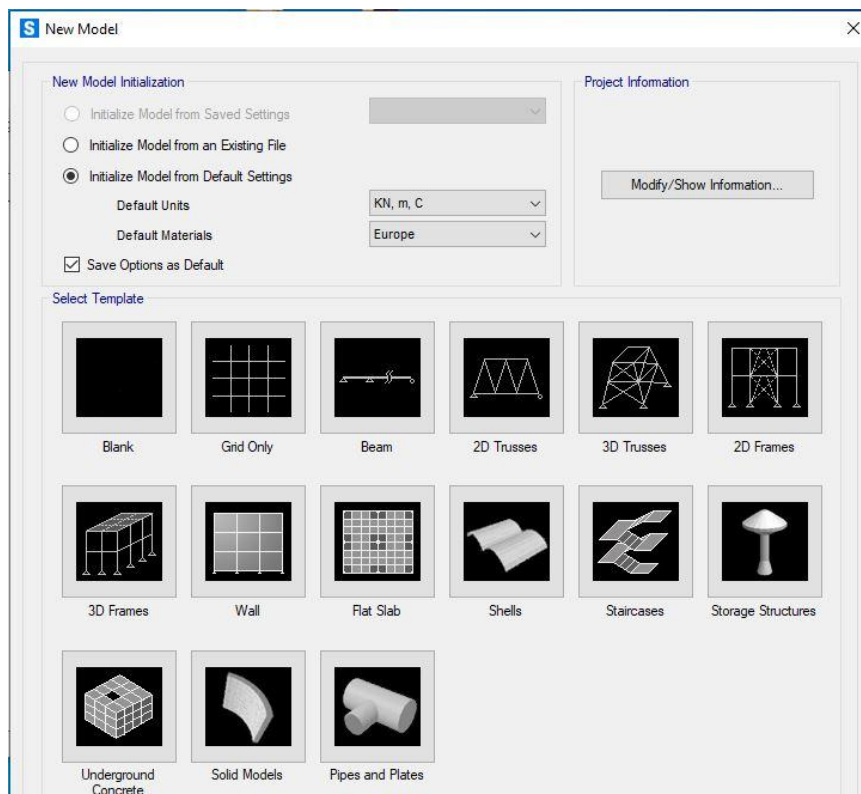


Figura 65. Configuración archivo SAP2000.

Se va a configurar la rejilla. La rejilla consta de 3 líneas verticales distanciadas en 10 metros y tres líneas horizontales distanciadas en 8 metros el primer tramo y 1,763 metros el segundo tramo. Esto no es posible de configurar de primeras, por lo tanto, se diseñará en 3 líneas verticales distanciadas 10 metros y 3 líneas horizontales distanciadas 8 metros y posteriormente se modificará.

El sistema de ejes globales se sitúa en el punto intermedio horizontal del pórtico y a la altura de los empotramientos.

En SAP 2000 se trabaja en el plano XZ, ya que de esta forma se aprovecha la máxima inercia de las barras.

S Quick Grid Lines X

Cartesian Cylindrical

Coordinate System Name
GLOBAL

Number of Grid Lines

X direction 3

Y direction 1

Z direction 3

Grid Spacing

X direction 10,

Y direction 1,

Z direction 8,

First Grid Line Location

X direction -10,

Y direction 0,

Z direction 0,

OK Cancel

Figura 66. Configuración rejilla inicial.

Una vez diseñada la rejilla se puede ver en el espacio de trabajo tridimensional como en el plano XZ de trabajo.

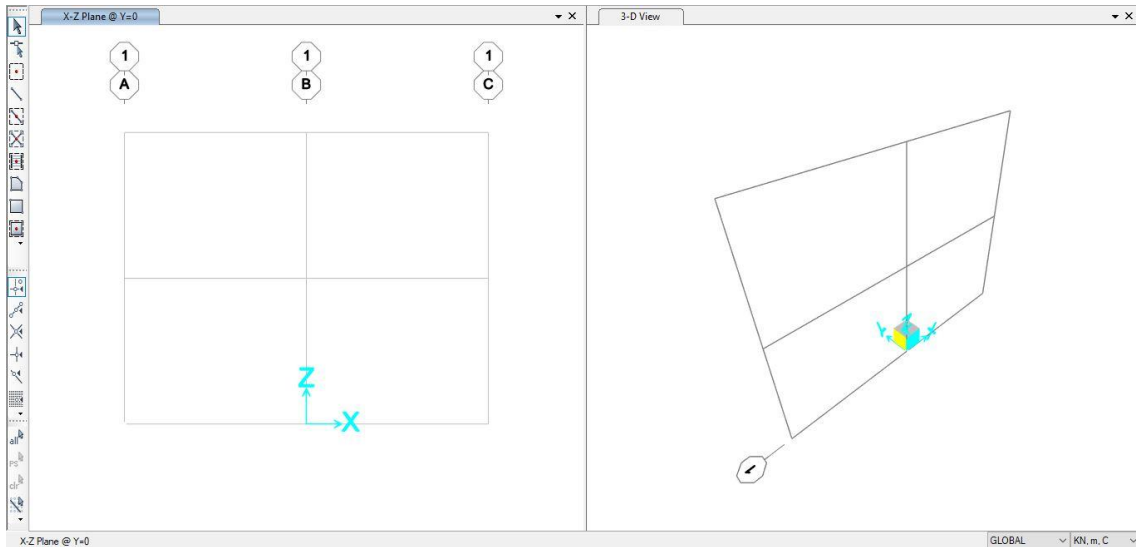


Figura 67. Espacio de trabajo inicial.

Las dimensiones de la rejilla no son las deseadas, por lo tanto, es necesario modificarlas.

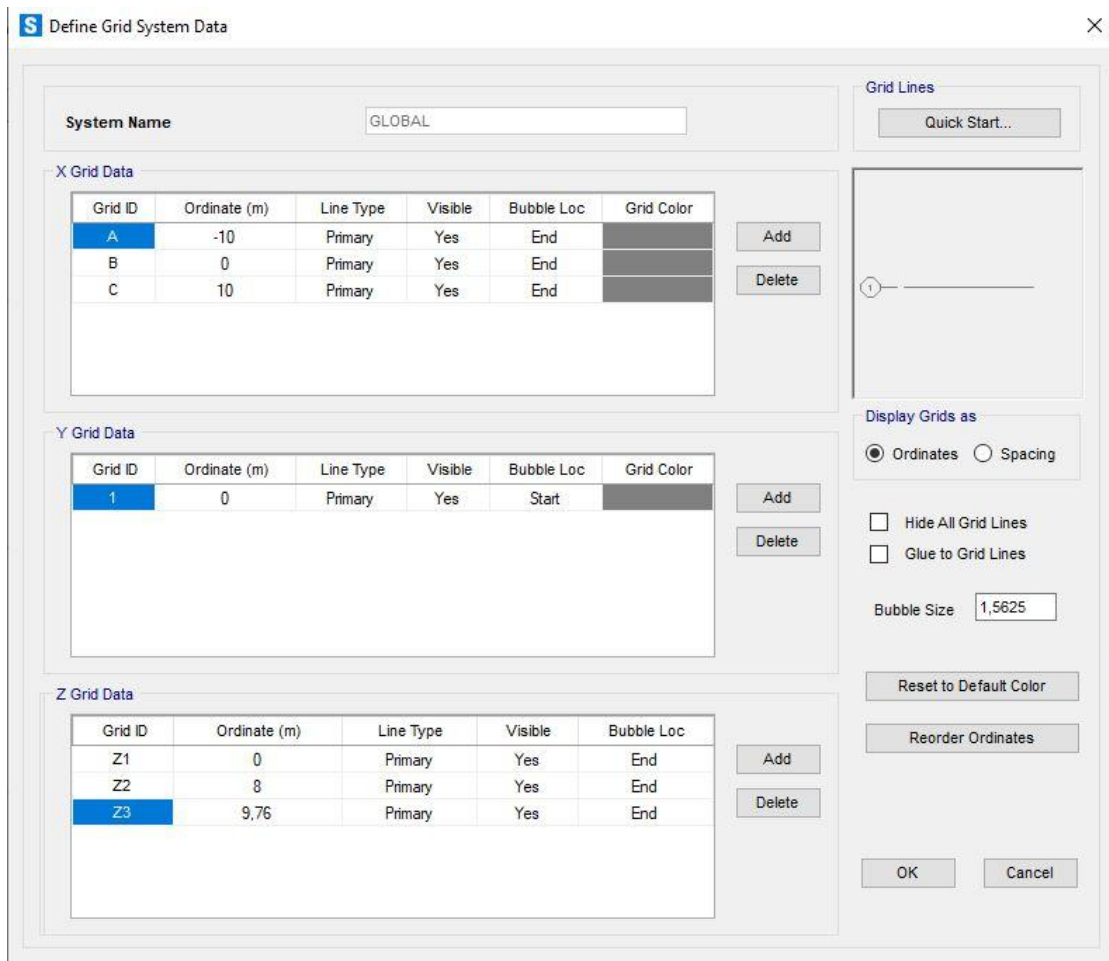


Figura 68. Configuración rejilla definitiva.

Una vez configurada la rejilla correctamente se puede ver en el espacio de trabajo y en el plano XZ, donde se seguirá diseñando el pórtico.

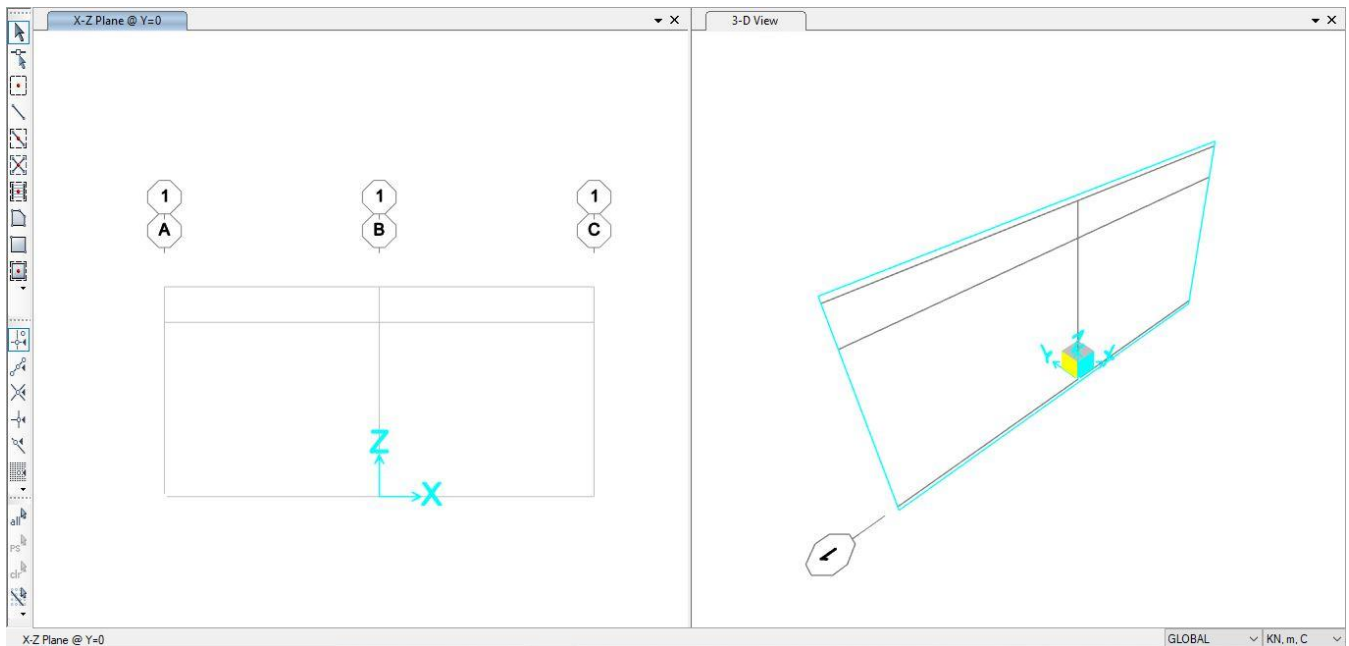


Figura 69. Espacio de trabajo definitivo.

Concluido el diseño de la cuadrícula deseada, se define el material para el pórtico.

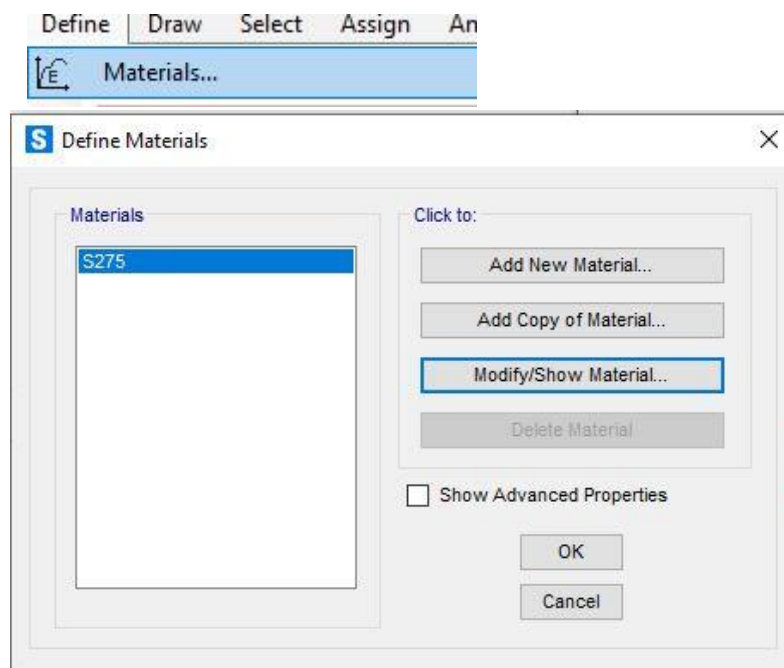


Figura 70. Definición de material.

Aquí se pueden ver las propiedades del material elegido, acero S275.

The image shows a software dialog box titled "Material Property Data" for the material S275. The dialog is organized into several sections:

- General Data:** Material Name and Display Color (S275), Material Type (Steel), Material Grade (S275), and Material Notes (Modify/Show Notes...).
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume (76.9729) and Mass per Unit Volume (7,849). A Units dropdown menu is set to "KN, m, C".
- Isotropic Property Data:** Modulus Of Elasticity, E (2,100E+08), Poisson, U (0,3), Coefficient Of Thermal Expansion, A (1,170E-05), and Shear Modulus, G (80769231,).
- Other Properties For Steel Materials:** Minimum Yield Stress, Fy (275000,); Minimum Tensile Stress, Fu (430000,); Expected Yield Stress, Fye (302500,); and Expected Tensile Stress, Fue (473000,).

At the bottom, there is a checkbox for "Switch To Advanced Property Display" (unchecked) and "OK" and "Cancel" buttons.

Figura 71. Propiedades del material.

Una vez elegido el material, se procede a elegir el tipo de perfil y la serie del perfil.

Se va a definir un IPE 360, ya que es el dimensionamiento obtenido anteriormente en CYPE.

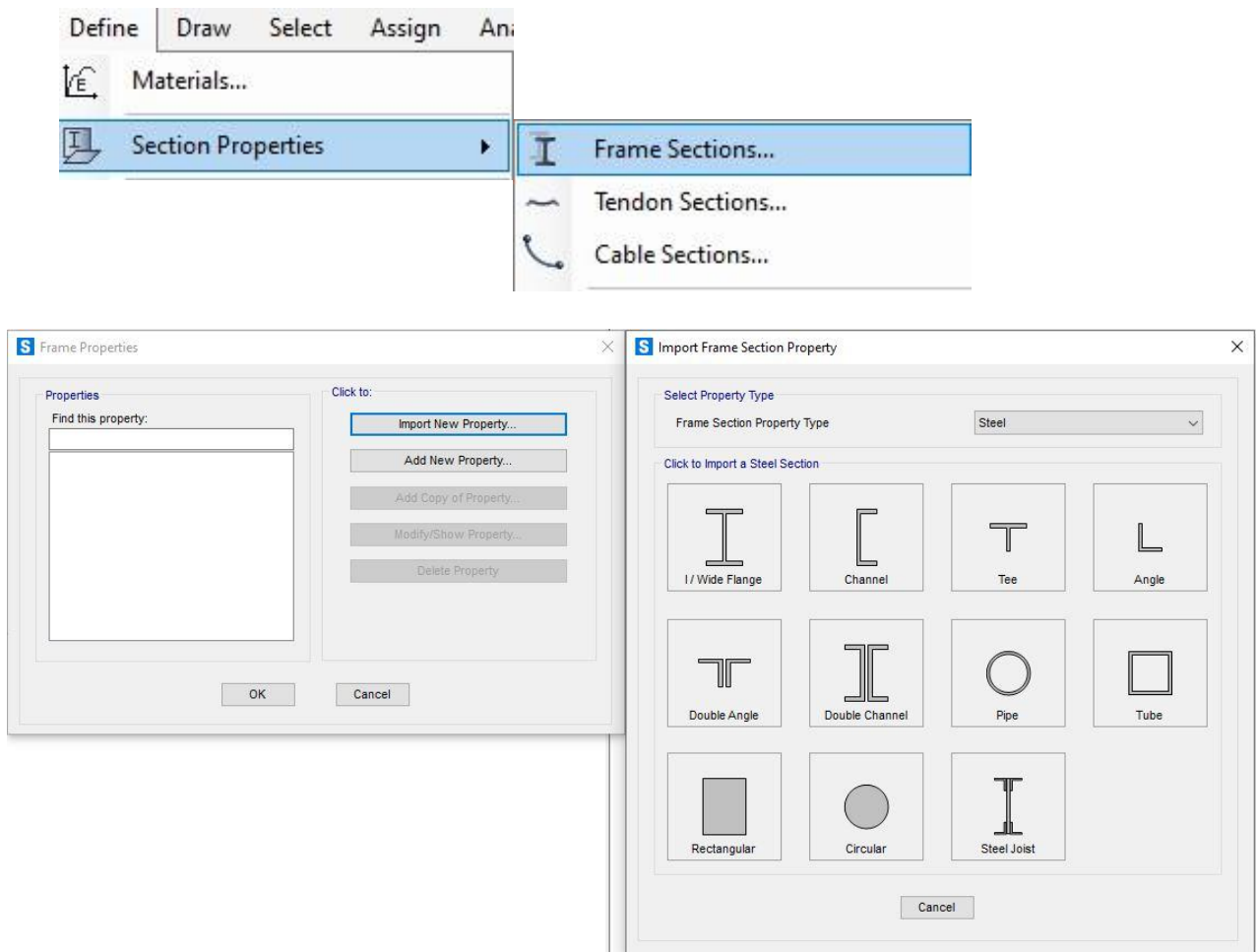


Figura 72. Definición de perfil.

Para obtener la serie de perfiles se elige la biblioteca de importación. En este caso es la biblioteca europea "Euro.pro".

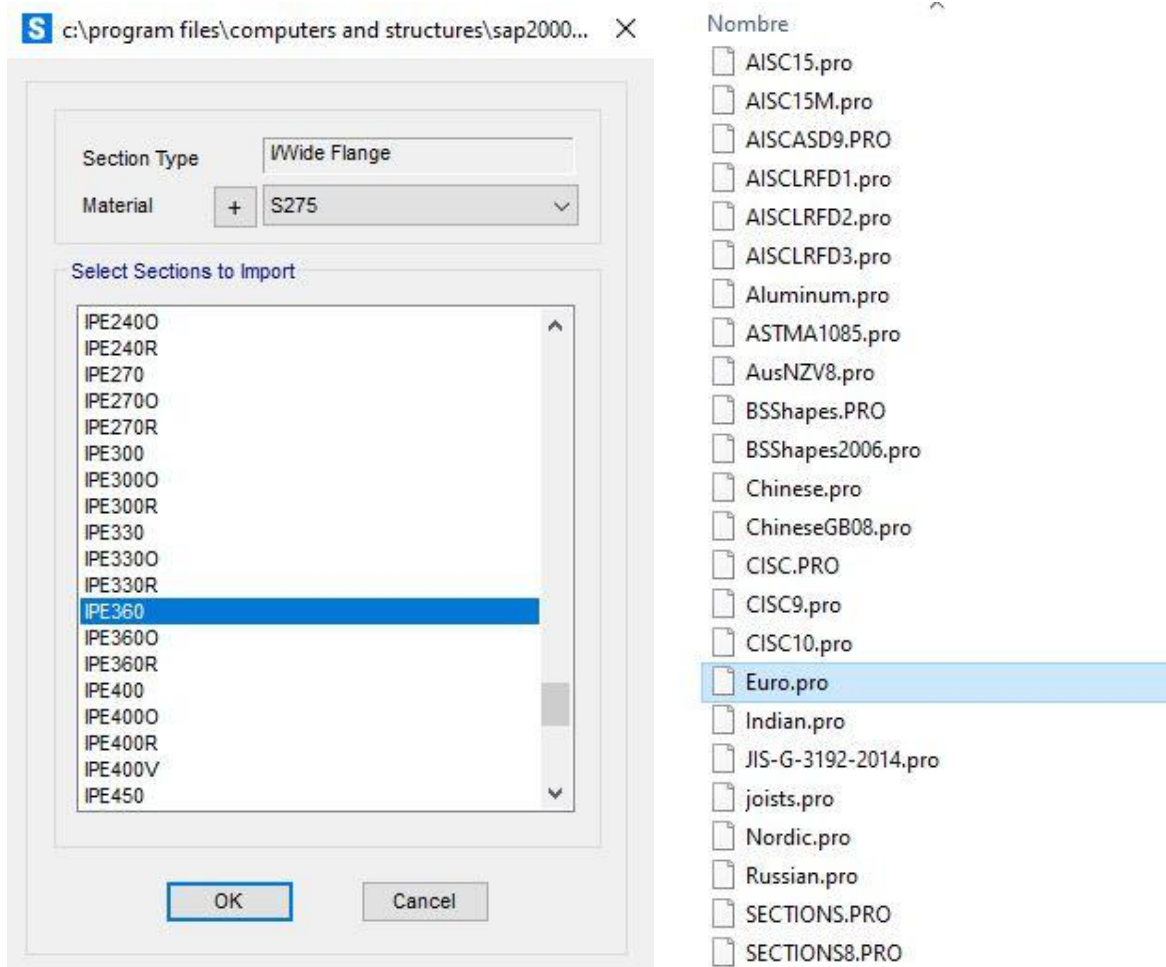


Figura 73. Serie de perfil.

Aquí se observan las características geométricas y propiedades del perfil IPE 360:

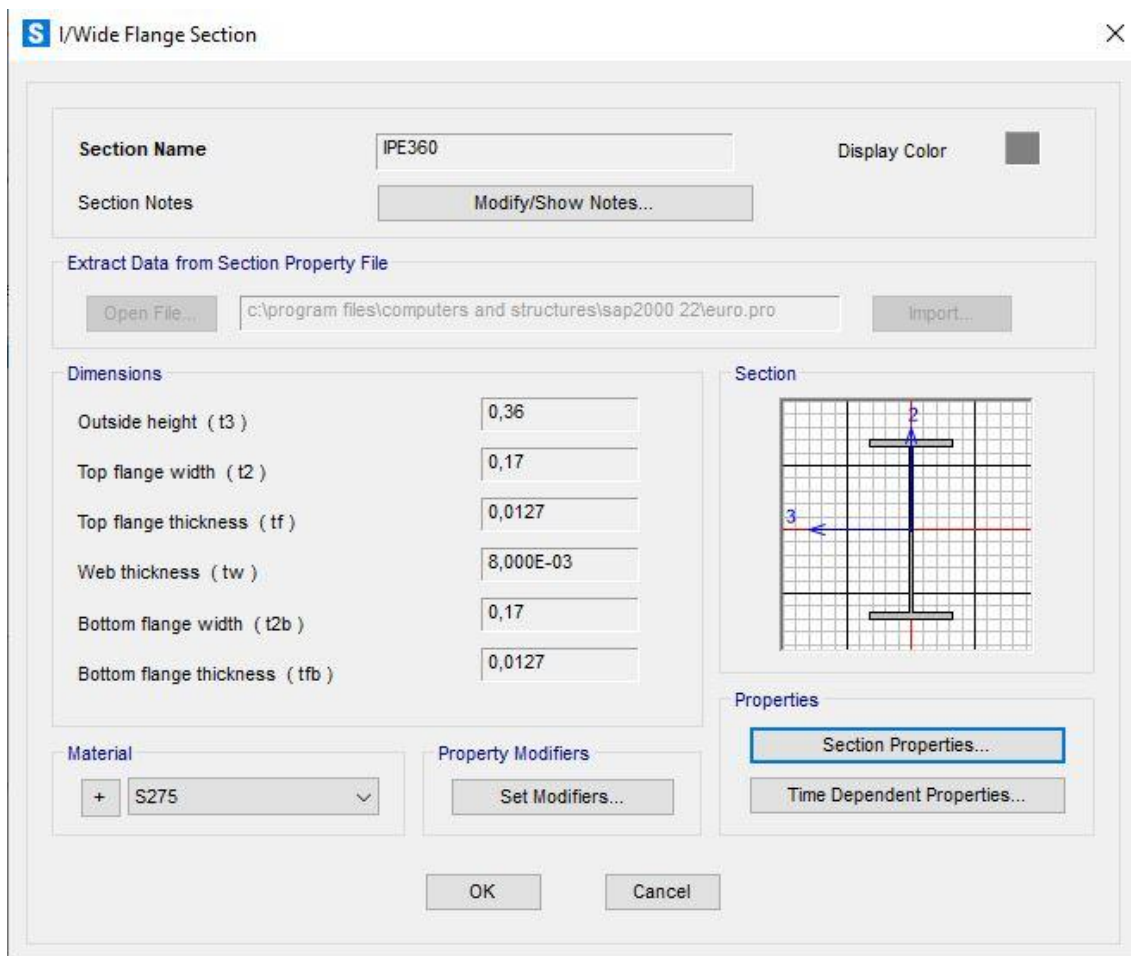


Figura 74. Dimensiones del perfil.

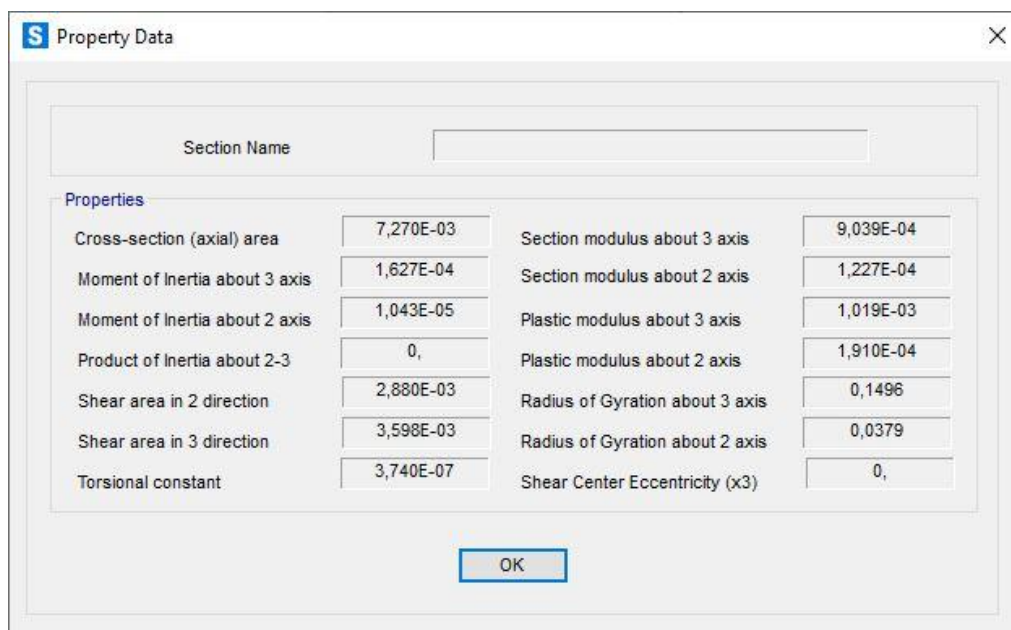


Figura 75. Propiedades geométricas del perfil.

Una vez definida la sección se diseña el pórtico con ayuda de la rejilla.

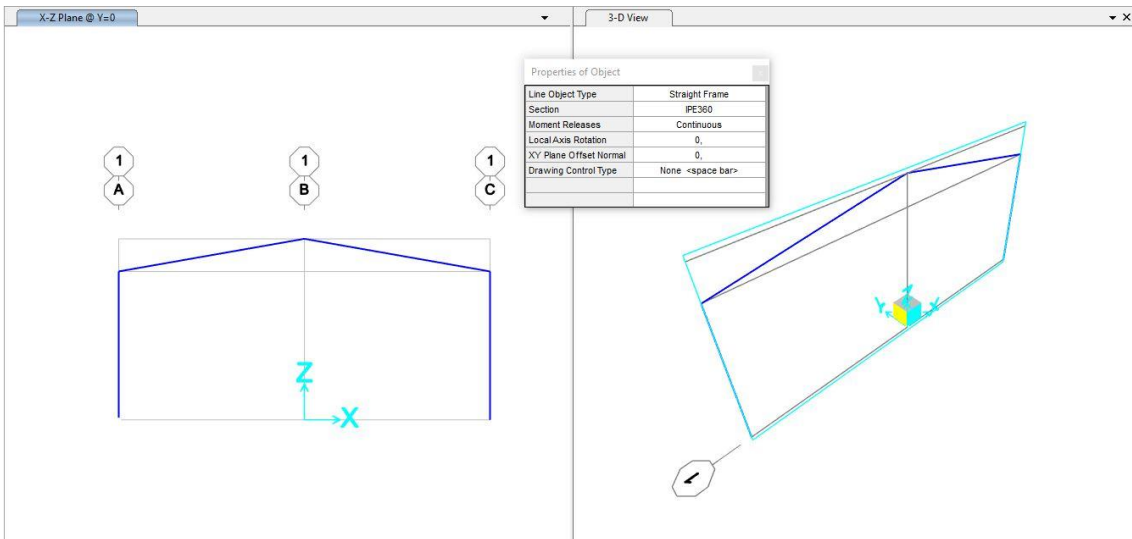


Figura 76. Estructura sin definir apoyos.

Ahora toca definir los apoyos deseados en los puntos en los que el pórtico está en contacto con el terreno. En este caso el pórtico va a ser biempotrado como se ha hecho anteriormente en el programa CYPE.

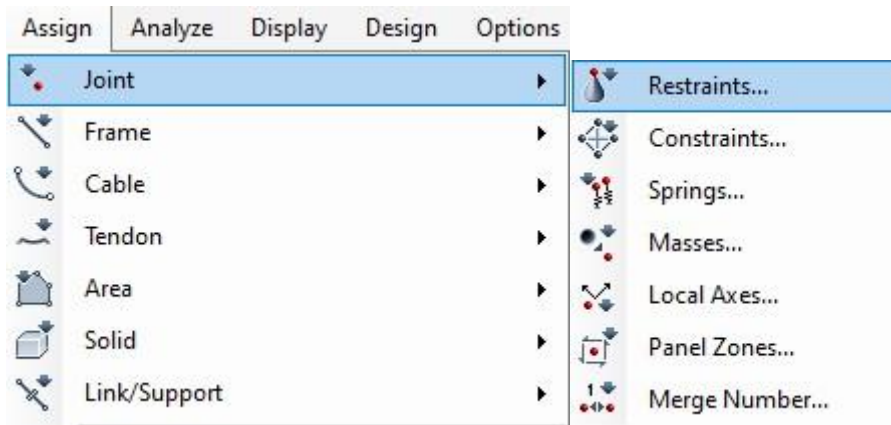


Figura 77. Introducción de apoyos.

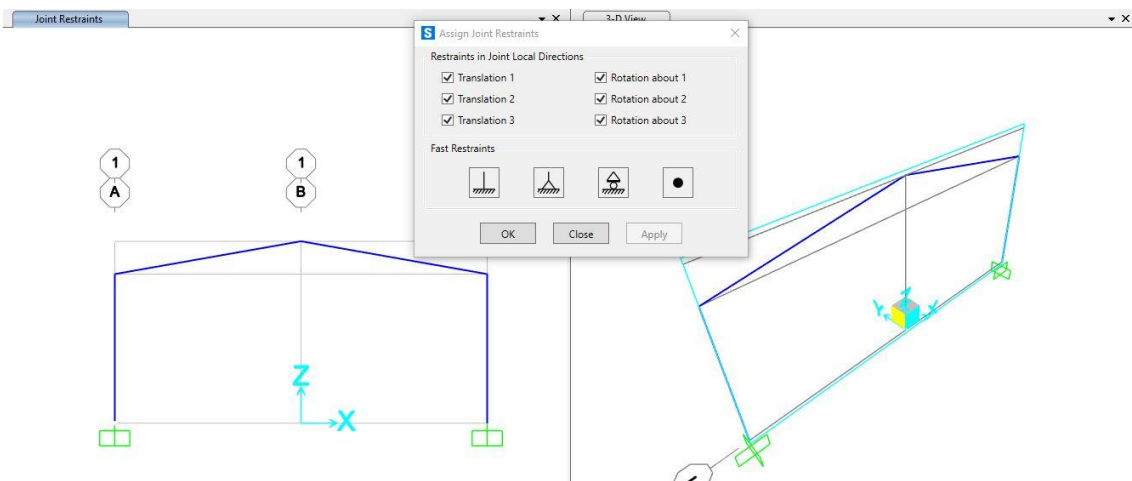


Figura 78. Definición de apoyos.

Ahora se define la carga de “Sobrecarga de uso”.

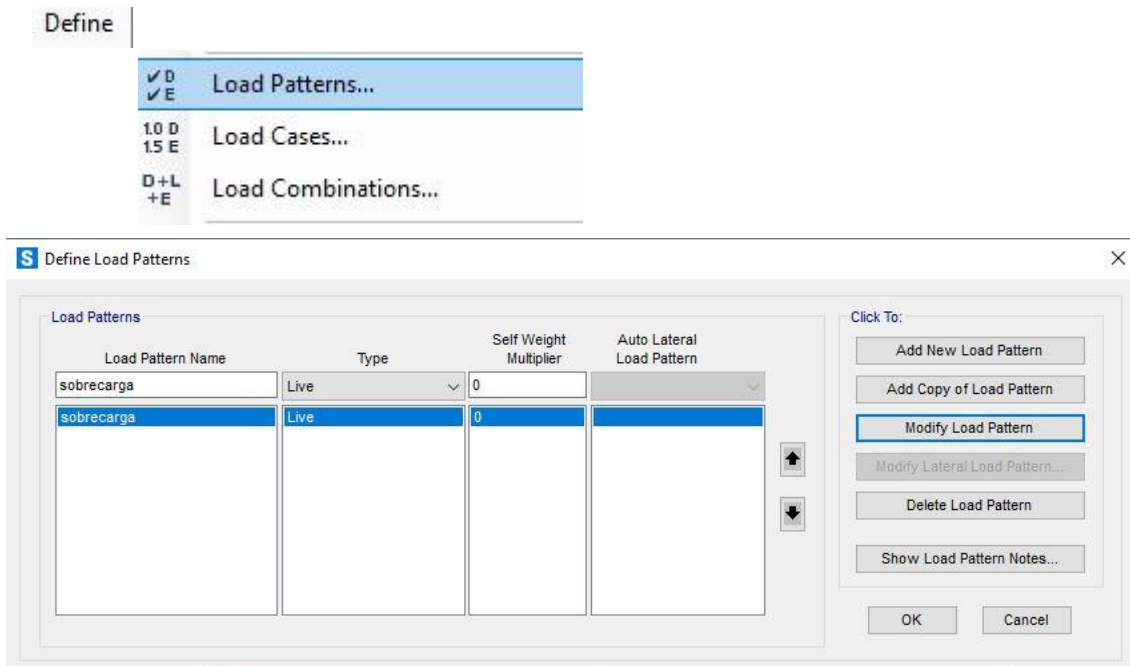


Figura 79. Definición de cargas.

Una vez definida la carga, se pasa a aplicar sobre el pórtico:

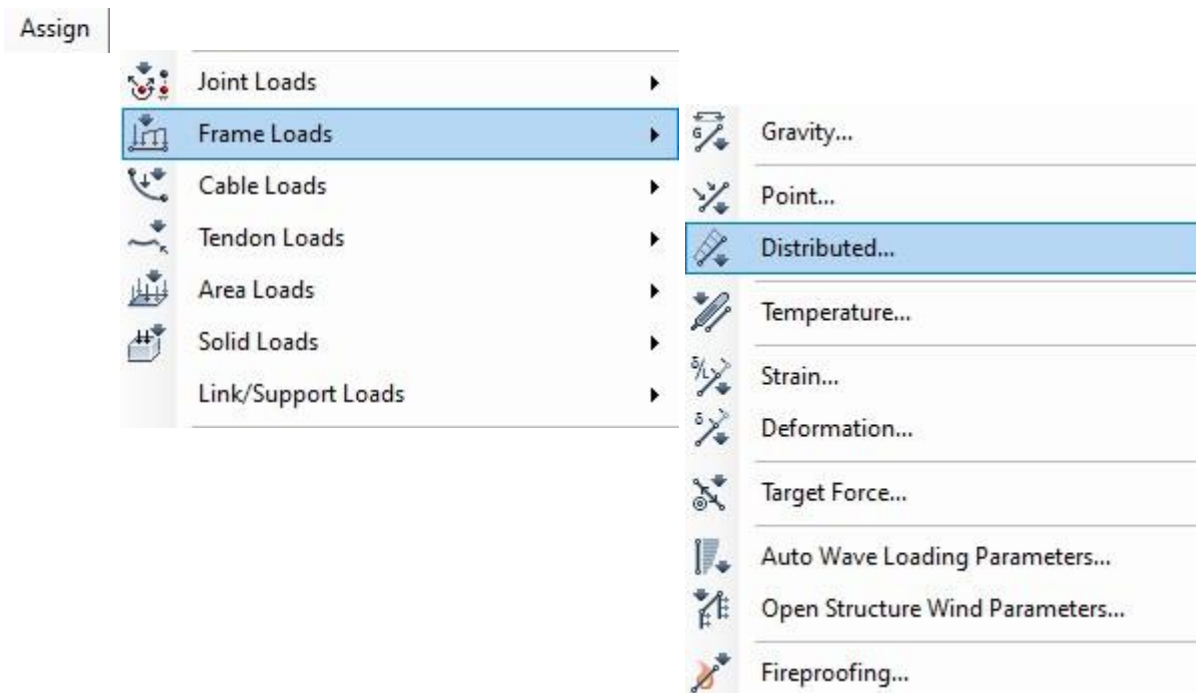


Figura 80. Introducción de cargas.

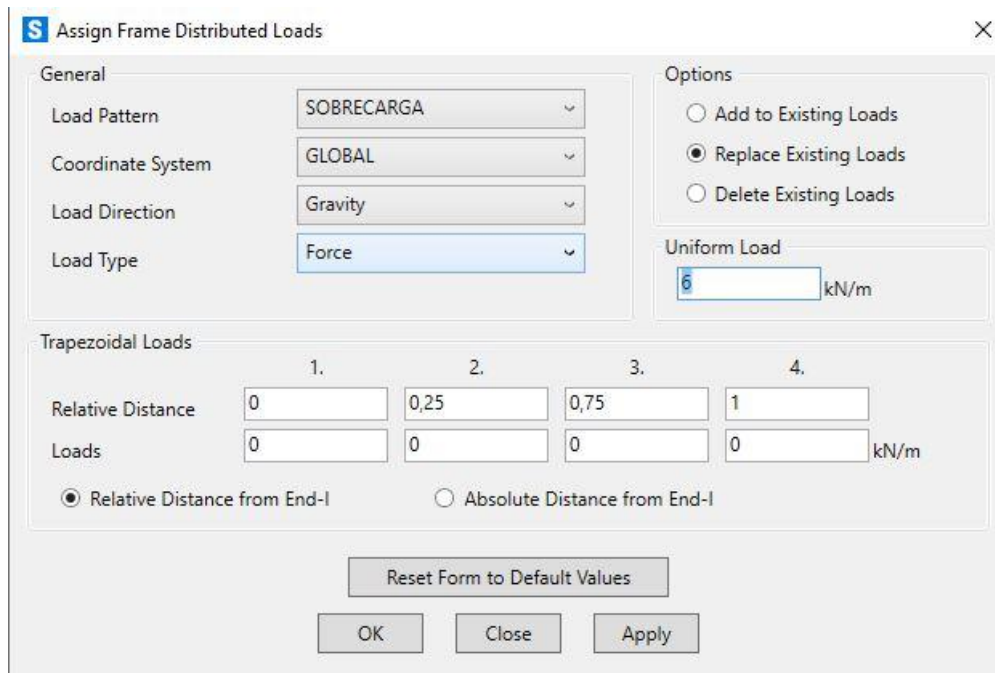


Figura 81. Introducción tipo de carga.

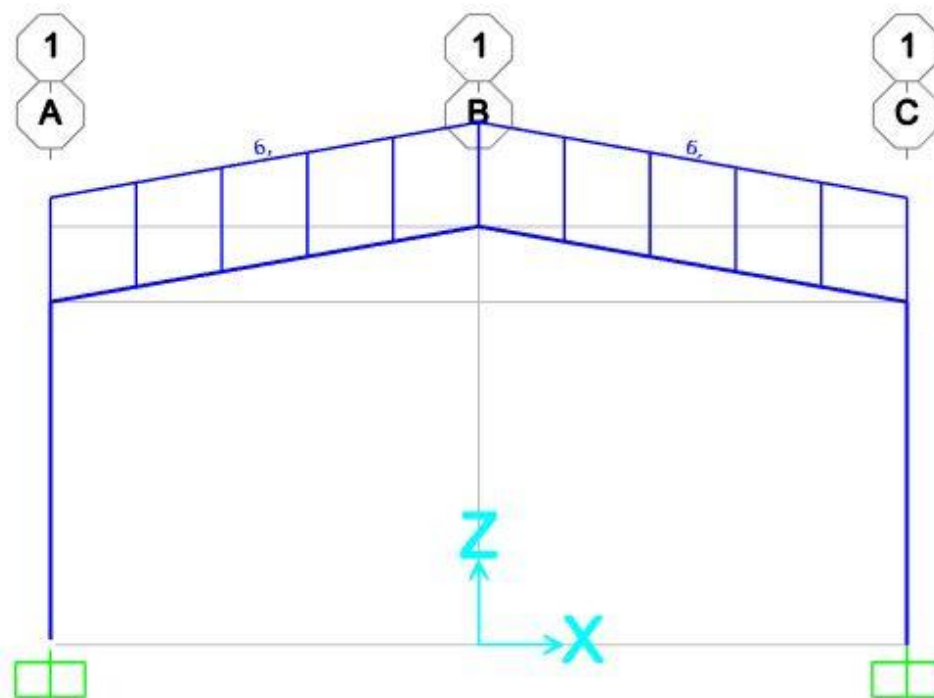


Figura 82. Pórtico con carga aplicada.

Viendo el pórtico como perfiles extruidos se ve de la siguiente forma:

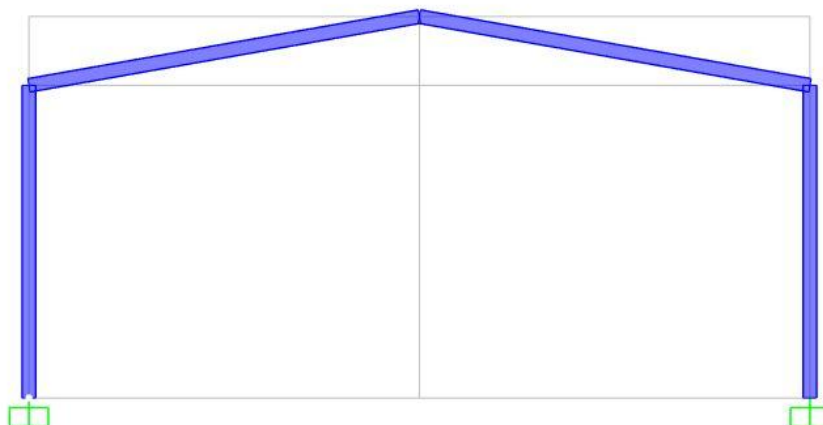


Figura 83. Pórtico con perfiles extruidos.

Se procede al cálculo estático de la estructura.

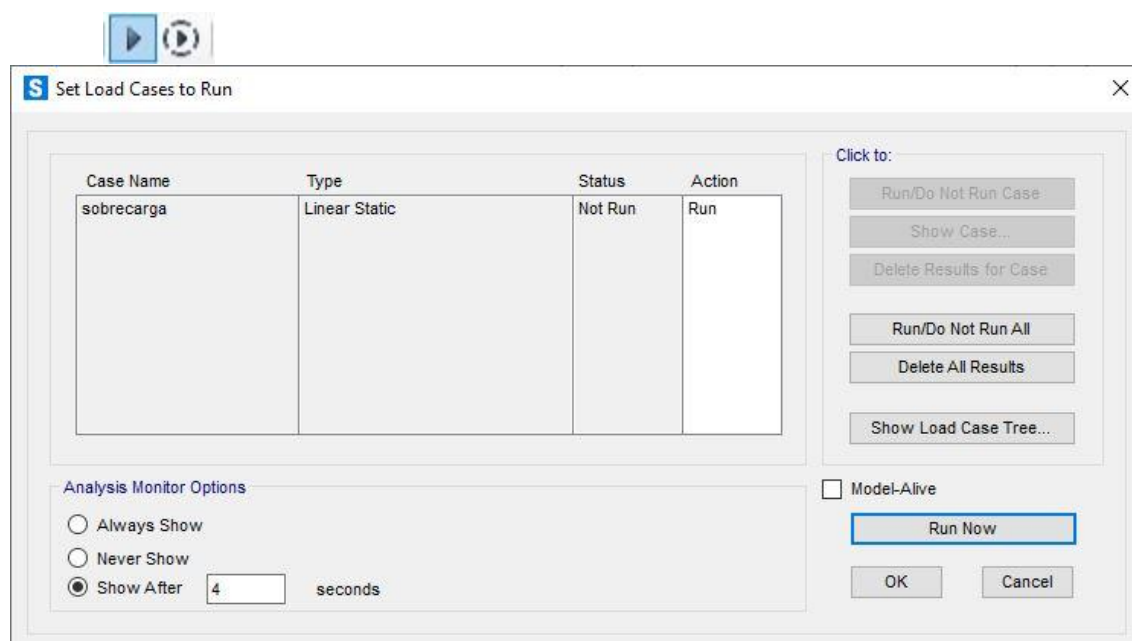


Figura 84. Cálculo estático.

Una vez realizado el cálculo estático de esfuerzos y reacciones, se procede a realizar un análisis de pandeo. Para ello, primero se divide cada barra de la estructura en varios tramos, en este caso se ha optado por 4 tramos e impedir el desplazamiento fuera del plano para evitar el vuelco. Al estar trabajando en el plano XZ, el desplazamiento impedido será u_y o también denominado v .

A continuación, se divide cada barra que forma el pórtico en 4 tramos.

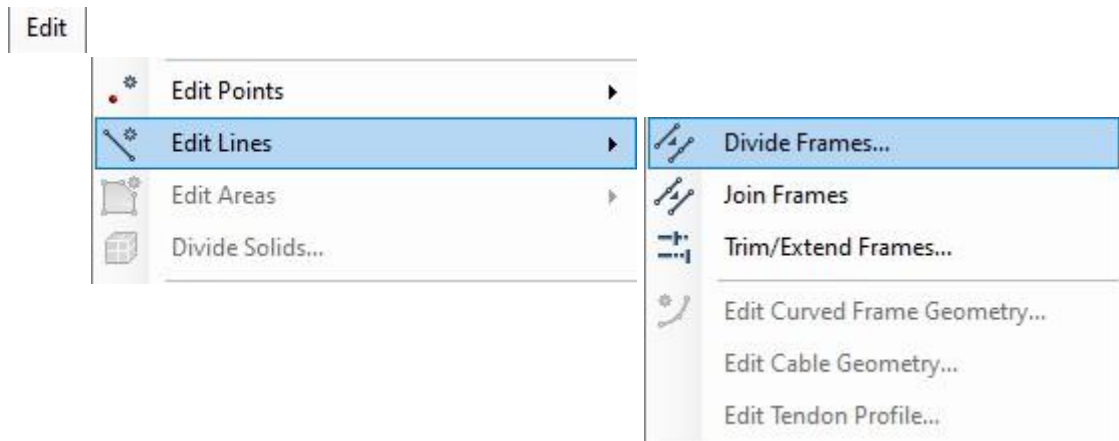


Figura 85. División de barras.

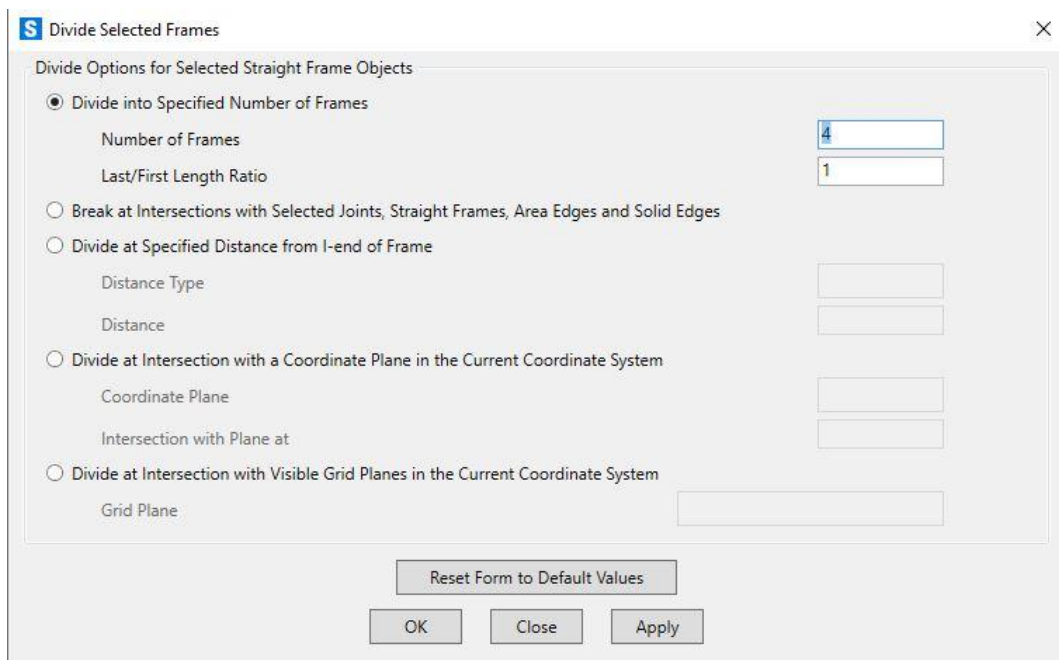


Figura 86. Configuración comando dividir.

Se obtienen las barras divididas.

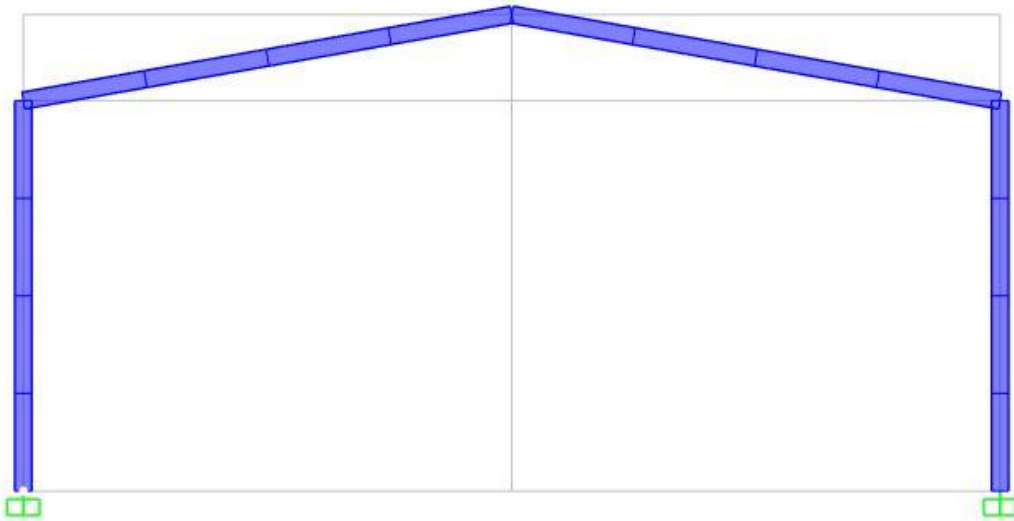


Figura 87. Perfil extruido con barras divididas.

Ahora se procede a impedir los desplazamientos de los nudos creados al dividir las barras en varios tramos. De esta forma se evita el vuelco de la estructura fuera del plano.

Para este paso se seleccionan todos los nudos.

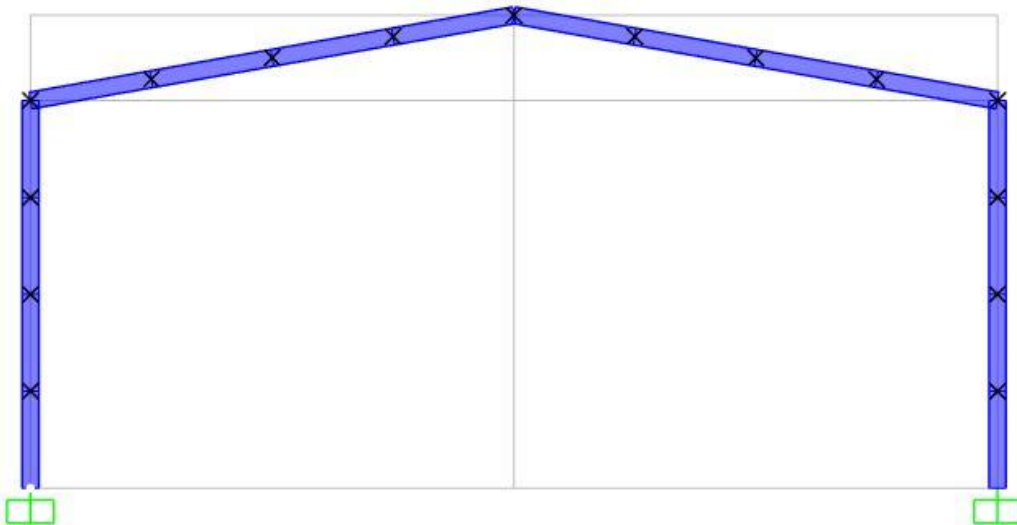


Figura 88. Nudos del pórtico seleccionados.

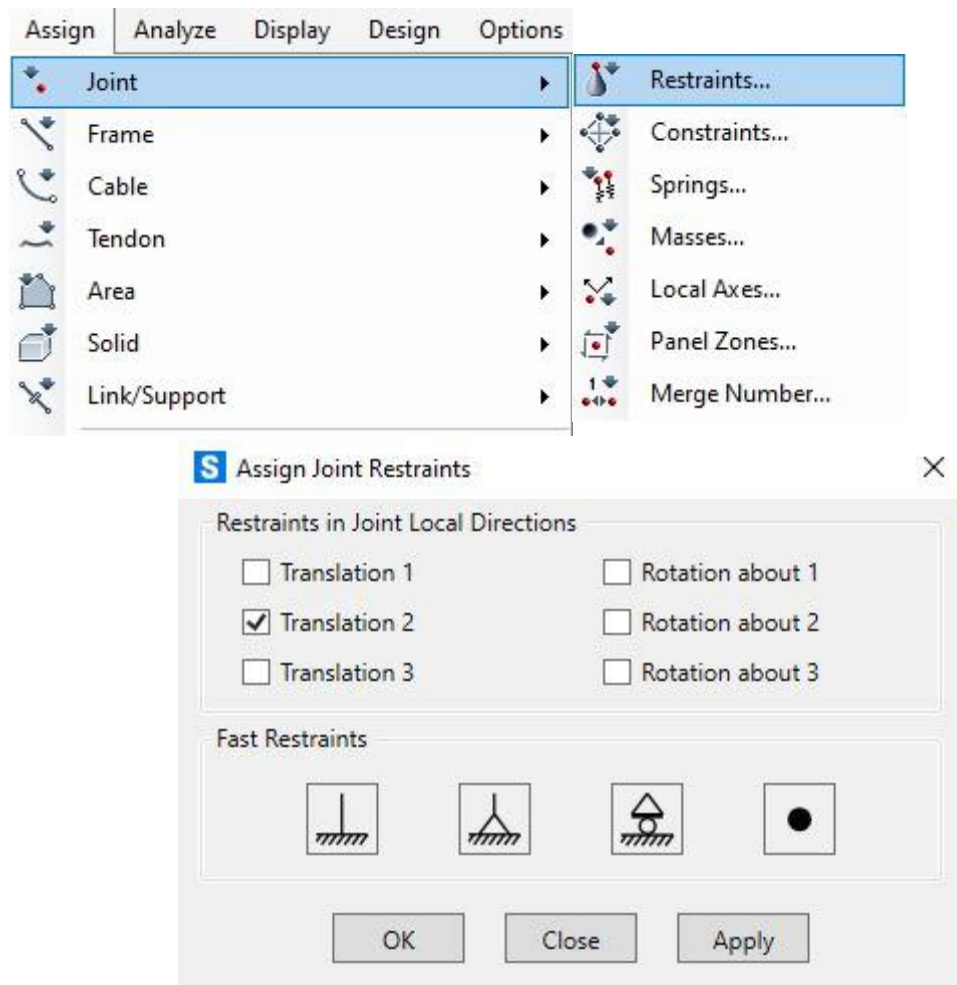


Figura 89. Introducción apoyos intermedios para evitar vuelco.

Se obtiene la estructura con apoyos que impiden el desplazamiento 2 (eje Y).

Para el estudio a pandeo hay que modificar unos ajustes en los casos de carga (Load cases) respecto al estudio estático:

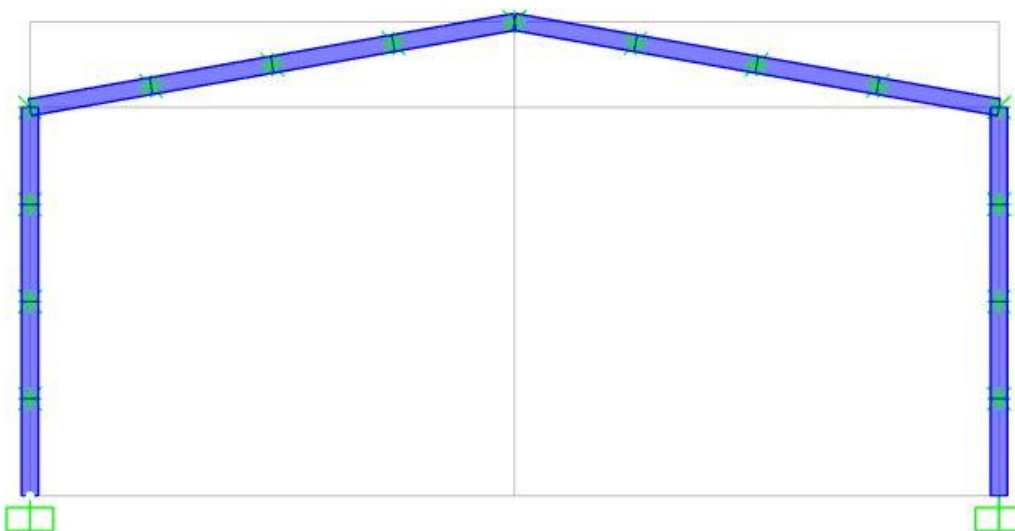


Figura 90. Pórtico con barras divididas y apoyos intermedios.

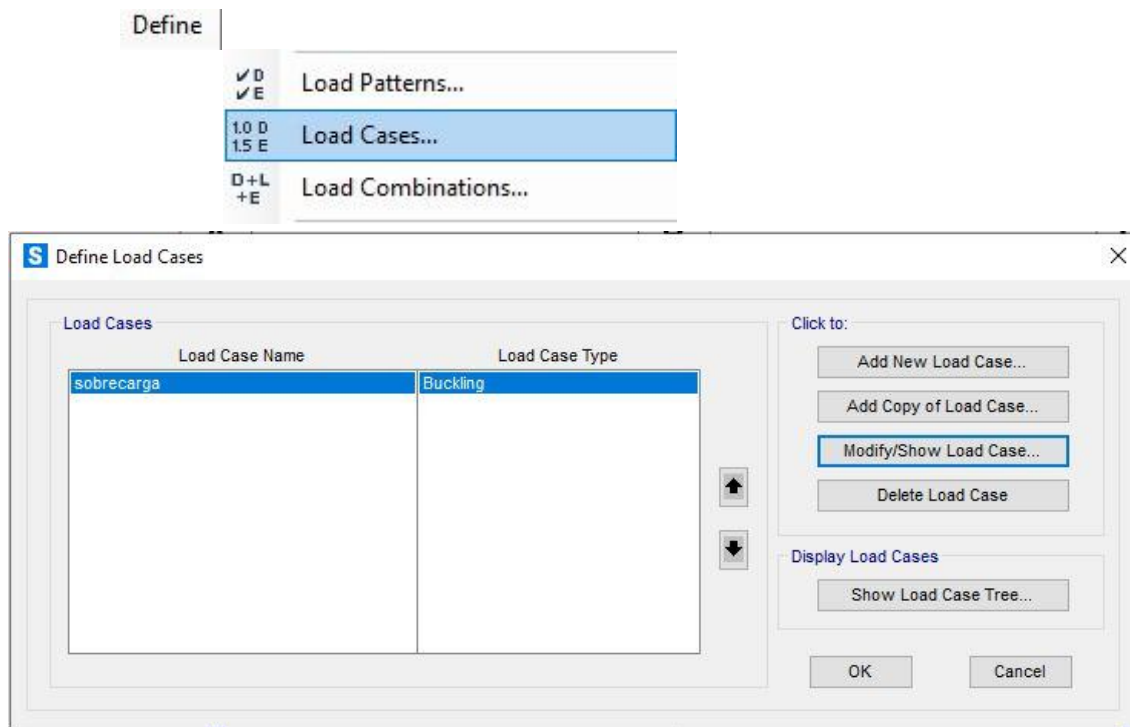


Figura 91. Casos de cargas pandeo.

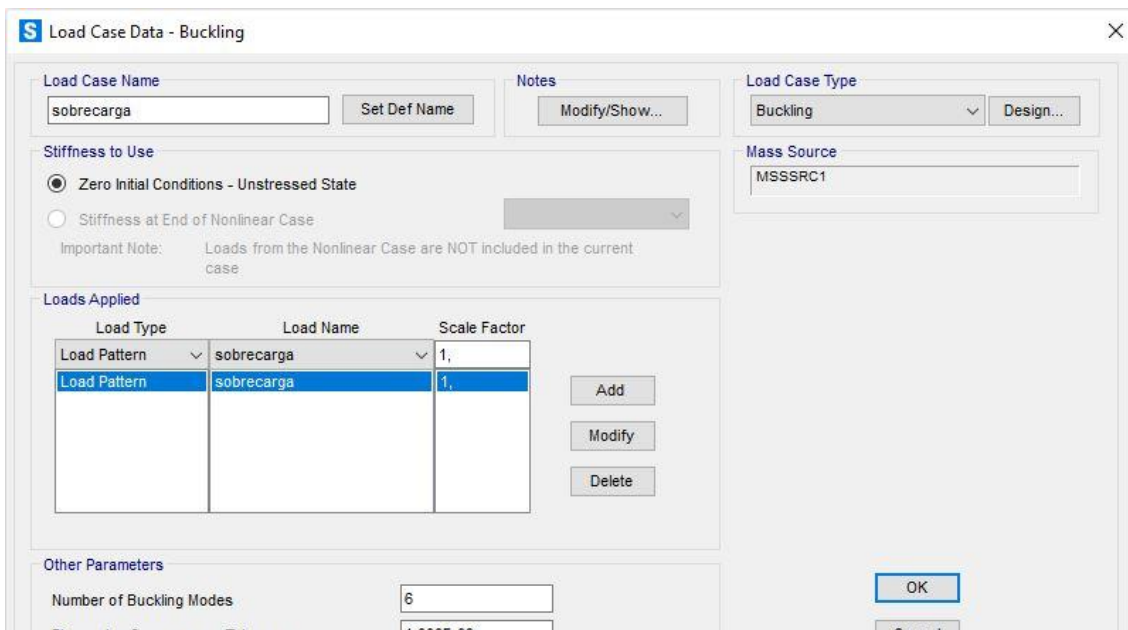


Figura 92. Configuración caso de cargas pandeo.

Ahora ya está listo para proceder al cálculo a pandeo del pórtico.

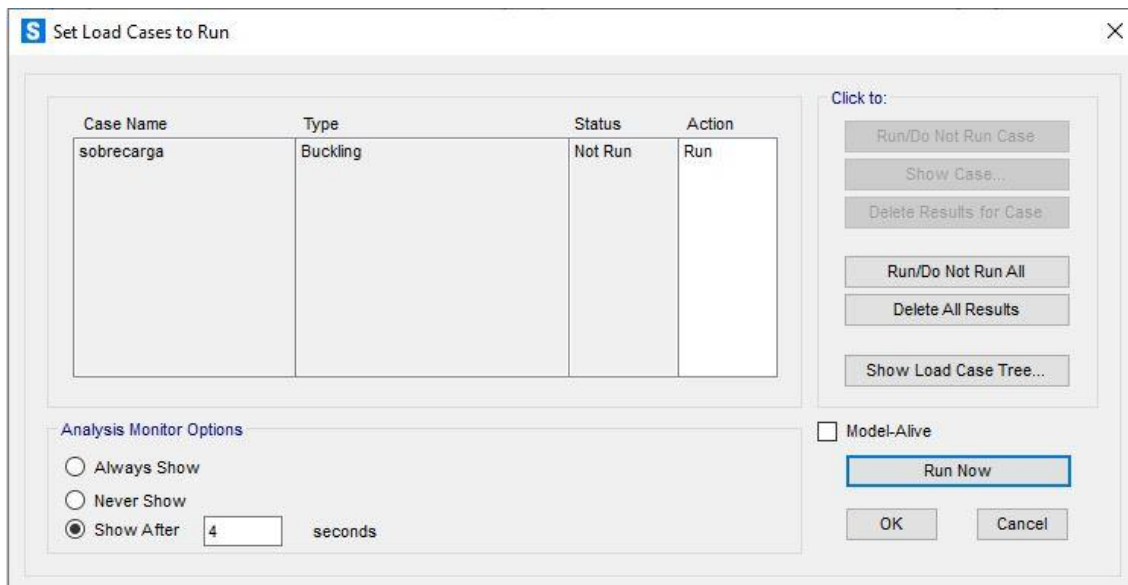


Figura 93. Cálculo a pandeo.

4.3- PÓRTICO CON CARGAS DE VIENTO, NIEVE Y PESO PROPIO.

Como tercer caso, se va a realizar un estudio de un pórtico rígido mediante los programas de cálculo CYPE y SAP2000.

4.3.1. CYPE:

Para comenzar con el cálculo, primero se va a crear un archivo nuevo en CYPE en el que, con respecto a la geometría y las cargas aplicadas nos va a dimensionar el perfil.

Se va a explicar los pasos para obtener el dimensionamiento: Para explicar el dimensionamiento y cálculo mediante CYPE del pórtico planteado para mi trabajo final de grado se usarán los siguientes comandos de Estructuras dentro de CYPE, "Generador de pórticos" y "CYPE 3D".

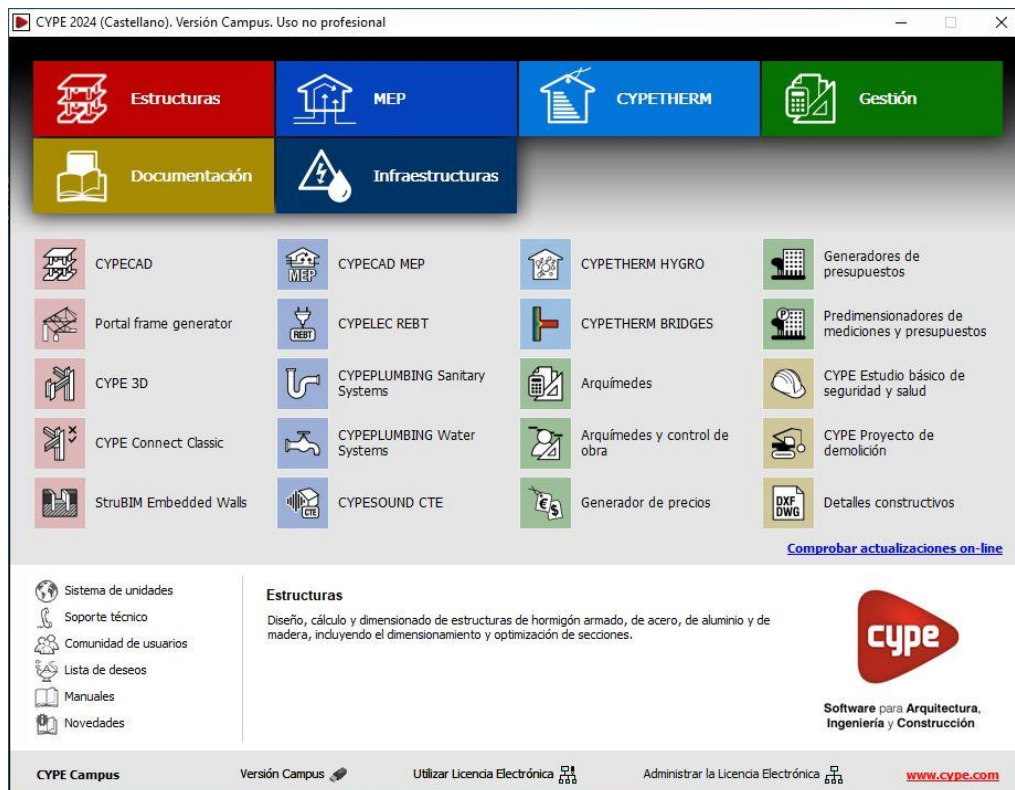


Figura 94. Pantalla inicial CYPE.

Se comienza con el “Generador de Pórticos”, en el que se define la geometría del pórtico.

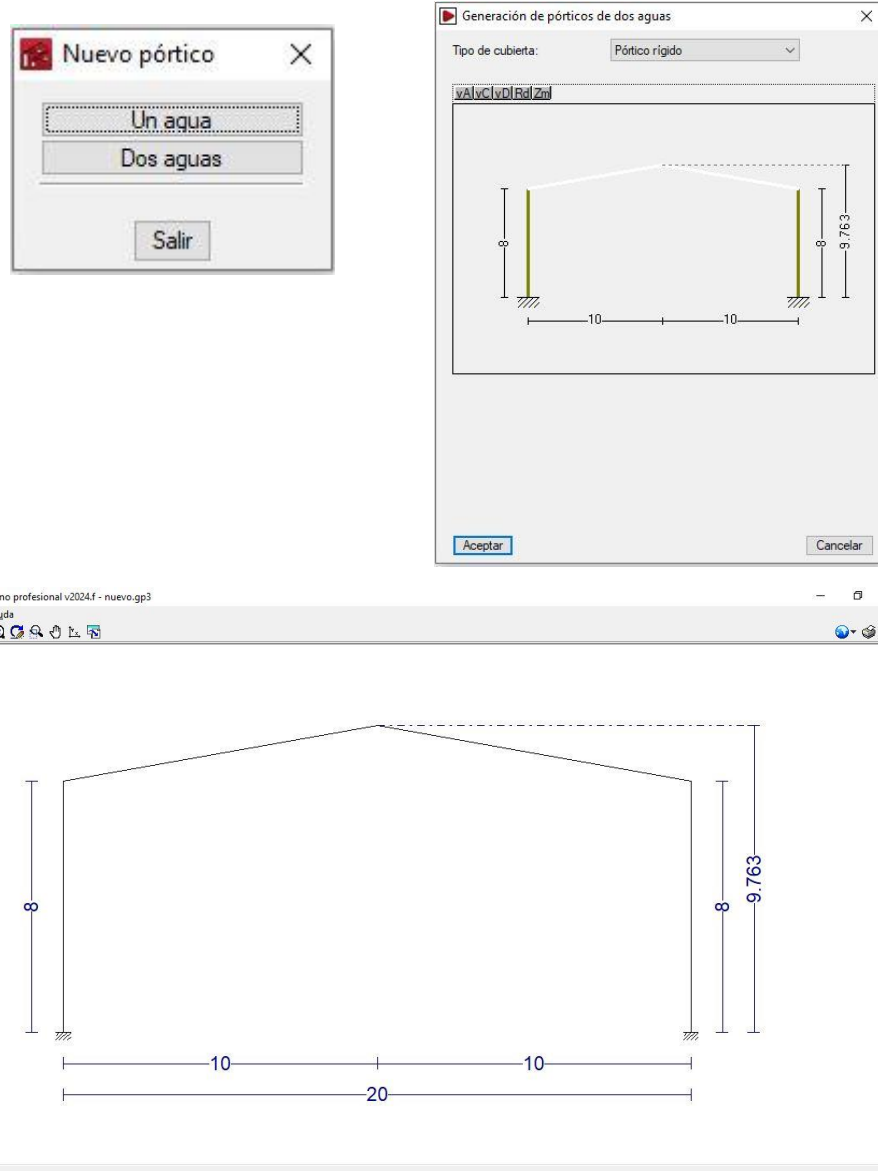


Figura 95. Diseño de pórtico rígido a dos aguas en Generador de pórticos.

Una vez definida la geometría, se procede a definir cargas de viento y nieve según la ubicación y la exposición de dichas cargas que se van a estudiar. Para añadir las cargas de viento y nieve hay que considerar que hay cerramiento tanto en la cubierta como en los laterales, con su peso cada uno, aunque en este caso se desprecian ya que en el estudio no se va a tener en cuenta el peso de los cerramientos.

Para el estudio de este pórtico se supone que se va a diseñar una nave industrial de 6 pórticos (5 vanos) y la separación entre los distintos pórticos va a ser 5 metros.

Datos generales

Número de vanos: 5

Separación entre pórticos: 5.00 m

Con cerramiento en cubierta

Peso del cerramiento: 0.00 kN/m²

Sobrecarga del cerramiento: 0.00 kN/m²

Con cerramiento en laterales

Peso del cerramiento: 0.00 kN/m²

Con sobrecarga de viento

Con sobrecarga de nieve

Combinaciones de cargas para cálculo de correas

Estados límite

E.L.U. de rotura. Acero conformado: CTE DB SE-A

E.L.U. de rotura. Acero laminado: CTE DB SE-A

Cota de nieve: Altitud inferior o igual a 1000 m

Desplazamientos

Acciones características

Aceptar Cancelar

Figura 96. Datos generales Generador de pórticos.

Para la carga del viento hay que elegir el país donde se está diseñando y la normativa que va a seguir, posteriormente la zona que en este caso al ser Valladolid corresponde a la zona A y el grado de aspereza que se va a tener, que en este caso va a ser única y va a ser de categoría 4 (zona urbana, industrial o forestal)

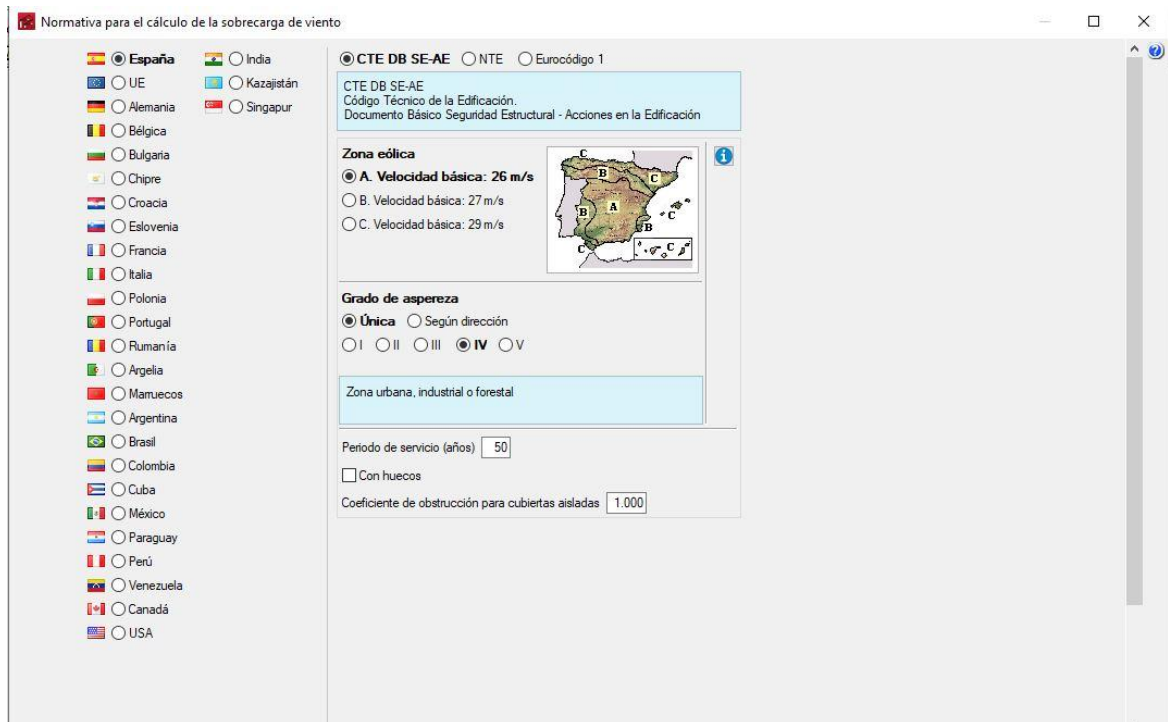


Figura 97. Configuración general carga viento en Generador de pórticos.

Para la carga de nieve hay que elegir el lugar de emplazamiento (zona y altitud, que se asignan al elegir la provincia y término municipal donde se va a ejecutar) y la exposición al viento que en nuestro caso va a ser normal.

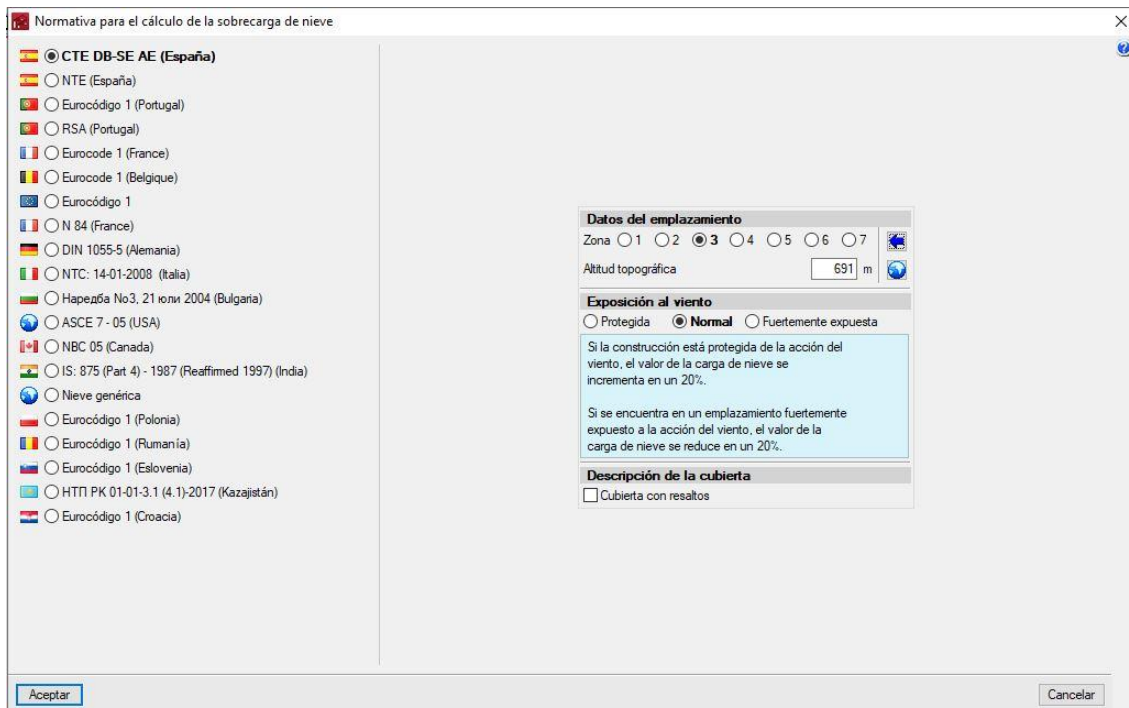


Figura 98. Configuración general carga nieve en Generador de pórticos.

Se realiza la exportación a CYPE 3D.

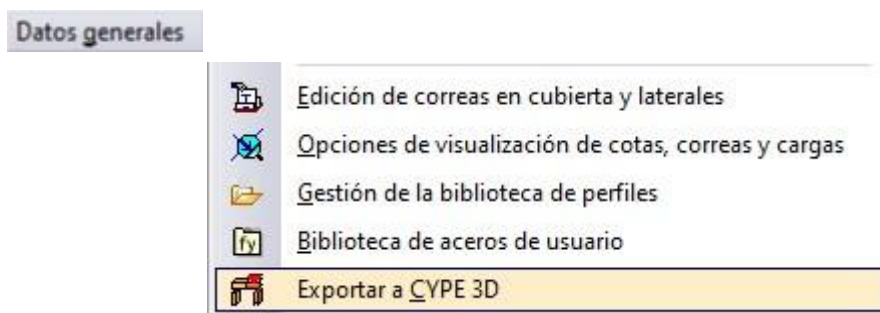


Figura 99. Exportación a CYPE 3D.

En este proceso hay que elegir la configuración de exportación.

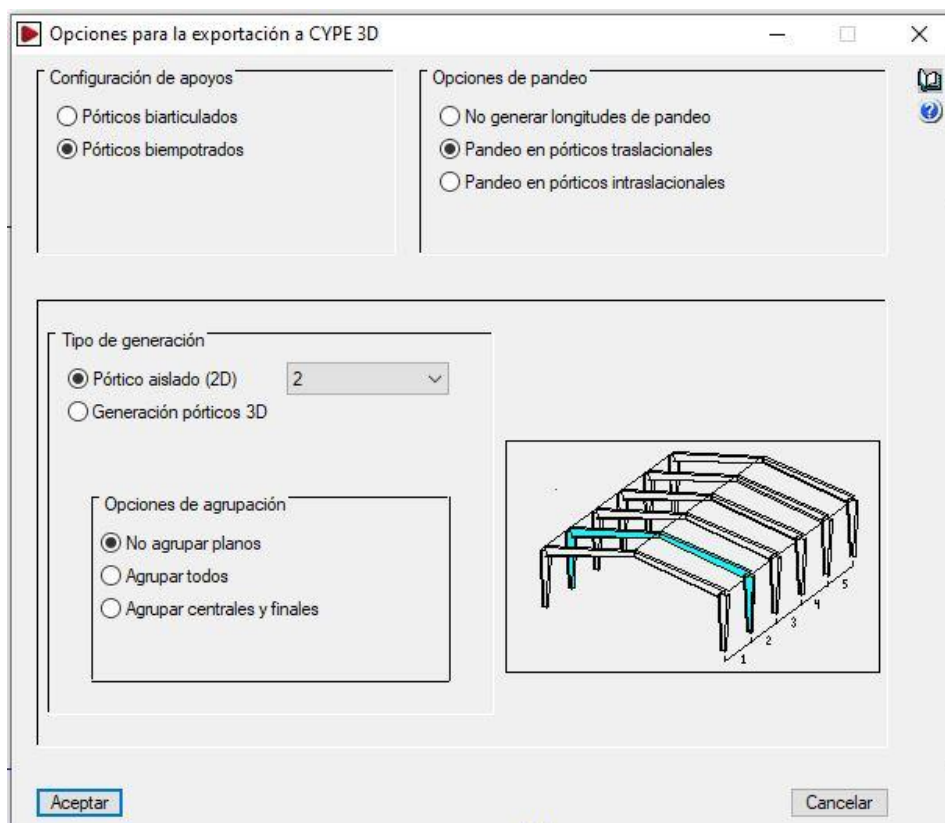


Figura 100. Configuración de exportación a CYPE 3D.

El programa da dos opciones, la primera es realizar un estudio de los distintos pórticos que forman la nave (3D) y la segunda es estudiar únicamente un pórtico(2D). En este caso se va a optar por estudiar únicamente un pórtico(2D).

Al tratarse de un pórtico aislado(2D) el que se va a estudiar, nos informa que las cargas son uniformes.

Cuando se ha realizado la exportación a CYPE 3D hay que configurar el tipo de materiales que se van a utilizar en los perfiles (en este caso es un perfil IPE 300, en acero laminado, elegimos acero S275).

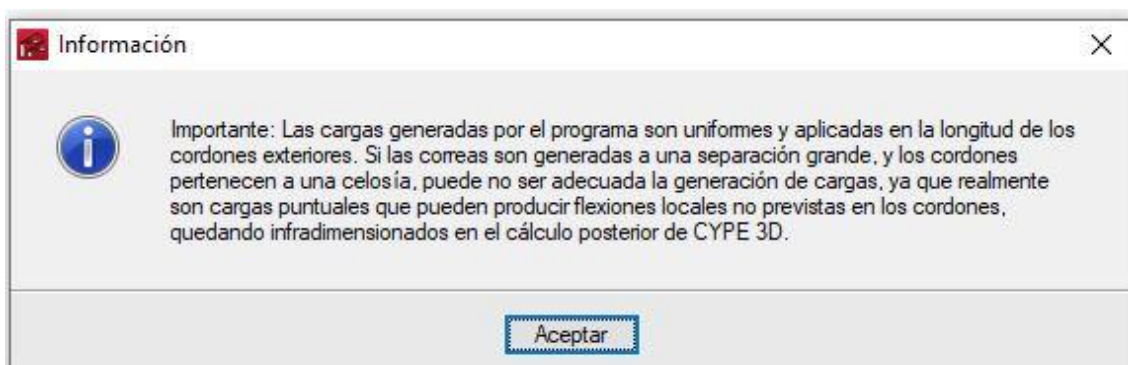


Figura 101. Dato informativo sobre la exportación de cargas.

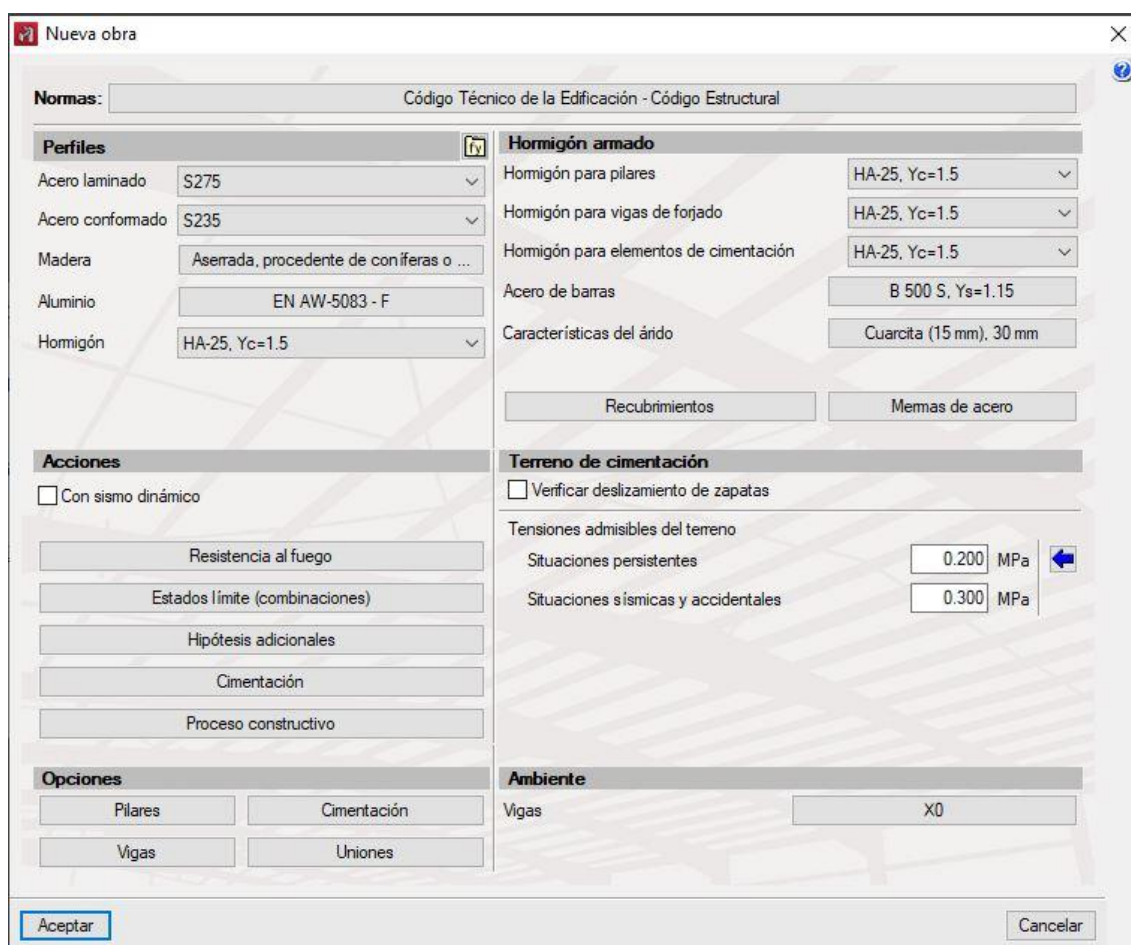


Figura 102. Configuración general CYPE.

Una vez realizada la exportación a CYPE 3D, se van a configurar los distintos ajustes:

- La normativa a cumplir va a ser el Código Técnico de la Edificación.
- El perfil elegido para diseñar va a ser un perfil laminado tipo IPE.
- El tipo de acero elegido por sus propiedades y resistencia va a ser un acero dúctil S275.

En cuanto a las acciones aplicadas:

-La resistencia al fuego, no se va a considerar a la hora de dimensionar y calcular.

-En hipótesis adicionales hay que indicar la categoría de uso, que para los tres casos de estudio se considera "G2. Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento.". Las cargas a estudiar van a ser peso propio, nieve y viento. La carga de peso propio aparece automáticamente, las cargas de viento y nieve se exportan desde "Generador de pórticos", por lo tanto, no va a aparecer un 1 en hipótesis adicionales.

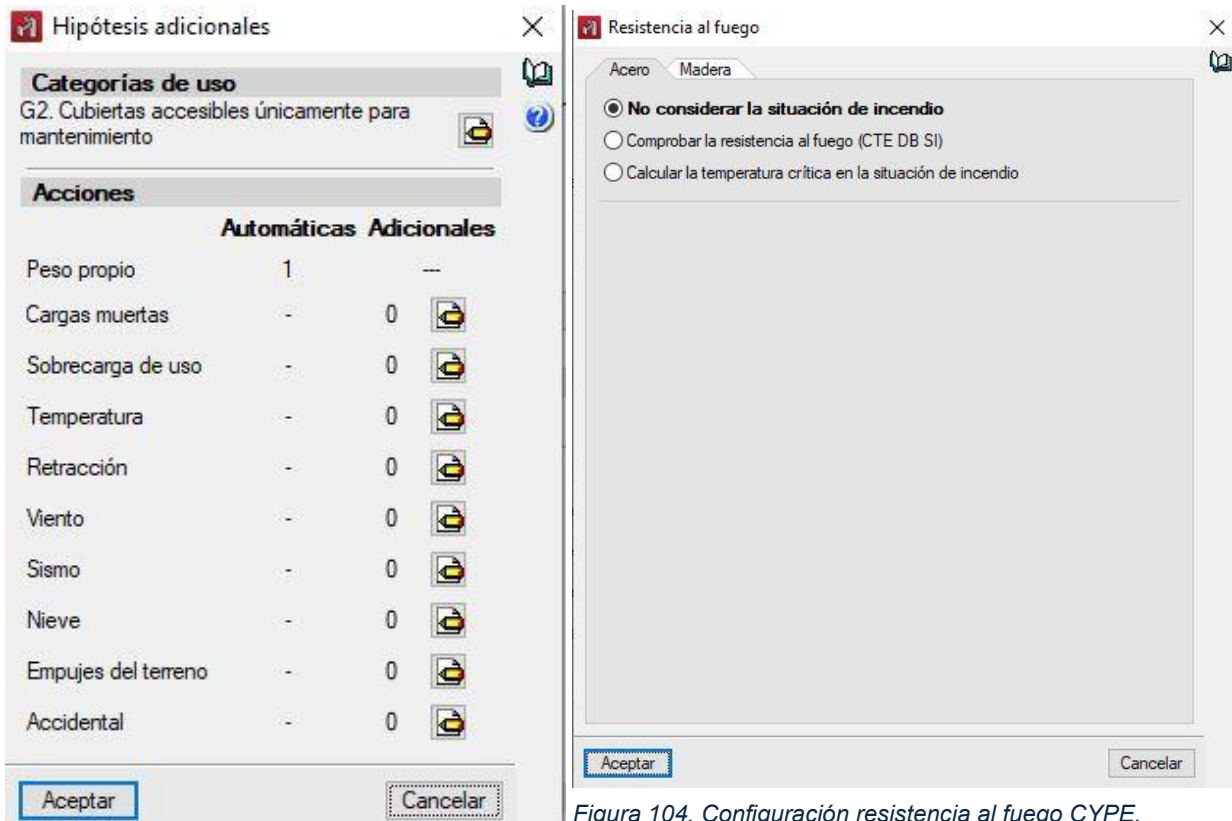


Figura 103. Configuración de cargas CYPE.

Figura 104. Configuración resistencia al fuego CYPE.

Una vez configurado el archivo se puede observar el pórtico en el espacio de trabajo tridimensional.

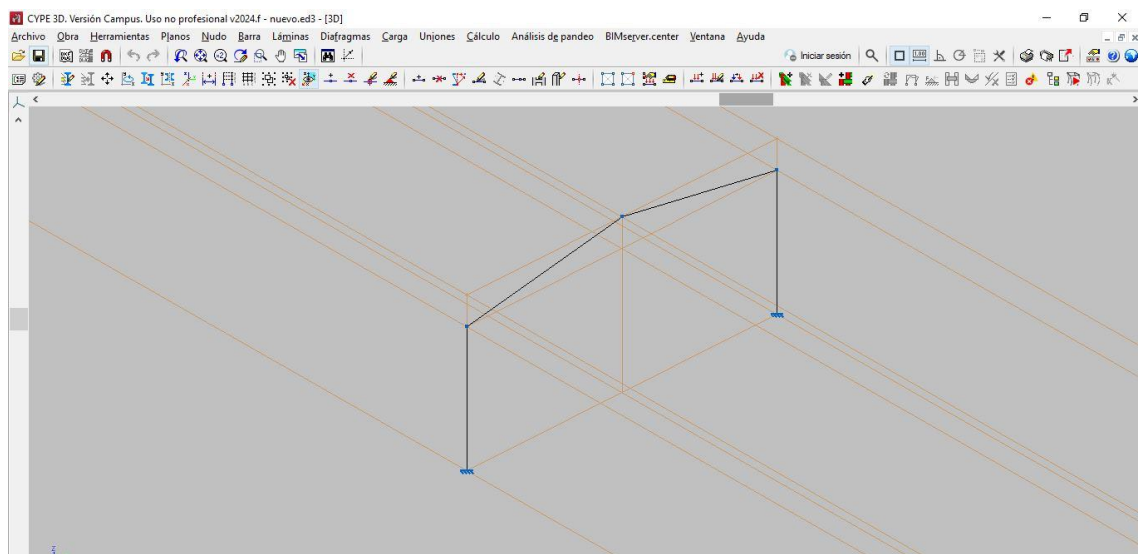


Figura 105. Espacio de trabajo.

Visto en el plano XZ:

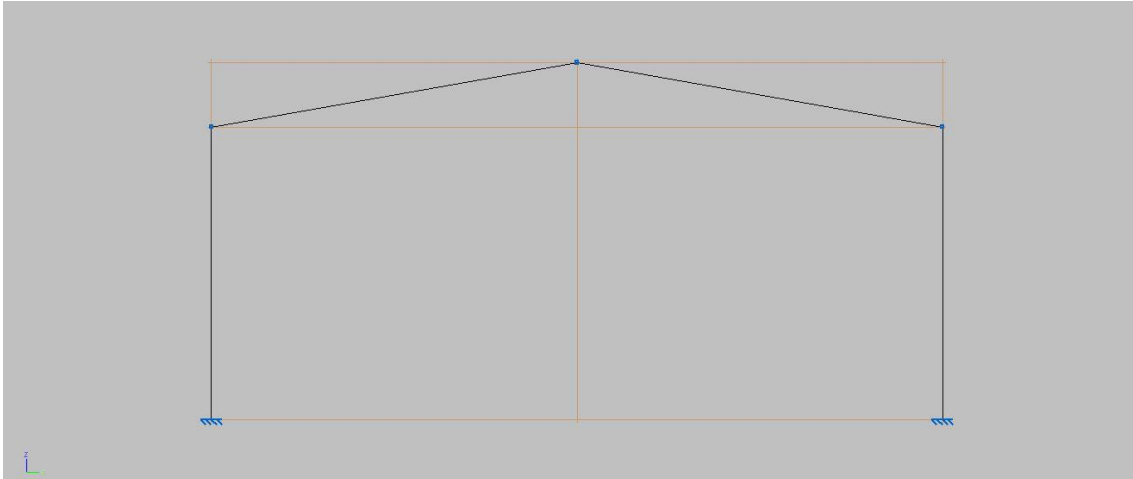


Figura 106. Pórtico visto en el plano XZ.

Ahora se van a describir los perfiles del pórtico, es decir indicar el tipo y tamaño del perfil. Inicialmente se elige un IPE300 tanto en pilares como en vigas y una vez se dimensiona se verá si es capaz de soportar las cargas aplicadas o si cambia de tamaño dentro de la serie de perfiles IPE.

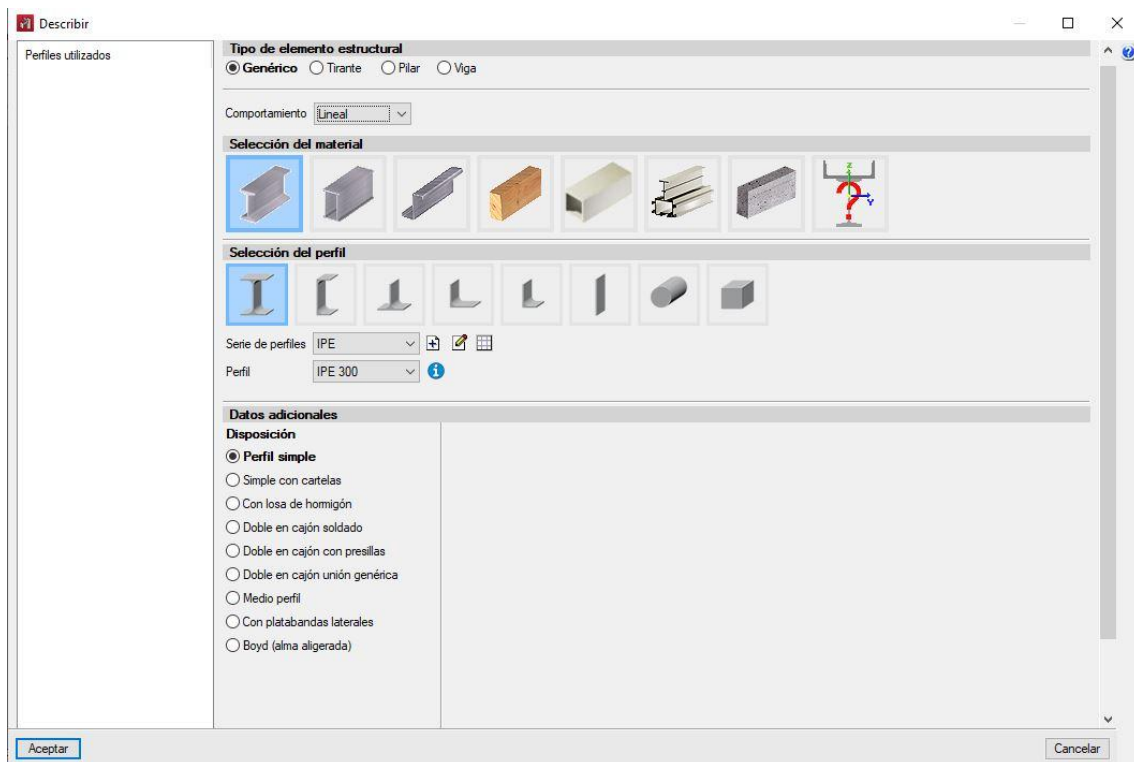


Figura 107. Elección del perfil.

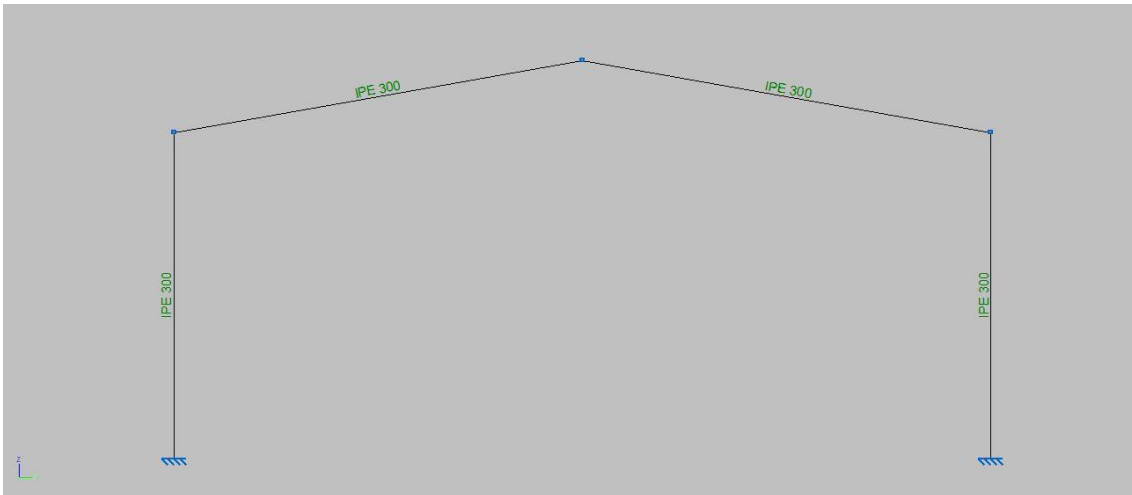


Figura 108. Pórtico con perfiles elegidos.

Hay que activar la carga de peso propio de los perfiles que forman el pórtico, en el caso de que al definir la geometría no se hubiera activado.

Una vez activada ya están todas las cargas: viento (6 hipótesis), nieve (3 hipótesis) y el peso propio (1 hipótesis). Aquí se pueden visualizar:

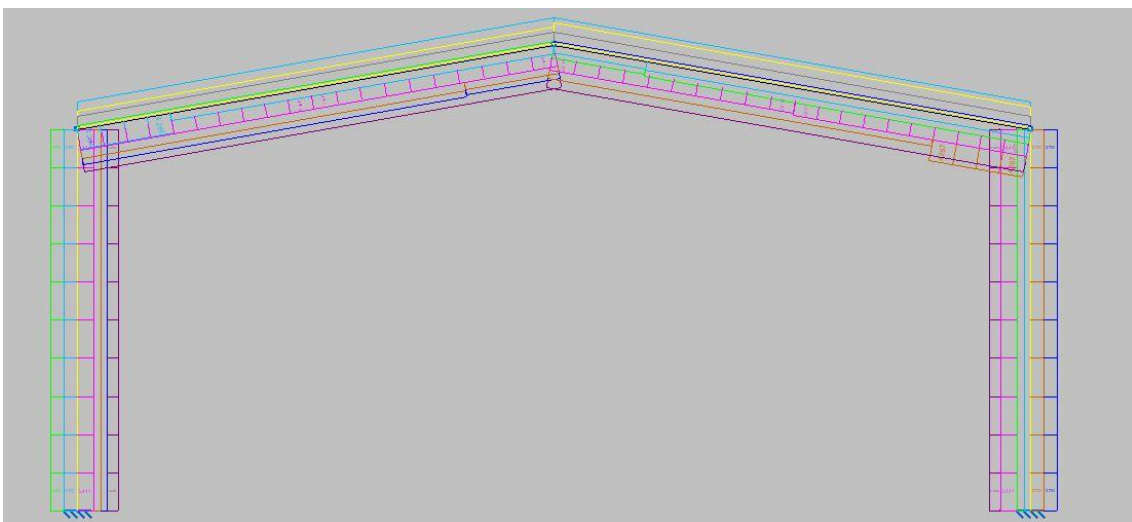


Figura 109. Cargas totales generadas al exportar desde Generador de pórticos.

Se van a mostrar una a una las distintas hipótesis de cargas:

- Peso propio.
- Viento.
- Nieve.

Peso propio (PP):

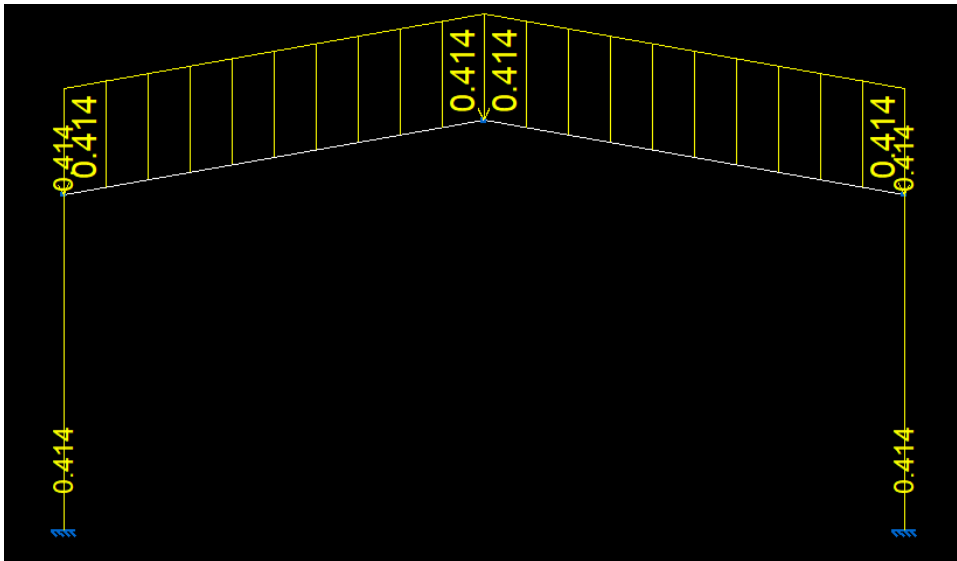


Figura 110. Carga de peso propio.

Viento:

V0° H1:

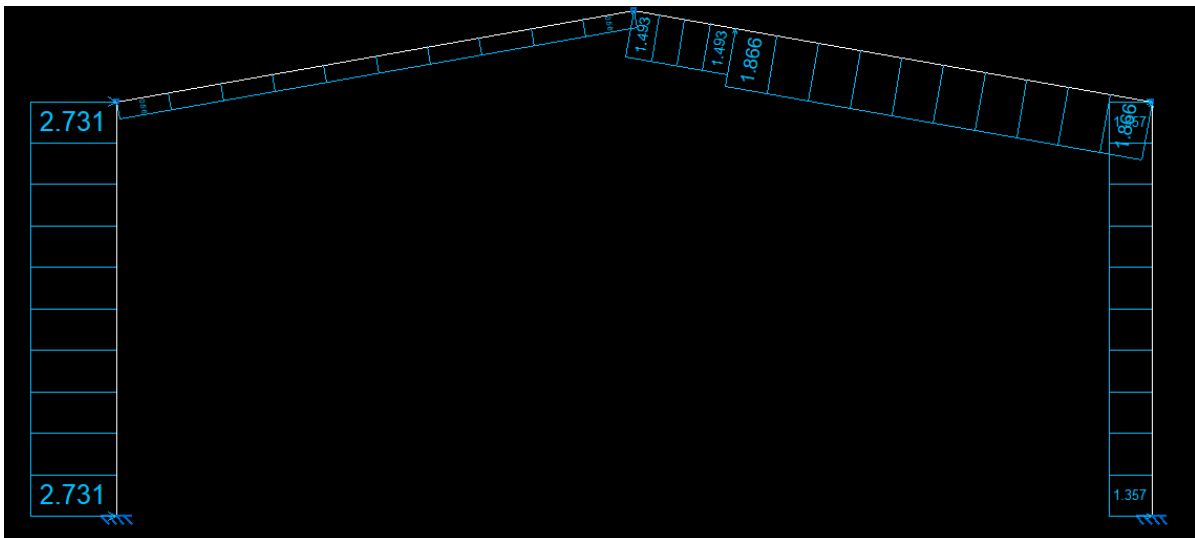


Figura 111. Hipótesis 1 de carga de viento incidente 0° .

V0° H2:

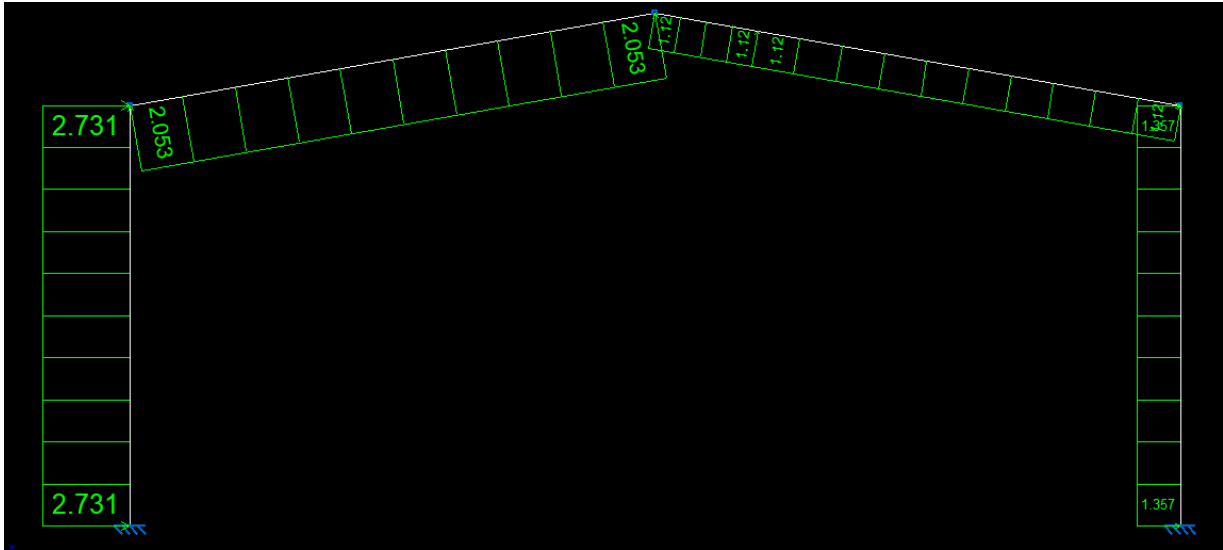


Figura 112. Hipótesis 2 de carga de viento incidente 0°.

V90° H1

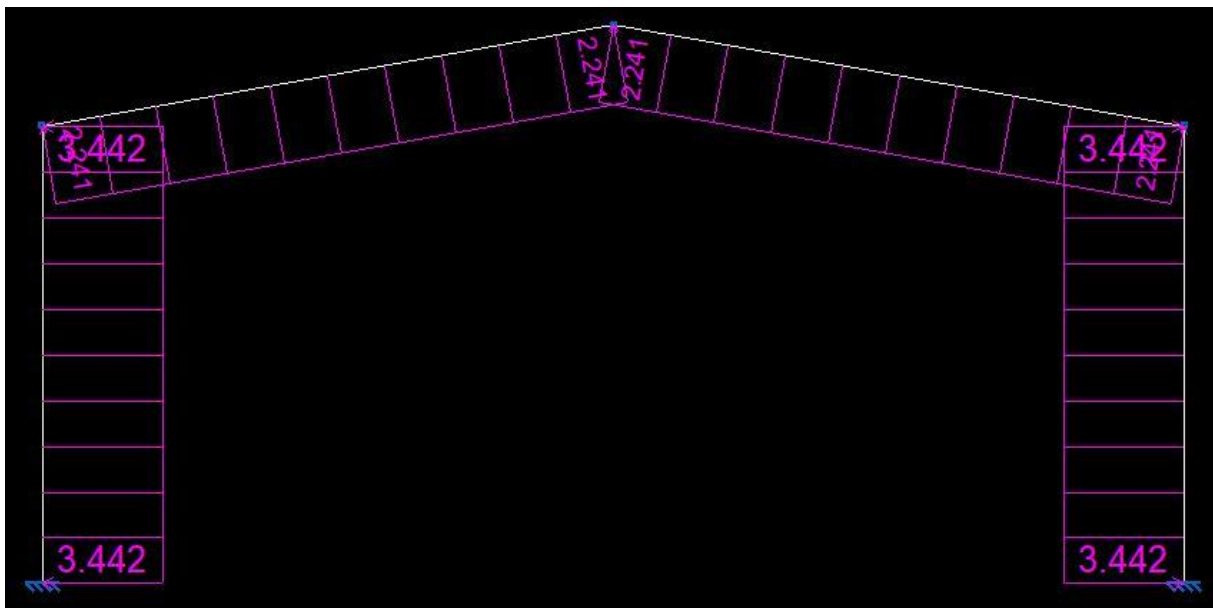


Figura 113. Hipótesis 1 de carga de viento incidente 90°.

V180° H1:

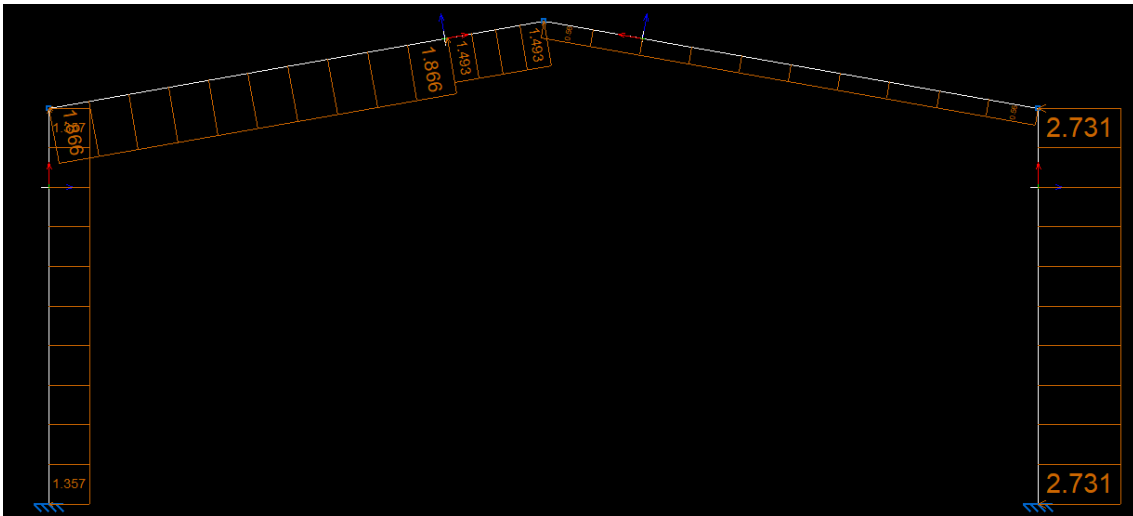


Figura 114. Hipótesis 1 de carga de viento incidente 180°.

V180° H2:

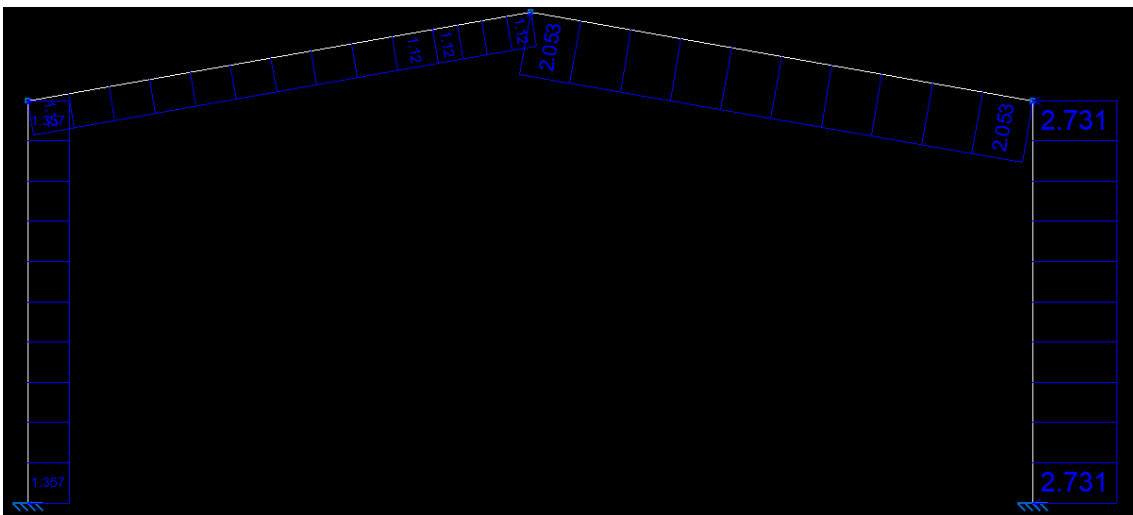


Figura 115. Hipótesis 2 de carga de viento incidente 180°.

V270° H1:

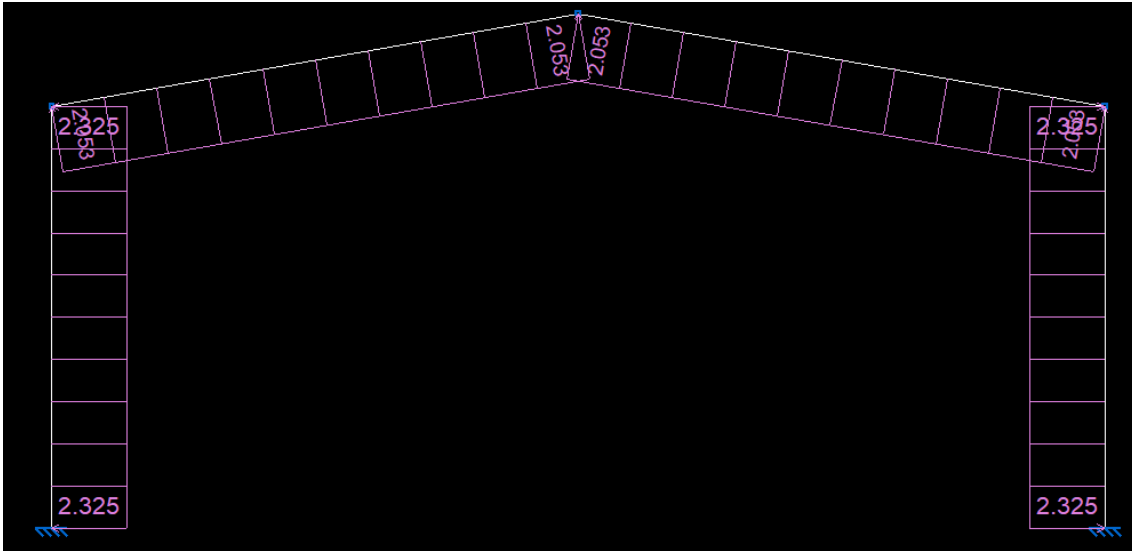


Figura 116. Hipótesis 1 de carga de viento incidente 270°.

Nieve:

N(EI):

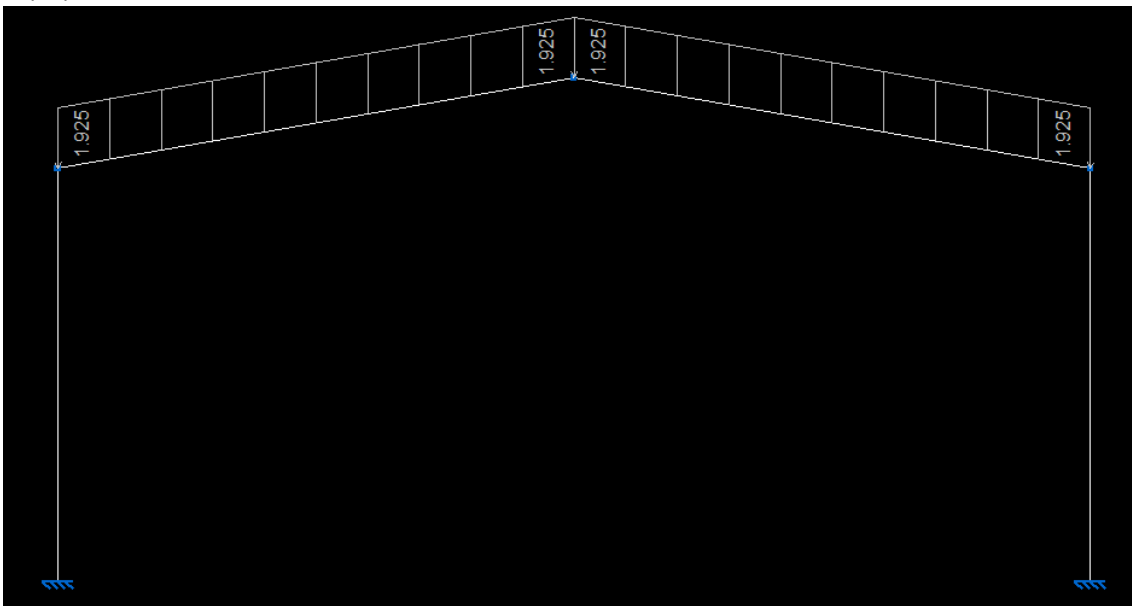


Figura 117. Hipótesis 1 de carga de nieve.

N(R)1:

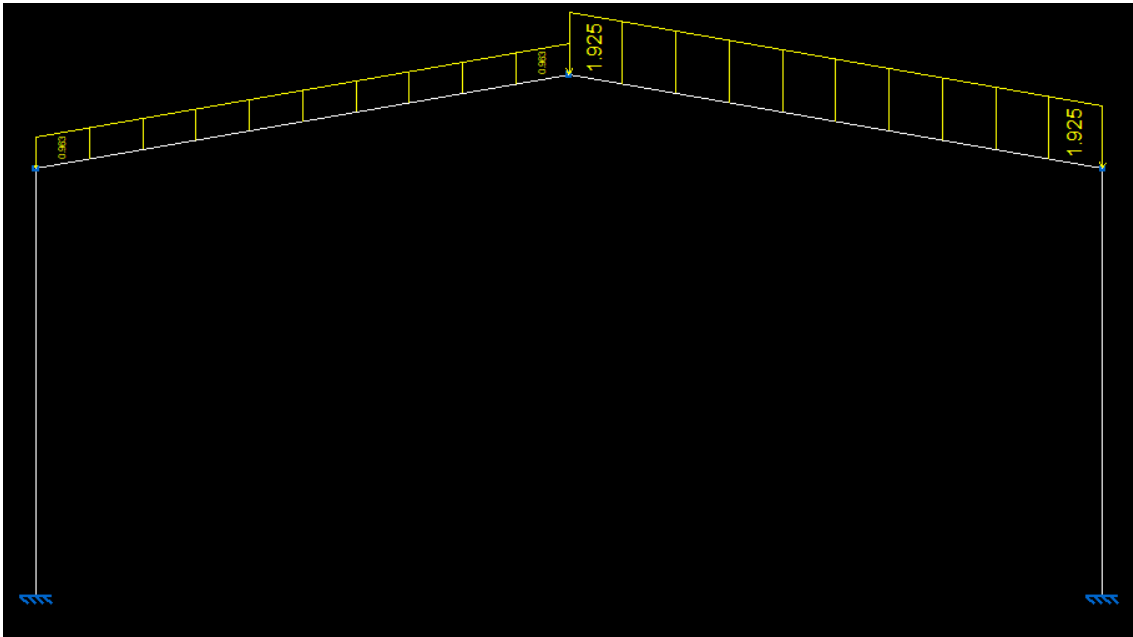


Figura 118. Hipótesis 2 de carga de nieve.

N(R)2:

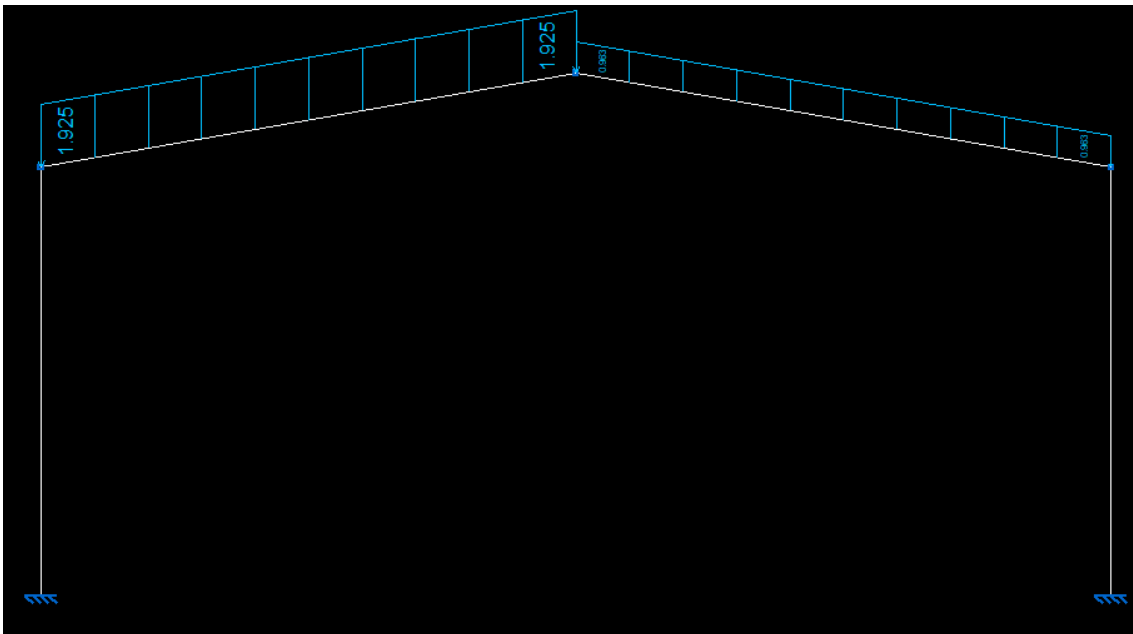


Figura 119. Hipótesis 3 de carga de nieve.

De todas estas hipótesis de cargas se va a coger la combinación de cargas más crítica (Peso propio + nieve + viento). Por lo tanto, la combinación de cargas de estudio va a ser la siguiente:

PP+V0° H1+N(EI)

PP:

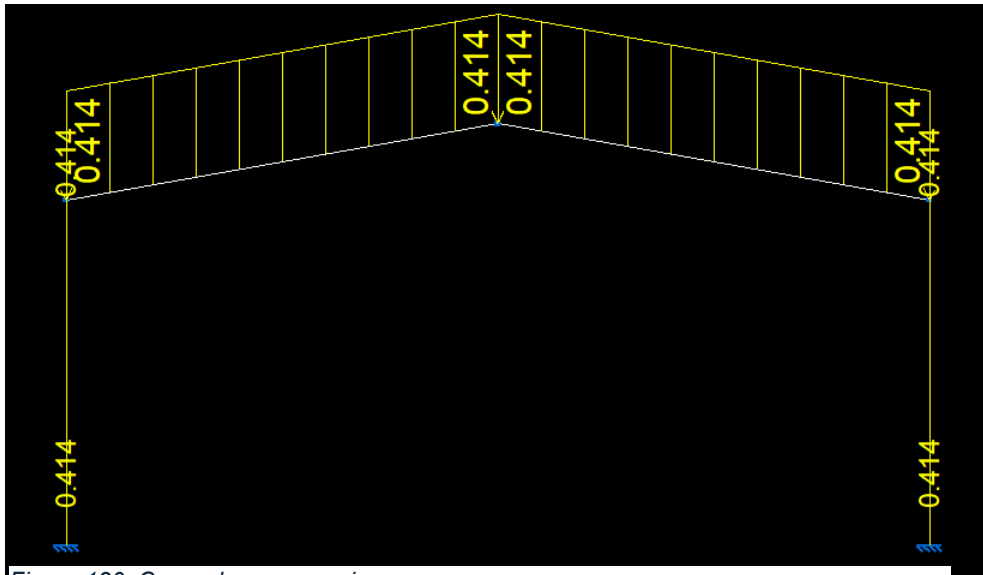


Figura 120. Carga de peso propio.

V0° H1:

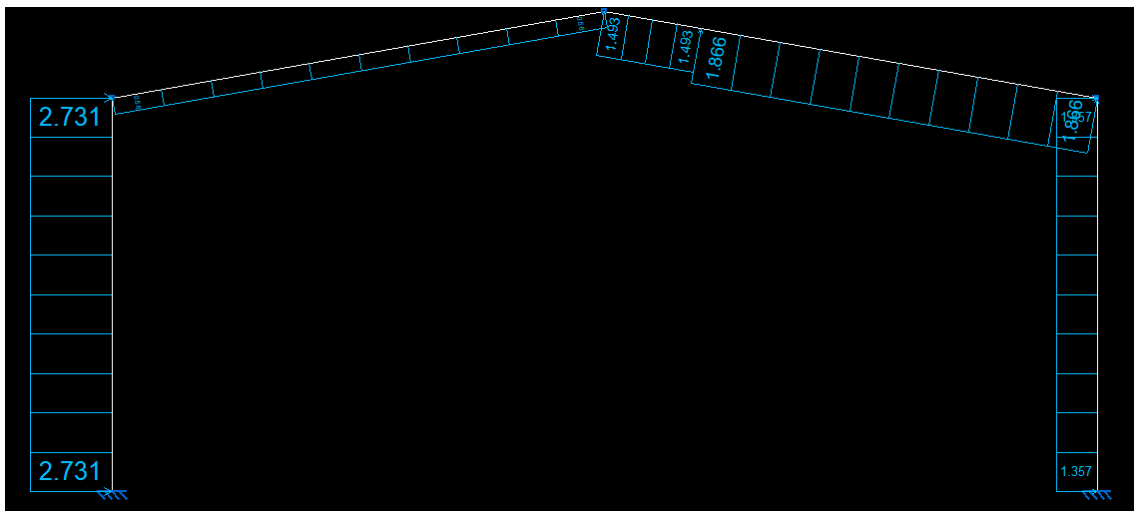


Figura 121. Hipótesis 1 de carga de viento incidente 0°.

N(EI):

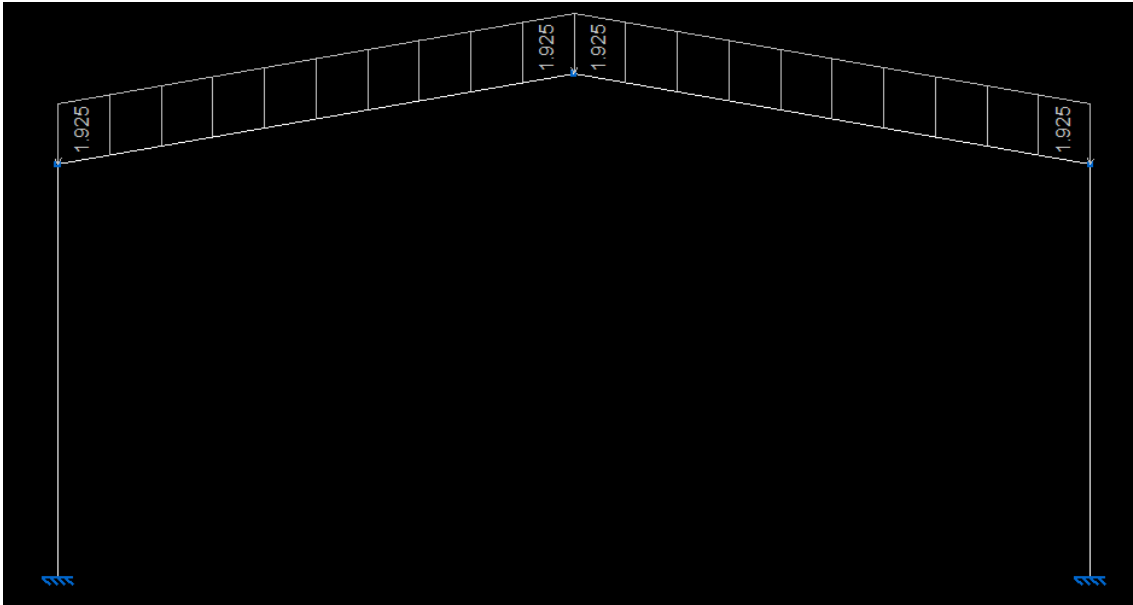


Figura 122. Hipótesis 1 de carga de nieve.

Una vez definidas las hipótesis de cargas a estudiar faltaría de configurar el pandeo lateral y el pandeo y se procedería a dimensionar y calcular.

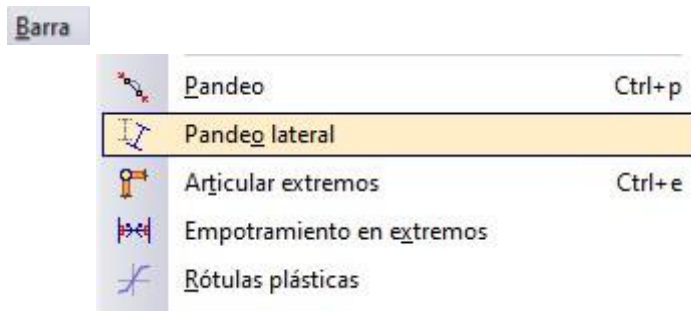


Figura 123. Configuración pandeo lateral.

El pandeo lateral se va a impedir para todas las barras, tanto en el ala superior como en el ala inferior, con un coeficiente de pandeo (β) nulo.

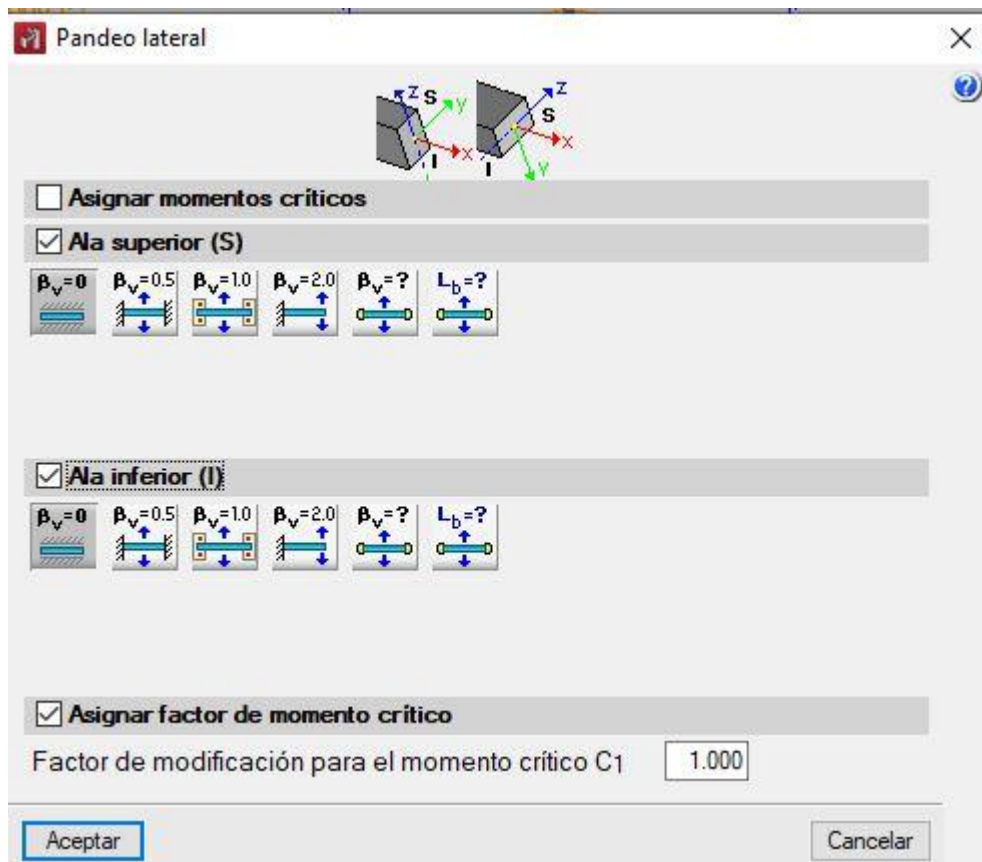


Figura 124. Pandeo lateral.

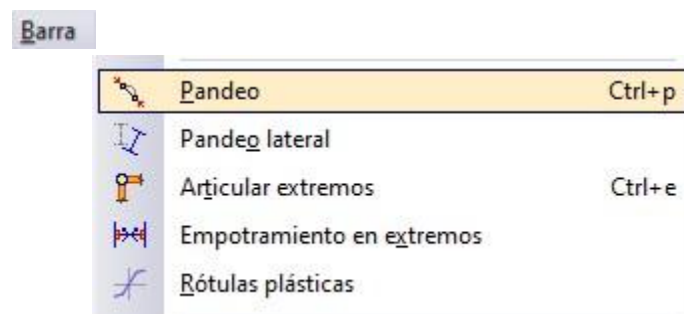


Figura 125. Configuración pandeo.

Se va a estudiar el pandeo en el plano (plano XY) y pandeo fuera del plano (plano XZ) según la referencia de la imagen. En el plano XY está impedido ($\beta=0$), en el plano XZ se va a comportar como una barra biempotrada con un coeficiente de pandeo ($\beta=0.5$).

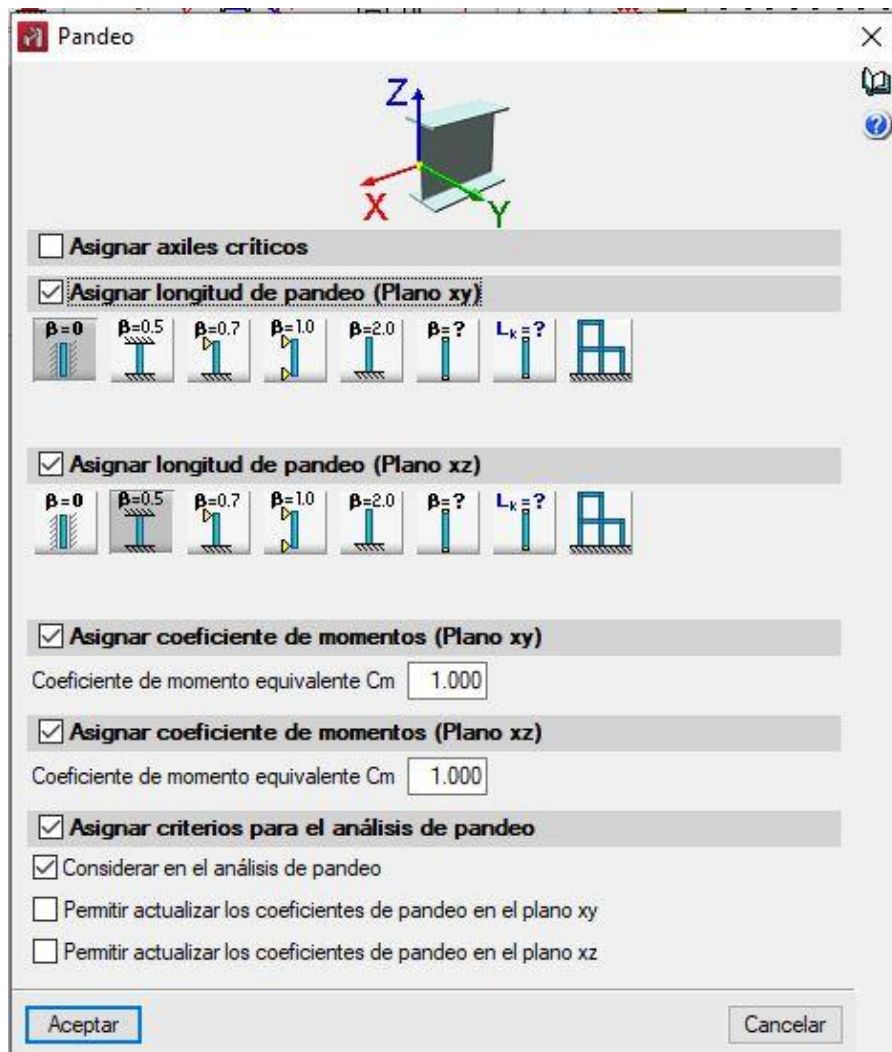


Figura 126. Pandeo.

Ahora se procede a calcular y dimensionar el pórtico.

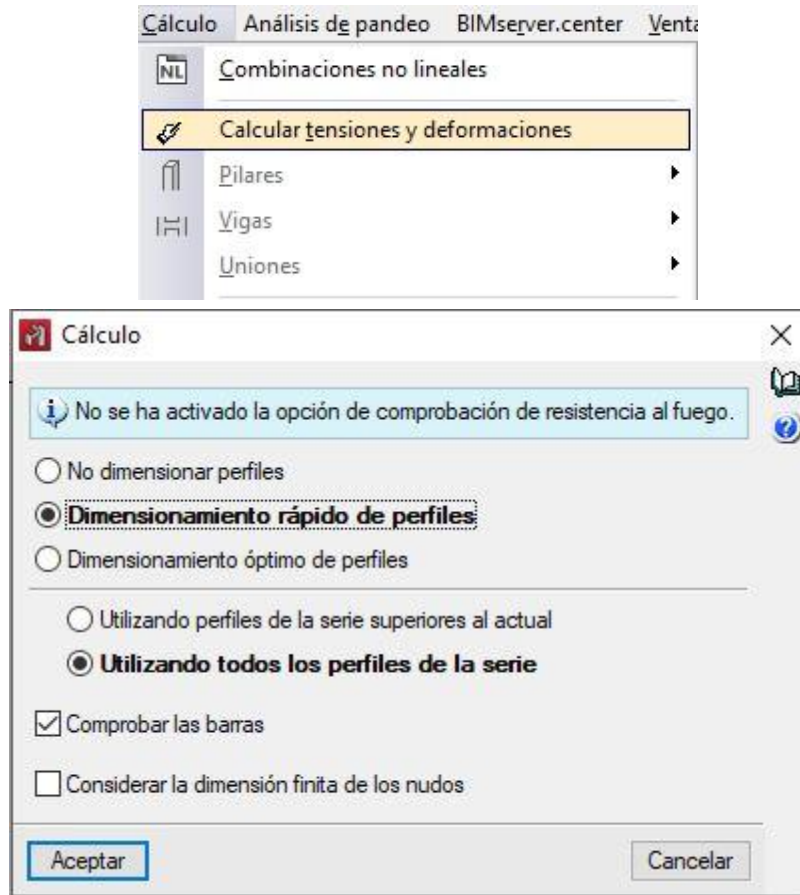


Figura 127. Cálculo de la estructura.

Aquí se puede observar el dimensionamiento obtenido:

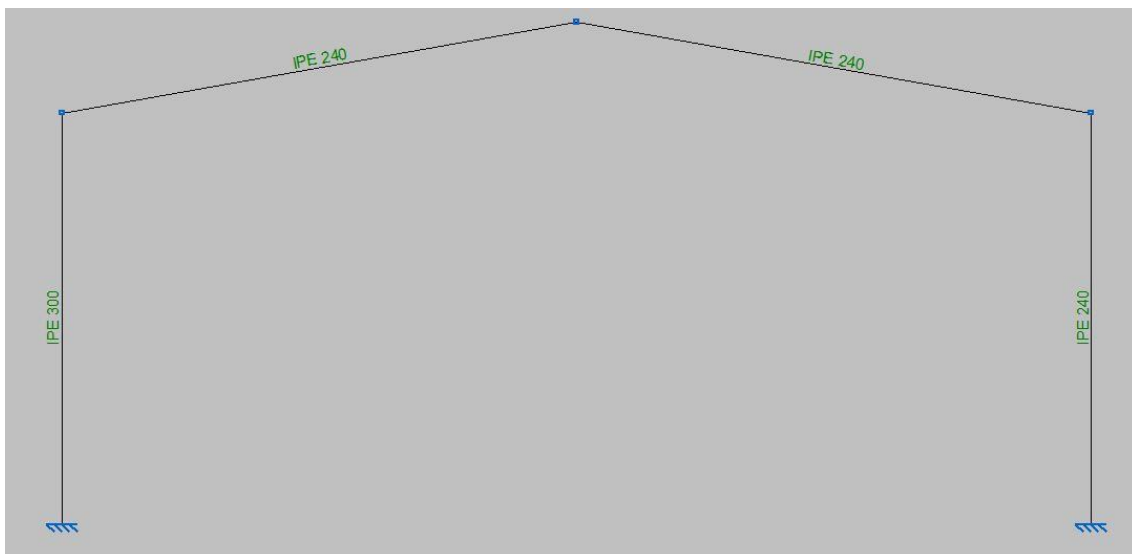


Figura 128. Dimensionamiento obtenido.

Al haber obtenido un dimensionamiento con distintos tamaños de perfil en el pórtico se va a realizar el estudio del pórtico con todas las barras con el mismo perfil (el mayor). Por lo tanto, en este caso se va a estudiar el pórtico con 4 barras de perfil IPE 300.

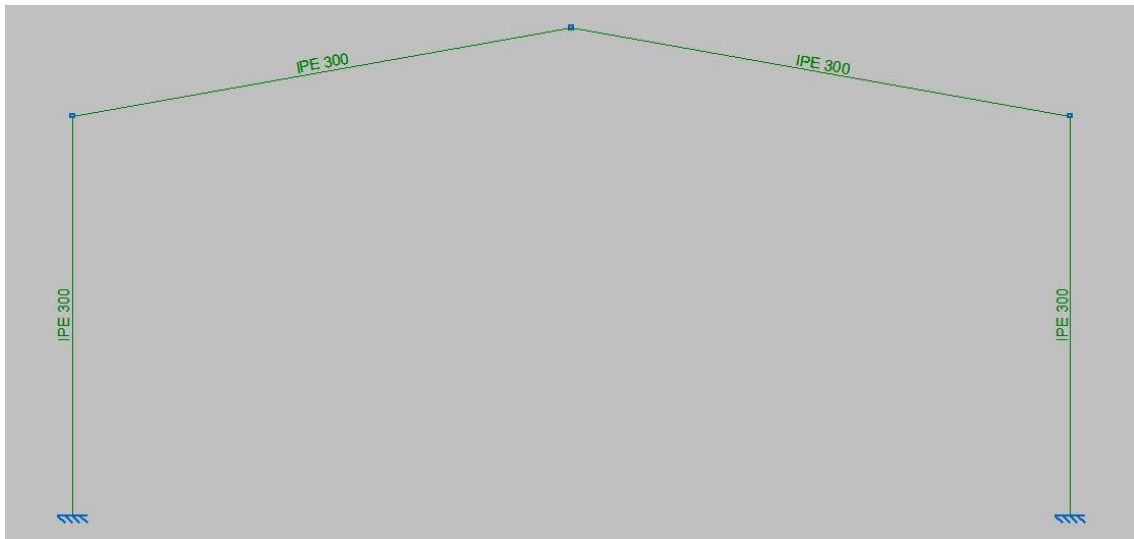


Figura 129. Dimensionamiento final.

En este tercer caso también hay barras sometidas a compresión, por lo tanto, se va a realizar un estudio a pandeo.

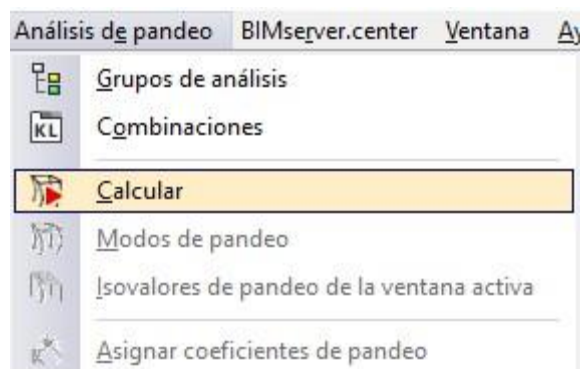


Figura 130. Cálculo a pandeo.

El número de modos a estudiar va a ser 20.

El número de tramos en los que se va a dividir la estructura va a ser 16. Cada barra se va a dividir en 4 tramos.

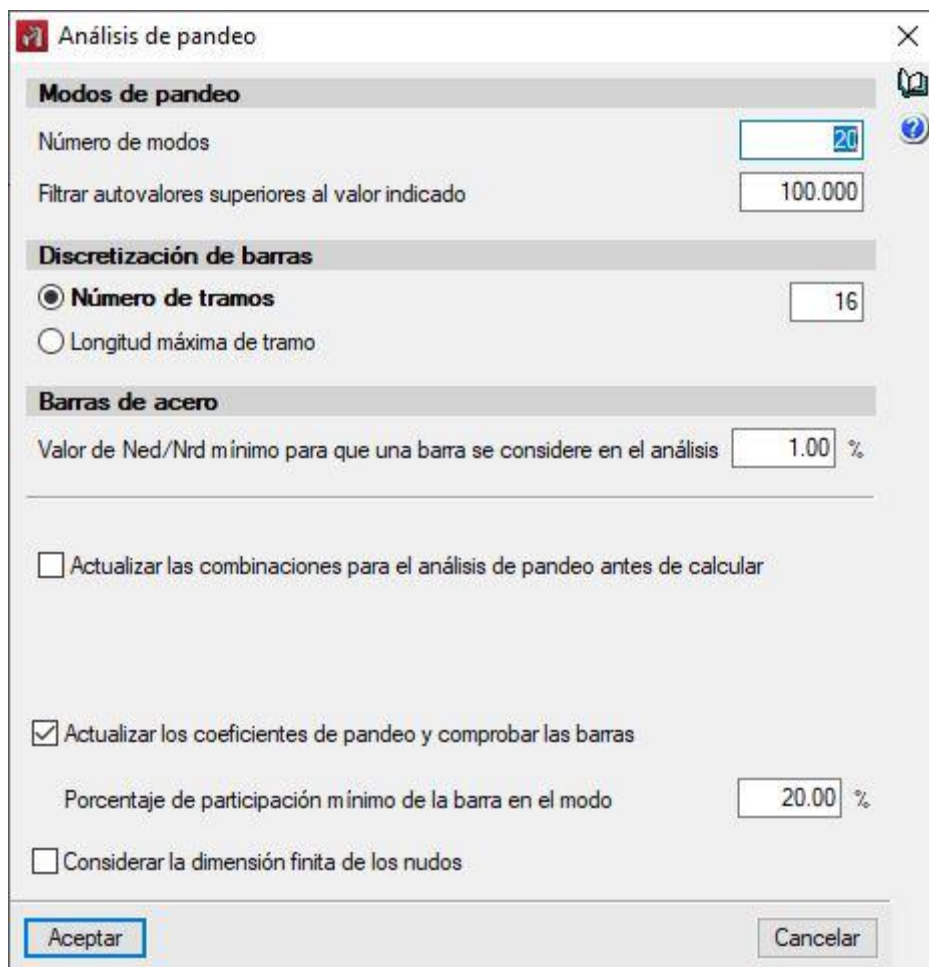


Figura 131. Configuración cálculo pandeo.

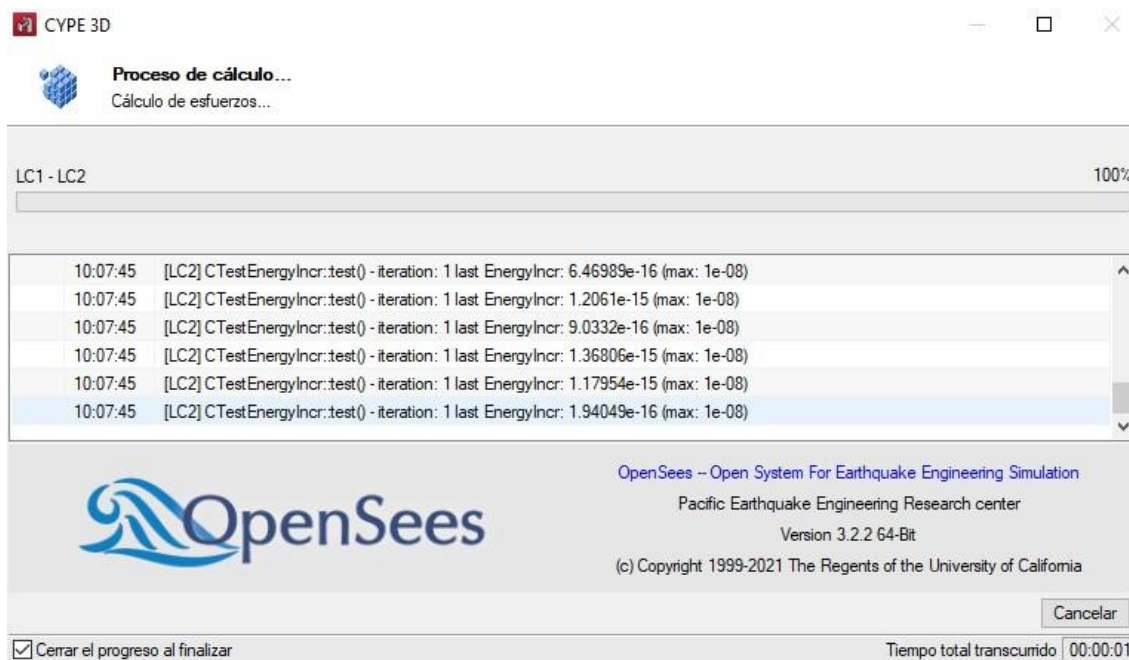


Figura 132. Proceso de cálculo a pandeo.

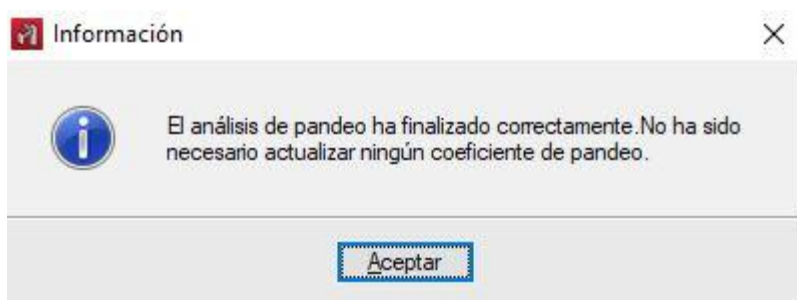


Figura 133. Cálculo a pandeo realizado correctamente.

4.3.2. SAP 2000:

Ahora se va a explicar el cálculo del pórtico en SAP 2000 con el dimensionamiento obtenido en CYPE.



Figura 134. Pantalla inicial SAP 2000.

Para comenzar a configurar el archivo hay que elegir el tipo de plantilla que se va a usar de inicio. En este caso, se usará "Grid Only", tiene una rejilla tipo cuadrícula en la que se pueden definir número de divisiones tanto verticales como horizontales en la que apoyarse a la hora de definir la geometría. También podría realizarse con los comandos "2D Frames" o "Blank".

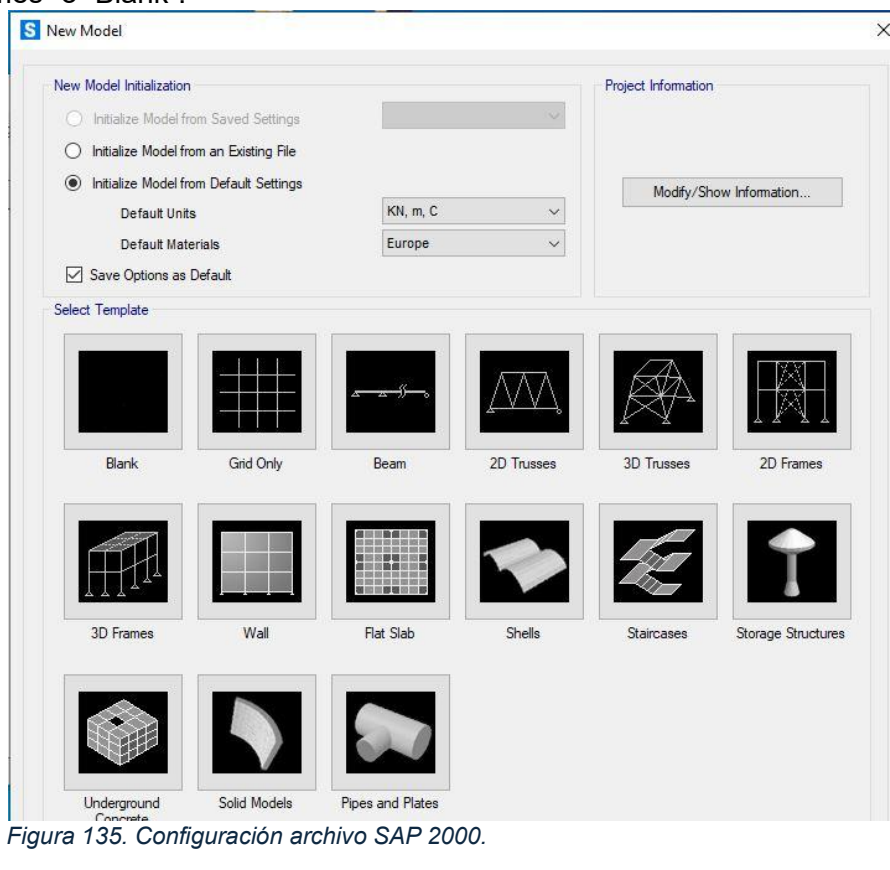


Figura 135. Configuración archivo SAP 2000.

Se va a configurar la rejilla. Consta de 3 líneas verticales distanciadas en 10 metros y 3 líneas horizontales distanciadas en 8 metros el primer tramos y 1,763 metros el segundo tramo. Esto no es posible configurarlo de primeras, por lo tanto, se diseñará en 3 líneas verticales distanciadas 10 metros y 3 líneas horizontales distanciadas 8 metros y posteriormente se modificará.

El sistema de ejes globales se sitúa en el punto intermedio horizontal del pórtico y a la altura de los empotramientos.

En SAP 2000 se trabaja en el plano XZ, ya que de esta forma se aprovecha la máxima inercia de las barras.

Section	Direction	Value
Coordinate System Name	GLOBAL	
	Number of Grid Lines	
	X direction	3
	Y direction	1
	Z direction	3
Grid Spacing	X direction	10,
	Y direction	1,
	Z direction	8,
First Grid Line Location	X direction	-10,
	Y direction	0,
	Z direction	0,

Figura 136. Configuración rejilla inicial.

Una vez diseñada la rejilla se puede ver tanto en el espacio de trabajo (plano XZ), como en 3D.

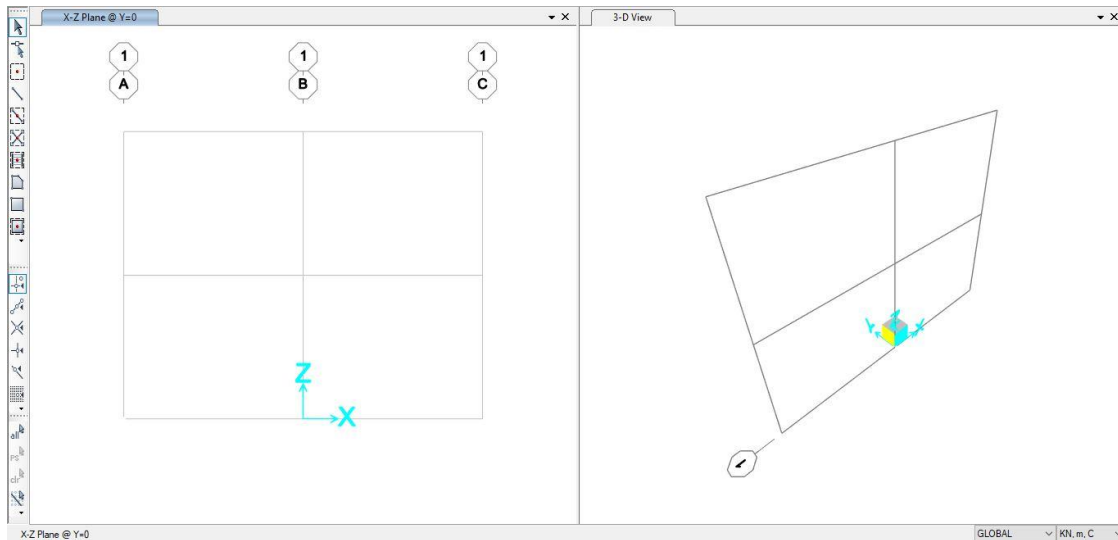


Figura 137. Espacio de trabajo inicial.

Las dimensiones de la rejilla no son las deseadas, es necesario modificarlas.

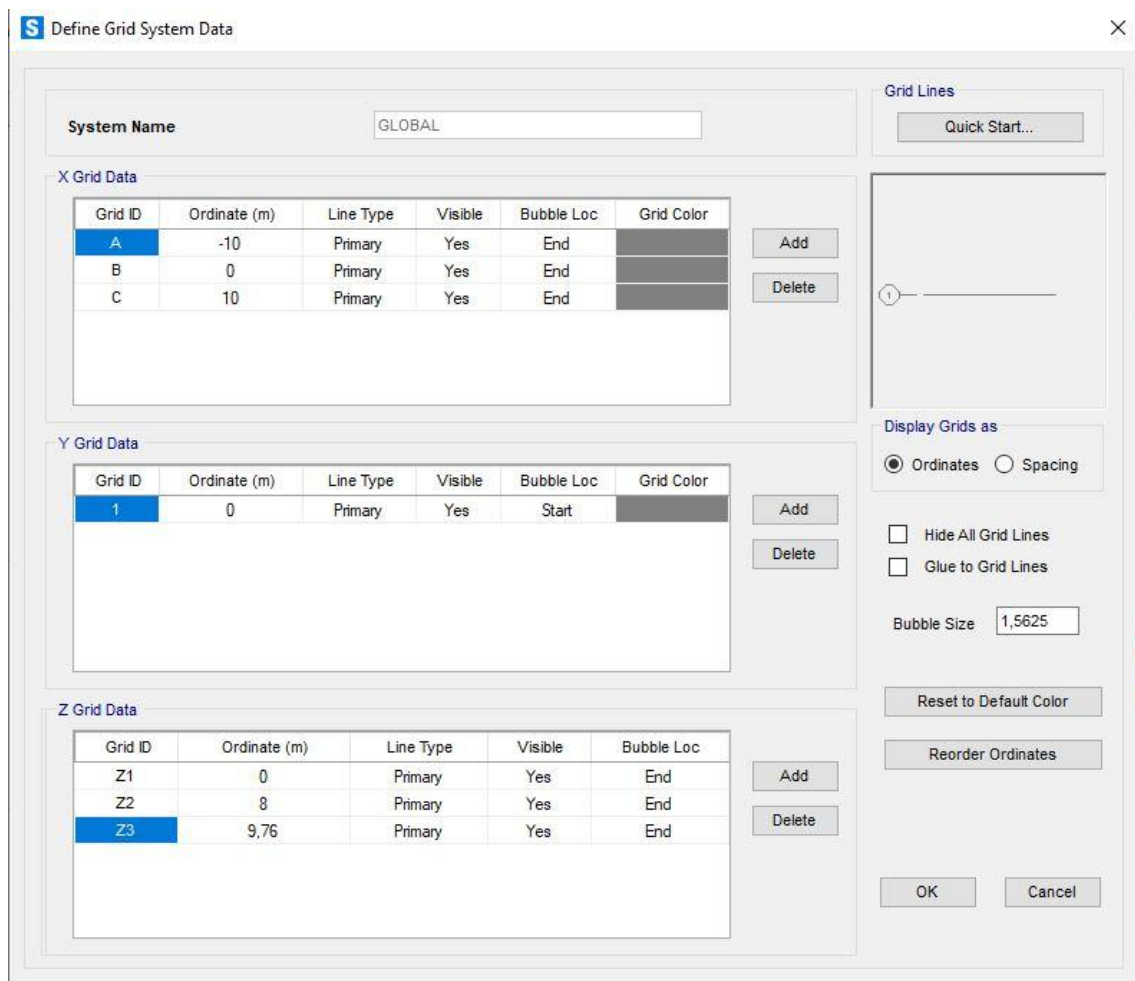


Figura 138. Configuración rejilla definitiva.

Una vez configurada la rejilla correctamente se puede ver en el espacio de trabajo (plano XZ) como en 3D, donde se seguirá diseñando el pórtico.

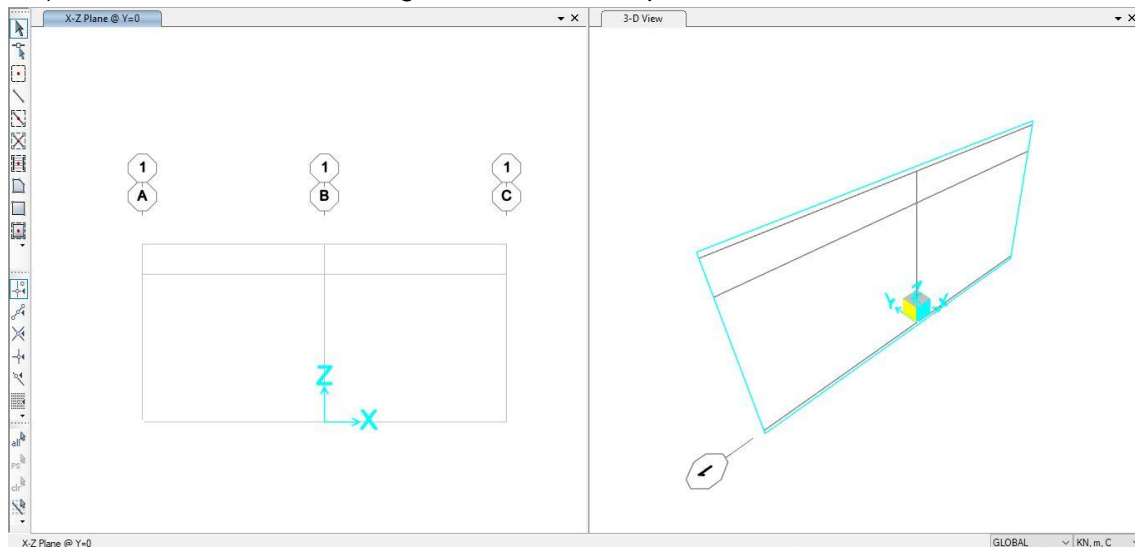


Figura 139. Espacio de trabajo definitivo.

Concluida la cuadrícula deseada se define el material para el pórtico.

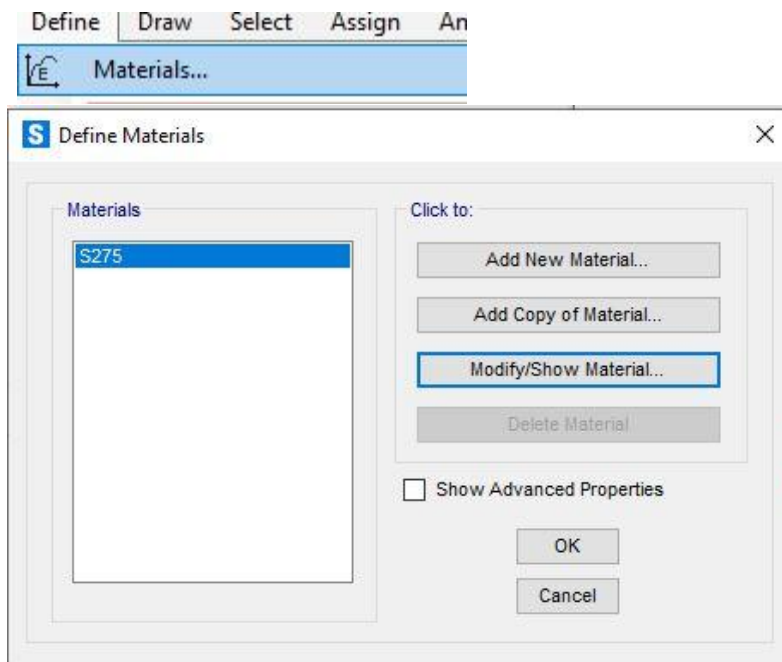


Figura 140. Definición de material.

Aquí se pueden ver las propiedades del material elegido, acero S275.

The image shows a 'Material Property Data' dialog box with the following sections and values:

- General Data**
 - Material Name and Display Color: S275
 - Material Type: Steel
 - Material Grade: S275
 - Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass**
 - Weight per Unit Volume: 76,9729
 - Mass per Unit Volume: 7,849
- Units**
 - KN, m, C
- Isotropic Property Data**
 - Modulus Of Elasticity, E: 2,100E+08
 - Poisson, U: 0,3
 - Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1,170E-05
 - Shear Modulus, G: 80769231,
- Other Properties For Steel Materials**
 - Minimum Yield Stress, Fy: 275000,
 - Minimum Tensile Stress, Fu: 430000,
 - Expected Yield Stress, Fye: 302500,
 - Expected Tensile Stress, Fue: 473000,

At the bottom, there is a checkbox for 'Switch To Advanced Property Display' (unchecked) and 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 141. Propiedades del material.

Una vez elegido el material, se procede a elegir el tipo y la serie del perfil.

Se va a definir un IPE 300, ya que es el dimensionamiento obtenido anteriormente en CYPE.

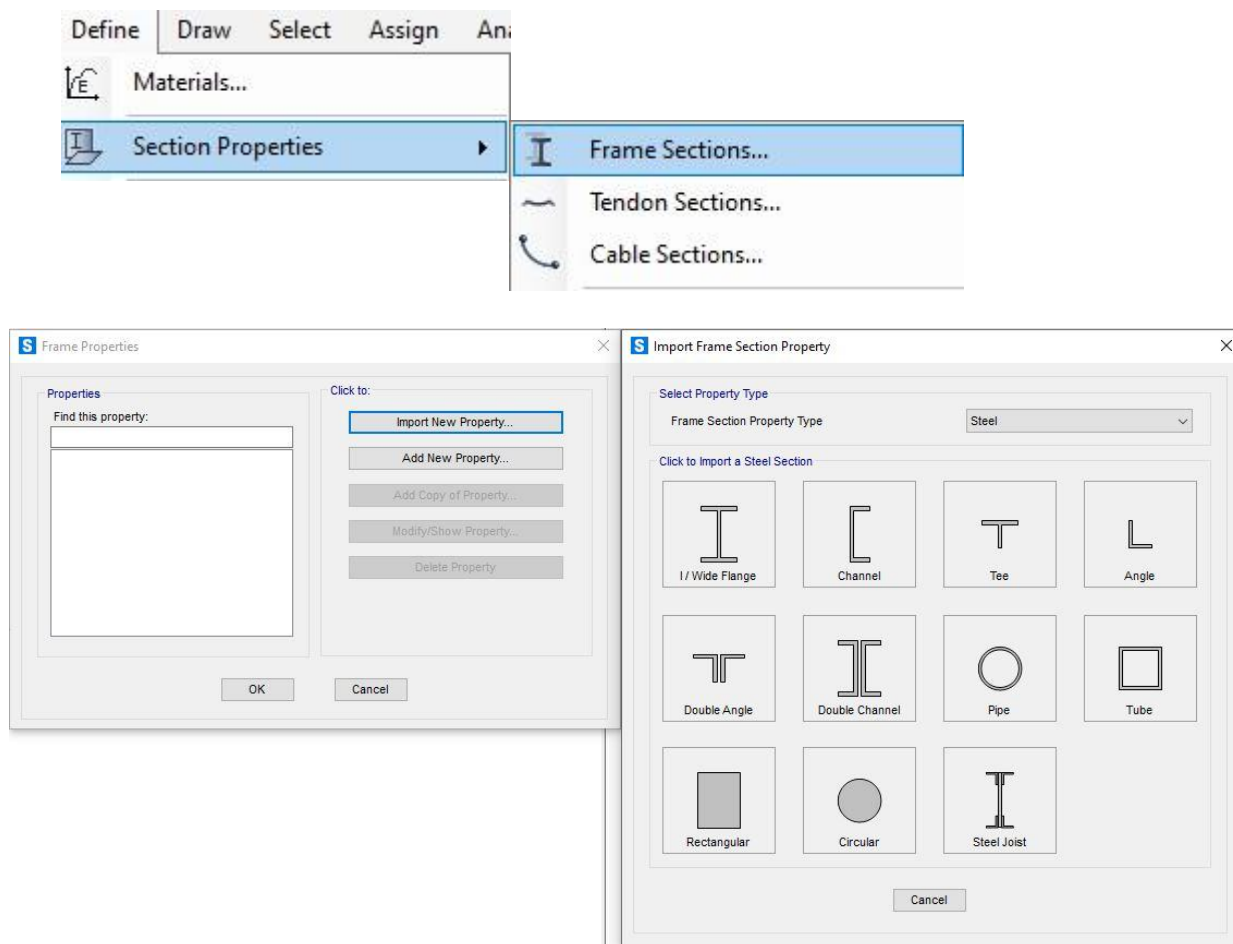


Figura 142. Definición de perfil.

Para obtener la serie de perfiles hay que elegir la biblioteca por la que se va a registrar. En este caso se importa la biblioteca europea "Euro.pro".

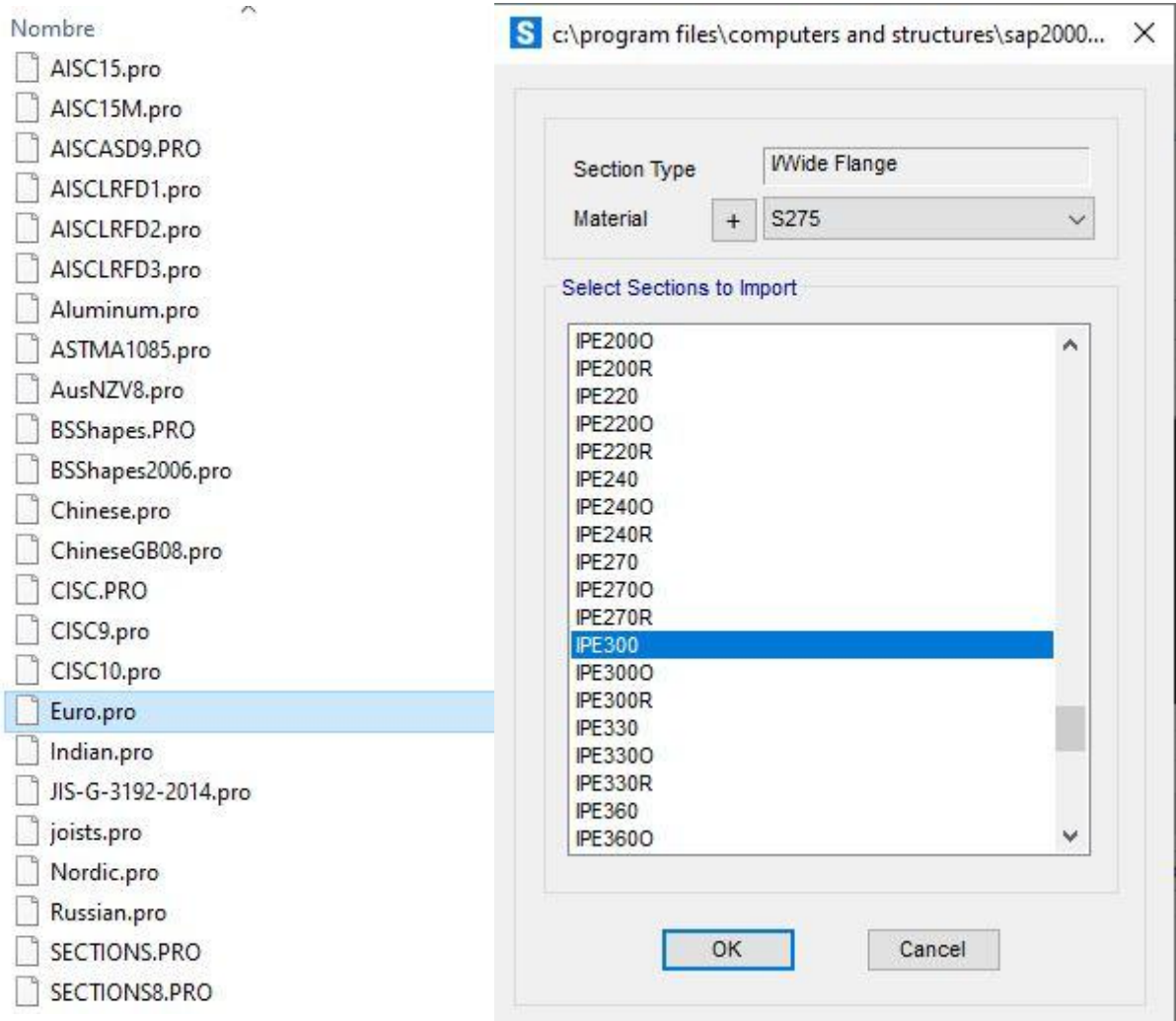


Figura 143. Serie de perfil

Aquí se observan las características geométricas y propiedades del perfil IPE 300:

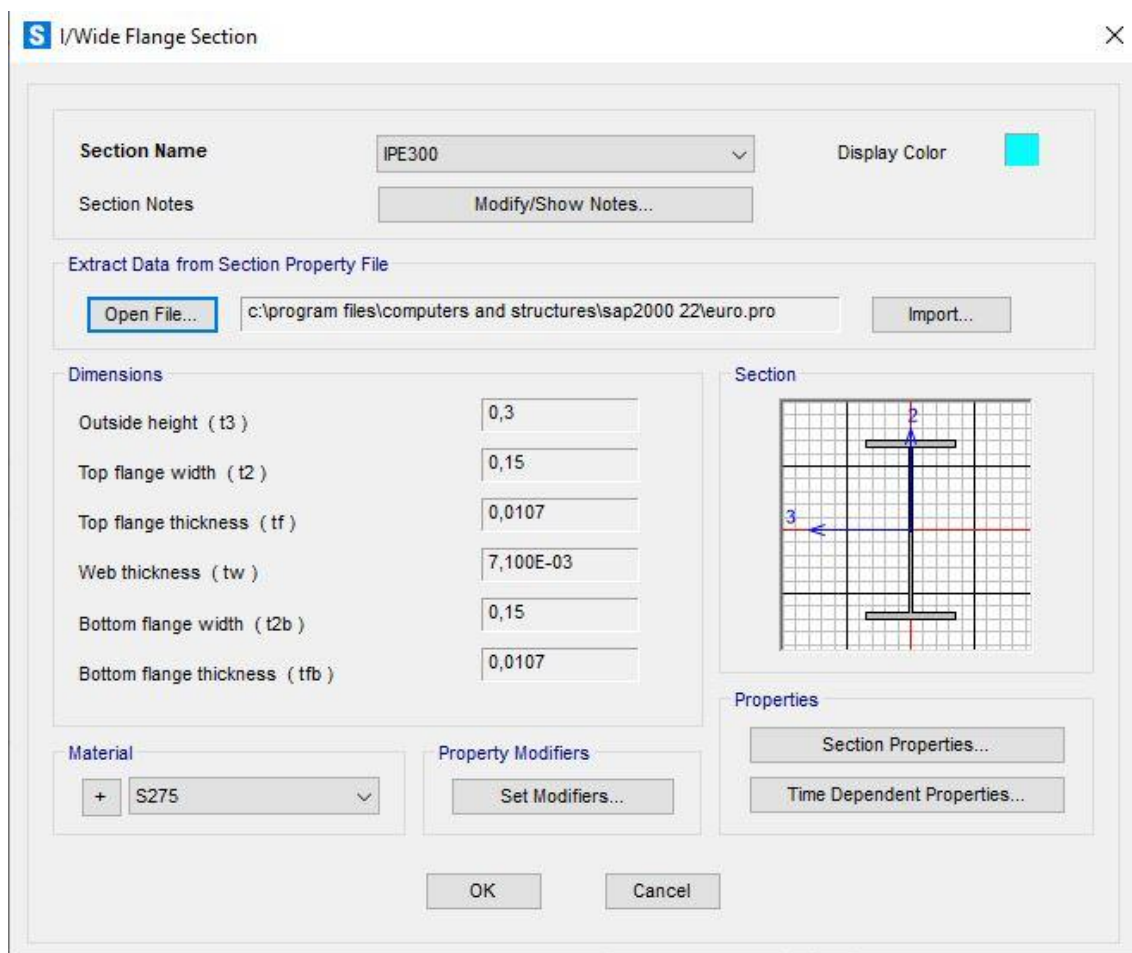


Figura 144. Dimensiones del perfil.

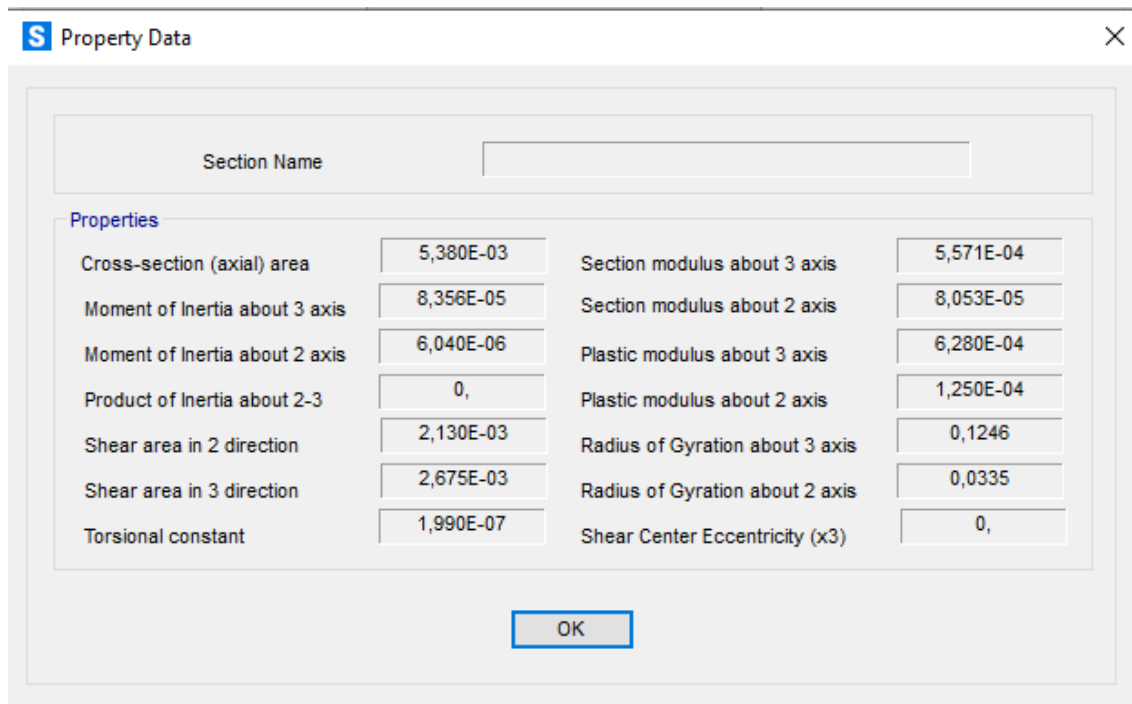


Figura 145. Propiedades geométricas del perfil.

Una vez definida la sección definida se diseña el pórtico con ayuda de la rejilla.

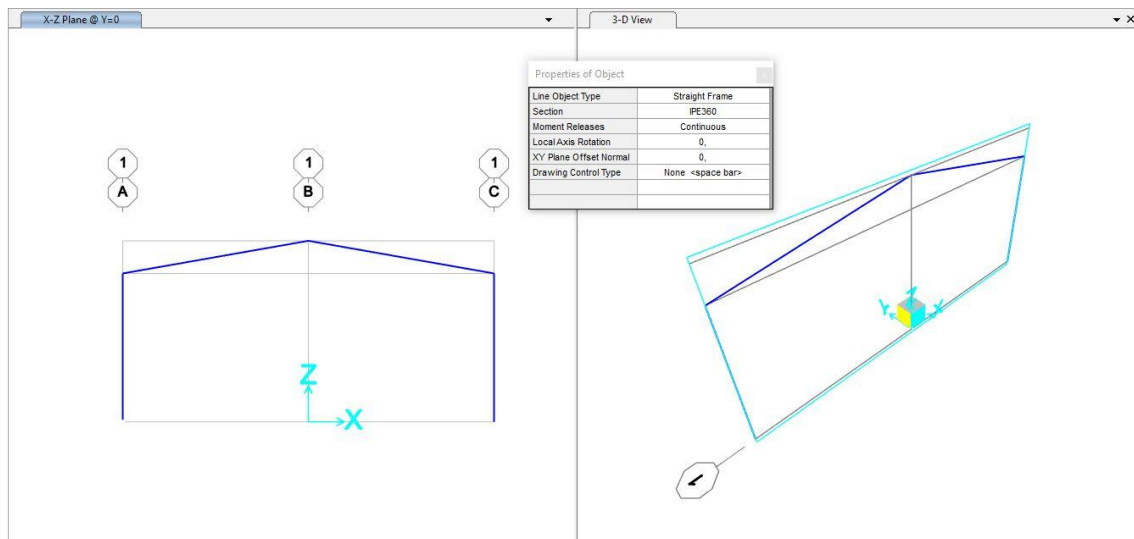


Figura 146. Estructura sin definir los apoyos.

Ahora toca definir los apoyos deseados en los puntos en los que el pórtico está en contacto con el terreno. En este caso el pórtico va a ser biempotrado como se ha hecho anteriormente en el programa CYPE.

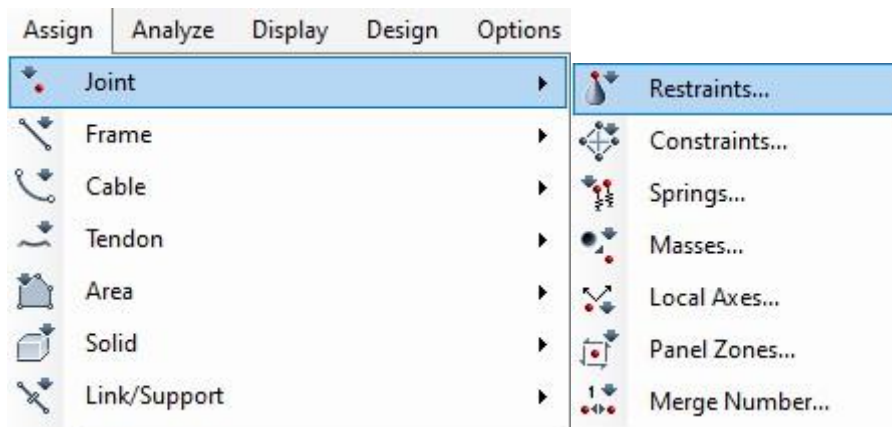


Figura 147. Definición de restricciones.

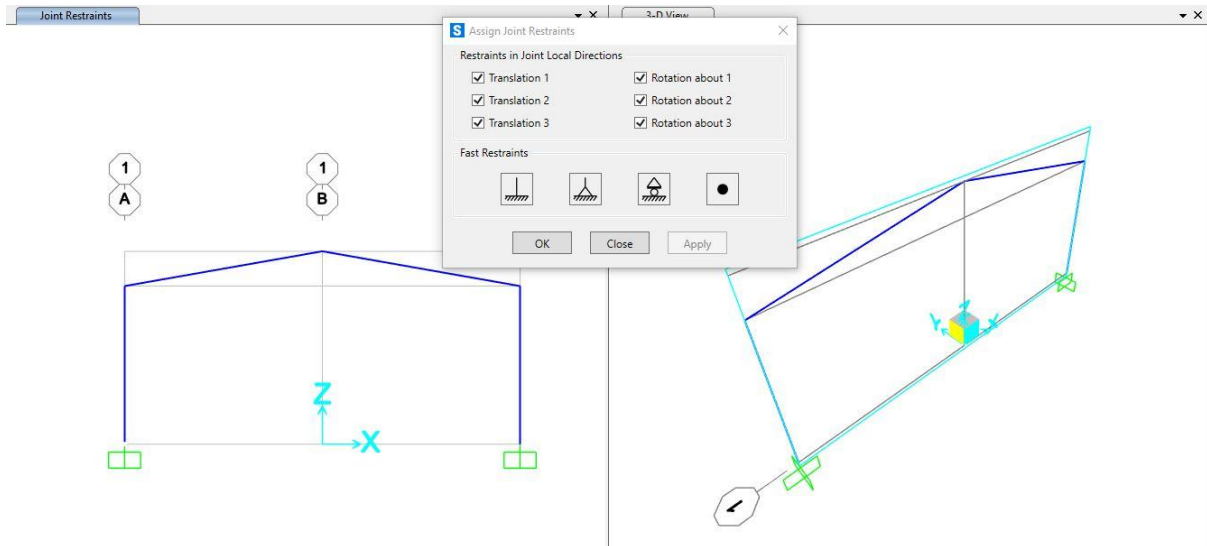


Figura 148. Estructura con empotramientos fijos definidos.

Ahora se pasa a definir las cargas:

- Peso propio.
- Nieve.
- Viento.

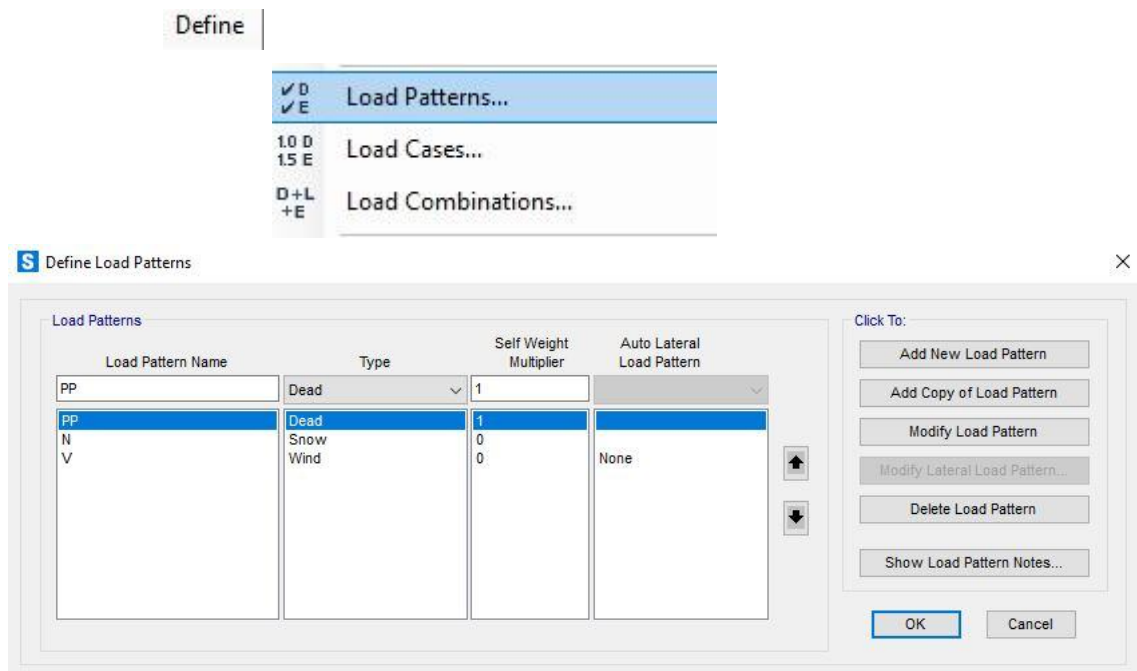


Figura 149. Definición de cargas.

Una vez definidas las cargas, se pasa a aplicarlas sobre el pórtico:

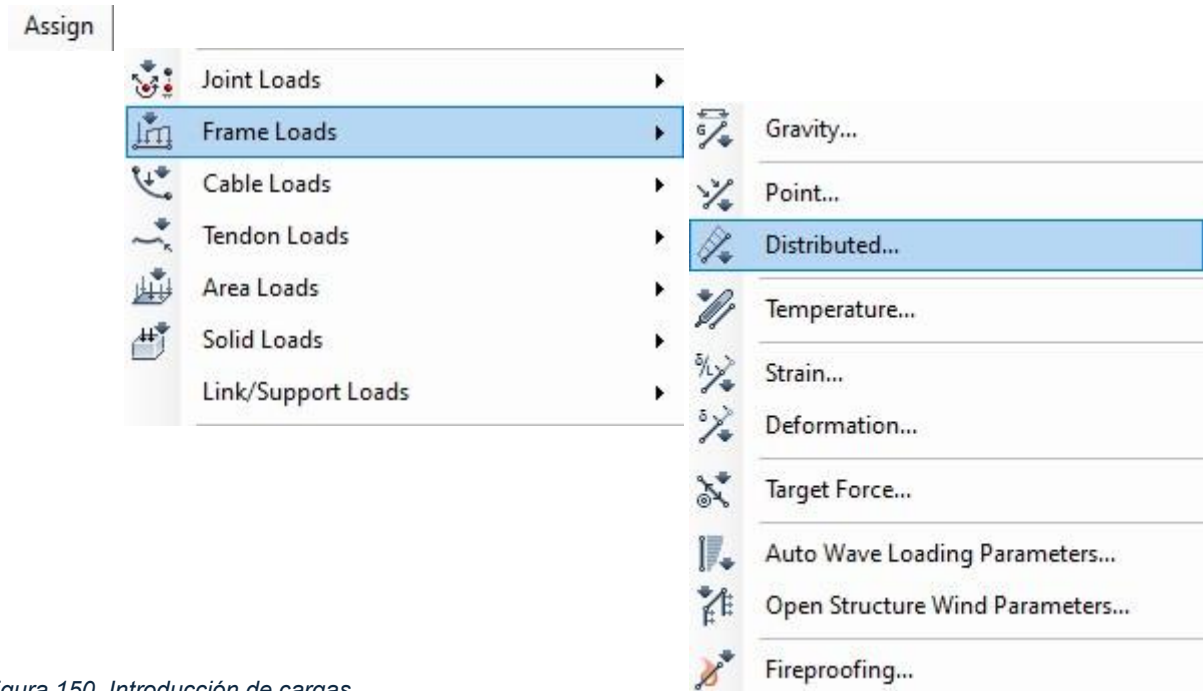


Figura 150. Introducción de cargas.

-Peso propio:

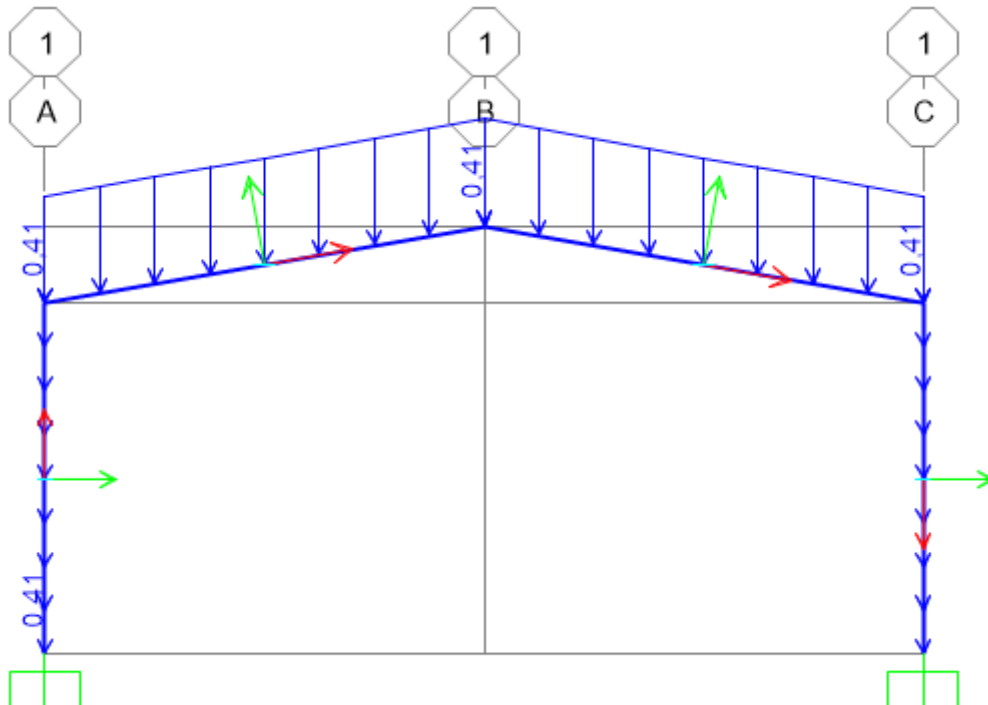


Figura 151. Carga de peso propio.

-Viento:

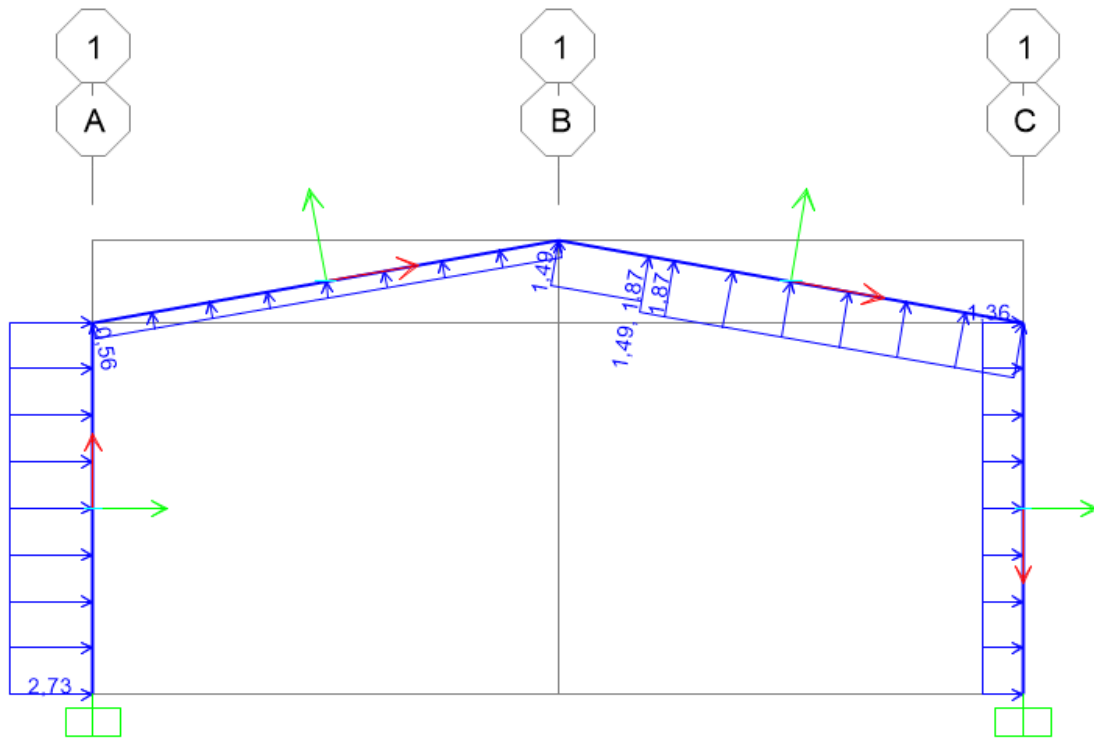


Figura 152. Carga de viento.

-Nieve:

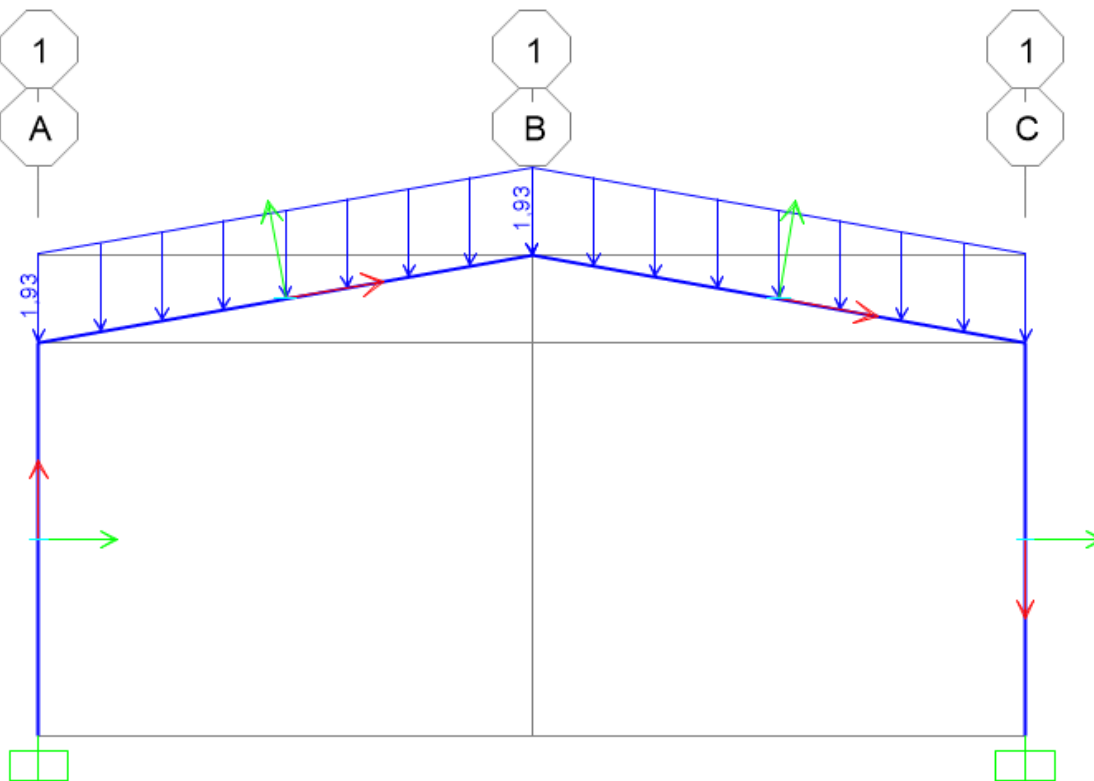


Figura 153. Carga de nieve.

Una vez asignadas las cargas en el pórtico, se genera un caso de cargas en el que se combinan las cargas (si se quisiera, se podrían poner coeficientes distintos a la unidad).

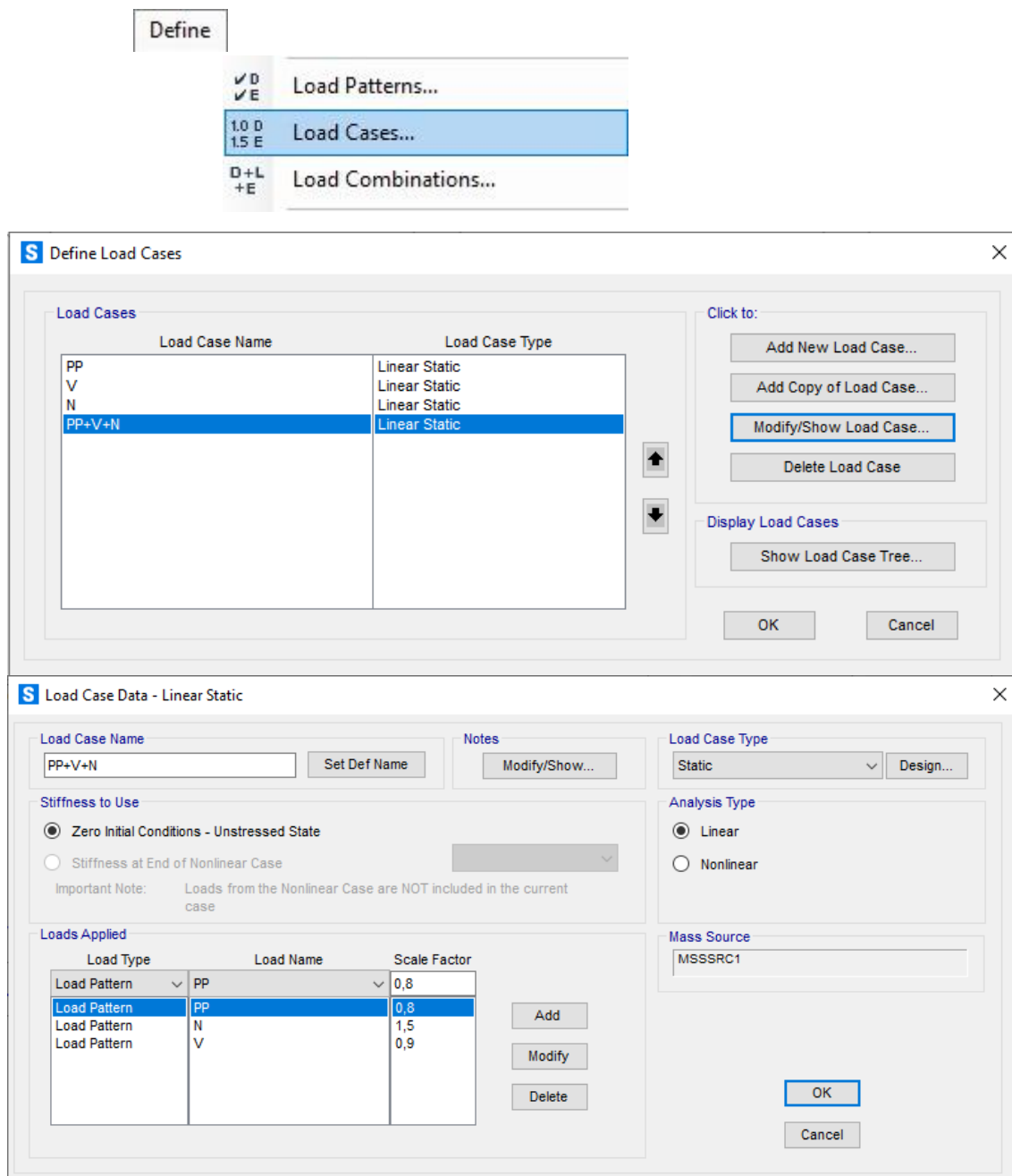


Figura 154. Caso de cargas estático.

Viendo el pórtico como perfiles extruidos se vería de la siguiente forma:

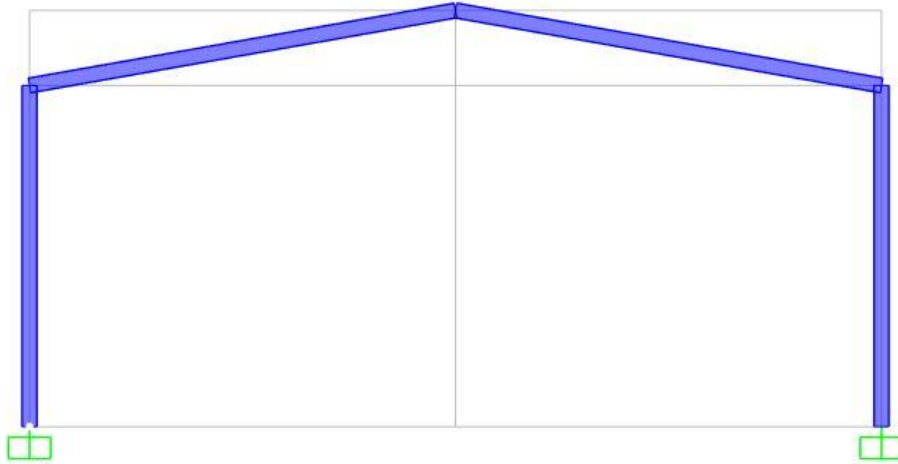


Figura 155. Pórtico con perfiles extruidos.

Se procede al cálculo estático de la estructura.

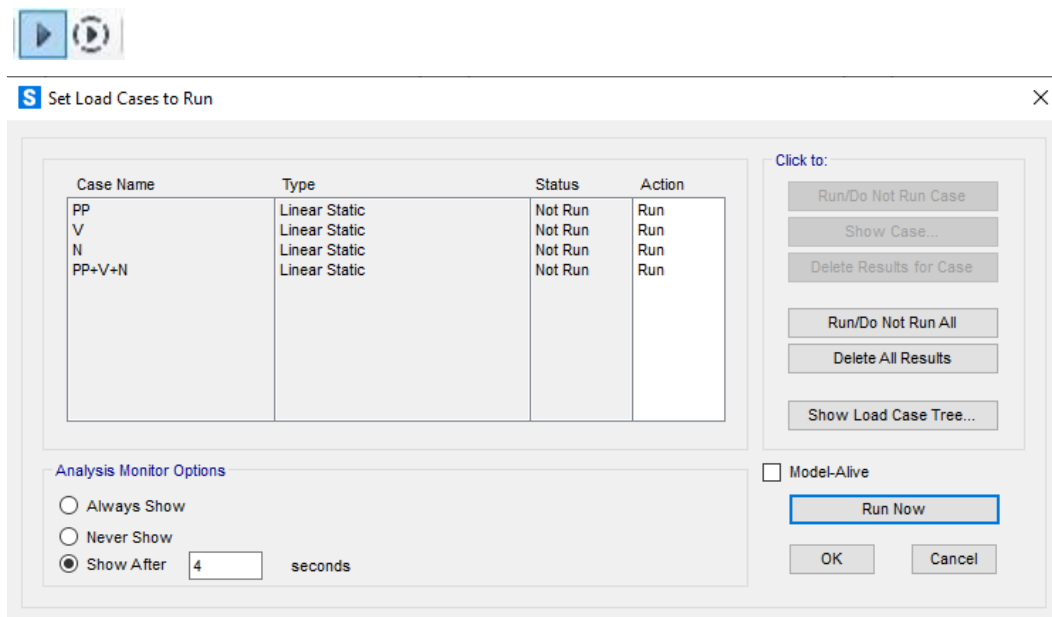


Figura 156. Cálculo estático.

Una vez realizado el cálculo estático de esfuerzos y reacciones, se procede a realizar un análisis de pandeo. Para ello, primero se divide cada barra de la estructura en varios tramos, en este caso se ha optado por 4 tramos e impedir el desplazamiento fuera del plano para evitar el vuelco. Al estar trabajando en el plano XZ, el desplazamiento impedido será u_y o también denominado v .

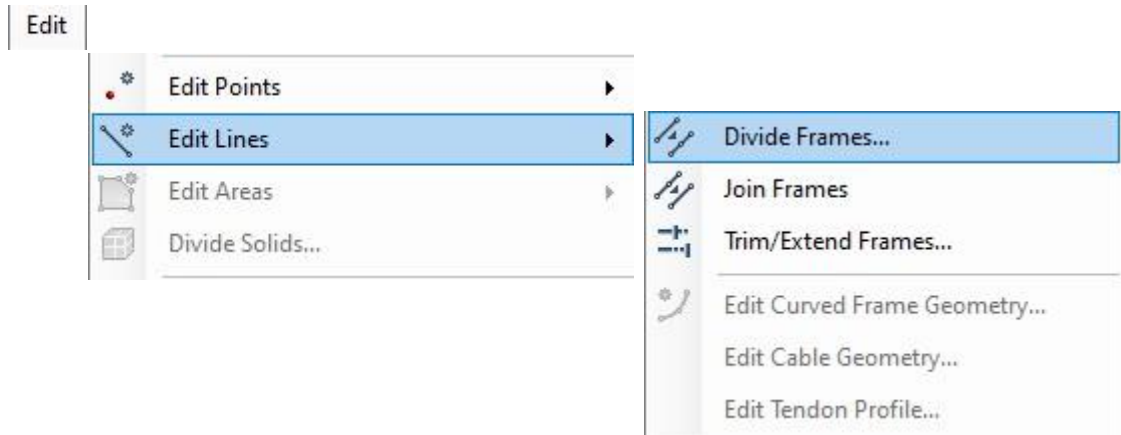


Figura 157. División de estructura.

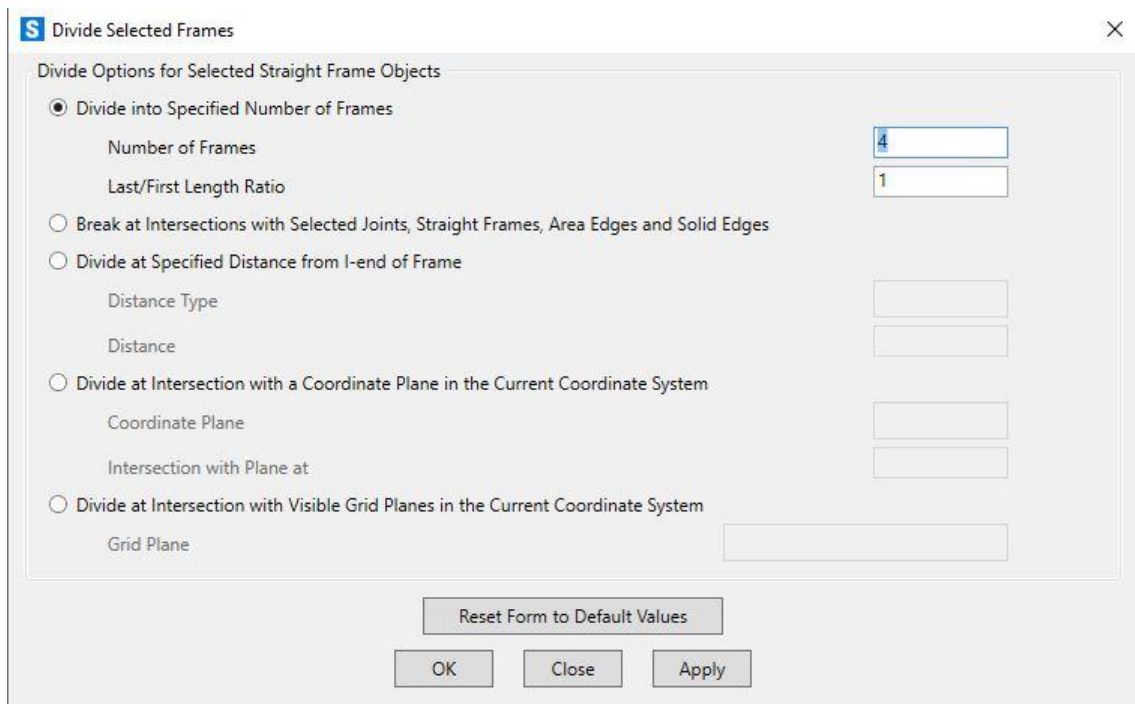


Figura 158. Configuración comando dividir.

Se obtienen las barras divididas.

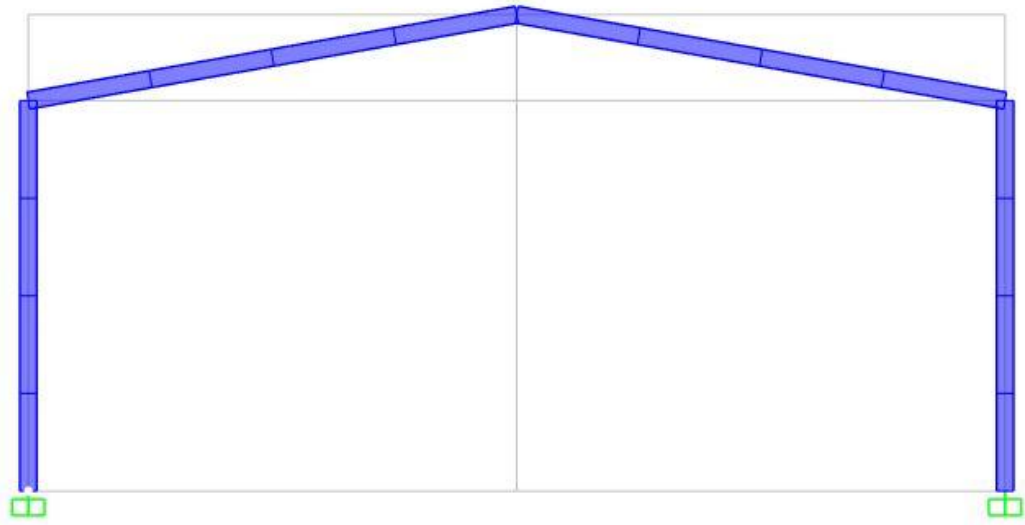


Figura 159. Pórtico extruido con barras divididas.

Ahora se procede a impedir los desplazamientos de los nudos creados al dividir las barras en varios tramos. De esta forma se evita el vuelco de la estructura fuera del plano.

Para este paso se seleccionan todos los nudos.

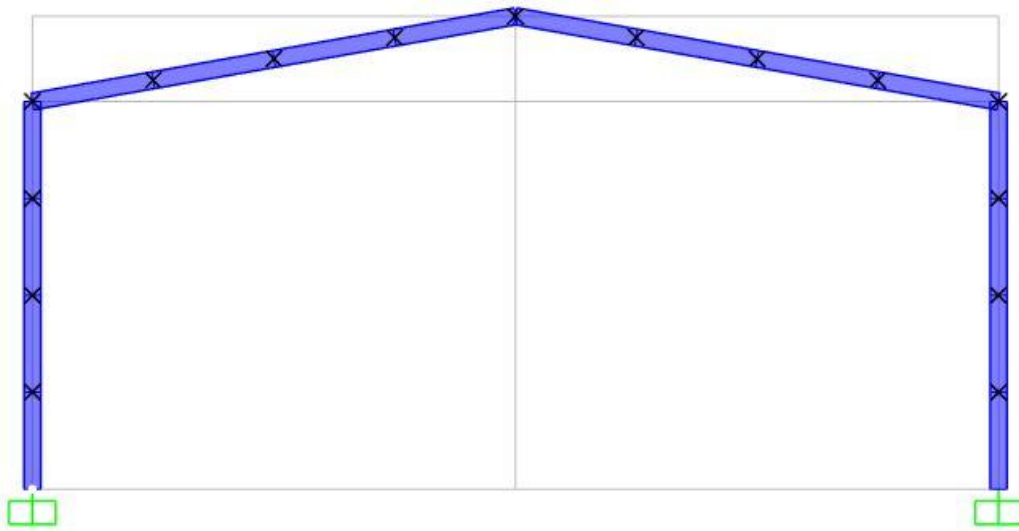


Figura 160. Nudos seleccionados.

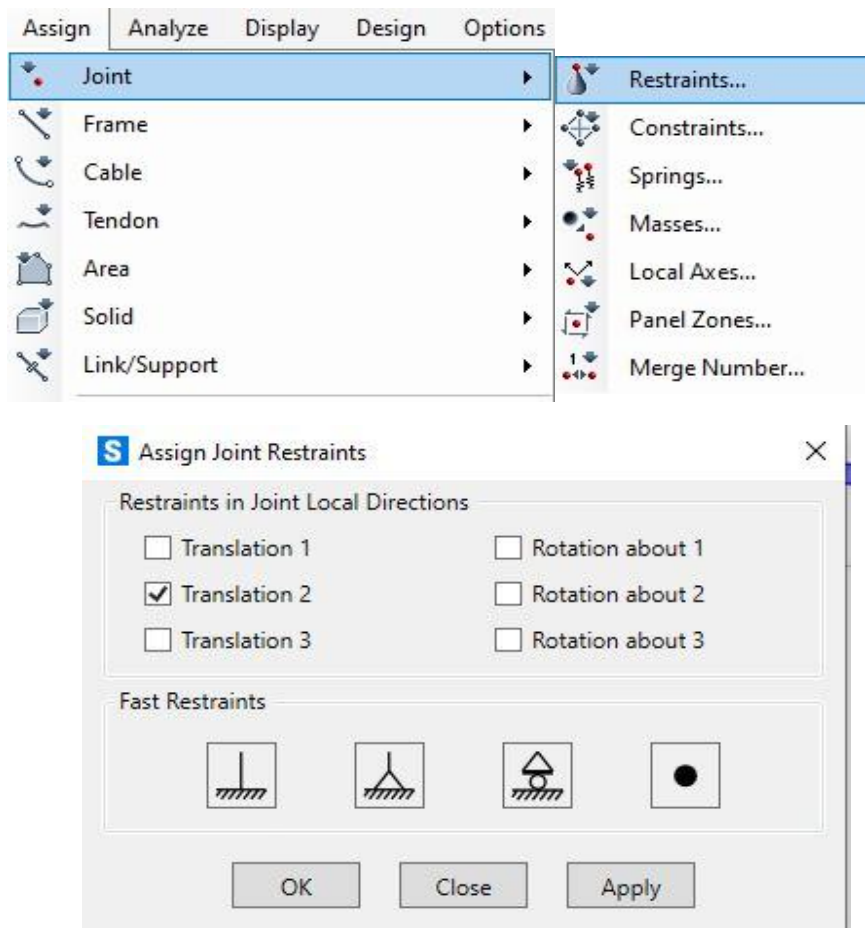


Figura 161. Apoyos para impedir vuelco.

Se obtiene la estructura con apoyos que impiden el desplazamiento 2 (eje Y).

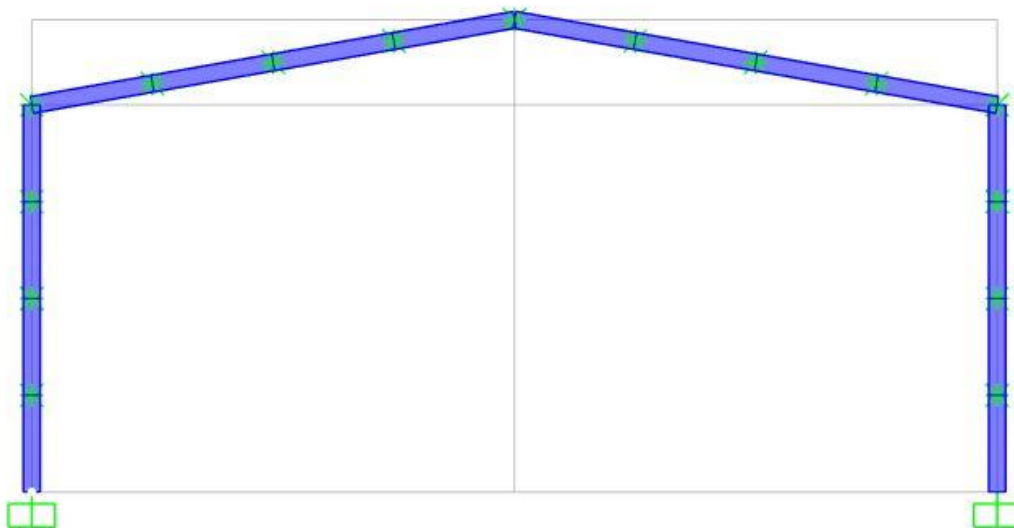


Figura 162. Pórtico extruido con barras divididas y apoyos intermedios.

Para el estudio a pandeo se tienen que modificar unos ajustes en los casos de carga (Load cases) respecto al estudio estático:

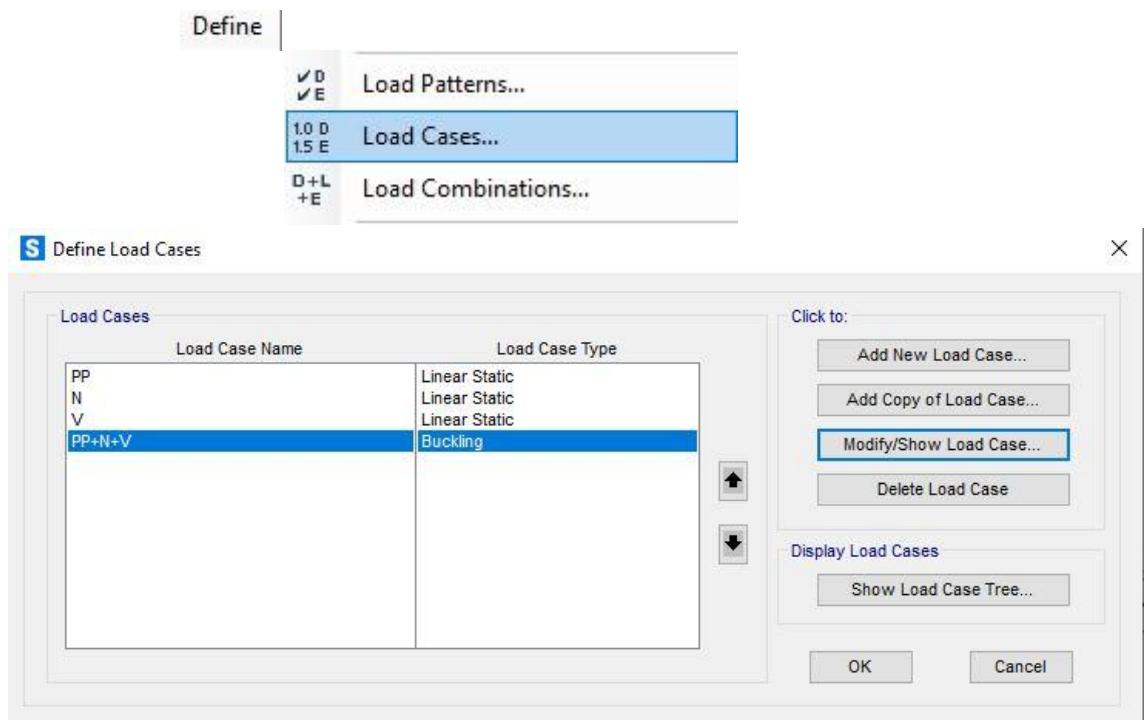


Figura 163. Caso de cargas para pandeo.

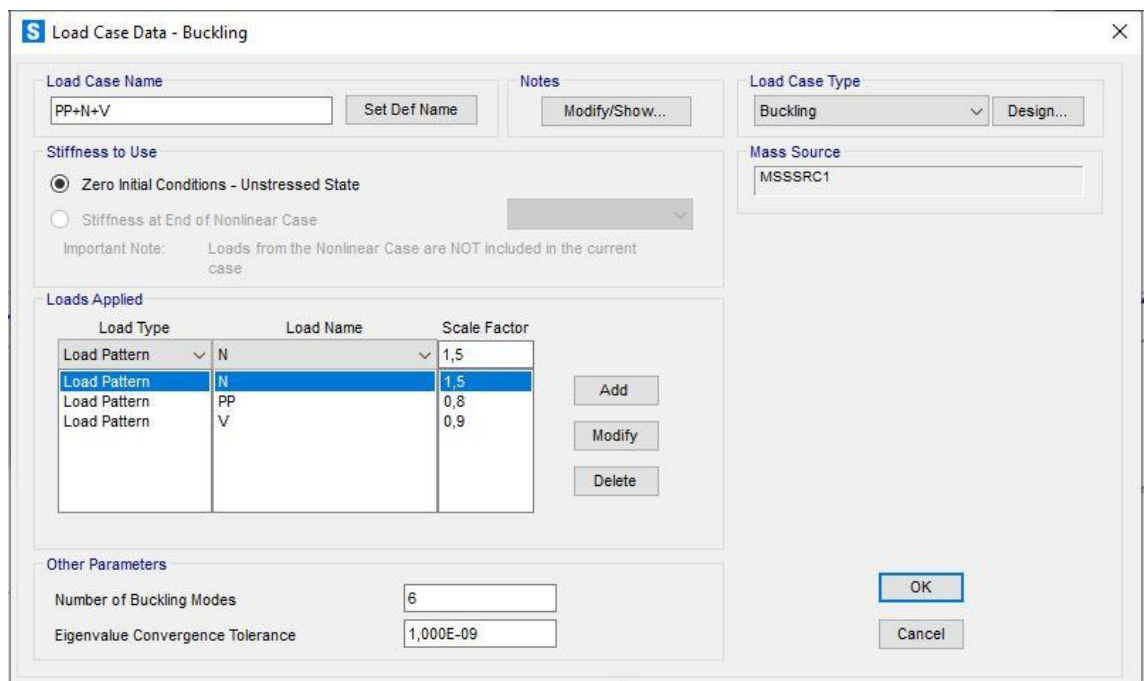


Figura 164. Configuración casos de carga para pandeo.

Ahora ya está listo para proceder al cálculo a pandeo del pórtico.

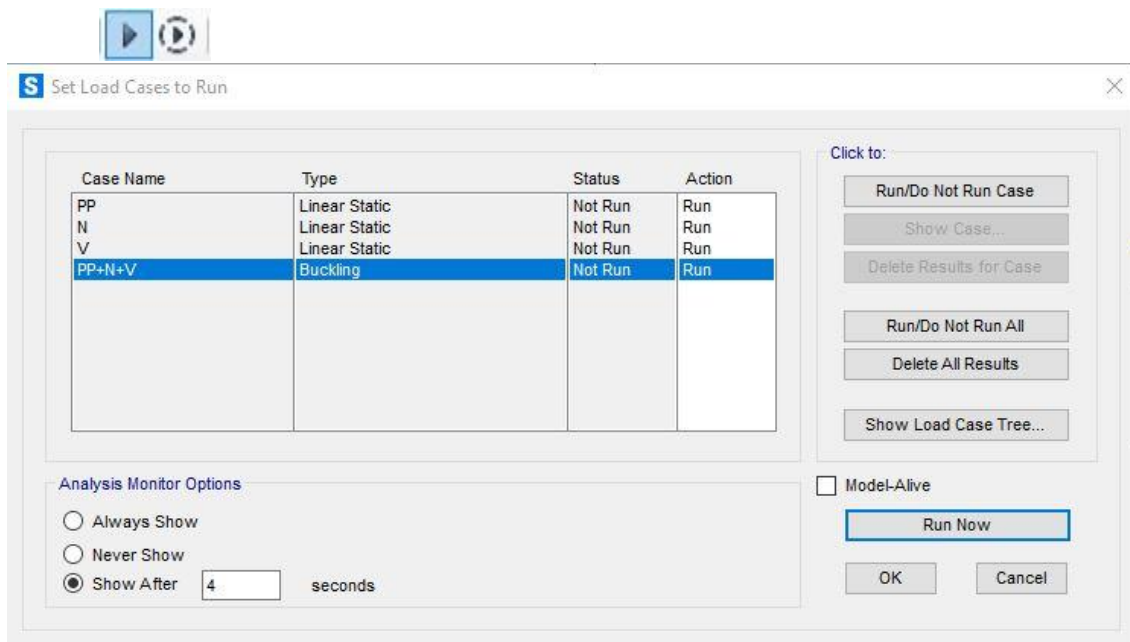


Figura 165. Cálculo a pandeo.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS.

5.1- BARRA.

En cuanto a la comparación de los resultados, se comenzará comparando las reacciones de los apoyos:

Reacciones:

CYPE:

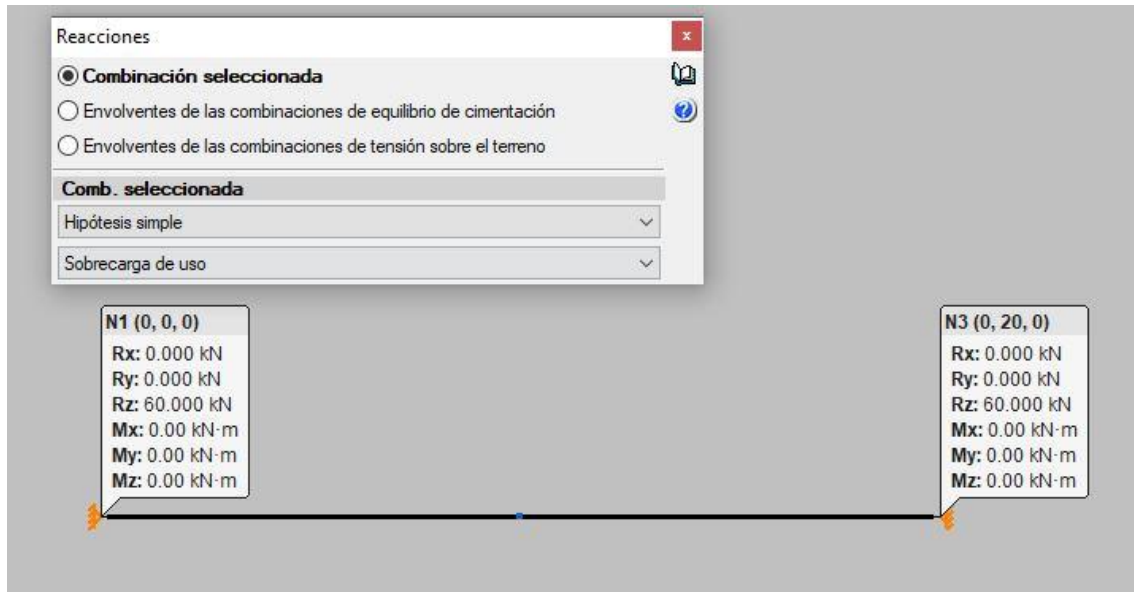


Figura 166. Reacciones barra CYPE.

SAP 2000:

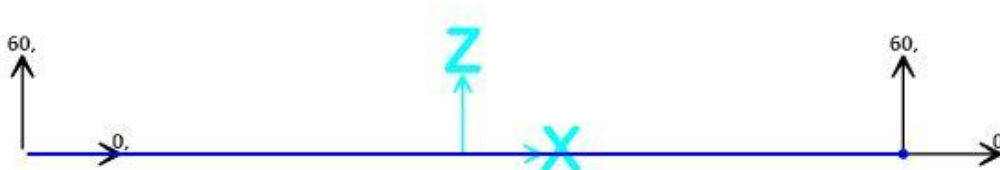


Figura 167. Reacciones barra SAP 2000.

Como se puede observar, las reacciones obtenidas en ambos softwares son iguales, obteniendo las reacciones verticales en ambos apoyos del valor de 60kN y el resto nulas.

Ahora se pasa a comparar los desplazamientos en los extremos y en el centro de la barra.

Desplazamientos:

CYPE:

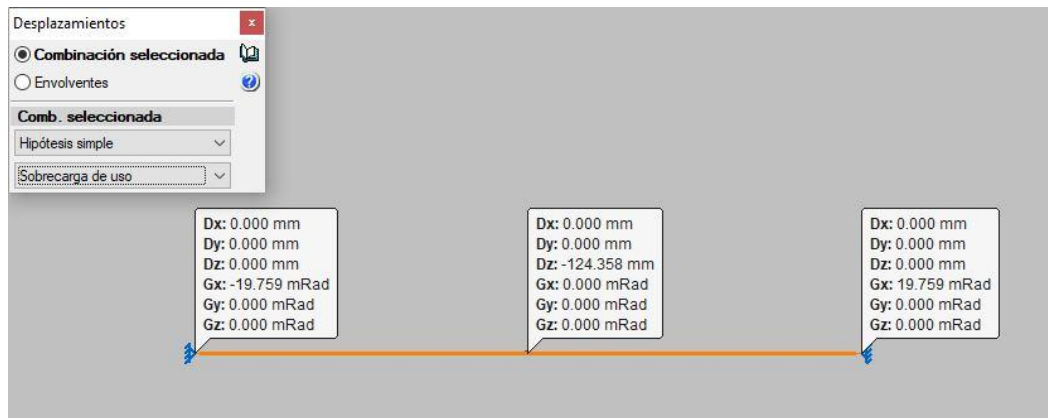


Figura 168. Desplazamientos barra CYPE.

SAP 2000:

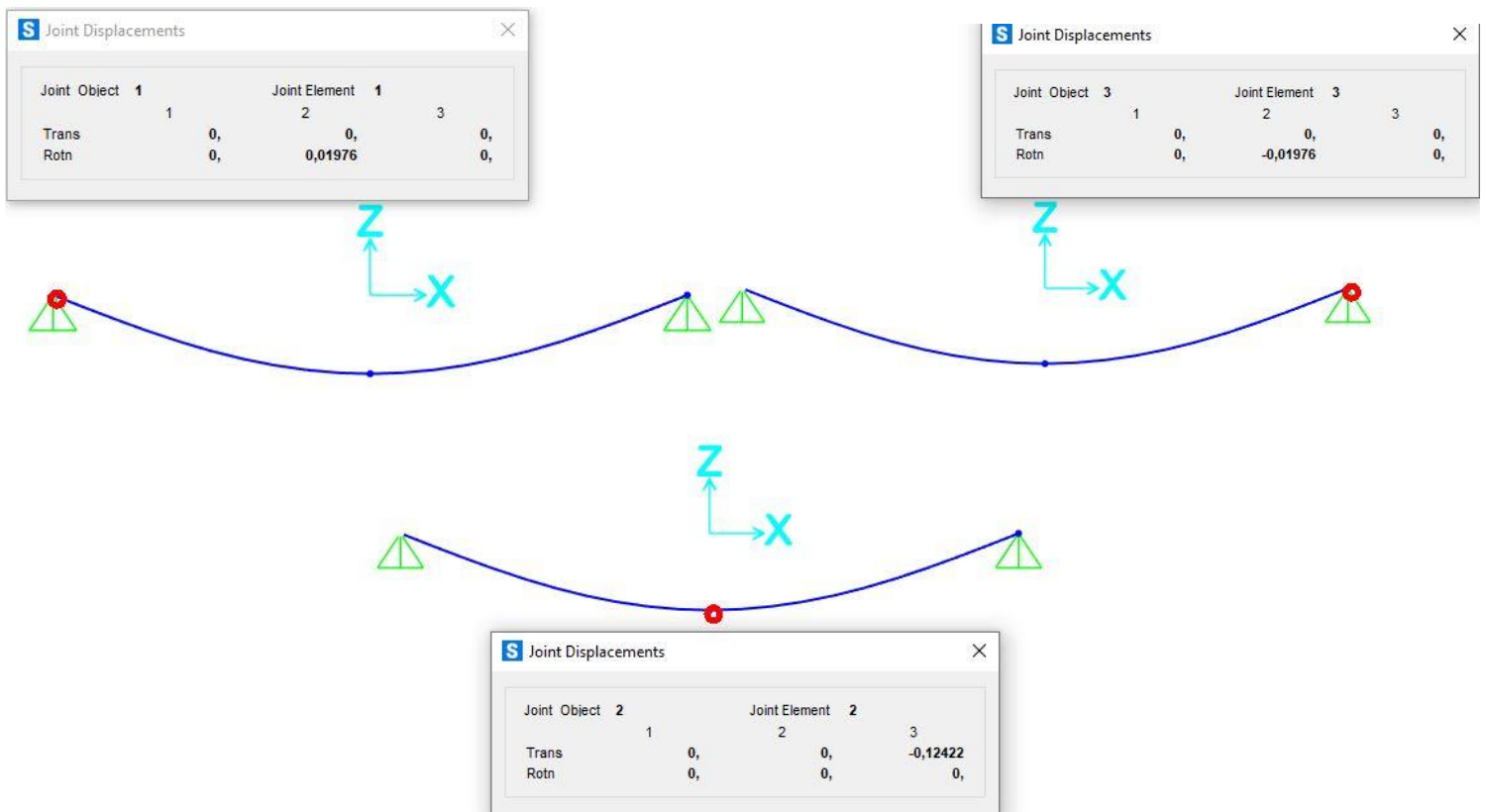


Figura 169. Desplazamientos barra SAP 2000.

Según las imágenes, los desplazamientos obtenidos en ambos softwares son iguales.

Ahora se compararán las gráficas de esfuerzos (axil, cortante y momento flector):

El axil es nulo, ya que la barra sólo tiene cargas de flexión.

Cortante:

CYPE:

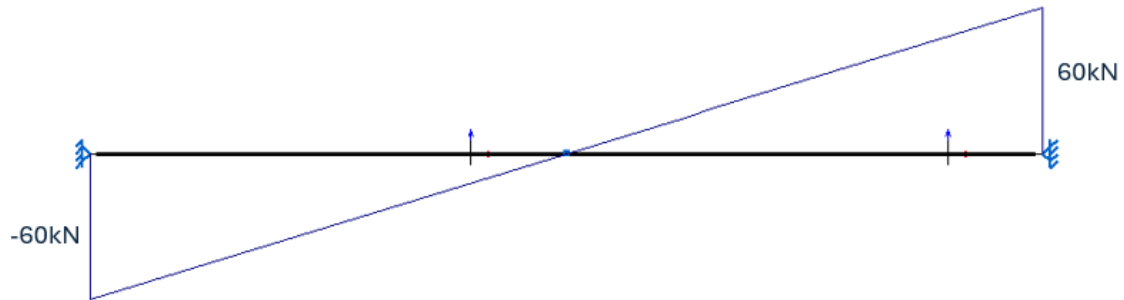


Figura 170. Cortante barra CYPE.

SAP 2000:

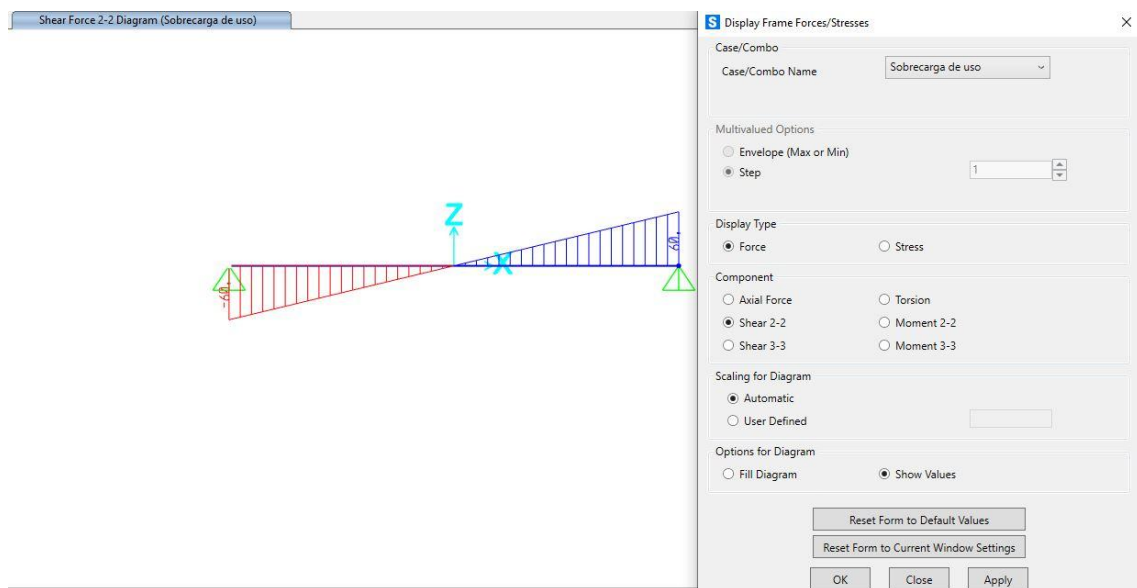


Figura 171. Cortante barra SAP2000.

Como se puede observar, los esfuerzos cortantes obtenidos en ambos softwares son iguales, obteniendo valores en ambos apoyos de 60kN y en el centro de la barra nulo.

Momento Flector:

CYPE:

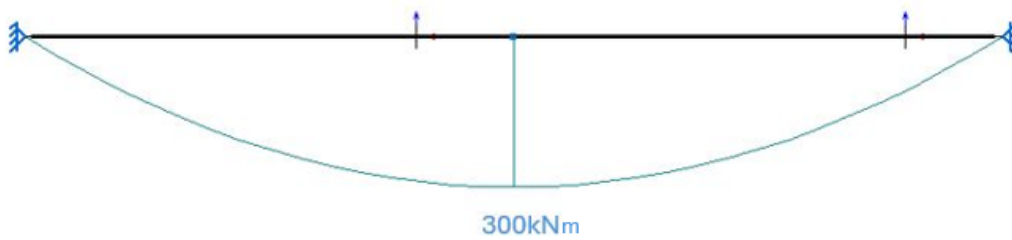


Figura 172. Momento flector barra CYPE.

SAP 2000:

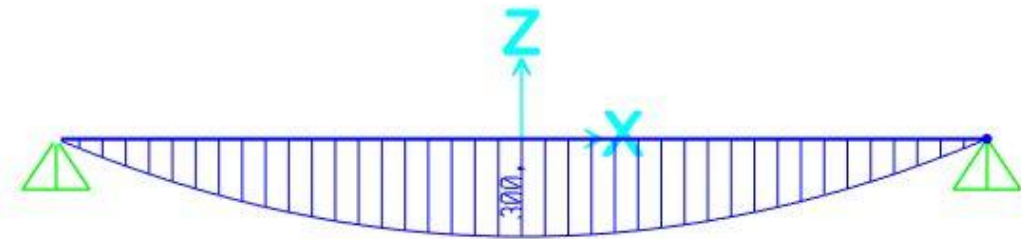


Figura 173. Momento flector barra SAP2000.

En las figuras 172 y 173, los esfuerzos flectores obtenidos en ambos softwares son iguales, obteniendo el valor en ambos apoyos de 300kNm y en los extremos de la barra nulos.

Por último, se va a comparar la deformada:

Deformada:

CYPE:

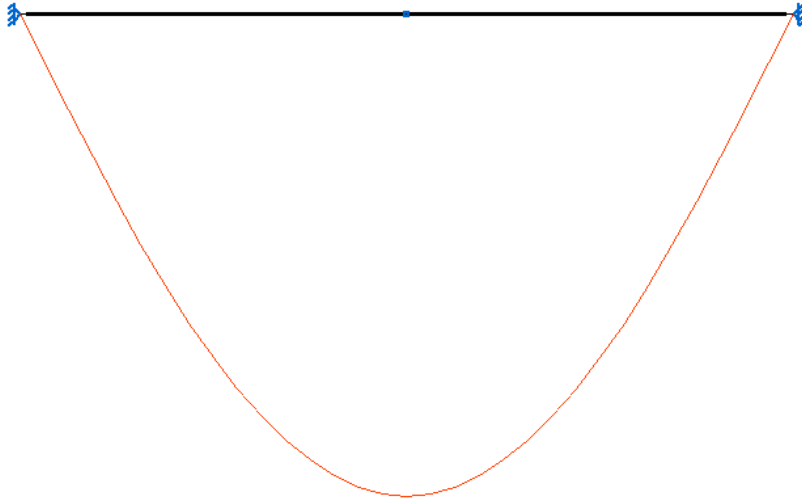


Figura 174. Deformada barra CYPE.

SAP 2000:

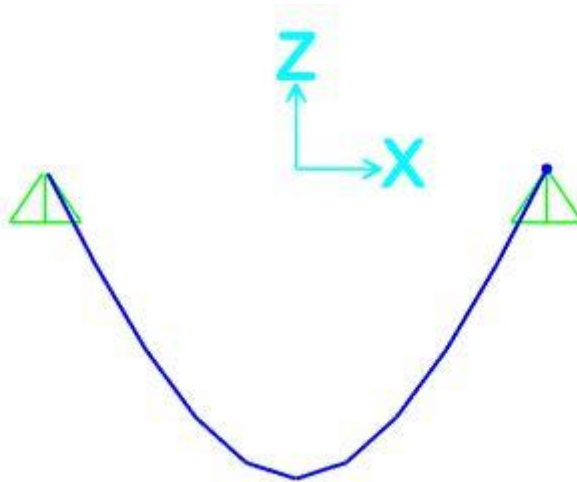


Figura 175. Deformada barra SAP2000.

Ambas deformadas tienen una escala multiplicadora de 100.

En este caso no se puede realizar el estudio a pandeo, ya que la barra no está sometida a compresión, sino que sólo trabaja a flexión.

5.2- PÓRTICO CON CARGA DE SOBRECARGA DE USO.

En cuanto a la comparación de los resultados, se comenzará por las reacciones de los empotramientos:

Reacciones:

CYPE:

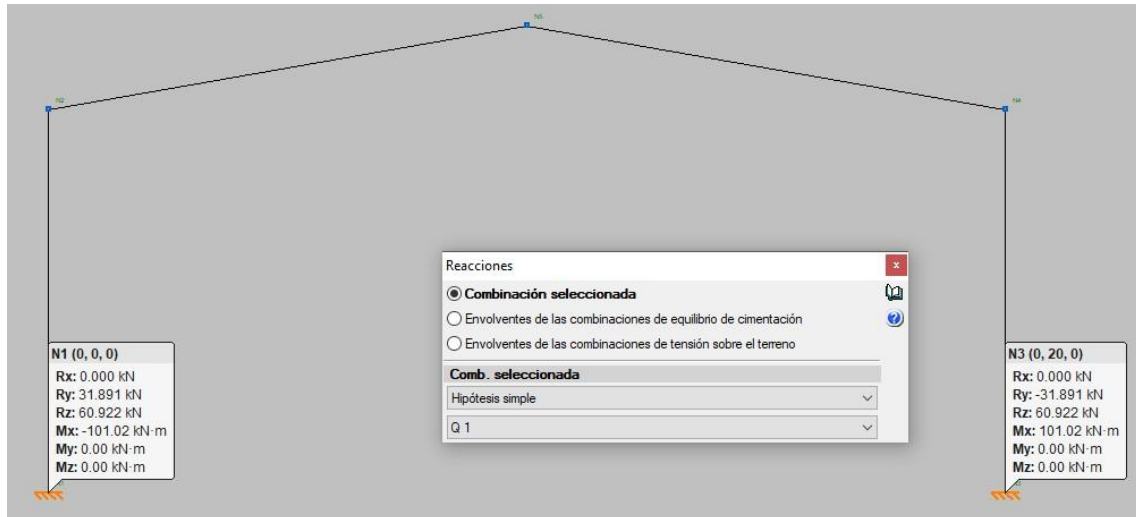


Figura 176. Reacciones pórtico 1 CYPE.

SAP 2000:

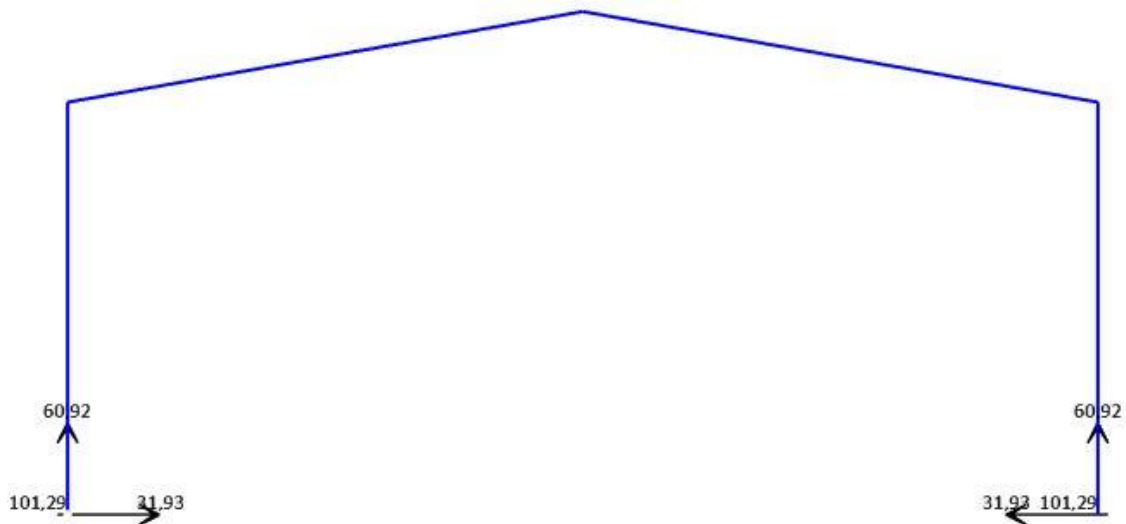


Figura 177. Reacciones pórtico 1 SAP2000.

Como se puede observar, las reacciones obtenidas en ambos softwares son iguales, obteniendo las reacciones verticales del valor de 60,92 kN, horizontales 31,93kN y el momento de 31,9kNm en ambos apoyos.

Ahora se pasará a comparar los desplazamientos en los extremos de las vigas que forman el pórtico:

Desplazamientos:

CYPE:

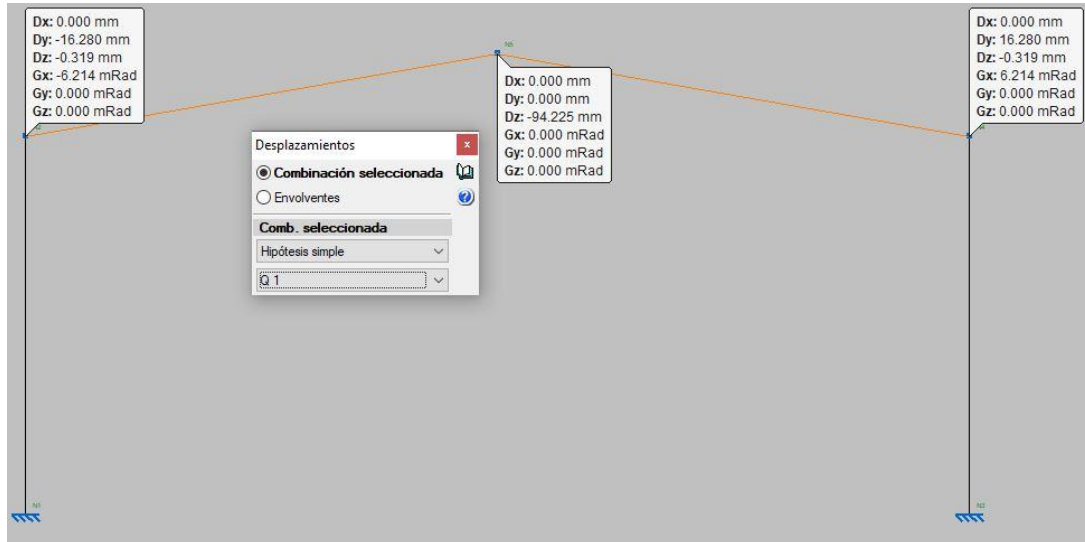


Figura 178. Desplazamientos pórtico 1 CYPE.

SAP 2000:



Figura 179. Desplazamientos pórtico 1 SAP2000.

Según las figuras 178 y 179, los desplazamientos obtenidos en ambos softwares son iguales.

Ahora se compararán las gráficas de esfuerzos (axil, cortante y momento flector).

Axil:

CYPE:

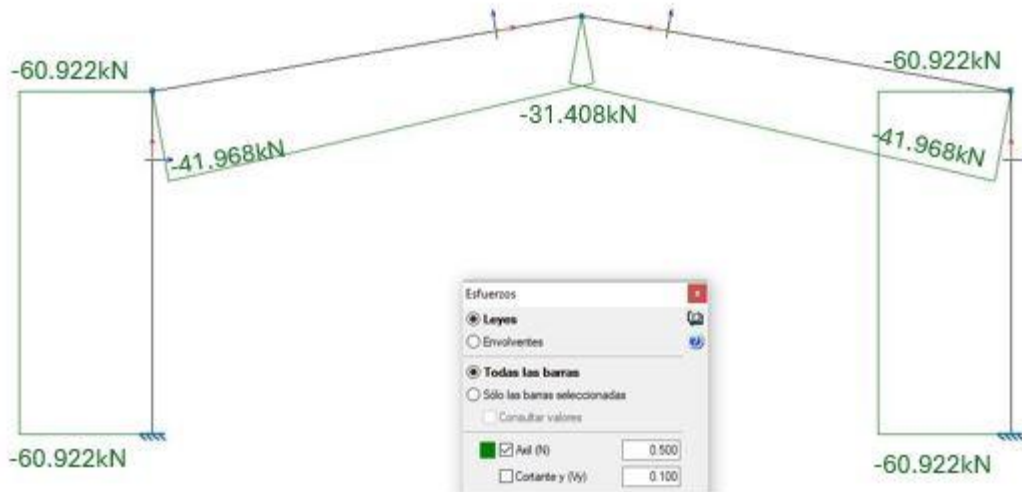


Figura 180. Axil pórtico 1 CYPE.

SAP 2000:

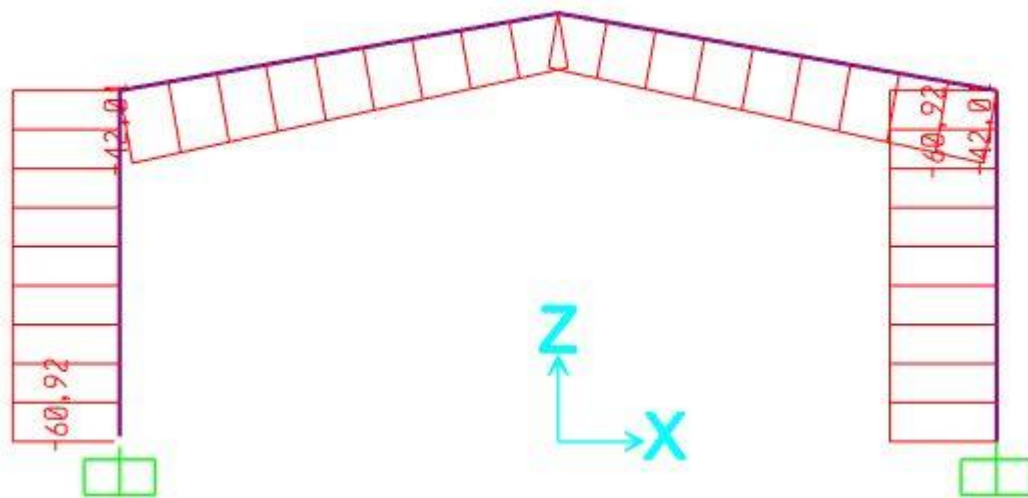


Figura 181. Axil pórtico 1 SAP2000.

Los resultados obtenidos son muy similares.

Cortante:

CYPE:

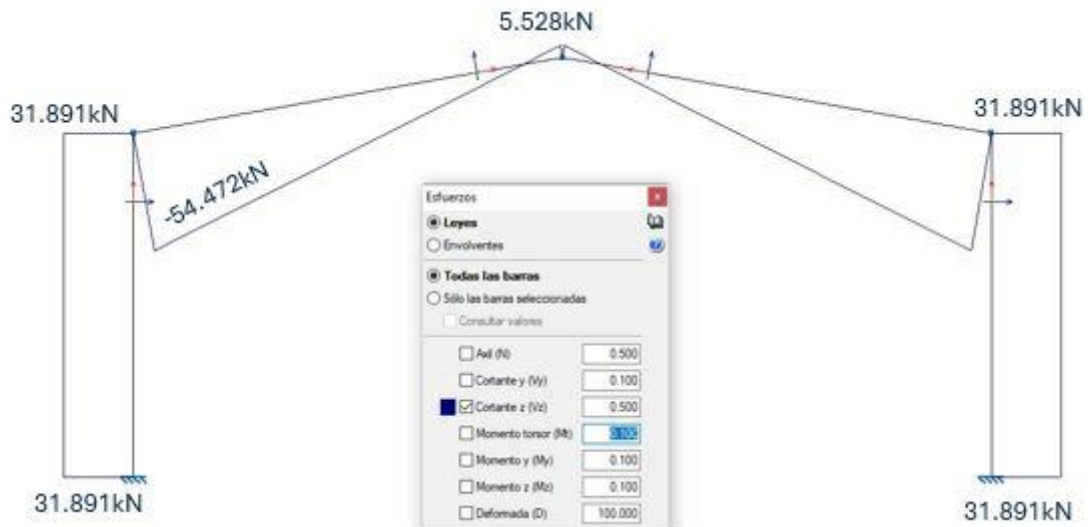


Figura 182. Cortante pórtico 1 CYPE.

SAP 2000:

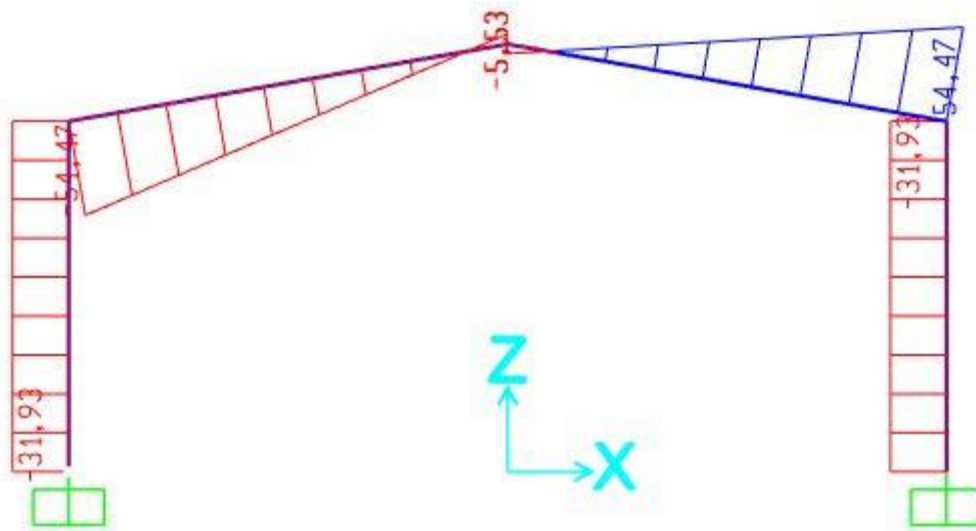


Figura 183. Cortante pórtico 1 SAP2000.

Como se puede observar, los esfuerzos cortantes obtenidos en ambos softwares son iguales.

Momento Flector:

CYPE:

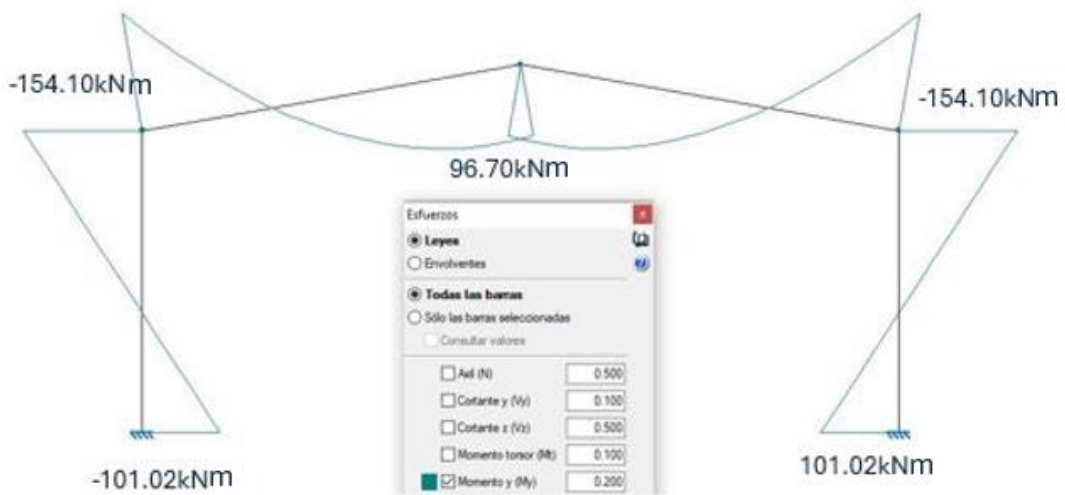


Figura 184. Momento flector pórtico 1 CYPE.

SAP 2000:

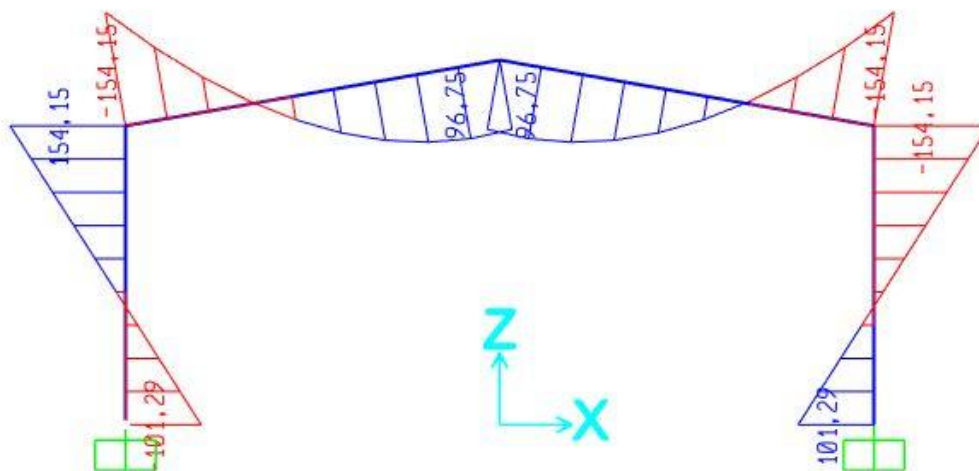


Figura 185. Momento flector pórtico 1 SAP2000.

Según las figuras 184 y 185, los esfuerzos de momentos flectores obtenidos en ambos softwares son muy similares.

Por último, se comparará la deformada:

Deformada:

CYPE:

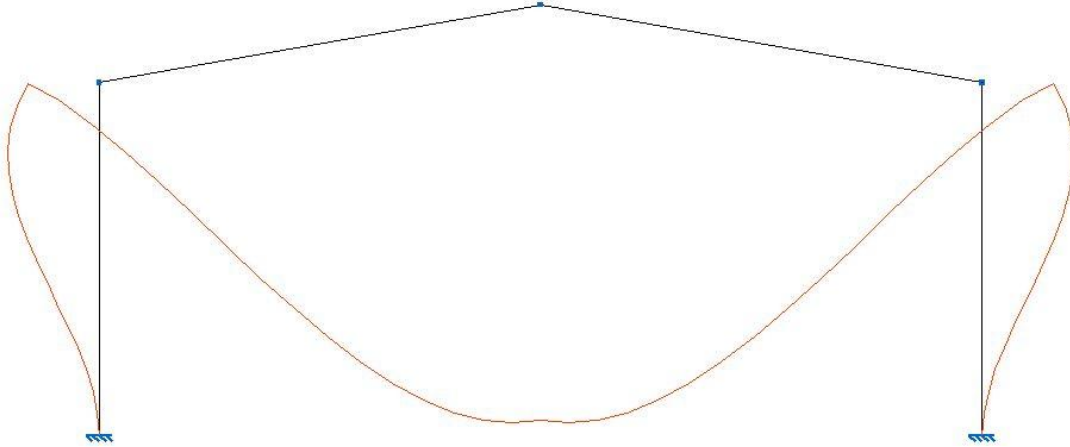


Figura 186. Deformada pórtico 1 CYPE.

SAP 2000:

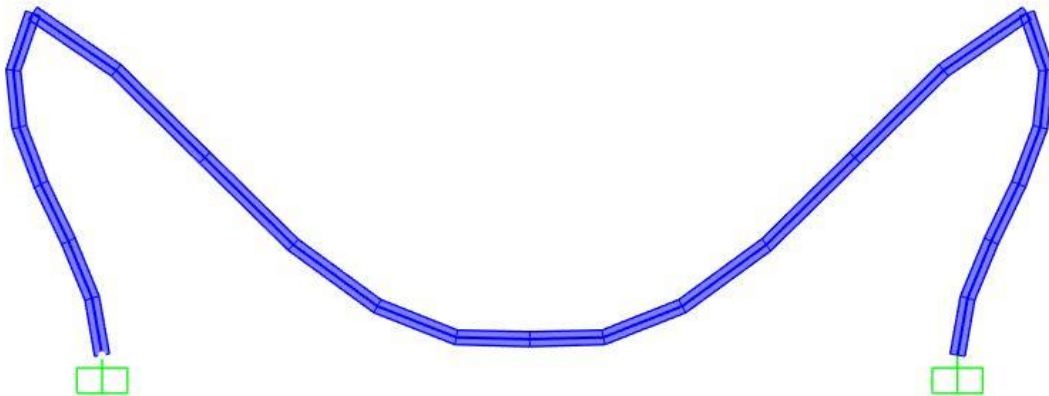


Figura 187. Deformada pórtico 1 SAP2000.

Ambas deformadas tienen una escala multiplicadora de 100.

Ahora se compararán los resultados del estudio a pandeo.

Una vez realizado el cálculo a pandeo se pueden ver los distintos modos de pandeo obtenidos y se utilizará el que pandee dentro del plano y con menor coeficiente.

Pandeo:

CYPE:

En CYPE se pueden ver los modos de resultados de dos formas diferentes:

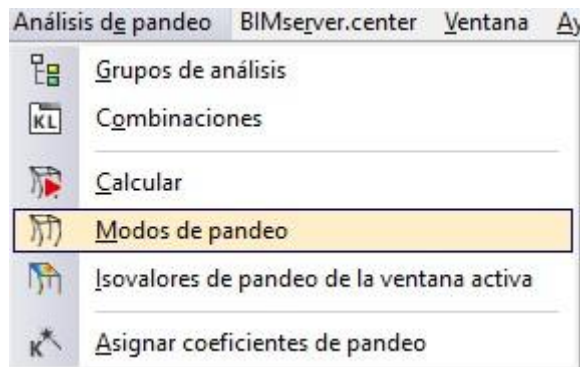


Figura 188. Modos de pandeo.

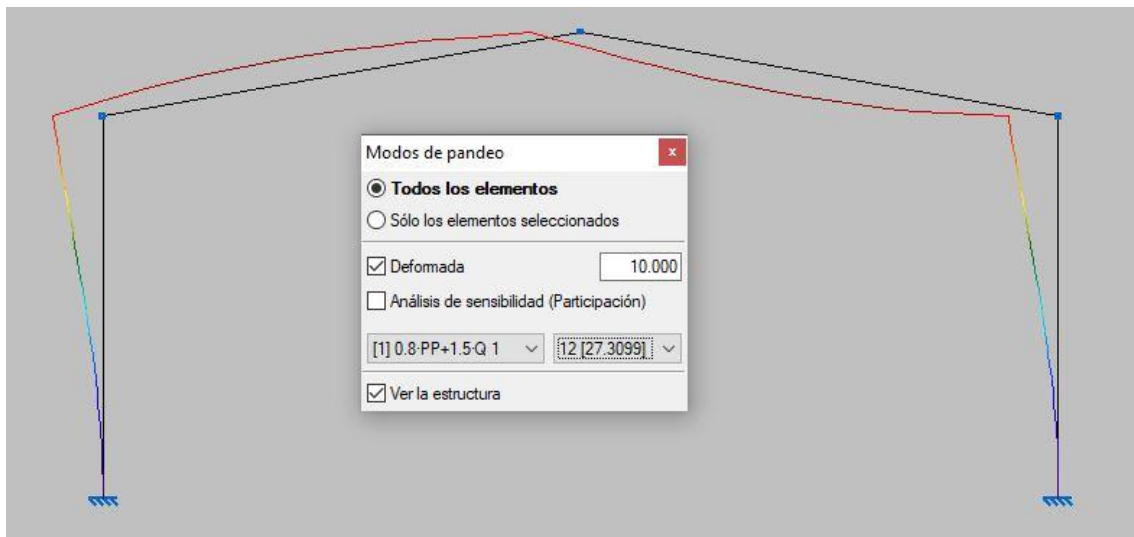


Figura 189. Resultado modos de pandeo pórtico 1.

También hay otra forma en la que se puede observar la deformada y es más visual, ya que representa los perfiles de la estructura.

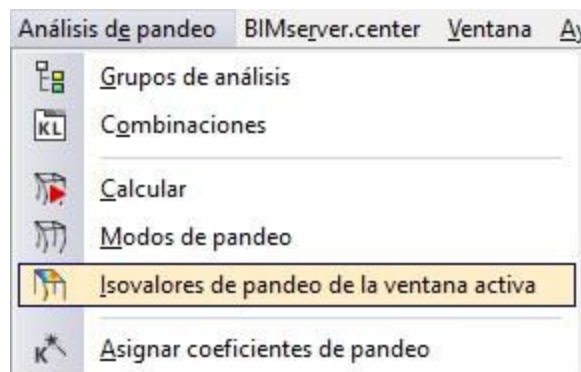


Figura 190. Isovalores de pandeo.



Figura 191. Resultado isovalores de pandeo pórtico 1 CYPE.

En ambos casos el factor multiplicador de los desplazamientos es 10.

El isovalor de pandeo obtenido es 27,3099.

Hay que tener en cuenta que la combinación de cargas es peso propio y sobrecarga de uso. La carga “Sobrecarga de uso” tiene un coeficiente multiplicador de 1.5 y la carga “Peso propio” tiene un coeficiente multiplicador de 0.8. El coeficiente multiplicador de la carga “Peso propio” no es importante ya que se ha desactivado la carga de peso propio del pórtico para este estudio.

Las combinaciones de cargas que aparecen las realiza el programa automáticamente.

SAP2000:

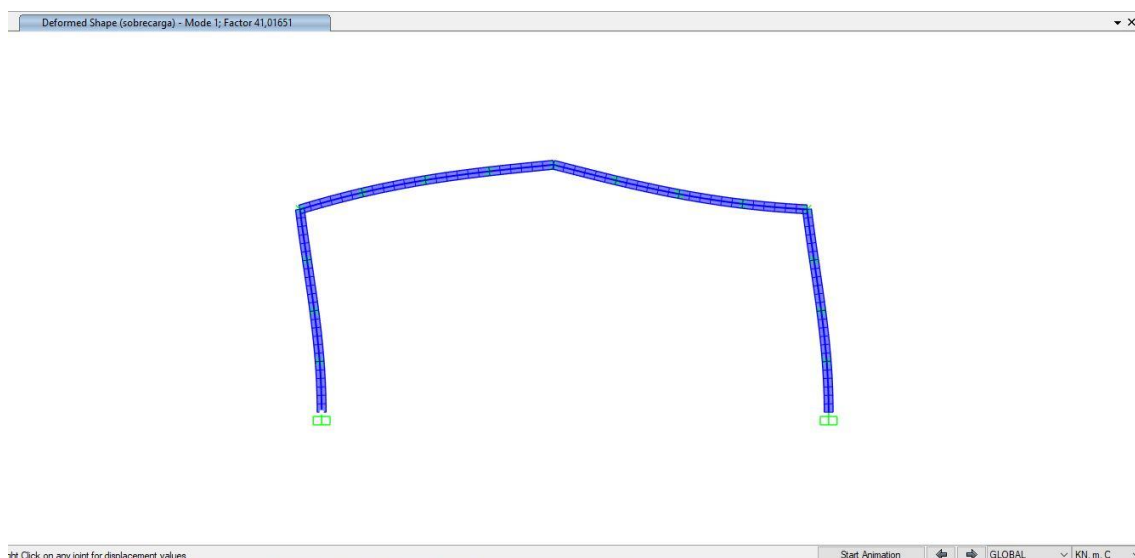


Figura 192. Resultado isovalores pórtico 1 SAP2000.

En SAP 2000 el resultado obtenido de isovalor de pandeo es 41,01651. Hay que tener en cuenta que el factor multiplicador de la carga es 1, mientras que en CYPE en la combinación mostrada el factor multiplicador es 1,5. Si en SAP 2000 se tuviera el factor multiplicador de 1,5 como en CYPE se obtendría el siguiente isovalor.

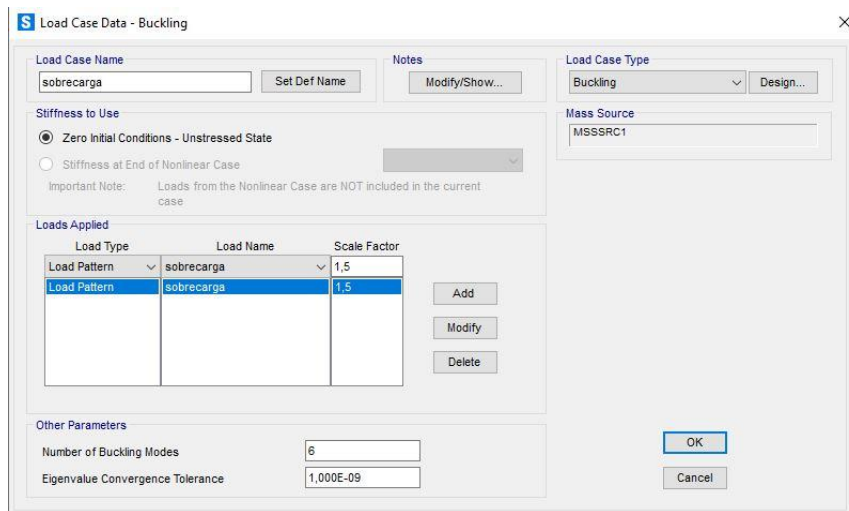


Figura 193. Modificación caso de cargas pandeo.

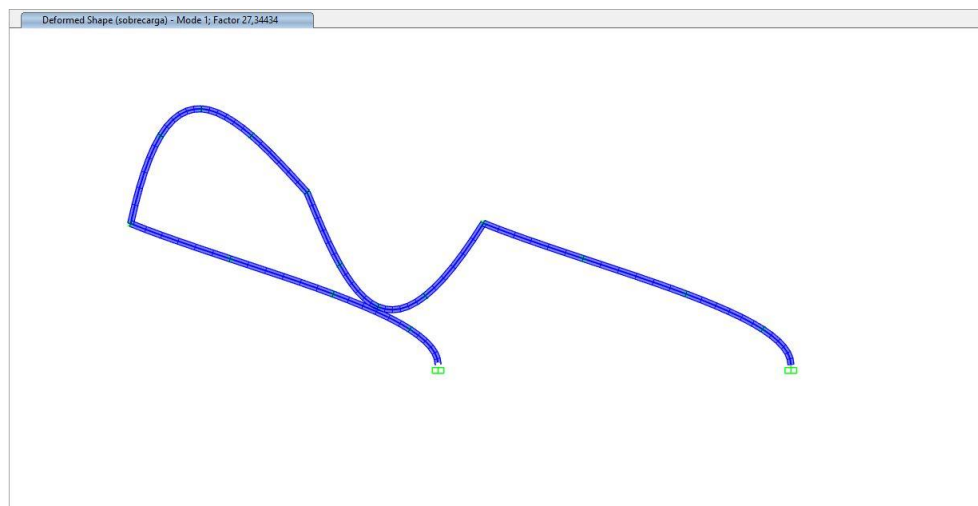


Figura 194. Resultado isovalores definitivo pórtico 1 SAP2000.

Como se puede ver, poniendo el coeficiente multiplicador de carga 1,5 en ambos programas se obtiene prácticamente el mismo isovalor de pandeo.

Este valor obtenido significa que con la carga "Sobrecarga de uso" con un coeficiente multiplicador de 1.5 aplicado, la estructura soportaría 27,3765 veces esa carga en el caso de CYPE y 27,3443 en el caso de SAP 2000. Es un valor muy similar.

5.3- PÓRTICO CON CARGAS DE VIENTO, NIEVE Y PESO PROPIO.

En cuanto a la comparación de los resultados, se va a estudiar la combinación de cargas de peso propio, viento y nieve aplicados los siguientes coeficientes:

Peso propio: 0,8

Viento:0,9

Nieve:1,5

Combinación de estudio: $0.8*PP+0.9*V+1.5*N$

Se comienza por las reacciones de los empotramientos:

Reacciones:

CYPE:

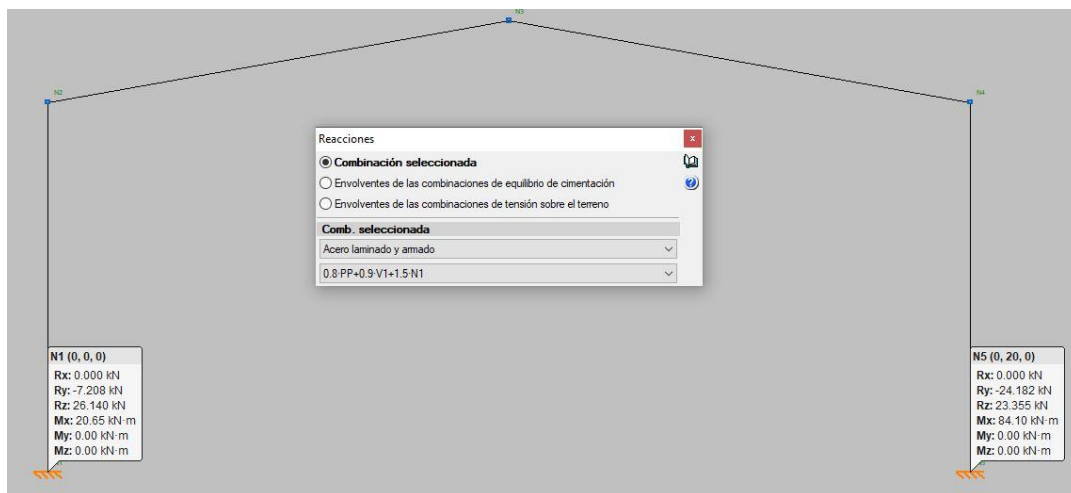


Figura 195.Reacciones pórtico 2 CYPE.

SAP 2000:

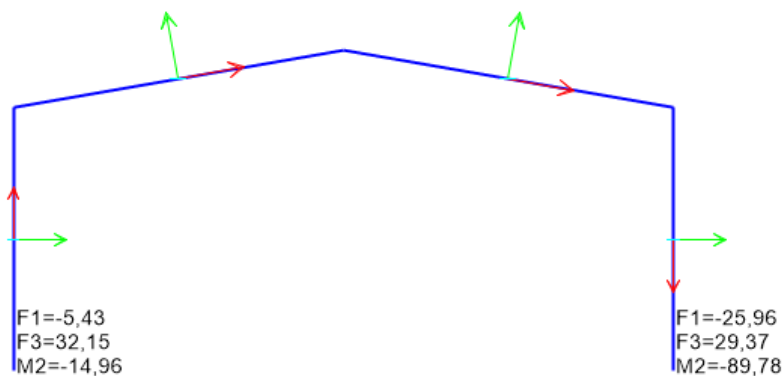


Figura 196. Reacciones pórtico 2 SAP2000.

Los valores obtenidos son semejantes, pero se alejan un poco en cuanto a los valores de reacciones de los casos anteriores.

Ahora se pasa a comparar los desplazamientos en los extremos de las vigas que forman el pórtico.

Desplazamientos:

CYPE:

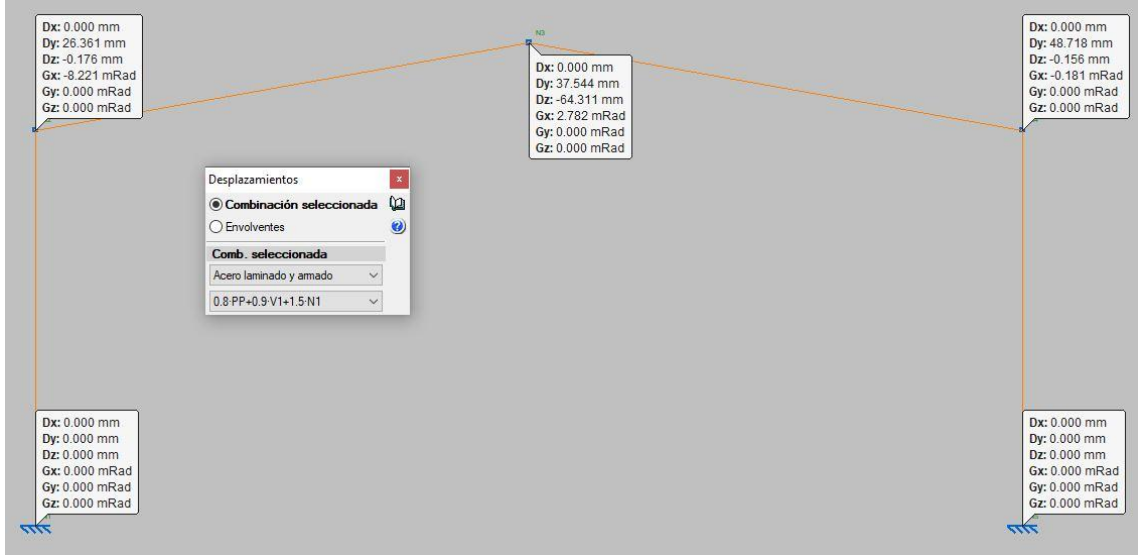


Figura 197. Desplazamientos pórtico 2 CYPE.

SAP 2000:

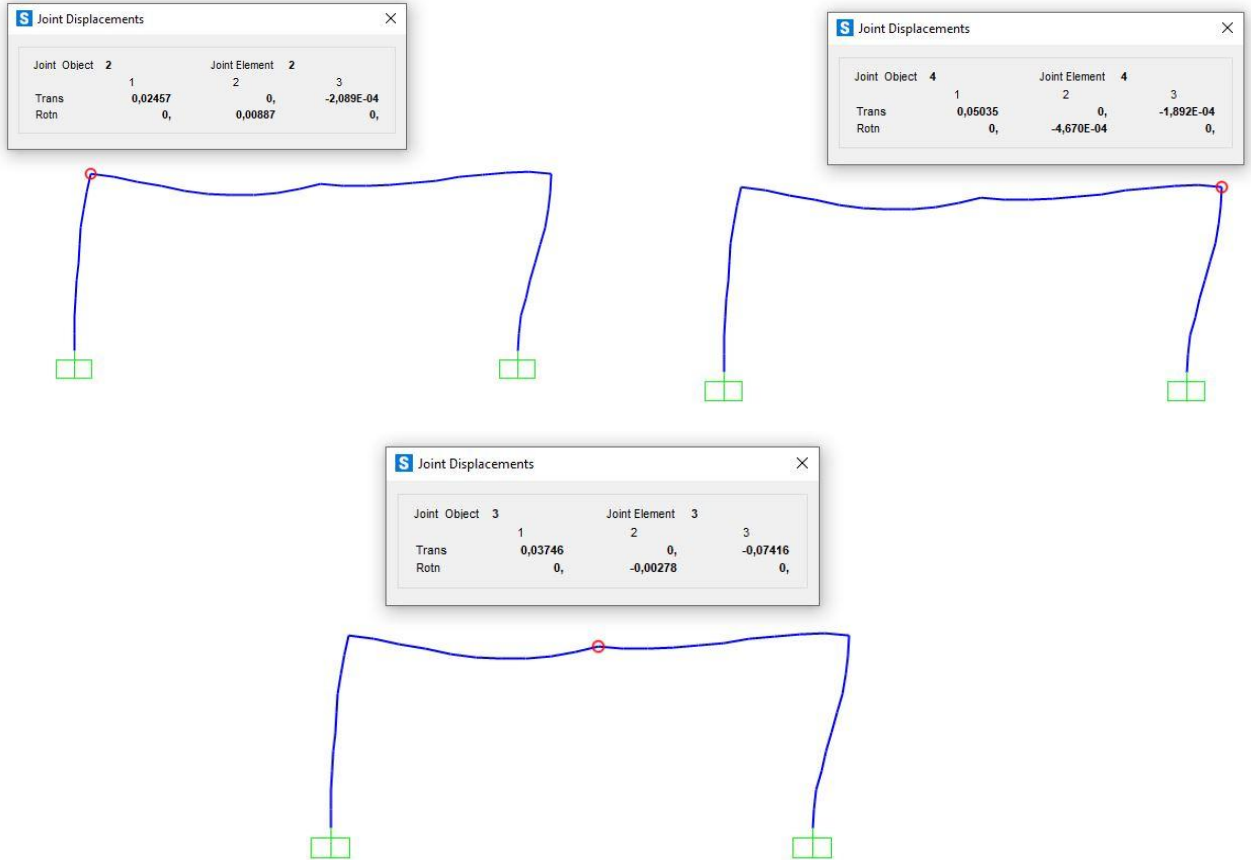


Figura 198. Desplazamientos pórtico 2 SAP2000.

Los valores obtenidos de desplazamientos, de la misma manera que en las reacciones son similares en ambos programas, pero se alejan un poco a diferencia de los casos anteriores.

Ahora se compararán las gráficas de esfuerzos (axil, cortante y momento flector).

Axil:

CYPE:

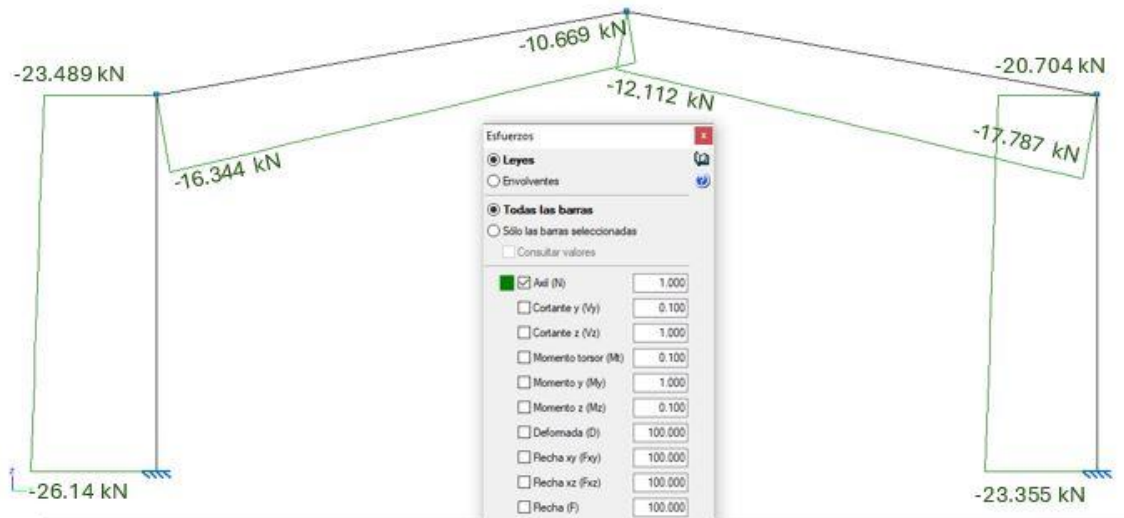


Figura 199. Axil pórtico 2 CYPE.

SAP 2000:

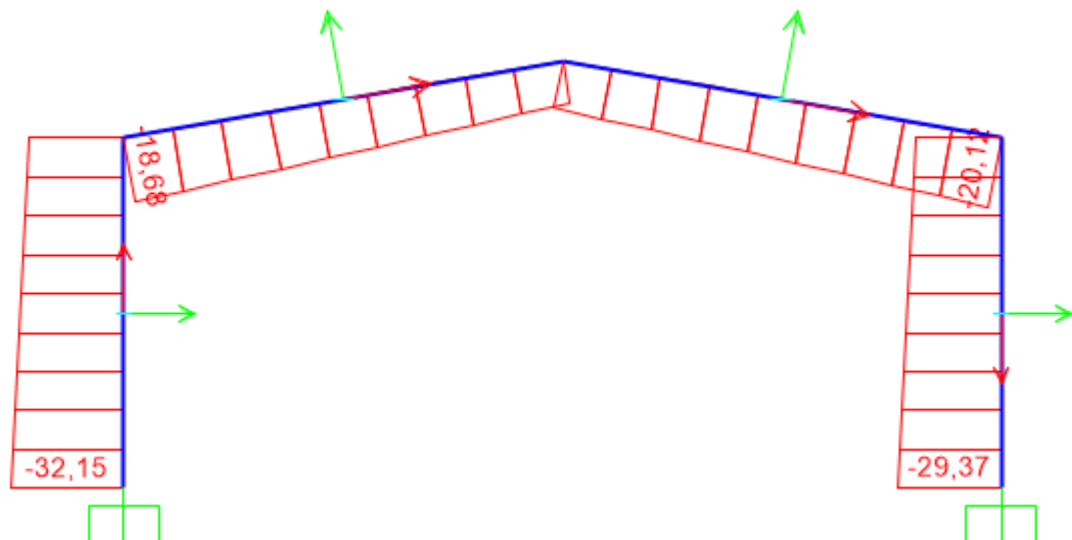


Figura 200. Axil pórtico 2 SAP2000.

Los valores de esfuerzo axial obtenidos en ambos programas son similares, pero al igual que las reacciones y desplazamientos se alejan un poco entre un programa y otro a diferencia de los casos de estudio anteriores.

Cortante:

CYPE:

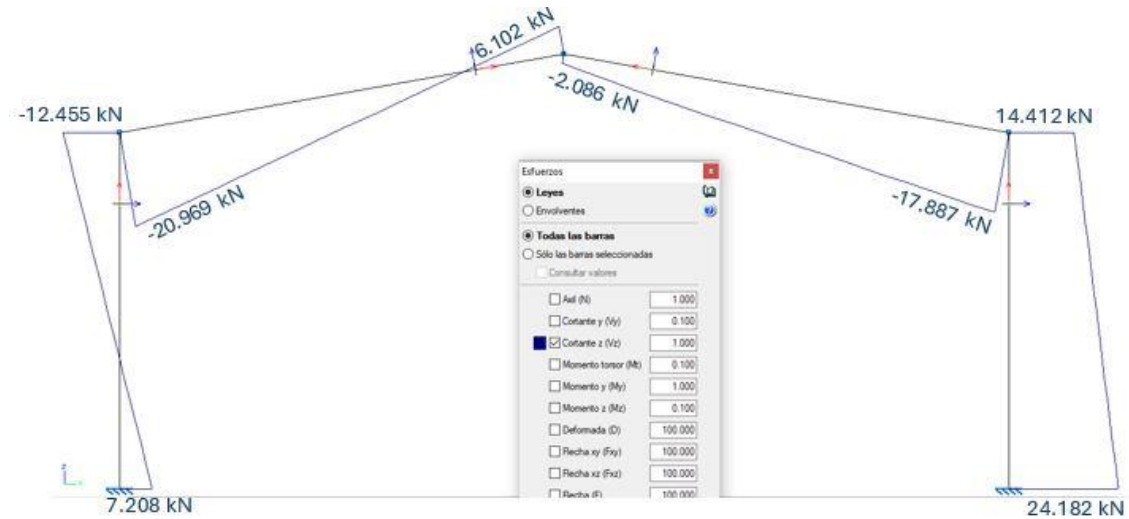


Figura 201. Cortante pórtico 2 CYPE.

SAP 2000:

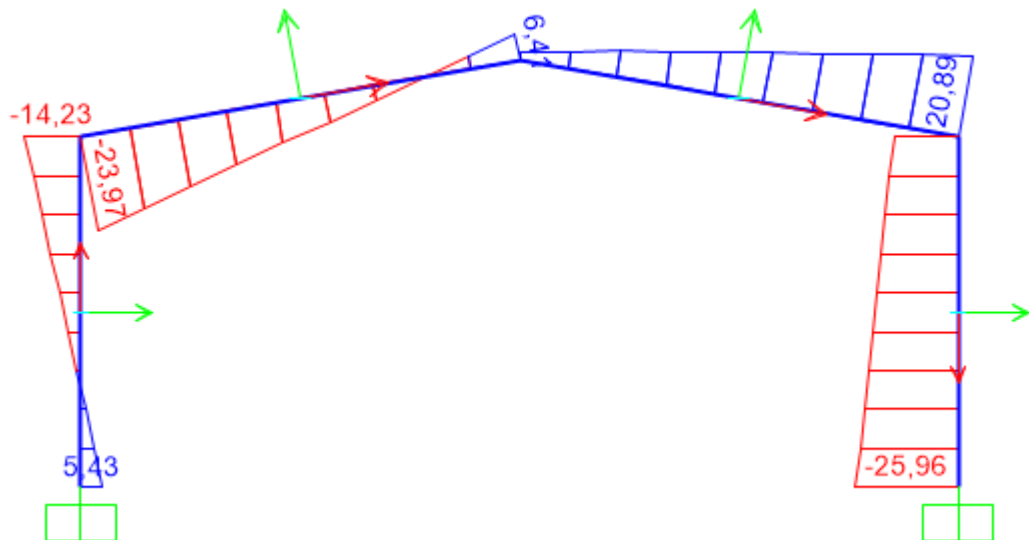


Figura 202. Cortante pórtico 2 SAP2000.

Los valores de esfuerzos cortante obtenidos en ambos programas son similares.

Momento Flector:

CYPE:

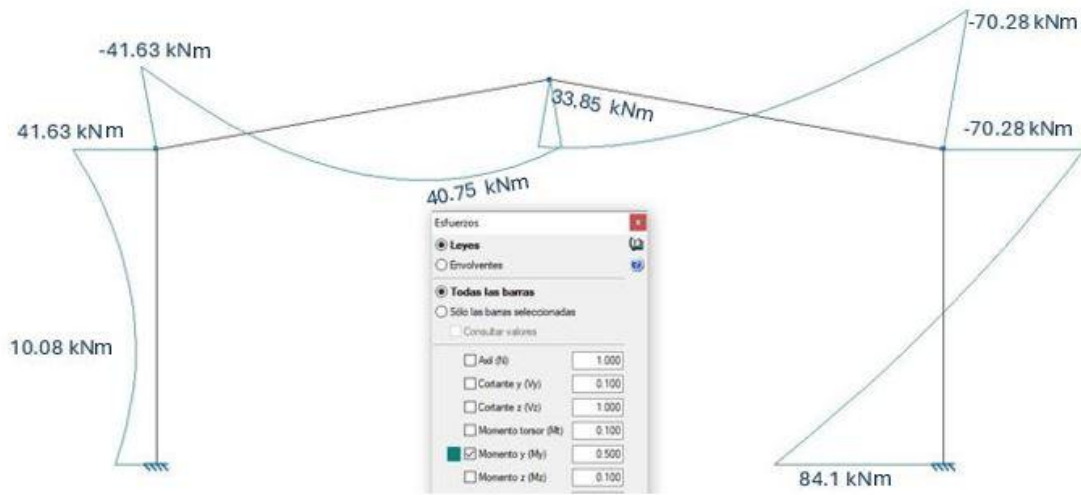


Figura 203. Momento flector pórtico 2 CYPE.

SAP 2000:

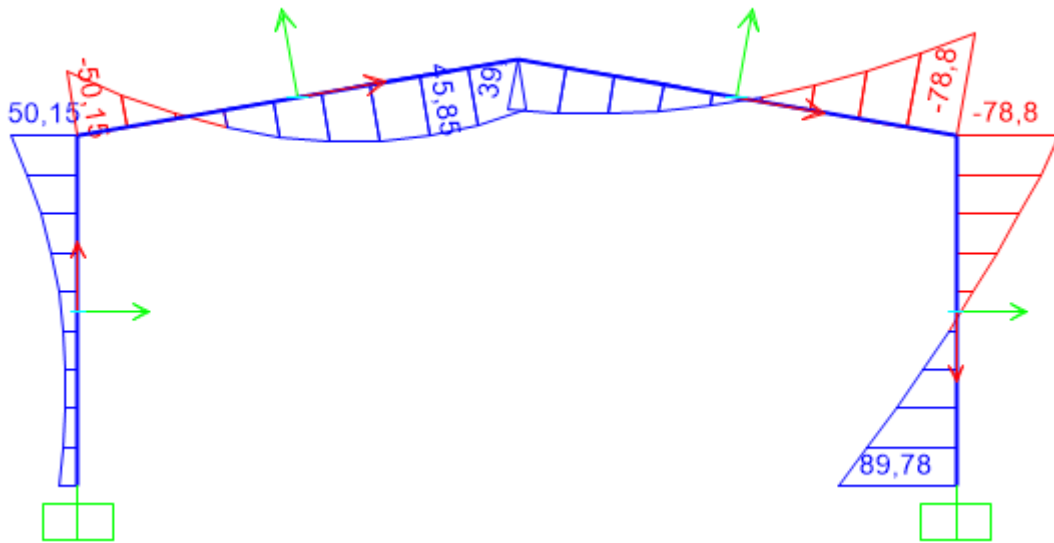


Figura 204. Momento flector pórtico 2 SAP 2000.

Los valores de esfuerzos de momento flector obtenidos en ambos programas son similares.

Por último, se compara la deformada:

Deformada:

CYPE:

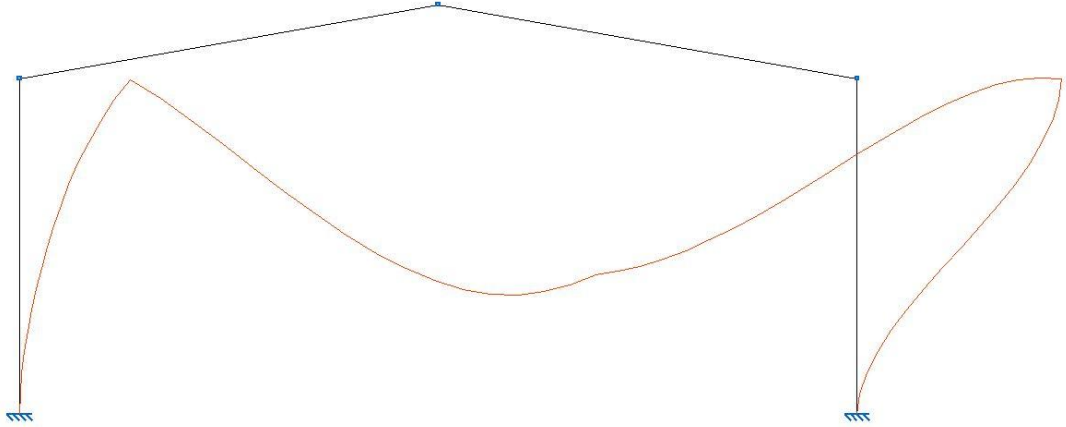


Figura 205. Deformada pórtico 2 CYPE.

SAP 2000:

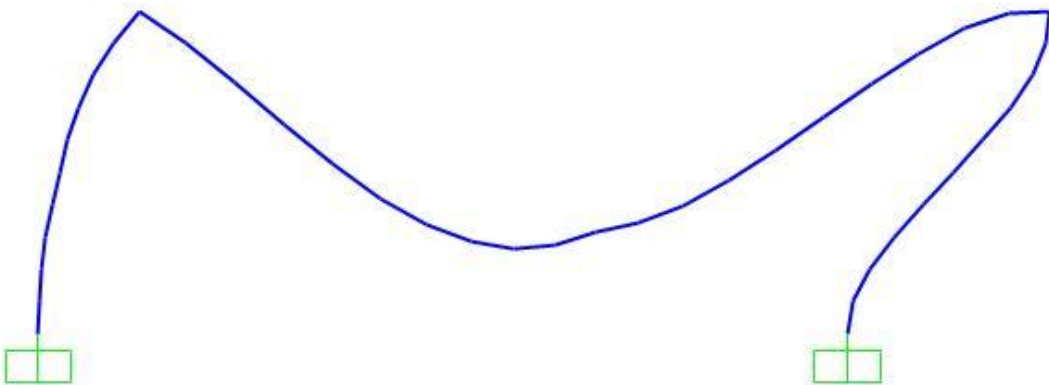


Figura 206. Deformada pórtico 2 SAP2000.

Ambas deformadas tienen una escala multiplicadora de 100.

Ahora se pasa a la comparación de resultados del estudio a pandeo:

Una vez realizado el cálculo a pandeo podemos ver los distintos modos de pandeo que hemos obtenido y vamos a quedarnos con el modo que nos pandee dentro del plano y con menor coeficiente.

Pandeo:

CYPE:

Dentro de CYPE se pueden ver los modos de resultados de dos formas diferentes:

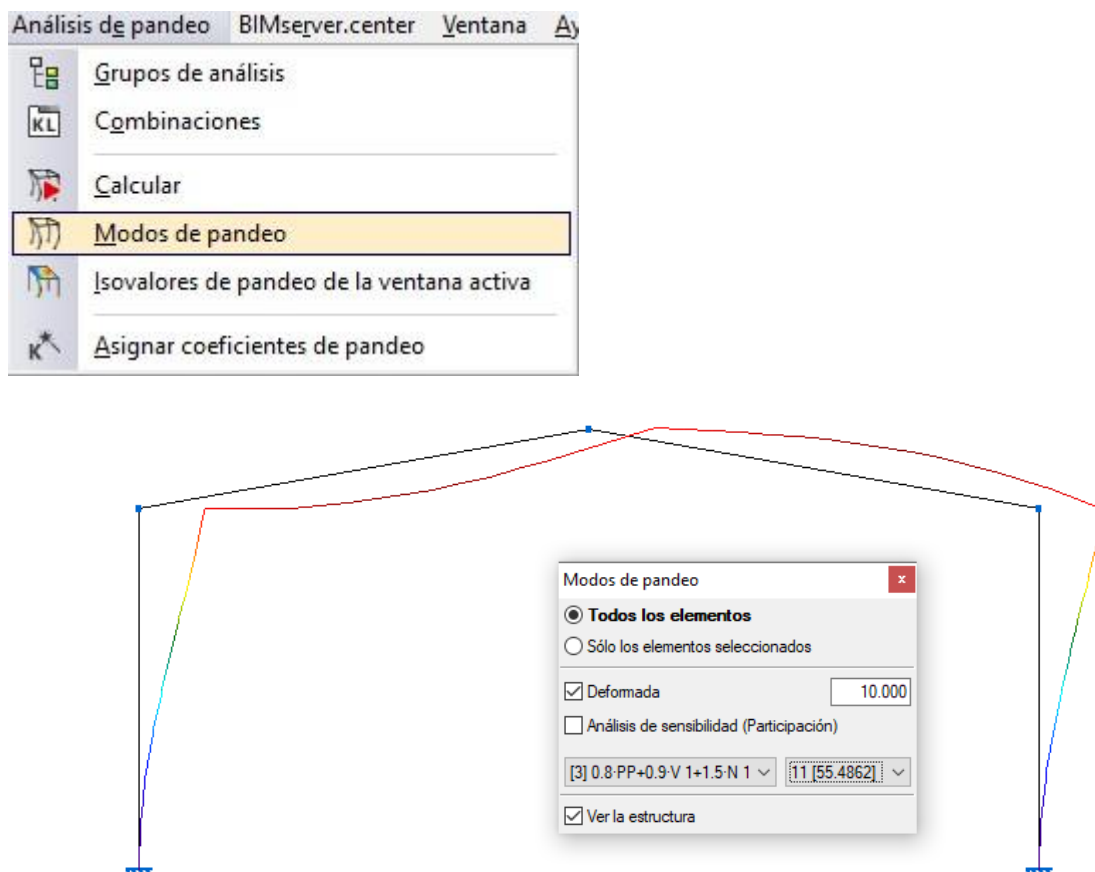


Figura 207. Resultado modos de pandeo pórtico 2 CYPE.

También hay otra forma en la que se puede observar la deformada y es más visual, ya que representa los perfiles de la estructura en 3D.

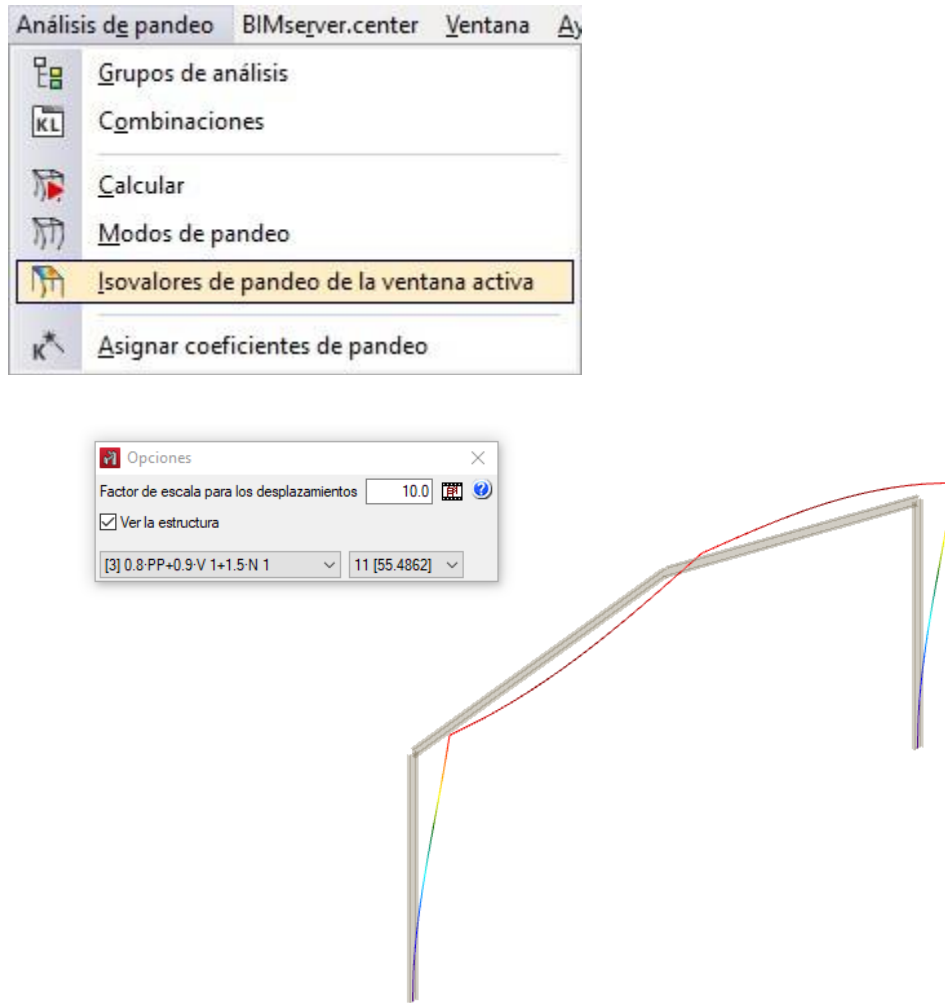


Figura 208. Resultado isovalores pórtico 2 CYPE.

En ambos casos el factor multiplicador de los desplazamientos es 10.

El isovalor de pandeo obtenido y que me interesa ya que pandea dentro del plano es 55.4862 para la combinación de cargas que estamos estudiando.

SAP 2000:

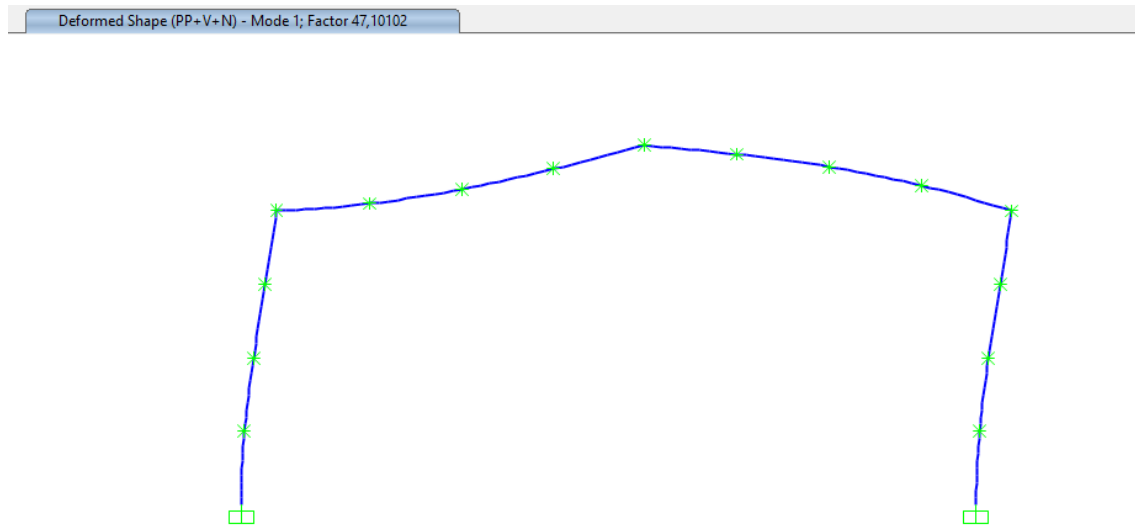


Figura 209. Resultado isovalores pórtico 2 SAP2000.

En SAP 2000 el resultado de isovalor obtenido es 47,10102.

Este valor obtenido significa que, con la combinación de cargas y sus coeficientes multiplicadores, la estructura soportaría 55.4862 veces esa carga en el caso de CYPE y 47.10102 en el caso de SAP 2000. Son valores similares, pero se alejan un poco entre un programa y otro a diferencia del segundo caso de estudio.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.

6.1- CONCLUSIONES FINALES.

Para el **primer caso de estudio**, en el que la estructura es una **barra rígida** de longitud 20 metros con apoyos fijos en los extremos con la carga “Sobrecarga de uso” uniforme y de valor 6kN/m. La conclusión del estudio es que los resultados obtenidos tanto en reacciones y desplazamientos como en esfuerzos son iguales prácticamente, por lo tanto, sería indiferente estudiarlo con uno u otro software. En este primer caso no se ha estudiado a pandeo ya que la barra está sometida a flexión únicamente y por lo tanto, no va a pandear.

Para el **segundo caso de estudio**, en el que la estructura es un **pórtico rígido** a dos aguas biempotrado con la carga “**Sobrecarga de uso**” uniforme y de valor 6kN/m. La conclusión del estudio es que los resultados obtenidos tanto en reacciones y desplazamientos como en esfuerzos son muy parecidos, por lo tanto, sería indiferente estudiarlo con uno u otro software. En este segundo caso se ha estudiado el pandeo, ya que las barras que forman el pórtico están sometidas a compresión y los valores obtenidos han sido iguales, eso indica que es indiferente utilizar un software u otro.

Para el **tercer caso de estudio**, en el que la estructura es un **pórtico rígido** a dos aguas biempotrado **con las cargas de viento, nieve y peso propio**. La conclusión del estudio es que los valores de reacciones, esfuerzos y coeficientes de pandeo son parecidos, pero se distancian más que en los casos anteriores y esto se explica por el método de cálculo de cada programa. Para el estudio de pandeo, en CYPE podemos definir el comportamiento de la estructura frente al pandeo lateral y pandeo mientras que en SAP 2000 lo considera automáticamente.

Como se puede observar ambos softwares son compatibles para realizar un estudio de una estructura sencilla ya que los resultados obtenidos son muy similares, pero cuando la estructura y cargas son más compleja los resultados que se obtienen se diferencian y por tanto, se tendría que decidir teniendo en cuenta si se quiere utilizar un programa más o menos restrictivo.

6.2- LÍNEAS DE MEJORA.

Una posible mejora para obtener un cálculo más preciso y realista del pórtico de una nave industrial sería crear cartelas y definir correctamente los diferentes tipos de uniones entre pilar y dintel.

Otra posible mejora para realizar un cálculo más preciso sería definir el tipo de zapata de cimentación de la hipotética nave de estudio según el tipo de terreno donde se va a edificar.

Estas opciones serían viables a estudiar en ambos programas de cálculo.

En SAP 2000 se puede definir el elemento cartela, pero no se puede definir la unión, pero en CYPE se pueden definir tanto la cartela como la unión.

Una última posible mejora podría ser hacer el estudio completo de la nave industrial, conjunto de pórticos y estudiar su comportamiento a las diferentes cargas aplicadas.

6.3-CONSIDERACIONES ADICIONALES.

El desplazamiento y el pandeo fuera del plano de trabajo de las estructuras a estudiar está impedido.

El estudio se ha realizado con un material metálico, se podría realizar un estudio de las mismas estructuras con otros materiales, como pueden ser hormigón o madera...

Se podría hacer un estudio con otros programas de cálculo de estructuras (ETABS, Tekla Structures...)

Se podría realizar un estudio económico de cada estructura a estudiar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] "Avial Azcunaga, Fernando Rodríguez. Construcciones metálicas. s.l. : Bellisco ediciones."
- [2] "CYPE 2008: Cálculo de estructuras metálicas con Nuevo Metal 3D" Antonio Manuel Reyes. Ed: Anaya Multimedia. 2008.
- [3] "La estructura metálica de hoy" Ramón Argüelles Álvarez. Ed: Librería Técnica Bellisco 1975-1987.
- [4] "Estructuras metálicas para edificación: adaptado al CTE" Jose Monfort Lleontart. Ed UPV. 2006
- [5] "Análisis y diseño de estructuras con SAP 2000 v15". Ed. Macro
- [6] "Spain, CSI. CSI Spain SAP2000. CSI Spain SAP2000. [En línea] CSI Spain, 2020. <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000/>." (09/09/2024)
- [7] "EC-3. (2013). Eurocódigo 3. Norma UNE-EN 1993-1-1 *Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios*. Madrid: AENOR."
- [8] <https://skyciv.com/es/docs/tutorials/load-tutorials/types-of-loads/> (06/09/2024)
- [9] "Cálculo de aplicaciones reales con metal 3D". Editor: Antonio Madrid Vicente
- [10] "Estructuras de acero. Tomo 5-Naves industriales" J.Fernández Diezma, R.Argüelles Bustillo.