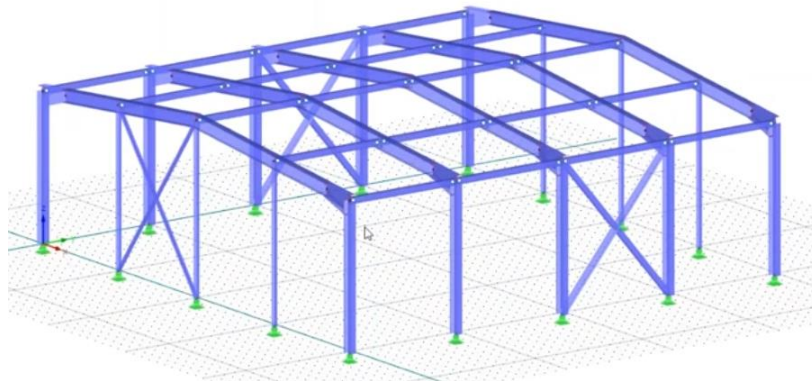


MÉTODO DE ANÁLISIS DIRECTO (D.A.M) PARA ESTRUCTURAS METÁLICAS, APLICANDO RFEM5

Válido para normativa AISC 360 y los reglamentos latinoamericanos derivados de éste, como el Cirsoc 301 de Argentina, por ejemplo, entre otros.

Dada una estructura metálica:



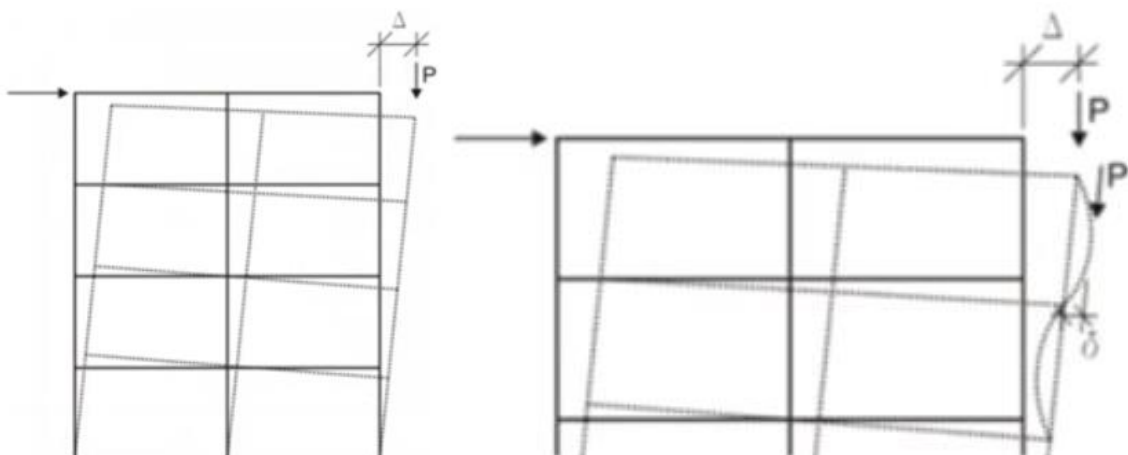
El método de análisis directo, o “DAM”, por sus siglas en inglés, es una metodología de análisis estructural que contempla consideraciones de inestabilidad, no linealidad geométrica, desplome, rigidez e incertidumbres, para la determinación de solicitaciones, esfuerzos y reacciones en elementos. SU justificación se basa en que permite encontrar esfuerzos y solicitaciones más reales que otros métodos, o que simplemente aplicar análisis lineal y de primer orden.

Con esto, se consigue esfuerzos y reacciones más reales en elementos y apoyos, y se puede aplicar factores de longitud efectiva $K = 1$ en todas las barras. Solucionando el tema de la aplicación de metodologías tediosas para su determinación en estructuras de cierta complejidad.

DAM ha sido seleccionado como el método de preferencia por el AISC 360, desde el año 2010, reemplazando al método de longitud efectiva, quien ahora tiene aplicaciones reducidas y es un método secundario.

Requisitos, presentados en AISC 360 desde el año 2010, como método preferible, en el Capítulo C:

- 1) Tomar en cuenta deformaciones de corte, flexión y axil en miembros.
- 2) Considerar efectos de segundo orden (P delta mayúscula y minúscula).



3) Considerar imperfecciones geométricas (desplome).

- (1) Las cargas ficticias deberán ser aplicadas como cargas laterales en todos los niveles. Las cargas ficticias deberán añadirse a las otras cargas laterales consideradas e incorporarse en las combinaciones de carga correspondientes, excepto en lo indicado en (4). La magnitud de las cargas ficticias debe ser:

$$N_i = 0,002\alpha Y_i \quad (C2-1)$$

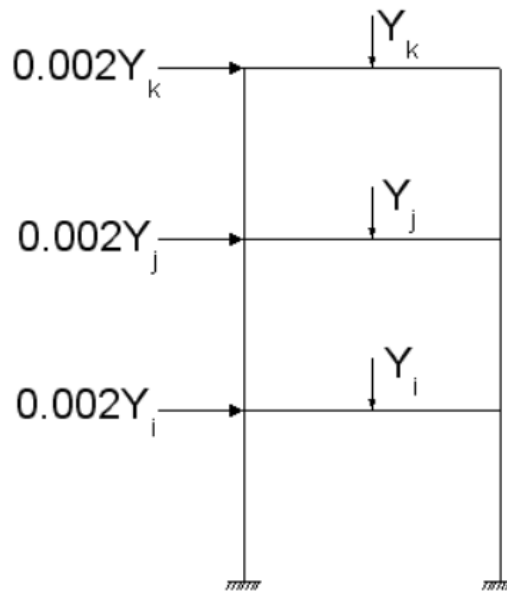
donde

$\alpha = 1,0$ (LRFD); $\alpha = 1,6$ (ASD)

N_i = carga ficticia aplicada en el nivel i , kgf (N)

Y_i = carga gravitacional aplicada en el nivel i de acuerdo con las combinaciones de carga LRFD o ASD, según corresponda, kgf (N)

Las cargas nocionales, son cargas equivalentes a un desplome de 1/500 en la altura del elemento. Un ejemplo de cargas nocionales es el siguiente:



El Método de análisis directo (DAM) permite dos opciones para considerar las imperfecciones geométricas:

- Se podría modelar la imperfección o desplome directamente (como hace RFEM).
- Modelar cargas nocionales, equivalentes a un desplome de 1/500 en los nudos donde se vinculan columnas y vigas (por nivel), considerando la carga gravitatoria que llega allí (como hacen programas como Sap2000 o Etabs).

4) Usar una reducción en rigidez axial y flexional.

3. Ajustes en la rigidez

El análisis de la estructura debe usar rigideces reducidas con tal de determinar las resistencias requeridas de los distintos componentes, como se indica a continuación

- (1) Un factor de 0,80 debe ser aplicado a todas las rigideces que se considere que contribuyen a la estabilidad de la estructura. Se permite el aplicar esta reducción a todas las rigideces de la estructura.

Nota: El aplicar una reducción de la rigidez en ciertos miembros y no en otros, puede llevar en ciertos casos a una distorsión artificial de la estructura bajo carga y sin intención a una posible redistribución de fuerzas. Esto puede evitarse aplicando dicha reducción a todos los miembros, incluyendo aquellos que no contribuyen a la estabilidad de la estructura.

- (2) Un factor adicional, τ_b , deberá ser aplicado en la rigidez a flexión de todos los miembros cuya rigidez a flexión se considere que contribuye a la estabilidad de la estructura.

(a) Cuando $\alpha P_r/P_y \leq 0,5$

$$\tau_b = 1,0 \quad (C2-2a)$$

(b) Cuando $\alpha P_r/P_y > 0,5$

$$\tau_b = 4(\alpha P_r/P_y)[1-(\alpha P_r/P_y)] \quad (C2-2b)$$

donde

$$\alpha = 1,0 \text{ (LRFD)}$$

$$\alpha = 1,6 \text{ (ASD)}$$

P_r = resistencia a compresión axial requerida usando combinaciones de carga LRFD o ASD, Kgf (N)

P_y = resistencia axial de fluencia ($= F_y A_g$), kgf (N)

Nota: Tomados juntos, Secciones (1) y (2) requieren el uso de $0,8 \tau_b$ veces la rigidez nominal elástica a flexión y $0,8$ veces las otras rigideces nominales elásticas para miembros estructurales de acero en el análisis.

- (3) En estructuras en que la Sección C2.2b es aplicable, en vez de usar $\tau_b < 1,0$ donde $\alpha P_r/P_y > 0,5$, se permite el uso de $\tau_b = 1,0$ para todos los miembros si la carga ficticia de $0,001\alpha Y_i$ [Y_i definido en Sección C2.2b (1)] es aplicada en todos los niveles, en la dirección especificada en Sección C2.2b (2), en todas las combinaciones de carga. Estas cargas ficticias deben ser agregadas en aquellas, si existieran, usadas para considerar las imperfecciones, no estando sujetas a la Sección C2.2b (4).
- (4) Donde componentes compuestos de materiales distintos al acero estructural que contribuyen a la estabilidad de la estructura son considerados, y los códigos y especificaciones para estos materiales requieren reducciones de rigidez mayores, dichas mayores reducciones deberán ser aplicados solo a dichos componentes.

5) Considerar incertidumbres en rigidez y resistencia.

Esto permitirá considerar un factor de longitud efectiva, **K de 1 (uno)**, para el diseño de columnas o elementos comprimidos.

Una comparación entre el Método de análisis directo (DAM) y el Método de longitud efectiva (ELM), aplicando las consideraciones mencionadas en los 5 puntos principales anteriores es la siguiente, presentado en los comentarios de AISC 360, Cap. C:

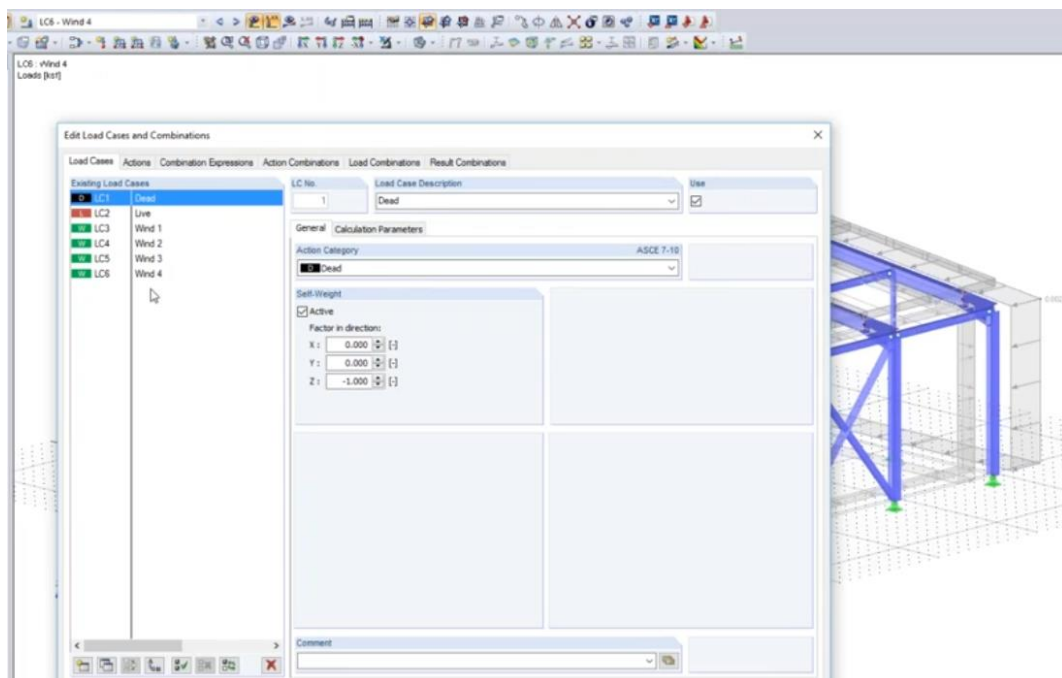
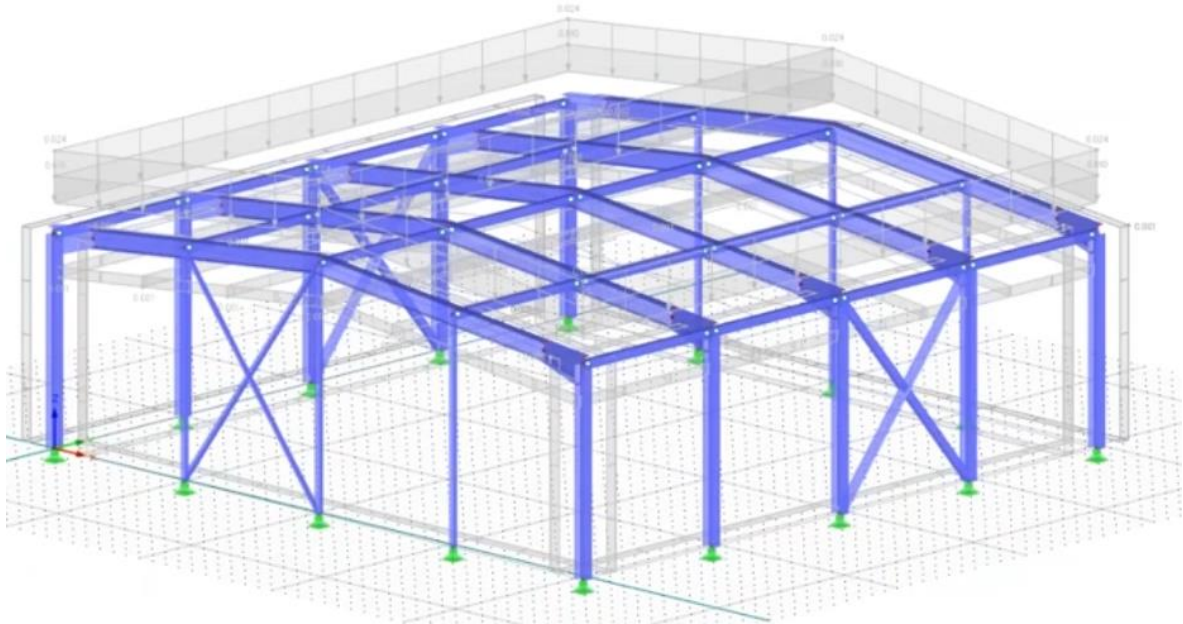
TABLA C-C1.1
Comparación de los Requerimientos Básicos de Estabilidad con las Disposiciones Específicas

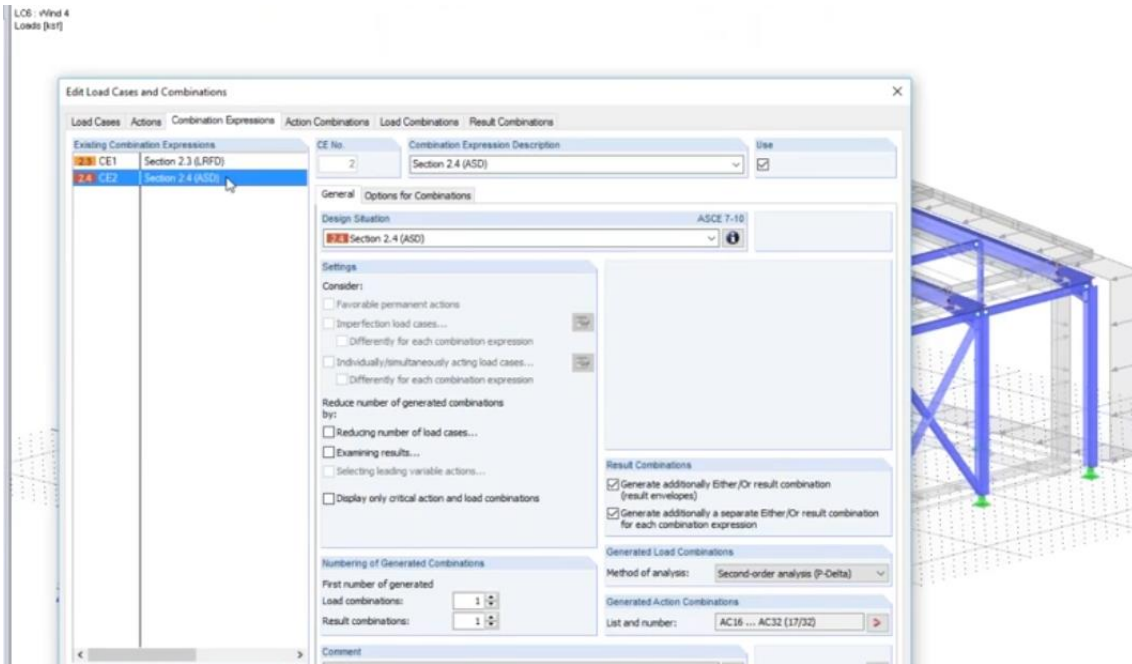
Método Requerimientos Básicos en Sección C1		Disposiciones en Método de Análisis Directo (DAM)	Disposiciones en de Longitud Efectiva (ELM)
(1) Considerar todas las deformaciones		C2.1(1) considera todas las deformaciones	Igual a DAM (por referencia a C2.1)
(2) Considerar los efectos de segundo orden (P-Δ y P-δ)		C2.1(2) Considera los efectos de segundo orden (P-Δ y P-δ)**	Igual a DAM (por referencia a C2.1)
(3) Considerar las imperfecciones geométricas. Esto incluye imperfecciones en la ubicación de uniones* (las que afectan la respuesta estructural) e imperfecciones en los miembros (las que afectan la respuesta estructural y la resistencia del miembro)	Efecto de las imperfecciones en la posición de las uniones en la respuesta estructural	C2.2a Modelado Directo o C2.2b Cargas ficticias	Igual a DAM, solo la segunda opción (por referencia a C2.2b)
	Efecto de las imperfecciones de los miembros en la respuesta estructural	Incluido en la reducción de rigidez especificada en C2.3	Todos estos efectos están considerados en el uso de KL de un análisis de pandeo lateral en la verificación de la resistencia del miembro. Note que la única diferencia entre DAM y ELM es que: * DAM usa rigideces reducidas en el análisis; KL=L en la verificación de la resistencia del miembro. * ELM usa rigidez completa en el análisis; KL para pandeo lateral en la verificación de la resistencia del miembro para elementos de marco
	Efecto de las imperfecciones en la resistencia de los miembros	Incluido en las formulas de resistencia de los miembros con KL=L	
(4) Considerar las reducciones de rigidez debido a inelasticidad. Esto afecta la respuesta estructural y la resistencia del miembro	Efectos de la reducción de rigidez en la respuesta estructural miembro	Incluido en la reducción de rigidez especificada en C2.3	
(5) Considerar incertezas en la resistencia y la rigidez. Esto afecta la respuesta estructural y la resistencia del miembro	Efectos de la reducción de rigidez en la resistencia del miembro	Incluido en las fórmulas de resistencia de los miembros con KL=L	
	Efectos de las incertezas en rigidez/resistencia en la respuesta estructural	Incluido en la reducción de rigidez especificada en C2.3	
		Efectos de las incertezas en rigidez/resistencia en la resistencia del miembro	Incluido en las formulas de resistencia de los miembros con KL=L
* En las estructuras típicas de edificios, las "imperfecciones en la ubicación de las uniones" se refieren al desaplome de la columna			
** Los efectos de segundo orden deben de ser considerados ya sea por un rigurosos análisis de segundo orden o por la técnica aproximada (usando B ₁ y B ₂) en Anexo 8.			

Pasos a seguir en RFEM5:

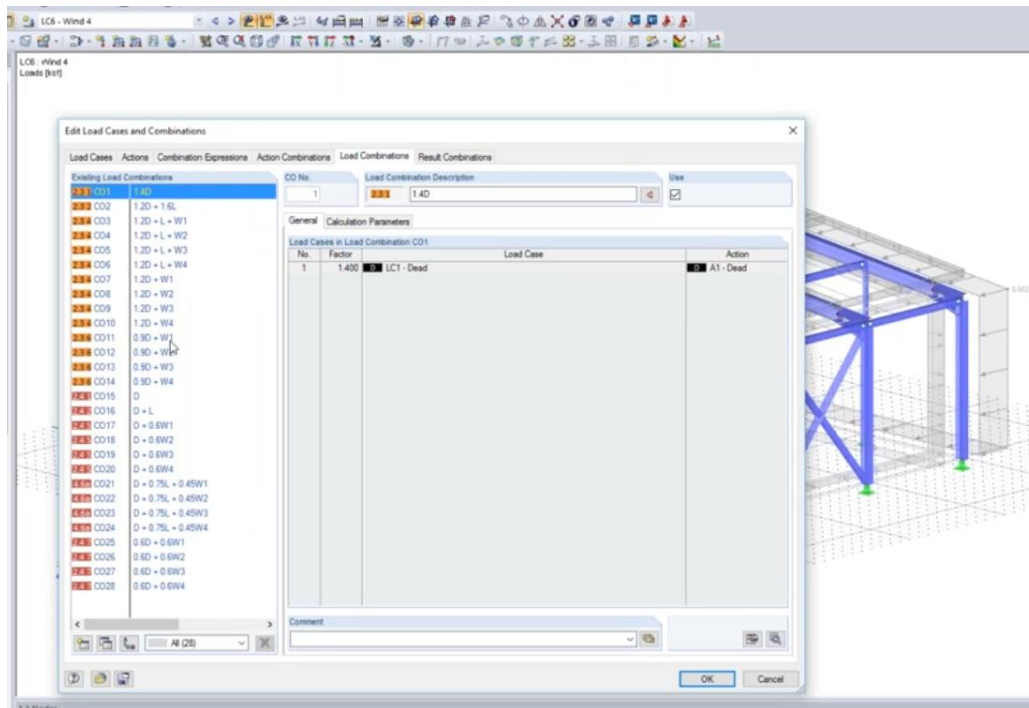
Paso 1:

Modelamos estructura, apoyos, cargas gravitatorias y de viento y sismo (si fuese aplicable).

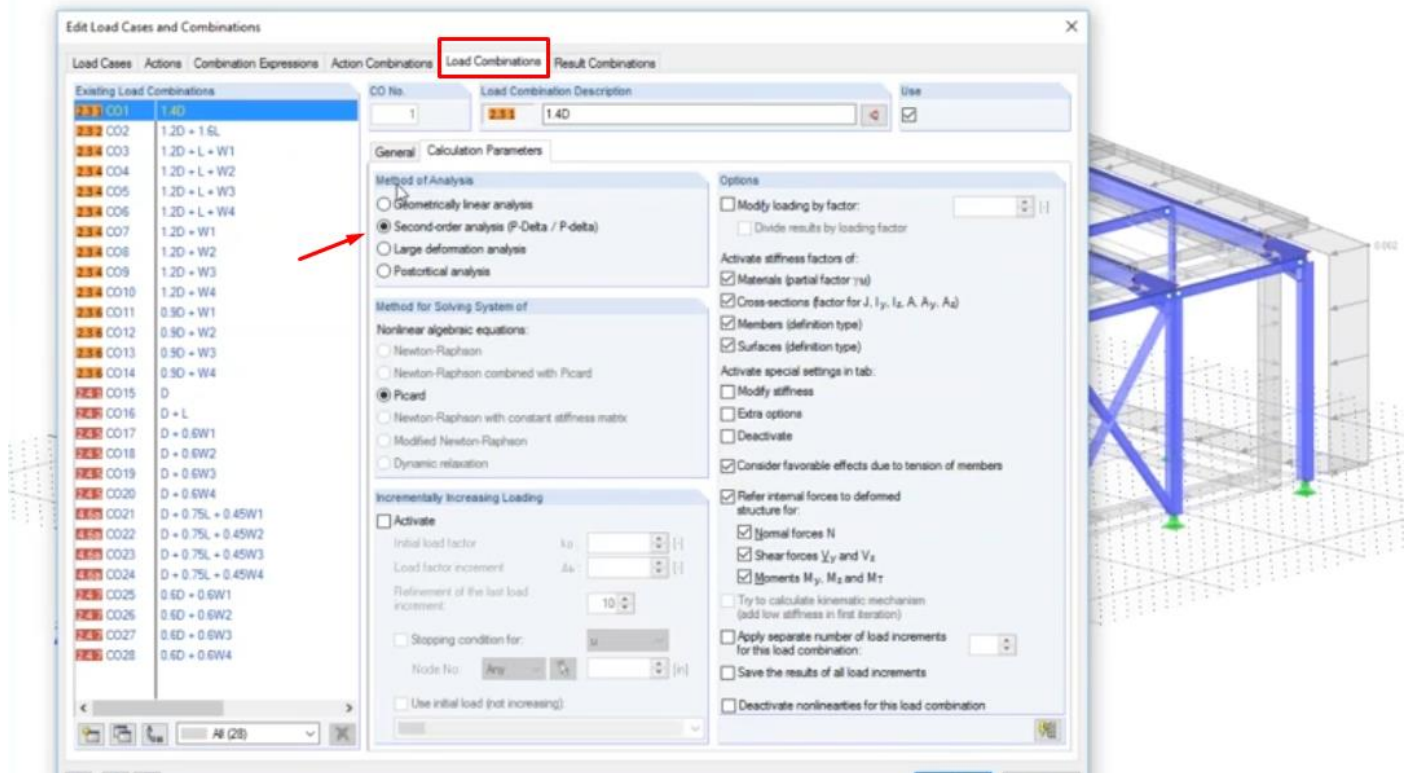




En Este ejemplo, las combinaciones de carga fueron realizadas con ASCE 7 2010 (considerando viento extremo, y, por ende, sin mayorar). Pero esto podría hacerse, sin problemas, con cualquier normativa:



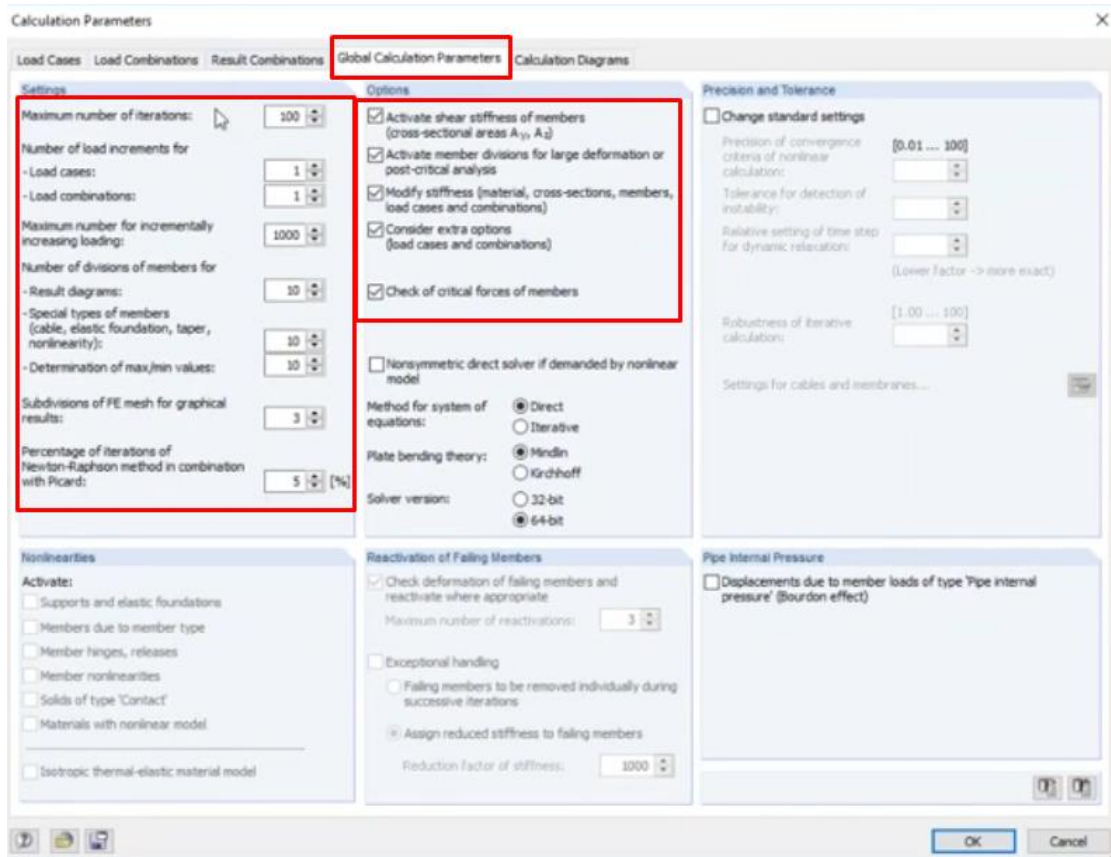
Notar el lugar en donde se aplica la no linealidad geométrica (sólo a las combinaciones), para considerar los efectos P-delta.



Paso 2:

Parámetros de cálculo (para P delta mayúscula y minúscula):

Corroborar iteraciones para análisis no lineal. El número máximo de iteraciones puede andar cerca de 100. Si no encontramos convergencia, podríamos aumentarlo. De ser necesario, se podría cambiar la precisión y tolerancia. Pero no es algo muy común.



Paso 3:

Comparamos si las deformaciones en 1er orden con respecto a las de 2do orden (con los efectos p delta) serán significativas o no. Con lo que podríamos utilizar dos opciones de comparación:

$$\frac{\Delta_{2doOrden}}{\Delta_{1erOrden}} < 1,7 \text{ (para elementos con rigidez reducida)}$$

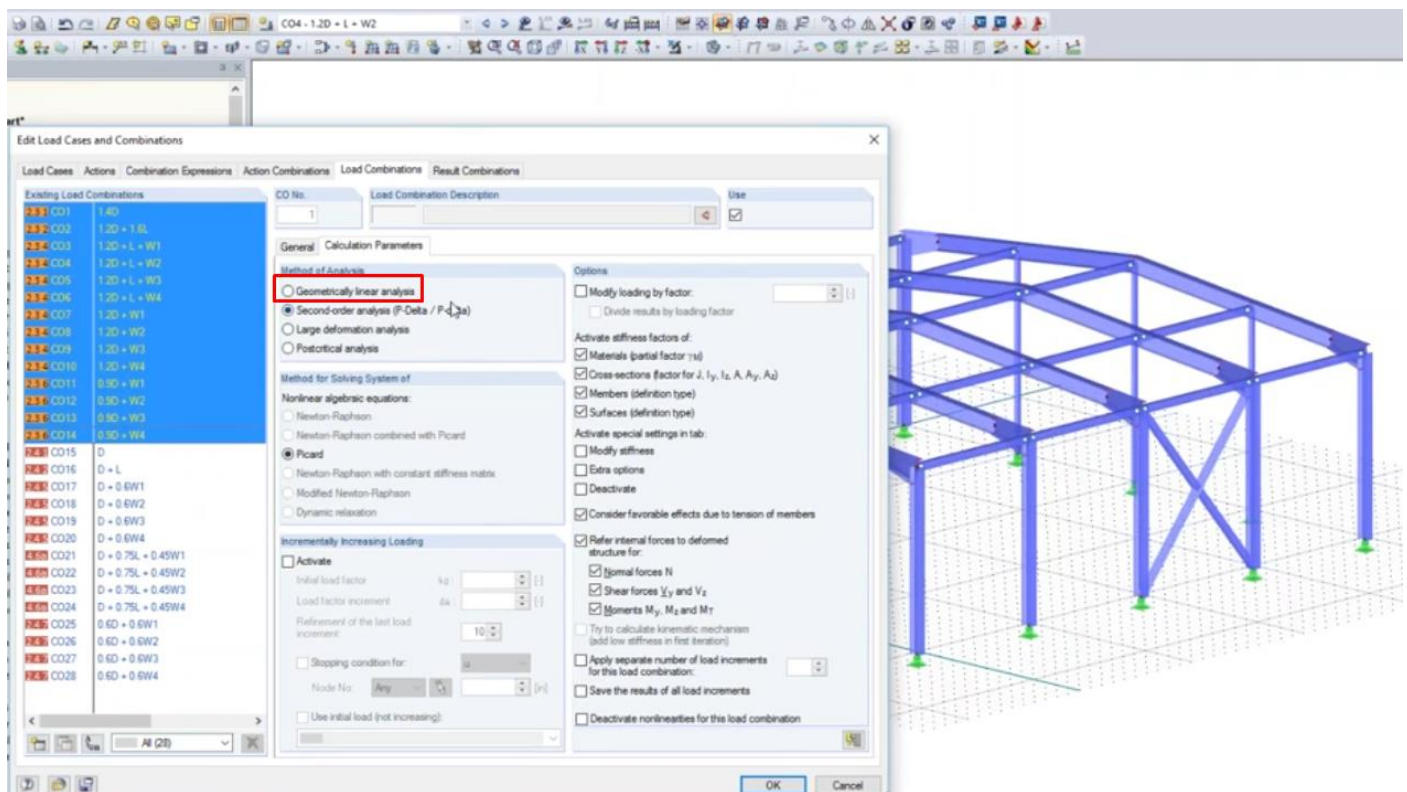
$$\frac{\Delta_{2doOrden}}{\Delta_{1erOrden}} < 1,5 \text{ (para elementos con rigidez sin reducir)}$$

Siendo “delta” las derivas de piso (desplazamiento de nudo superior, menos desplazamiento de nudo inferior, dividido por la altura del nivel). En estructuras de una planta, se podría utilizar tranquilamente el desplazamiento del nivel, simplemente.

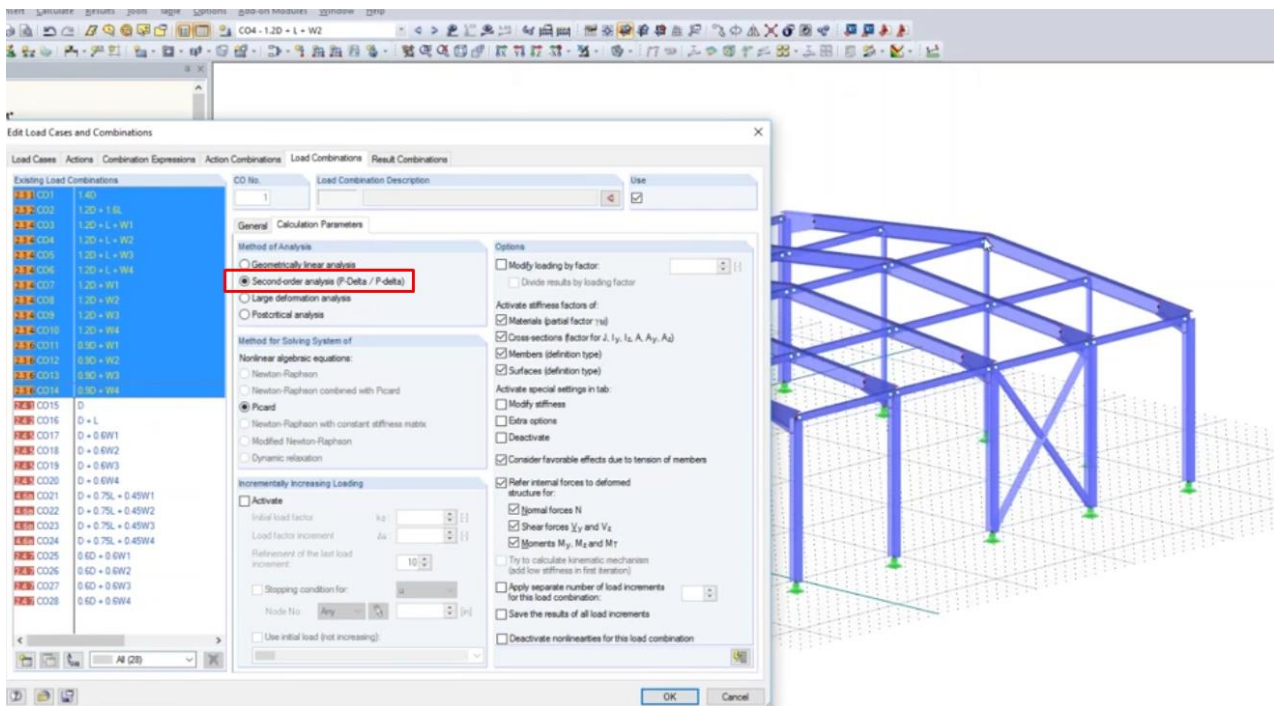
Entonces, podemos no aplicar el desplome o las cargas nocionales a las combinaciones que ya tienen cargas laterales (viento o sismo). Y sólo utilizar el desplome o las cargas nocionales en las combinaciones gravitatorias.

Para ello debemos hacer dos corridas del modelo:

Primero hacemos el análisis de las combinaciones en primer orden y vemos los desplazamientos:



Luego, corremos el modelo, aplicando el análisis en segundo orden para las mismas combinaciones.



Tomamos nota de los resultados, y comparamos.

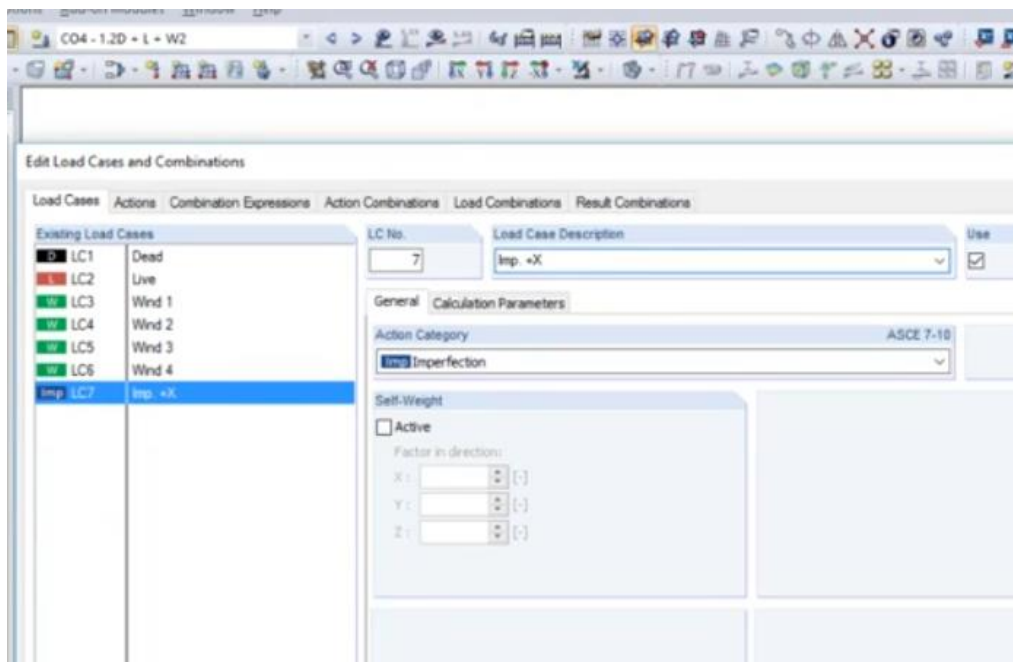
En función de la relación mencionada más arriba, podremos determinar si incluimos las imperfecciones (Desplome o cargas nocionales adicional) en las combinaciones gravitatorias únicamente, o en todas (incluyendo las laterales).

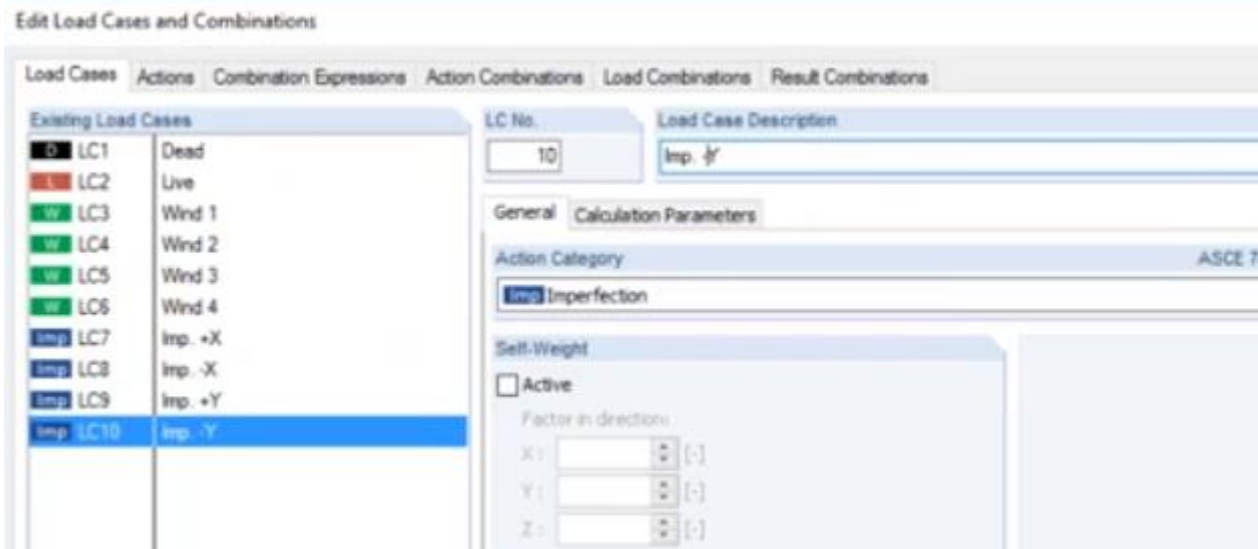
Paso 4:

Inclusión de las imperfecciones geométricas, de 1/500, en columnas (aplicado a las combinaciones que ya revisamos en el punto anterior, en función de la comparación entre desplazamientos de primer y segundo orden):

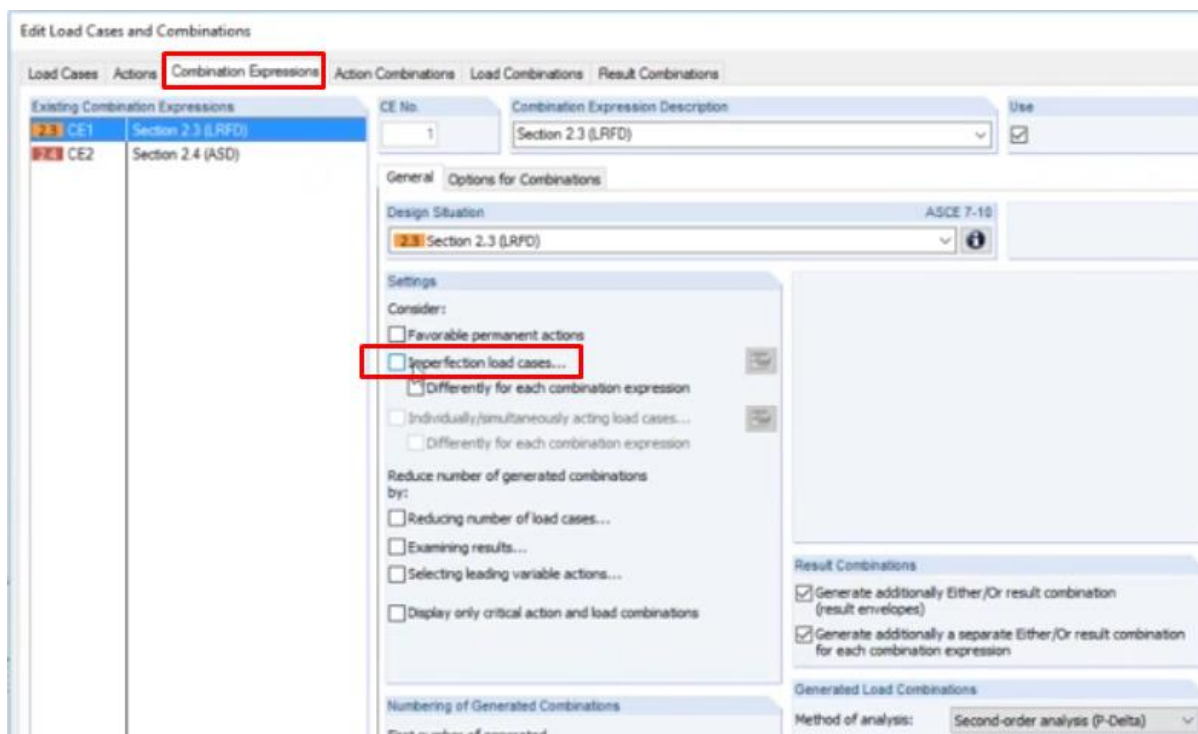
Deben considerarse en 2 direcciones y dos sentidos por cada una.

Entonces, primero generamos las cargas de imperfección:

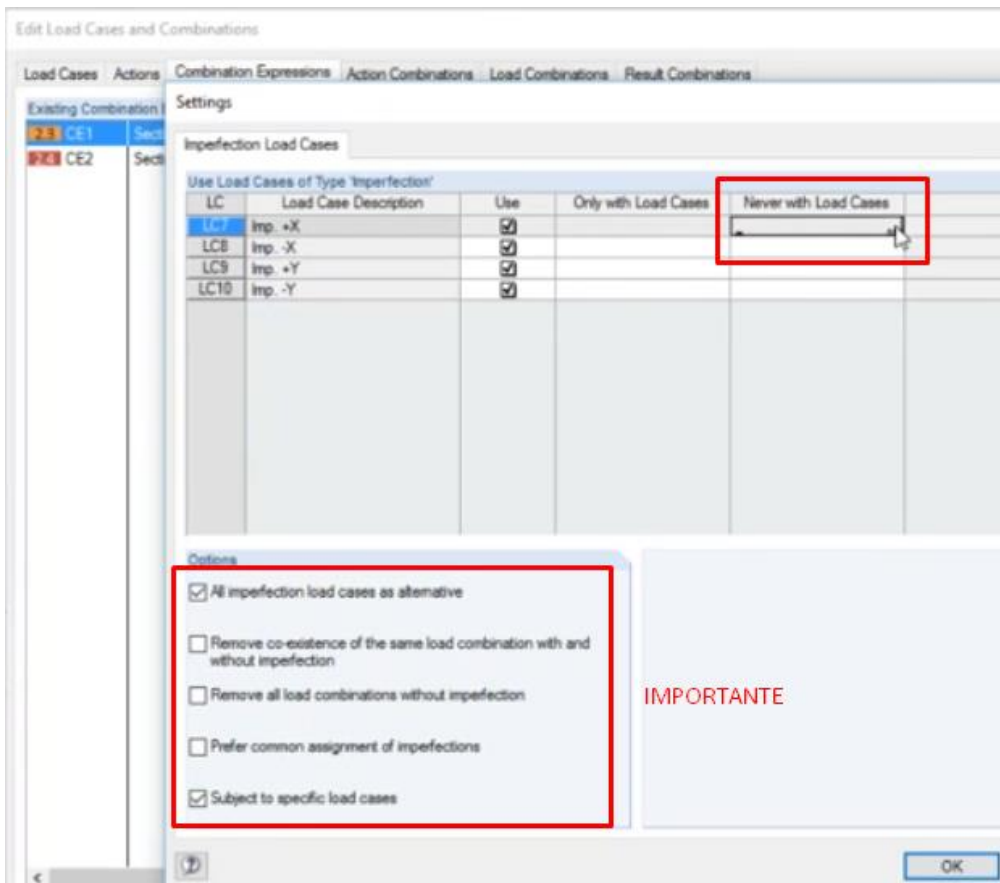




Luego, las aplicamos a las combinaciones:

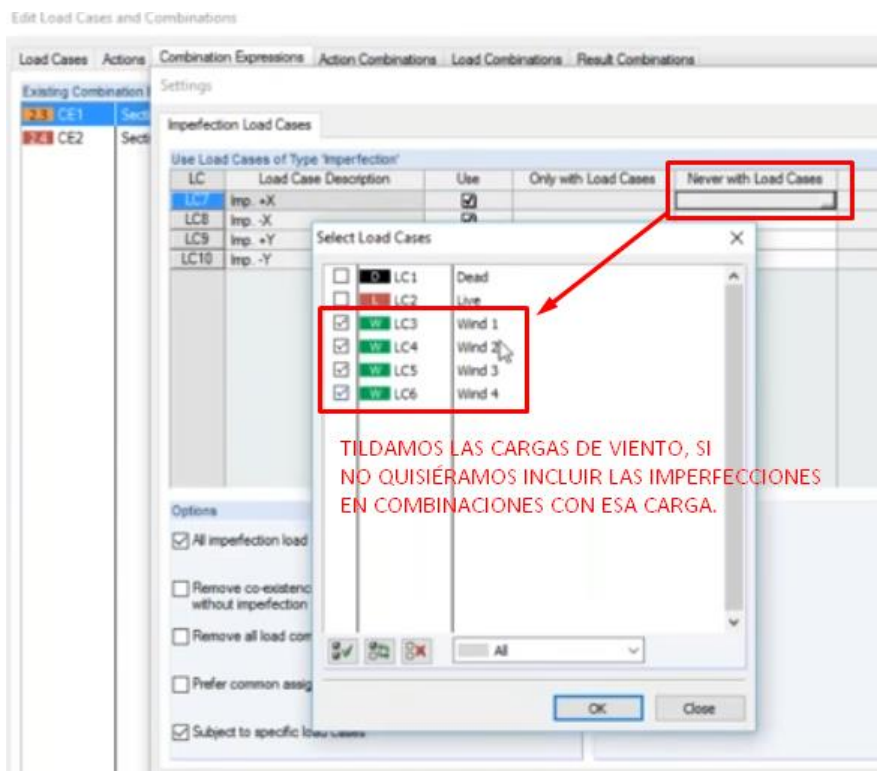


Vamos a aplicarlas alternativamente en las combinaciones:

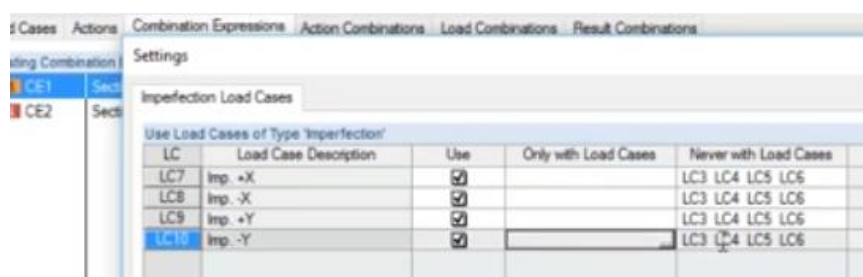


IMPORTANTE

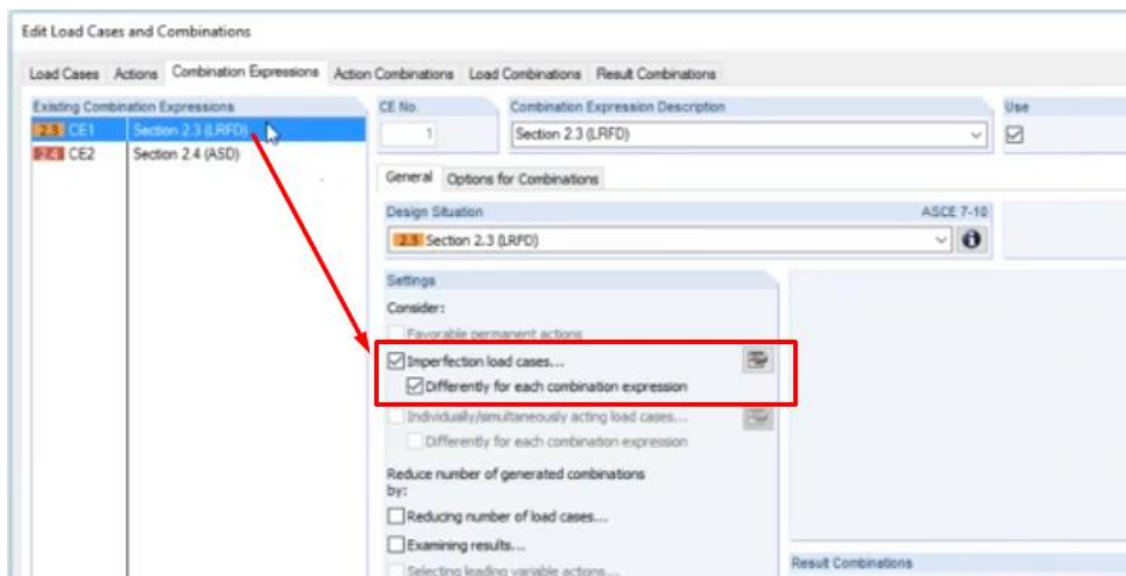
Si quisiéramos aplicarlas en las combinaciones que no tienen viento, por ejemplo:



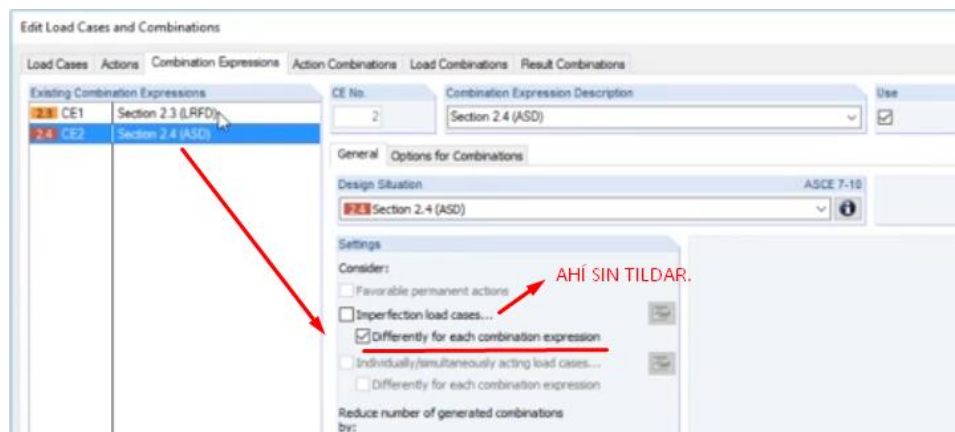
TILDAMOS LAS CARGAS DE VIENTO, SI NO QUISIÉRAMOS INCLUIR LAS IMPERFECCIONES EN COMBINACIONES CON ESA CARGA.



Notar que las combinaciones ELU deberían tener tildado:

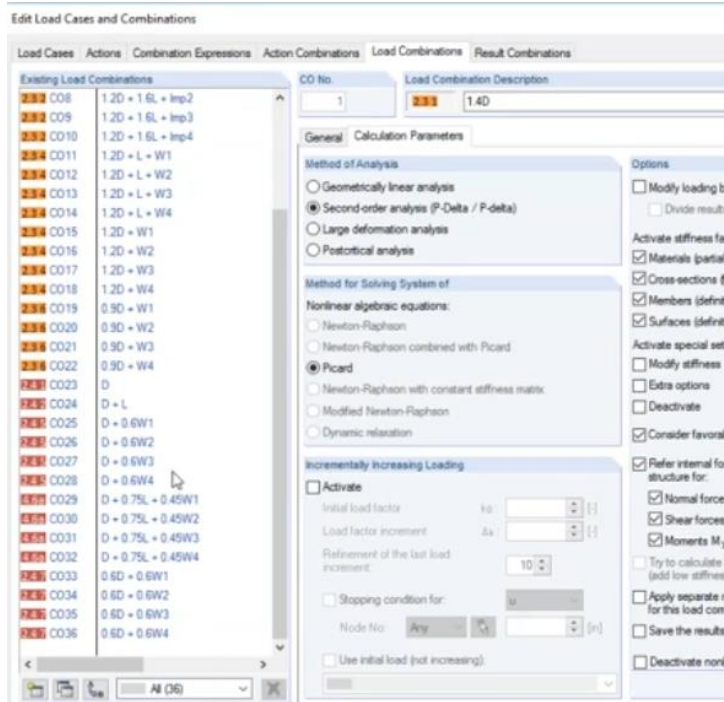
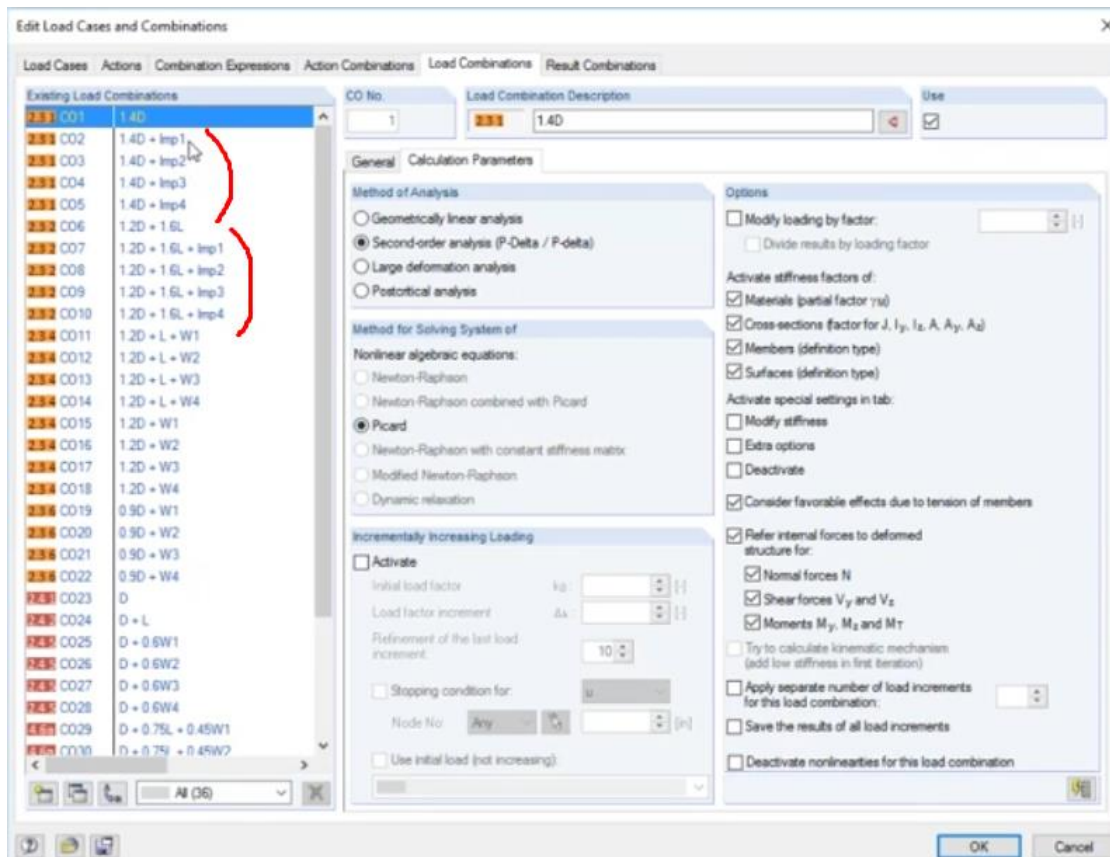


Supongamos que no se quisiera aplicar las imperfecciones a las cargas en servicio, donde revisaremos deflexiones, se podría hacer lo siguiente:

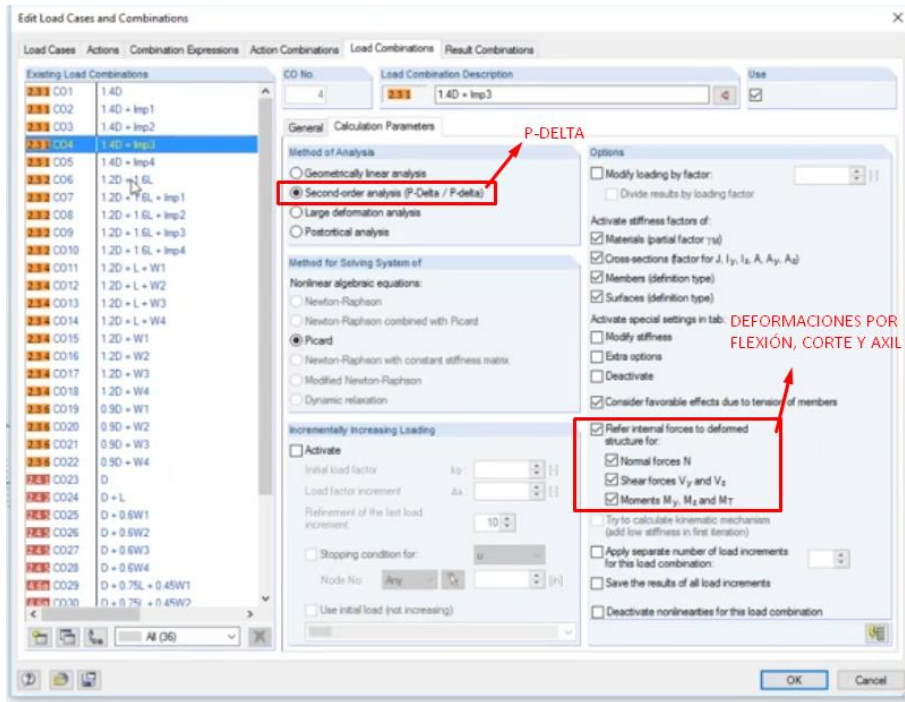


Personalmente, yo no haría eso. Las consideraría de la misma manera que en las ELU. Pero lo muestro sólo como una alternativa que podría aplicarse.

Hecho lo anterior, se tendrá las combinaciones con imperfecciones (para el caso en que los efectos de 2do orden son relativamente bajos y se pueden evitar en las combinaciones con cargas laterales):



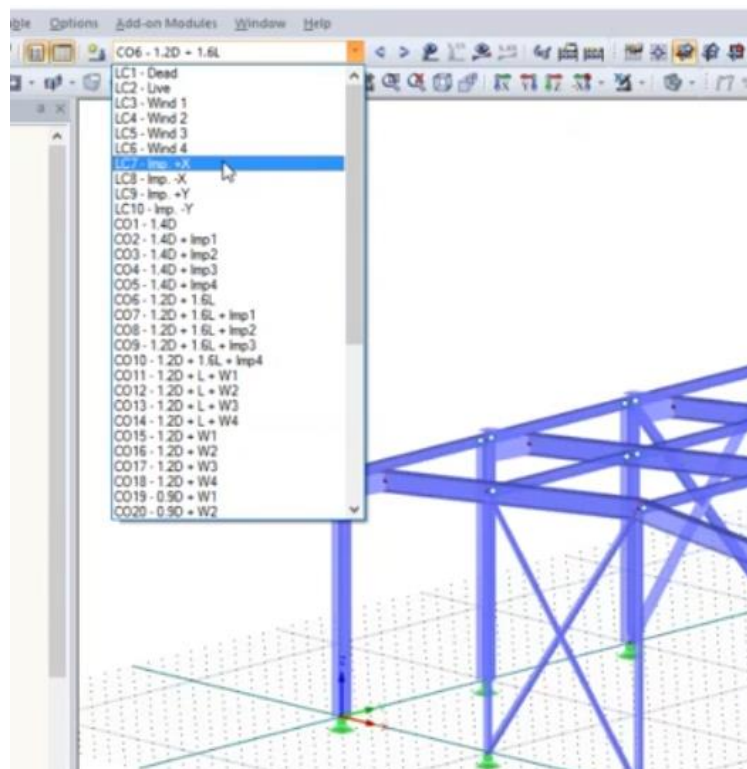
Observar, cómo las combinaciones tienen incluidos el P-delta y las consideraciones de deformaciones por flexión, axil y corte:



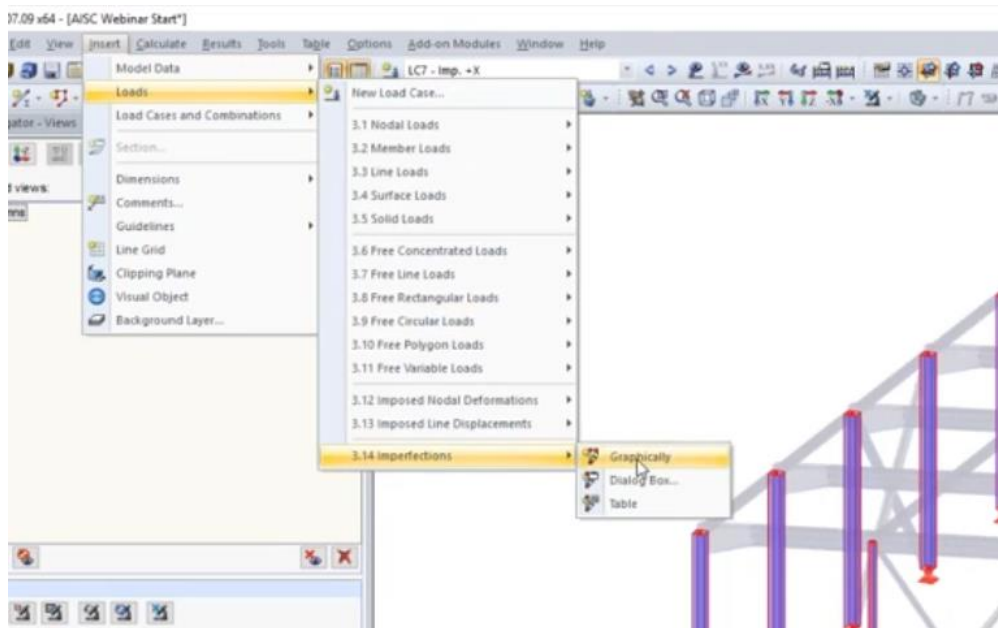
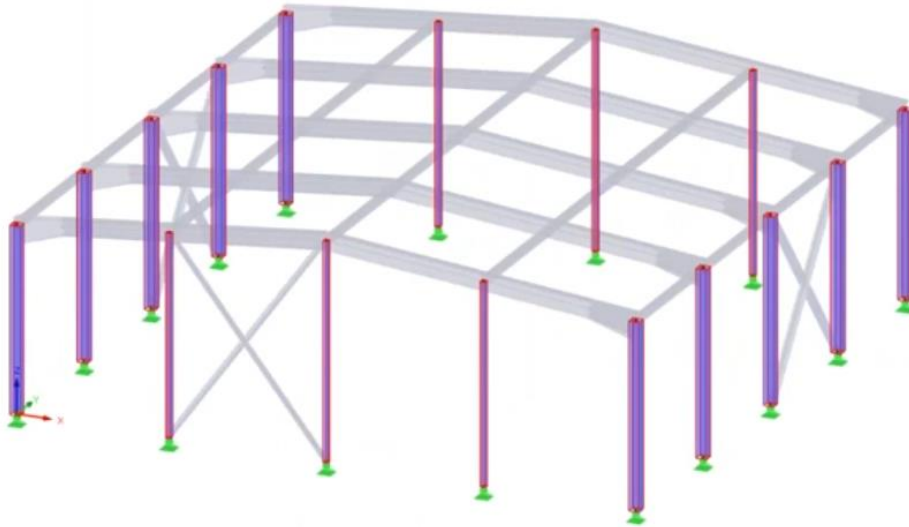
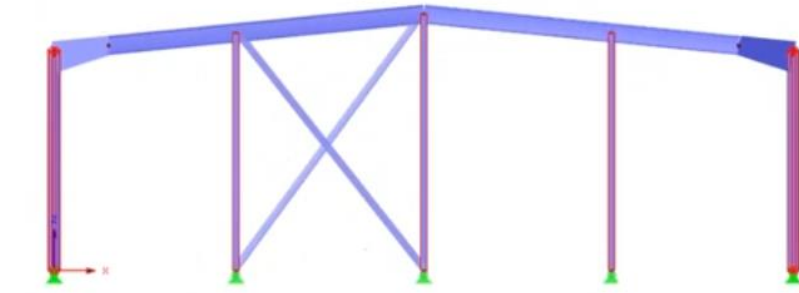
Ye tenemos generados los casos de carga, y las imperfecciones, con las combinaciones y las consideraciones de no linealidad geométrica y de inclusión de todos los tipos de deformaciones. En el próximo paso, asignaremos las imperfecciones a las barras.

Paso 5:

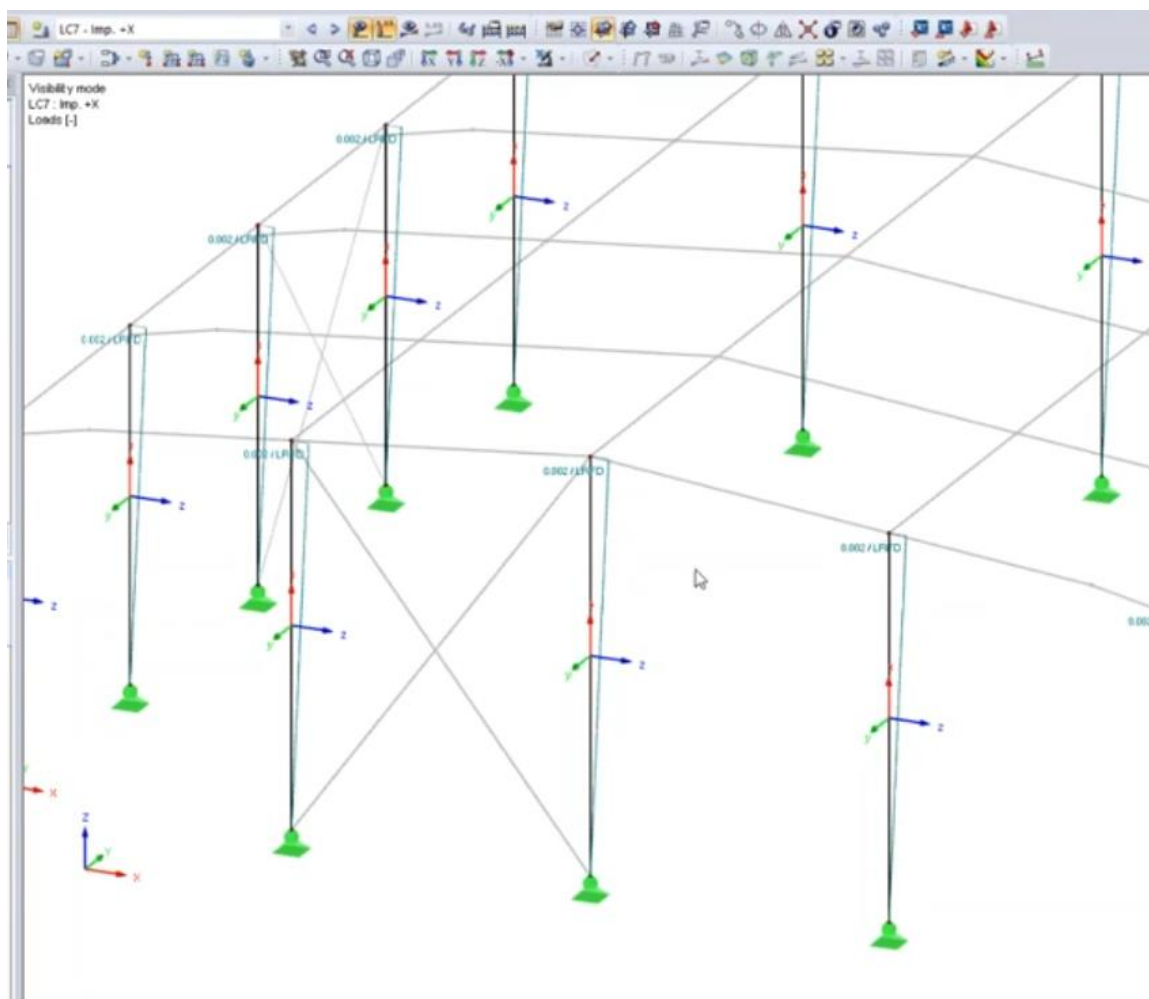
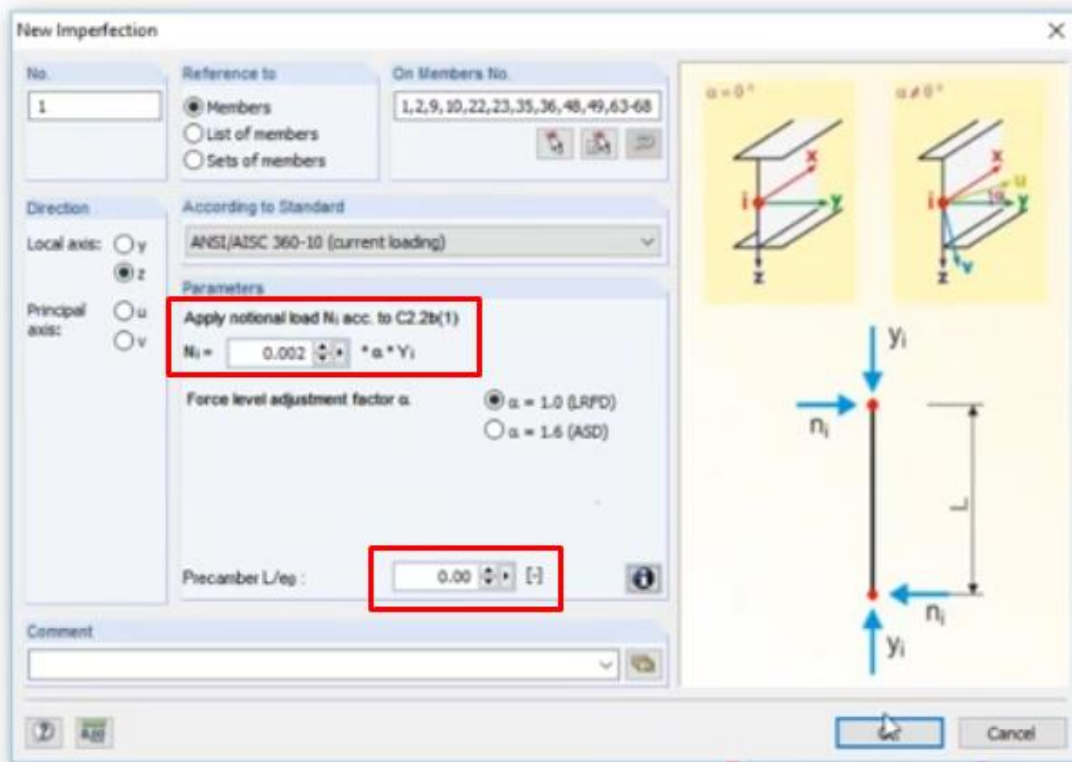
Asignamos las imperfecciones a las barras:



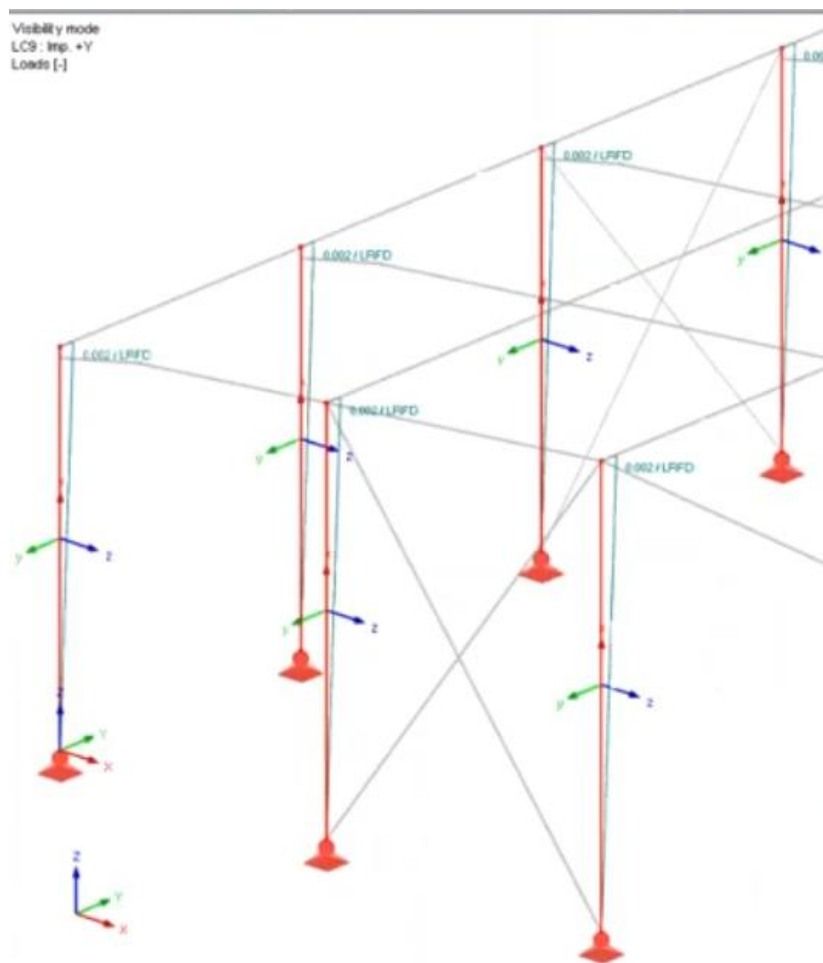
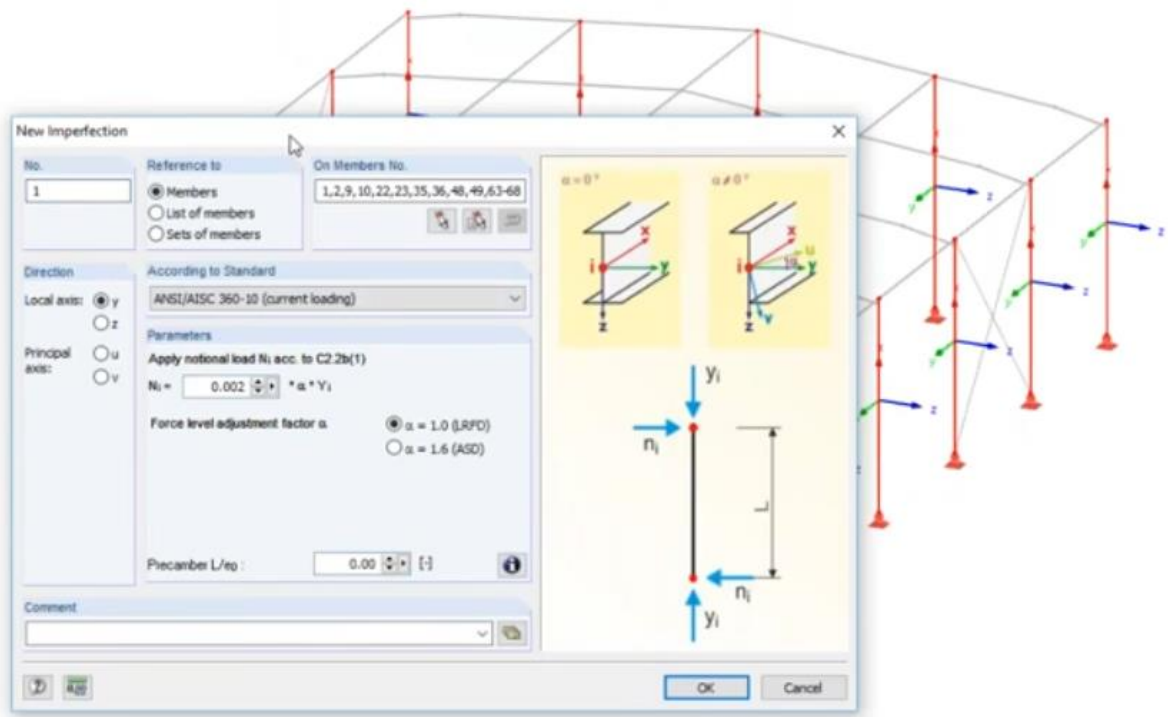
Lo aplicamos sólo a las columnas:



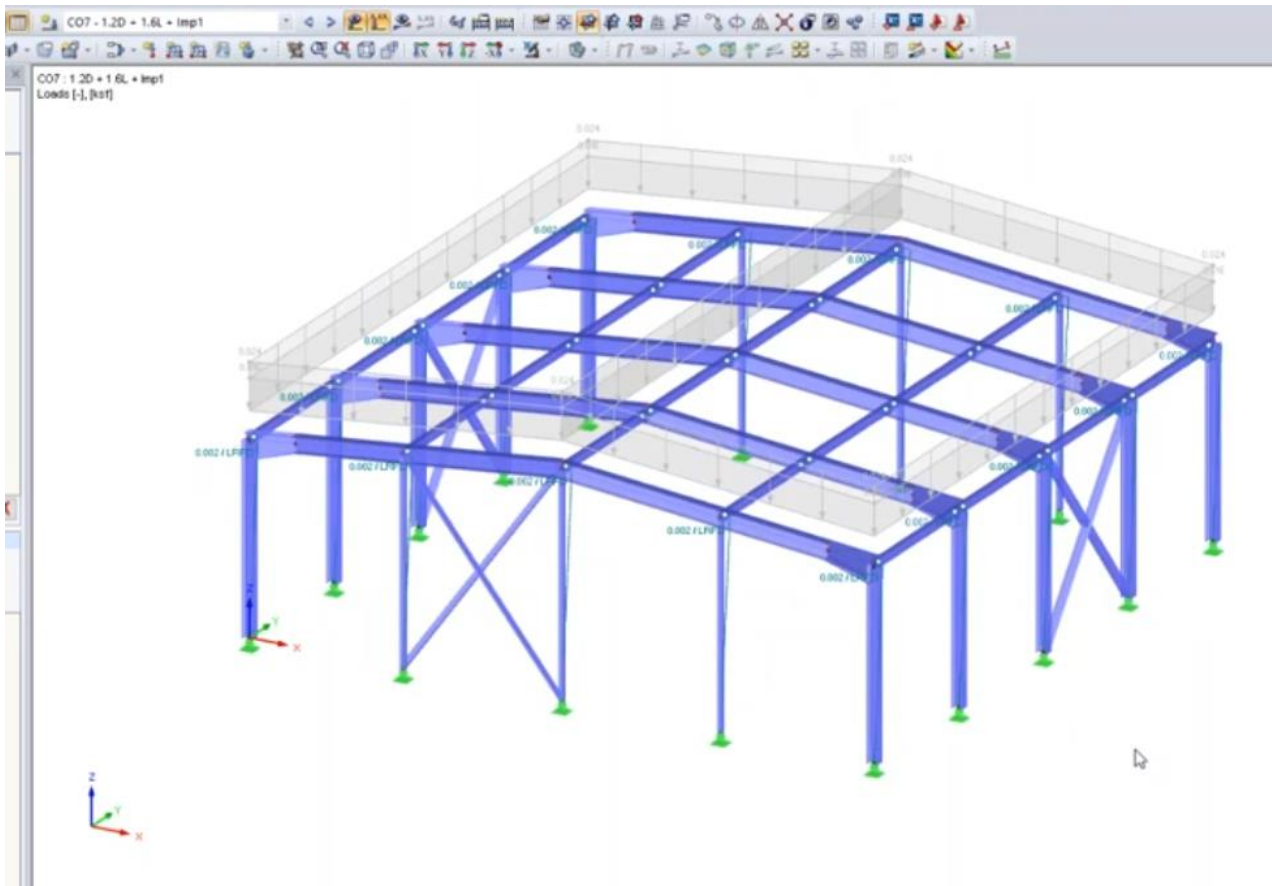
Asignaremos desplome en el nudo superior a las columnas (0,002 equivalente a 1/500), tal y como lo pide el AISC 360. No se exige desplome de tramo, por lo que vamos a dejar eso como cero.



Tener en cuenta los ejes locales. Esto debe hacerse para las 2 direcciones, en los 2 sentidos. Por ende, se debe aplicar una imperfección para cada uno de los 4 casos de carga generados. Tener en cuenta que se debe ir cambiando la carga a asignar en cada imperfección.



De esta forma, las combinaciones presentarán, si las visualizamos, las cargas asignadas y los desplomes (para aquéllas en las que se asignó esto):



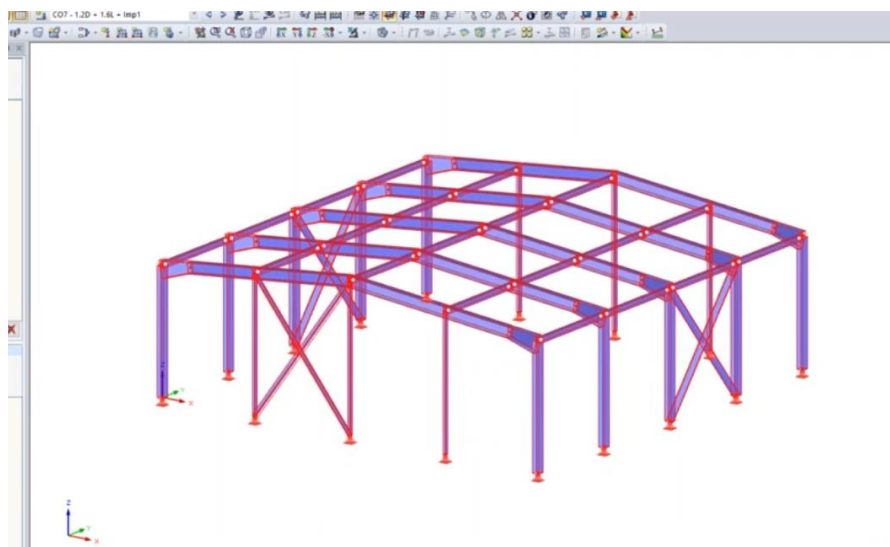
Listas las imperfecciones. Ahora debemos seguir con el tema de la rigidez.

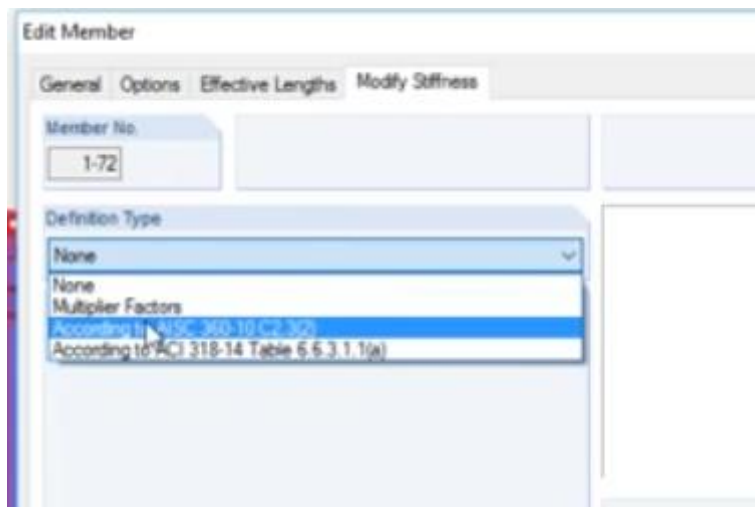
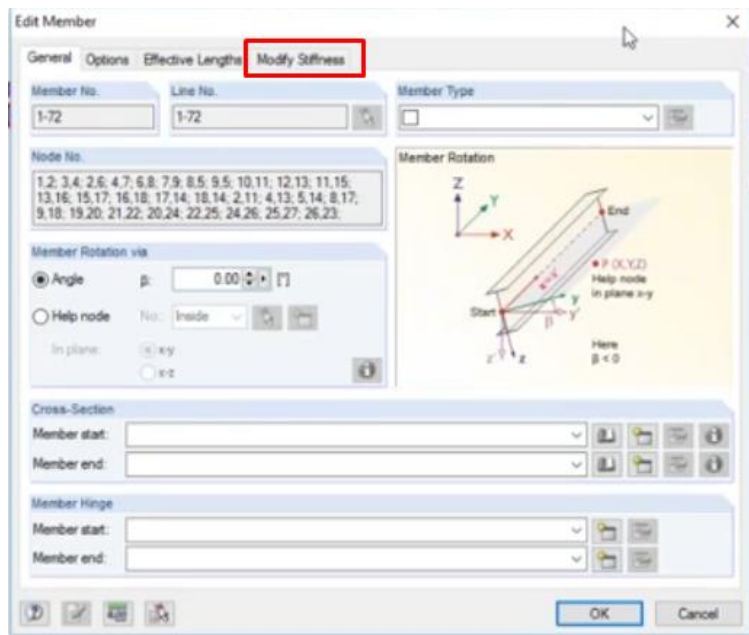
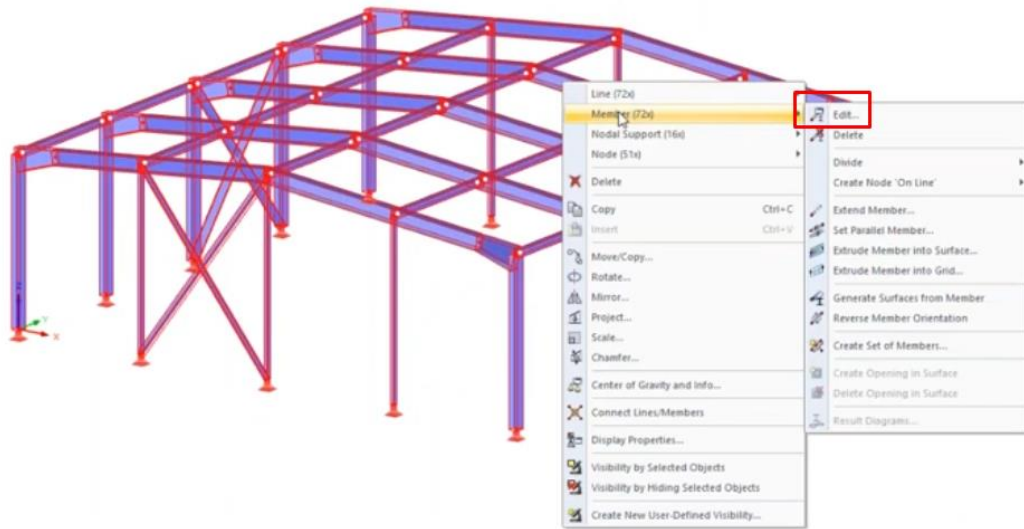
Paso 6:

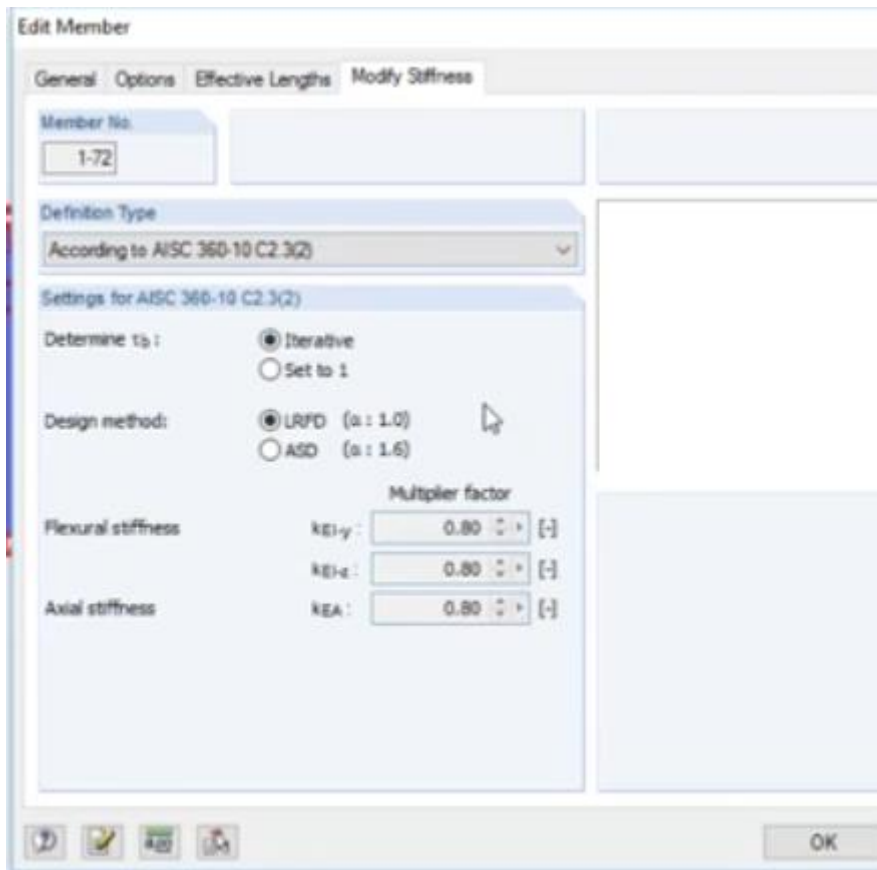
Las rigideces a aplicar dependerán del grado de compresión de los elementos. RFEM lo puede hacer, tildando la opción correspondiente.

Esto se hace para todos los elementos.

Seleccionamos todos los elementos del modelo:





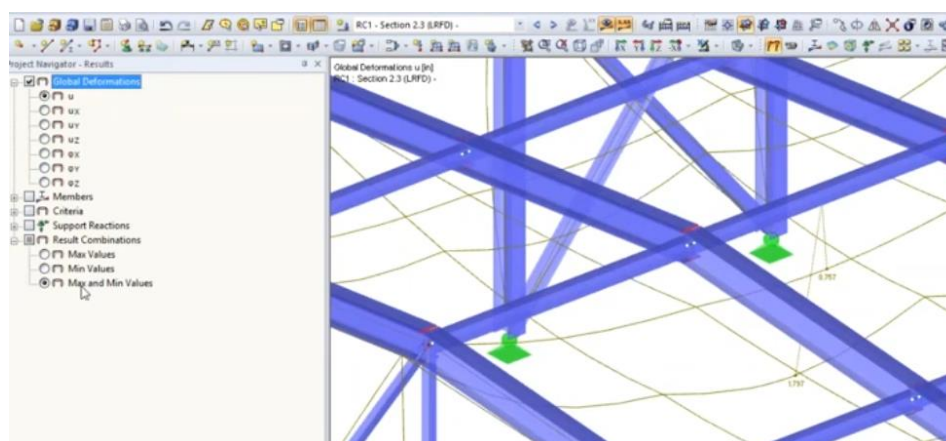


Con esto, el programa considerará iteraciones para el cálculo de “tau b” en la rigidez modificada, dependiente del grado de compresión, y también se tiene el factor “0,8” para flexión y axil.

Paso 7:

Corremos el análisis. **Todo esto, se hace sólo con RFEM5, sin necesidad de usar los módulos de diseño adicionales (como Steel-AISC, por ejemplo).**

Podemos ver la envolvente, por ejemplo:



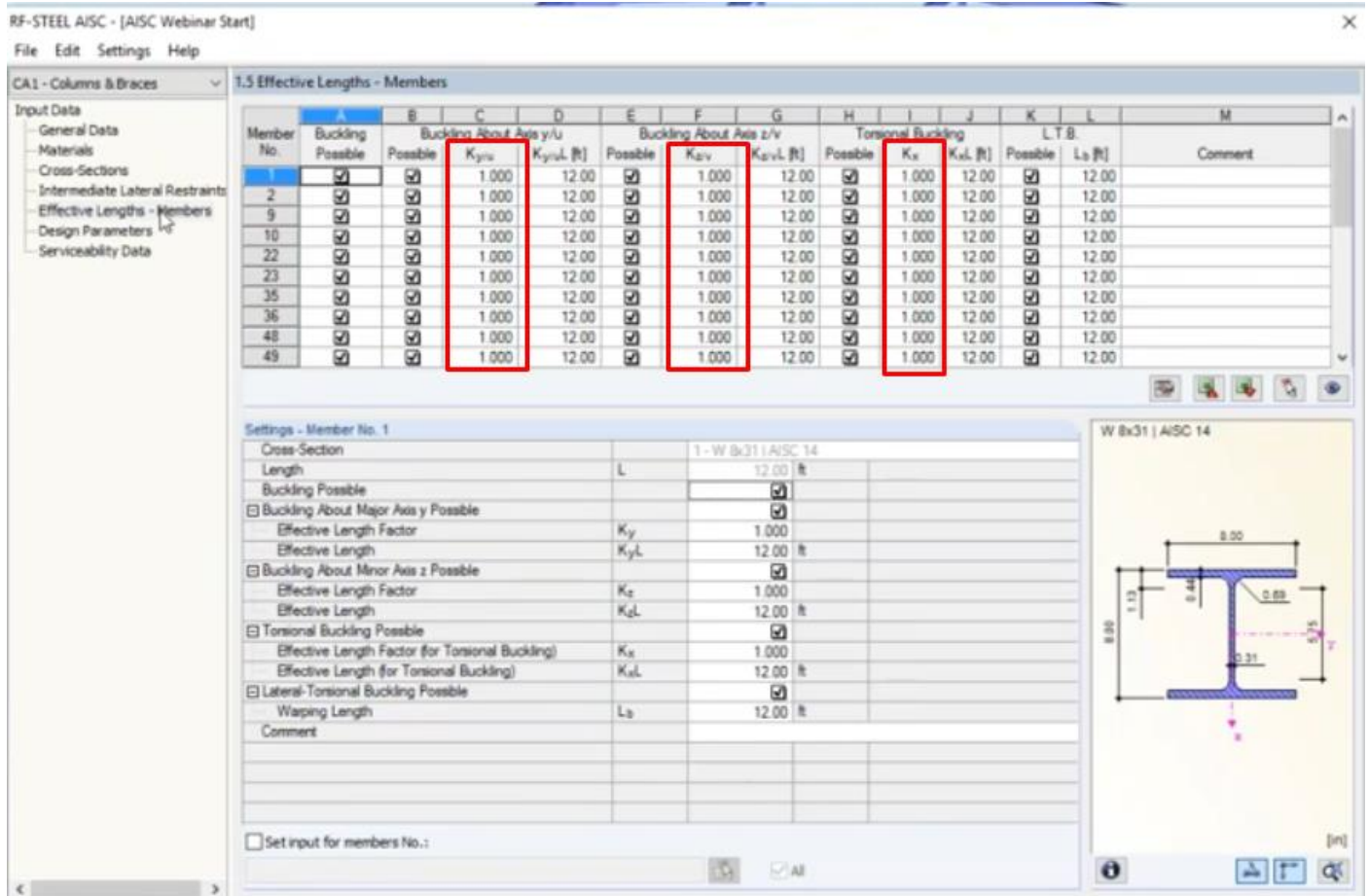
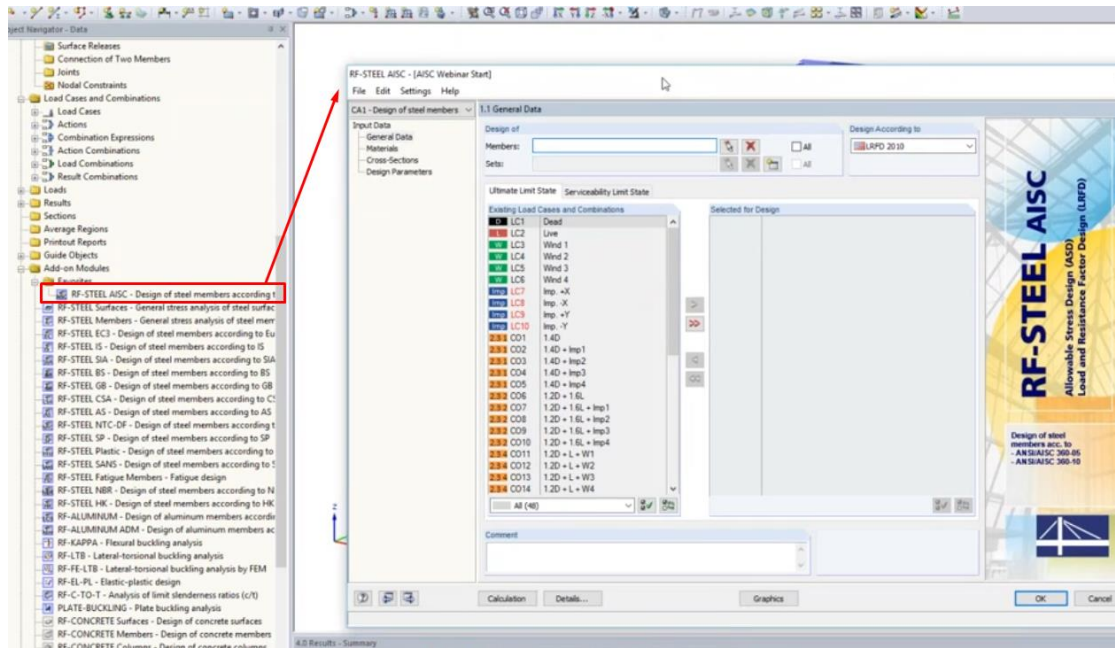
Con esto, ya hemos aplicado todos los requisitos del DAM, exigidos en el capítulo C del AISC 360. Ya estamos en condiciones de proceder al diseño de la estructura.

Podemos diseñar con nuestras fórmulas, planillas de cálculo, o el módulo STEEL AISC del programa.

Lo más importante, es que ya **hemos considerado todos los ajustes solicitados para tener un método de análisis correcto, y además podemos utilizar el factor de K=1 en todos nuestros elementos.**

Paso 8:

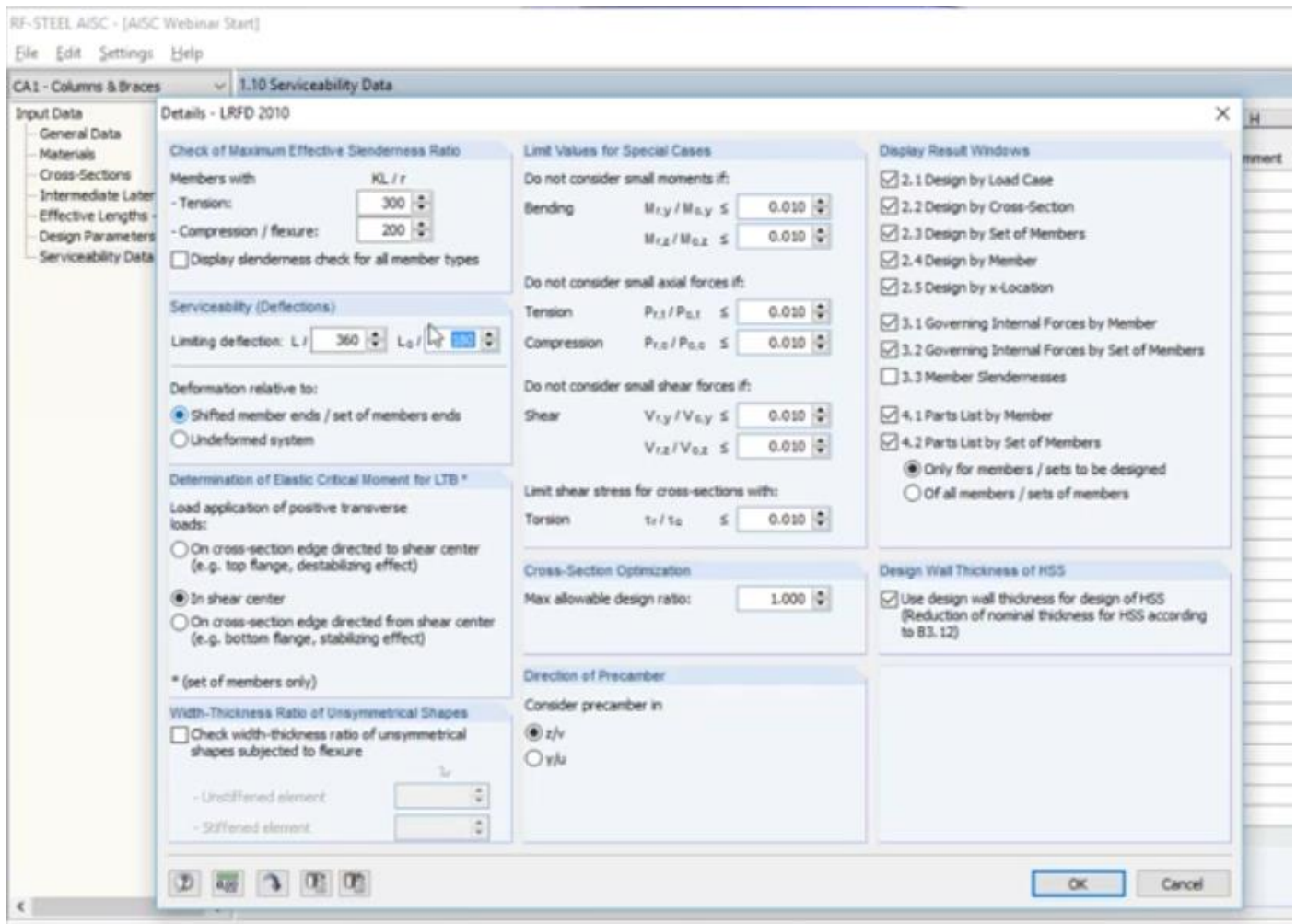
Diseño. Aplicando el módulo STEEL AISC.



Será fundamental tener en cuenta el valor de las longitudes no arriostradas que se tenga en cada situación. Pero el factor K será 1.

BUCKLING MODES						
THEORETICAL K_{ϕ} VALUE	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
RECOMMENDED DESIGN K_{ϕ} WHEN IDEAL CONDITIONS APPROXIMATED	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.4
END CONDITION CODE						
	ROTATION FIXED, TRANSLATION FIXED					
	ROTATION FREE, TRANSLATION FIXED					
	ROTATION FIXED, TRANSLATION FREE					
	ROTATION FREE, TRANSLATION FREE					

Para servicio (ELS) consideramos:



Tener en cuenta que, para servicio, no es necesario usar la reducción de rigidez de los elementos.