

18.- DIMENSIONADO CON SAP2000 V15 (*)

18.1 - Introducción

El **dimensionado** de estructuras de acero consiste en los cálculos en los que, a partir de los esfuerzos y las propiedades de las secciones de las barras, mediante expresiones, se comprueba que los perfiles de las barras verifican las condiciones de resistencia, rigidez y estabilidad que regulan las normativas.

La mayoría de programas de cálculo de estructuras (esfuerzos y deformaciones) poseen módulos de dimensionado. En España y para estructuras de acero, destacan programas de uso extendido, como Cype, Tricalc, Promonal, y otros que constituyen aplicaciones de programas más generales que incluyen los Eurocódigos como normativa, como CivilFEM (ANSYS), ETABS y SAFE, (CSI), etc. Suelen facilitar el proceso de diseño y dimensionado profesional, así como la confección de planos, memorias de cálculo, mediciones, pliego de condiciones, etc.

18.2 - Programas de dimensionado

Los autores de esta publicación, en el caso de naves, aconsejan que el proceso de dimensionado sea controlado por el usuario a partir de los esfuerzos obtenidos de un programa de cálculo estructural. Debe existir un conocimiento de los esfuerzos, perfiles, métodos y variables de dimensionado. Supone una cierta irresponsabilidad controlar sólo los índices resistentes en programas de dimensionado automático.

En trabajos extensos resulta muy laborioso el dimensionado manual. En las simplificaciones que suelen realizarse para abordarlo podrían omitirse casos y resultados más desfavorables.

Por ello una labor combinada, captando con el programa las situaciones pésimas, y comprobando de forma individual sólo esos casos, dará el mejor aprovechamiento.

- En el proceso de dimensionado, uno de los apartados más *delicados* es la definición de los parámetros de pandeo:
 1. Longitudes de la pieza a pandeo: los programas pueden disponer algoritmos que evalúan la longitud de la pieza, pero el usuario debe verificarla.
 - Si un pilar se define por dos barras con un nudo intermedio, el programa podría tomar erróneamente como longitud de pandeo la de cada segmento del pilar
 - Si existe una barra en ese nudo intermedio que conecta con otro pilar, el usuario deberá estudiar si esa barra arriostra o limita el pandeo en el plano que contiene los pilares y la barra. En cambio, en el otro plano, se deberá tomar toda la longitud del pilar.
 - Considerar el efecto de otros elementos (estructurales o constructivos) que no se introducen en el cálculo pero pueden arriostrar (muros, paneles de chapa rígidos, elementos de sujeción paneles prefabricados, zunchos, etc.)
 2. Coefficientes beta de pandeo:

Plano de la estructura: el valor por defecto suele ser 1. Muchos programas incluyen el caso de *pórticos ortogonales de varias plantas*, que puede aplicarse a pórticos a dos aguas con dintel de poca pendiente. Sin embargo, el programa debe permitir que el usuario pueda introducir su valor en pórticos a dos aguas, pilares de celosías, estructuras trianguladas.
 3. Vuelco lateral: los perfiles abiertos, perfil I, U, pueden experimentar este tipo de inestabilidad si no están suficientemente arriostrados. La mayor parte de los

programas lo tienen en cuenta por defecto. Muchos de los perfiles I en pórticos y correas tienen impedido ese pandeo al estar bien enlazados a cubiertas, muros, correas, etc. de suficiente rigidez, por lo que se deberá deshabilitar.

- Combinaciones de carga, siempre es de interés que el proyectista conozca cual provoca la situación límite. Los programas pueden generar todas las combinaciones según un patrón (propio de la edificación) que el usuario debe conocer si lo utiliza.

Según la norma (CTE-SE), la verificación de los estados límites es común para todo tipo de edificación. En naves, para una situación límite concreta, el proyectista puede tener una interpretación particular, y dimensionar más o menos al límite en función de la naturaleza o significado de ese estado límite.

- Normativa: La EAE no coincide totalmente con el EC-3. En ciertos parámetros puede haber discrepancias al utilizar programas, como SAP2000, basados en la normativa europea. Será necesario modificarlos (por ejemplo, combinaciones de carga).

18.3 - Dimensionado con el programa SAP2000

El programa SAP2000 permite dimensionar o comprobar (*Design*) los elementos estructurales de acero según el **EC-3**. Es un programa de propósito general y no realiza comprobaciones particulares de elementos (nudos, bases de anclaje).

1.- Clasificación de secciones

El programa determina la Clase de sección (1, 2, 3 y 4) a compresión, a flexión y flexocompresión. Los tipos de perfiles incluidos son I, U, L, tubos, T, doble L. Las secciones macizas se definen como de Clase 2. El programa permite poder modificar la Clase de la barra/s seleccionadas. El espesor de la pieza debe ser superior a 3 mm.

2.- Longitud no arriostrada de pandeo (*Unbraced Length*)

Es la longitud de la pieza a considerar para el pandeo, que será la distancia entre sus extremos o punto intermedio, que enlazan a otras barras o riostras que le restringen sus movimientos. Existirá un valor para cada plano de pandeo en función de las conexiones en cada plano.

SAP2000 reconoce varios aspectos de la estructura, como las conexiones, restricciones al movimiento, etc., para determinar los extremos fijos de una barra y obtener la longitud respecto al pandeo. Es importante comprobarla.

3.- Coefficiente K de pandeo (coeficiente β de pandeo)

Es la longitud efectiva de pandeo: factor que multiplica a la longitud de la pieza $K \cdot L$ para obtener la resistencia de una pieza a pandeo por compresión $N_{b,Rd}$.

Existen **tres tipos** de factores K (y para K_1 , K_2 , un valor en cada plano de pandeo, K_{yy} o plano principal o eje fuerte y K_{zz} o plano lateral o eje débil):

- K_1 (*Braced*): se utiliza para calcular la capacidad de carga a compresión en el cálculo de los factores k_{yy} , k_{zy} de interacción axil-flector. El valor por defecto es 1
- K_2 (*Sway*): con este valor se obtiene $N_{b,Rd}$ o capacidad de carga de la pieza a pandeo por compresión. El programa lo calcula en pilares conectados a vigas según sus rigideces (pórticos ortogonales). El resto de casos vale 1
- K_{LTB} : factor para la longitud a adoptar a vuelco lateral $L_{cr} = K_{LTB} \cdot L_{LTB}$

En nuestro caso, en este texto no se ha establecido diferencia, siendo $K_1 = K_2 = \beta$

4.- Comprobación a compresión

El método es el mismo que la EAE. En tubos estructurales utiliza la **curva a** pues sólo considera de opción de laminados en caliente (*rolled*) (se puede modificar).

5.- Comprobación a vuelco lateral

En estos Apuntes se formuló la hipótesis de que el monolitismo existente (aportada por los cerramientos) en una nave terminada, de luz pequeña o media, es suficiente para aportar la rigidez necesaria para limitar suficientemente el vuelco lateral.

6.- Comprobación a combinación de esfuerzos

SAP2000 trata las siguientes combinaciones de esfuerzos:

- **Comprobación de resistencia:** Para secciones de Clase 1 y 2 de perfiles I, tubos rectangulares, utiliza *expresiones específicas* para estos perfiles de la EAE (EC-3) (Apartado 3.1.5). Los índices son algo inferiores. Para el resto utiliza las ecuaciones generales del Apartado 6.4.5
- **Comprobación a pandeo:** idénticas expresiones a las del Apartado 5.3.3. y 5.3.4. ampliadas aquí para los tres esfuerzos N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$:

(1) En el plano y-y	$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$
(2) Lateral z-z	$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$

Los valores de k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} , son los **coeficientes de interacción** que se definen en el Método 1 y Método 2 de la EAE (EC-3).

El programa no aplica algunos puntos importantes del EC-3 ó EAE del **Método 2**:

- No contempla piezas **no susceptibles a torsión**. En este texto, se ha considerado esta opción
- El programa siempre calcula a vuelco lateral ($\chi_{LT} \leq 1$). Se puede eliminar *artificialmente* el vuelco lateral con una longitud pequeña a vuelco lateral
- No se puede definir $c_{my} = 0.9$ para pórticos sin arriostrar (traslacionales). El programa calcula c_{my} en función de la ley de flectores. En el caso de pilares de pórticos de naves, los flectores suelen ser de signos contrarios en extremos de barra, y $C_{m,y}$ vale entre **0.4** y **0.6** en lugar de **0.9** (diferencia importante)

7.- Esfuerzos a considerar

SAP2000 comprueba en cada sección de la barra (*Output Station*) definida, tanto para las comprobaciones de resistencia como las de pandeo. En este último caso:

- Axil N_{Ed} : el de la sección (**no** considera el **máximo** de la pieza)
- Flector M_{Ed} : el máximo del mismo signo que el flector de la sección

En cambio, según EAE ó EC-3, las comprobaciones de **pandeo** se realizan con los máximos de toda la pieza. No se comprueba cada sección, sino la pieza entera.

En vigas de sección variable a pandeo, el programa utiliza el momento resistente W de la barra en la sección de cálculo junto con el flector máximo del mismo signo que el de la sección. El programa adopta incorrectamente el mayor flector (nudo esquina) con el W de la sección que se está calculando. Se recomienda precaución respecto a su aplicación en ese caso

18.4 - Celosía: introducción de datos

Parámetros que se introducen antes de efectuar el cálculo de la estructura (*Run Analysis*) (No influyen en los resultados del cálculo, esfuerzos, reacciones, etc., pero para modificarlos hay que deshacer o desbloquear (*Unlock Model*) el cálculo):

Paso 1: Propiedades de los materiales. Se introduce (*Define* → *Materials*, S275) la **resistencia característica** del acero f_y (275 N/mm², *Minimum Yield Stress* (16.1.2)).

Paso 2: Para un correcto dimensionado, es necesario asignar como mínimo **3 secciones** a las barras de la celosía. Se seleccionan: *Assign* → *Frame* → *Output Stations* → *Min Number Stations* (**3**). A los pilares se habían definido 9 secciones.

Parámetros que pueden ser introducidos antes o después de efectuar el cálculo de la estructura (*Run Analysis*) (no es necesario rehacer el cálculo estructural):

Design → *Steel Frame Design*, se activarán las siguientes opciones:

18.4.1 - CONSULTAR O REVISAR PREFERENCIAS (→ *View/Revise Preferences*):

Item	Value
1 Design Code	Eurocode 3-2005
2 Country	CEN Default
3 Combinations Equation	Eq. 6.10
4 Reliability Class	Class 2
5 Interaction Factors Method	Method 1 (Annex A)
6 Multi-Response Case Design	Envelopes
7 Framing Type	DCH-MRF
8 Behavior Factor, q	4.
9 System Overstrength Factor, Omega	1.
10 Consider P-Delta Done?	No
11 GammaM0	1.05
12 GammaM1	1.05
13 GammaM2	1.25
14 Ignore Seismic Code?	No
15 Ignore Special Seismic Load?	No
16 Is Doubler Plate Plug-Welded?	Yes
17 Consider Deflection?	No
18 DL Limit, L /	120.
19 Super DL+LL Limit, L /	120.
20 Live Load Limit, L /	360.
21 Total Limit, L /	240.
22 Total-Camber Limit, L /	240.
23 Pattern Live Load Factor	0.75
24 Demand/Capacity Ratio Limit	1.

Explanation of Color Coding for Values:
Blue: Default Value
Black: Not a Default Value
Red: Value that has changed during the current session

Los parámetros (designados entre corchetes) a modificar en el cálculo de la nave son:

[1] Design Code (Normativa): Eurocódigo 3-2005

[5] Interaction Factors Method: Se refiere al Método que se utiliza para calcular los coeficientes de interacción k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} . Son el **Método 1** o el **Método 2** del Eurocódigo-3 (igual a la EAE). Se aconseja seleccionar el **Método 1**.

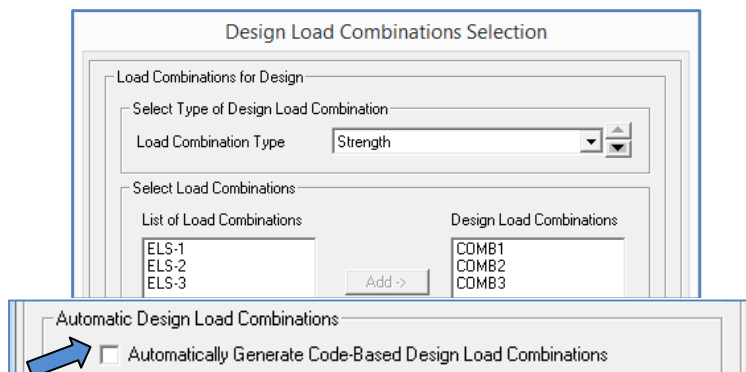
[11] GammaM0: Coeficiente de seguridad γ_{M0} relativo a la plastificación: **1.05**

[12] GammaM1: Coeficiente de seguridad γ_{M1} relativo a la inestabilidad: **1.05**

[24] Demand/Capacity Ratio Limit: Los índices de las comprobaciones no deben superar **1**. Sin embargo, según criterio del proyectista, puede considerarse un límite inferior a 1. El valor por defecto es 0.95. Anotamos **1**. Si en la comprobación del perfil se sobrepasa ese valor, el programa informará que la sección **no es válida** (*overstressed*). Se deberá aumentar el perfil.

18.4.2 - DEFINIR COMBINACIONES DE CARGA (→ *Select Design Combos*)

En el cuadro *Design Load Combinations Selection*, se seleccionan las combinaciones de carga que deben activarse para el dimensionado. El programa comprobará las barras en cada sección definida (*Output Stations*) y para cada combinación.



En *Select Load Combinations*, y en la Tabla a la izquierda *List of Load Combinations*, trasladamos COMB1 y COMB2, mediante el botón **Add->**, a la Tabla de la derecha *Design Load Combinations*.

Debe desactivarse siempre el botón *Automatically Generate Code-Based Design Load Combinations*. Se debe evitar que el programa genere de forma automática combinaciones de carga del EC-3, diferentes de las prescritas en el CTE SE.

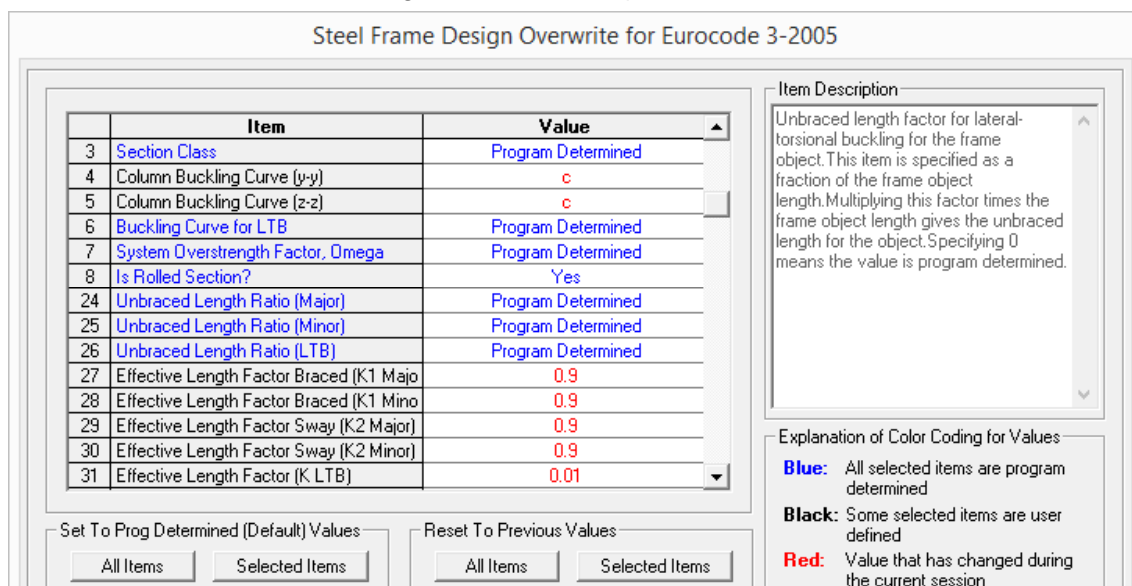
Si aparecieran en el cuadro otras combinaciones en *Design Load Combinations* (el programa las denomina como DSTLn°), es que se han generado porque no se desactivó la generación automática. Se eliminan del cuadro derecho con **< Remove**

Si por el error anterior, aparecen esas combinaciones automáticas en *Define* → *Load Combinations*, se deben eliminar previamente al cálculo (*Run Analysis*) ya que en caso contrario aparecerán en todos los listados de combinaciones de carga.

18.4.3 - CONSULTAR/REVISAR PARÁMETROS (→ *View/Revise Overwrites*)

En el cuadro que aparece, existen hasta 46 parámetros del dimensionado que pueden modificarse en las barras que previamente se hayan seleccionado.

Entre ellos destacan las filas entre [27] a [31], dónde se definen los 5 valores para el factor de pandeo. En estas casillas, introducir un valor nulo **0** significa que el programa determina dicha cantidad (*Program Determined*).



Paso 1: Seleccionar las barras de la celosía y activar: *Design* → *Steel Frame* → *View/Revise Overwrites*:

[4] [5] **c**: *Column Buckling Curve (y-y) (z-z)*. Curva de pandeo “c” para los tubos conformados en frío. El programa considera por defecto los tubos como laminados en caliente (*Rolled*, curva a). Se modifica la curva de pandeo.

[27] a [30]: **0.9**: Los factores, tanto K_1 y K_2 , de las longitudes de pandeo tanto en el plano de la estructura (*Major*) como para el lateral (*Minor*), para tubos (cordones y diagonales), según EC-3, se puede aplicar 0.9

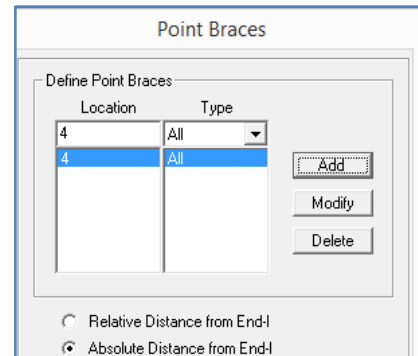
[31]: **0.01**. Vuelco lateral. Sin influencia en tubos, pero se recomienda desactivar el vuelco ($\chi_{LT} = 1$). Para ello se escribe un factor de longitud muy pequeño

Paso 2: Definir el arriostramiento lateral de los pilares.

Seleccionar el tramo inferior de los pilares.

En este proyecto, sobre la altura del pilar de 6 m, se considera que las correas de fachada arriostran 2 m por ser el panel rígido. Por esta razón, la longitud no arriostrada lateral es de **4 m**.

Design → *Lateral Bracing* → *User Specified*;
Specify Point Bracing → *Absolute Distance from End-I* ; *Location = 4* ; *Type = All* ; *Add*.



Paso 3: Se seleccionan nuevamente el tramo inferior de los pilares. Se activa: *Design* → *Steel Frame* → *View/Revise Overwrites*:

Steel Frame Design Overwrites for Eurocode 3-2005		
Item	Value	Item Description
23	Live Load Reduction Factor	Program Determined
24	Unbraced Length Ratio (Major)	Program Determined
25	Unbraced Length Ratio (Minor)	Program Determined
26	Unbraced Length Ratio (LTB)	Program Determined
27	Effective Length Factor Braced (K1 Major)	1.5
28	Effective Length Factor Braced (K1 Minor)	1.
29	Effective Length Factor Sway (K2 Major)	1.5
30	Effective Length Factor Sway (K2 Minor)	1.
31	Effective Length Factor (K LTB)	0.01

Item Description:
Allowable bending moment capacity in major axis bending. Specifying 0 means the value is program determined.
For symmetrical sections major bending is bending about the local 3-axis. For unsymmetrical sections (e.g., angles) major bending is the bending about the section principal axis with the larger moment of inertia.

[27] [29] **1.5**: Coeficiente beta de pandeo para el pilar

[28] [30] **1**: Coeficiente beta de pandeo lateral para el pilar considerando que la fachada lateral se encuentra arriostrada

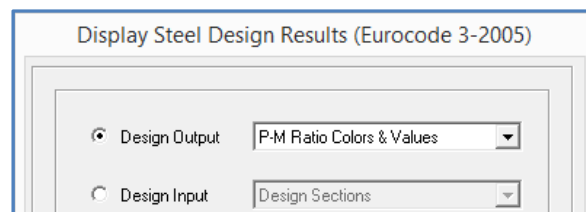
[31] **0.01**: si se desea que el vuelco lateral sea despreciable en el dimensionado

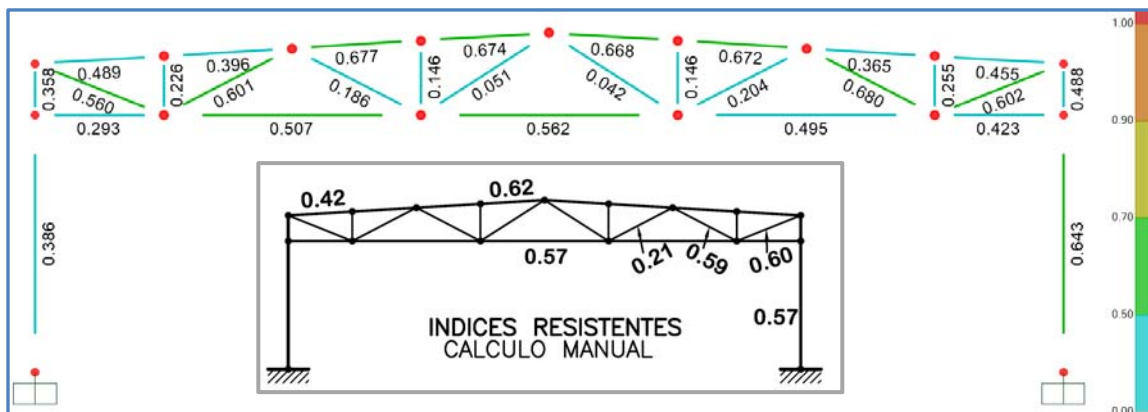
⇒ No es necesario modificar el tramo superior corto de los pilares

18.4.4 - DIMENSIONADO

Antes de dimensionar, la estructura debe haber sido calculada previamente (*Run Analysis* ó *F5*). Ejecutamos el dimensionado mediante la orden *Design* → *Steel Frame Design* → *Start Design/Check of Structure* o el botón:

Con la opción *Design* → *Steel Frame Design* → *P-M Ratio Colors & Values* obtenemos los índices resistentes:





Comentarios:

- Como los **índices son inferiores al límite máximo** impuesto por el proyectista ($i_R \leq 1$), el dimensionado es **correcto** bajo las hipótesis impuestas. Estos resultados pueden añadirse al Anejo de Cálculo del Proyecto

Si el **índice es superior a 1**, la pieza queda grafiada en rojo, y se deberá **corregir** (aumentar o cambiar de perfil, mejorar el arriostramiento, etc.). El programa lo advierte en los listados mediante un mensaje: **Error: Section overstressed.**

- En las barras de la celosía los índices son algo superiores a los obtenidos en el cálculo manual. Se debe a que el programa considera axil y flector, y en el cálculo manual hemos despreciado los flectores, lo que permite la EAE, bajo ciertas condiciones (5.1.1). Se puede eliminar el índice del flector haciendo [33], [35], $k_{yy} = k_{zy} = 0$
- Para este tipo estructural con mayor número de barras, el dimensionado con programa presenta grandes ventajas: es rápido de realizar, se definen pocos parámetros y se cubren todas las combinaciones y comprobaciones posibles.

18.5 - Análisis P-Delta

Se utilizan algunas opciones avanzadas del programa para obtener los esfuerzos de 2º orden. El programa utiliza un método de análisis no lineal, denominado P-Delta, válido para pequeñas deformaciones, mediante el cual tiene en cuenta los esfuerzos *secundarios* debidos al desplazamiento de los nudos.

La EAE prescribe que es necesario un cálculo no lineal en estructuras traslaciones.

En el caso de pórticos a dos aguas y en celosía, es habitual que se trate de estructuras **poco** traslacionales. Un cálculo de 1º orden en la posición inicial sin deformar es suficiente. Los esfuerzos *secundarios* pueden considerarse despreciables.

Paso 1: Se define un nuevo tipo de análisis de carga: *Define* → *Load Cases* → *Add New Load Case*. Consiste en un procedimiento de cálculo iterativo por aproximaciones sucesivas para realizar el equilibrio en la posición deformada. Vamos a activarlo para la Comb2 (mayores axiles en pilares):

- *Load Case Name:* P-DELTA-COMB2 (por ejemplo)
- *Analysis Type:* NonLinear
- *Geometric Nonlinearity Parameters:* P-Delta
- *Loads Applied:* G/1.35 ; S/1.5 ; N/0.75 ; V2/0.9 (*Load Name/Scale Factor*)

Después del cálculo, si se comparan los nuevos esfuerzos frente a los obtenidos mediante el análisis lineal, se confirma que las diferencias son insignificantes.

18.6 - Análisis a pandeo (buckling)

Consiste en calcular el **coeficiente** β de pandeo de una barra. Para ello se obtiene la carga crítica de cada modo de pandeo (la que provoca el colapso por inestabilidad de la estructura). Analizando la deformada, se localiza aquella que afecta a la barra en estudio. Se va a aplicar para obtener el coeficiente beta de pandeo de los **pilares**.

Paso 1: Para que el cálculo a pandeo tenga suficiente precisión, resulta conveniente dividir los pilares en un número suficiente de segmentos de barras. El programa lo trata como un elemento único compuesto de varias barras:

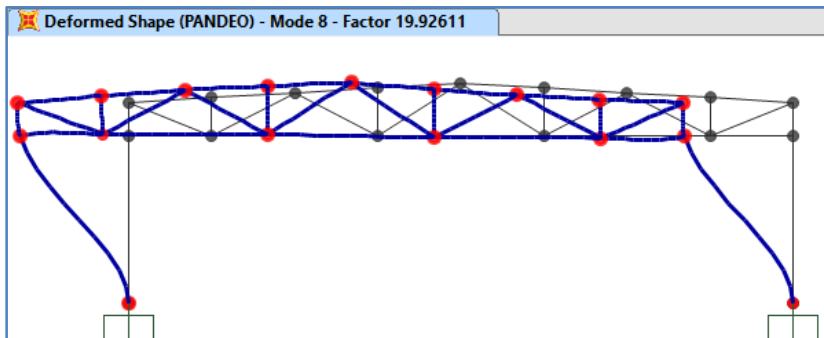
Se seleccionan los pilares y se activa la orden: *Assign* → *Frame* → *Automatic Frame Mesh*. En *Maximum Length of Segments*, anotamos, por ejemplo, **0.5**. Las barras tendrán una longitud no superior a 0.5 m.

Paso 3: Se define este caso de carga con *Define* → *Load Cases* → *Add New Load Case*:

- Cálculo a pandeo: copiamos el caso anterior (*Add Copy of Load Case*):
 - *Load case Type:* **Buckling** (lista desplegable)
 - *Load Case Name:* PANDEO-COMB2 (por ejemplo)
 - *Stiffness at End of Nonlinear Case:* P-DELTA-COMB2 (se toma la rigidez a flexión de la estructura modificada por la influencia del axil)
 - *Number of Buckling Modes:* 20 (los factores de carga negativos carecen de interés así como los que afectan a la celosía)

Paso 4: Se efectúa el cálculo de la estructura: *Run Analysis* (F5). Se activa la deformada (*Deformed Shape*). Se selecciona en *Case/Combo*, PANDEO-COMB2 (*buckling*), *Multivalued options*, *Mode Number* → N° modo de pandeo. Es más cómodo utilizar el botón inferior izquierdo, hasta obtener el modo que afecta a los pilares.

Para el 8º modo de pandeo (puede variar, lo que no afecta al resultado del factor de carga), se representa el aspecto que tiene la deformada.



En la pestaña situada en el lado superior izquierdo de la ventana principal, se anota el **factor de la carga de pandeo: $f = 19.93$** . Es un factor f de Comb2 ($G \cdot 1.35 + S \cdot 1.5 + N \cdot 0.75 + V \cdot 0.9$), que al multiplicar por el axil máximo del pilar N_{Ed} se obtiene el axil crítico de pandeo N_{cr} tal que la estructura es inestable. La equivalencia a la columna ideal biarticulada de Euler, (HEA-180: $I_y = 2510 \text{ cm}^4$), es:

$$N_{cr} = f \cdot N_{Ed} = \pi^2 \cdot \frac{EI}{(\beta \cdot L)^2} \quad ; \quad \beta = \frac{\pi}{L} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_y}{f \cdot N_{Ed}}} = \frac{\pi}{600} \cdot \sqrt{\frac{2.1 \cdot 10^6 \cdot 2510}{19.93 \cdot 8538}} = 0.92$$

$N_{Ed} = 8538 \text{ kg}$: axil máximo del pilar (Figura 11.7)

Es un resultado *teórico* semejante al de la pieza biempotrada con deslizadera $\beta = 1$ (Figura 5.3). Es bastante inferior a $\beta = 1.5$ adoptado para los pilares