



**tecnun**  
Universidad  
de Navarra

Escuela de Ingeniería

# Cálculo de celosías espaciales con Celo3D

**Juan Tomás Celigüeta**

Copyright © tecnun - Universidad de Navarra y Juan Tomás Celigüeta Lizarza.

Se concede permiso para copiar, distribuir y/o modificar este documento bajo los términos de la Licencia de Documentación Libre de GNU, (GNU Free Documentation License) Versión 1.3 o cualquier otra versión posterior publicada por la Free Software Foundation; sin Secciones Invariantes ni Textos de Cubierta Delantera ni Textos de Cubierta Trasera.

Una copia de la licencia puede consultarse en <http://www.gnu.org/licenses/>

Primera edición: Julio 2011. Versión 1.0

Segunda edición: Mayo 2012. Versión 1.1

Tercera edición: Enero 2014. Versión 2.0

Cuarta edición: Junio 2022. Versión 2.1.2

# Contenido

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES SOBRE CELO3D</b>	<b>2</b>
Elementos estructurales admitidos	3
Grados de libertad	5
Propiedades de las barras	5
Fuerzas exteriores admitidas	5
Unidades	6
Limitaciones	6
Interfaz de usuario	6
Operaciones con documentos	7
<b>REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ESTRUCTURA</b>	<b>8</b>
Sistema de coordenadas de visión	8
Control de la imagen	10
Hipótesis de carga activa	12
Visualización de los datos	12
<b>DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA</b>	<b>15</b>
Elemento raíz del documento	16
Elemento Nudo	16
Elemento Tubo	17
Elemento Barra	18
Elemento Viga	18
Elemento Ligadura	20
Elemento Hipotesis	21
Elemento FuerzaNudo	21
Elemento CargaBarra	22
Elemento Deformacion	23

Elemento GrupoHipotesis	24
Elemento HipoComponente	25
Elemento Opciones	25
Elemento Dimensiona	26
Elemento Orden2	27
Elemento ArchivosTexto	28
Elemento Comentario	28
Elemento Incluye	29
<b>CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA</b>	<b>30</b>
Cálculo estático lineal	30
Cálculo estático de segundo orden	30
<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO</b>	<b>32</b>
Resultados combinados	36
Impresión y listado de los resultados	41
<b>DIMENSIONAMIENTO DE LAS BARRAS</b>	<b>43</b>
Criterios de dimensionamiento	43
Ejecución del dimensionamiento	45
Observaciones	46
<b>EJEMPLOS</b>	<b>47</b>
Cubierta curva	47
Celosía simple no lineal	48
<b>ANEJO A. PERFILES NORMALIZADOS</b>	<b>51</b>
Elemento raíz	51
Elemento Familia	52
Elemento Perfil	52
<b>ANEJO B. FORMATO DE LOS ARCHIVOS DE TEXTO DE DATOS</b>	<b>54</b>
Archivo de coordenadas de nudos	54

<b>Archivo de tubos</b>	<b>54</b>
<b>Archivo de barras</b>	<b>54</b>
<b>Archivo de fuerzas exteriores sobre los nudos</b>	<b>55</b>
<b>Archivo de cargas exteriores sobre las barras</b>	<b>55</b>
<b>Archivo de ligaduras</b>	<b>56</b>
<b>ANEJO C. FORMATO DE LOS ARCHIVOS DE TEXTO DE RESULTADOS</b>	<b>57</b>
<b>    Archivo de deformaciones de los nudos</b>	<b>57</b>
<b>    Archivo de reacciones en los apoyos</b>	<b>57</b>
<b>    Archivo de esfuerzos en las barras</b>	<b>58</b>
<b>    Archivo de esfuerzos extremos en las barras</b>	<b>59</b>
<b>ANEJO D. EJECUCIÓN DESDE LA LÍNEA DE COMANDOS</b>	<b>61</b>



### Introducción

En este texto se presenta una solución completa al cálculo y diseño de estructuras de celosía espacial de gran tamaño mediante un programa de ordenador denominado Celo3d, desarrollado por el autor en tecnun - Escuela de Ingenieros Industriales de San Sebastián (Universidad de Navarra).

El programa utiliza el método de rigidez, por su sencillez de programación y generalidad y se basa en los fundamentos teóricos explicados en el libro Curso de Análisis Estructural (Ed. EUNSA).

Se incluye en primer lugar una descripción de las características principales del programa: elementos estructurales empleados, grados de libertad, tipos de fuerzas admitidas, etc. A continuación se describe la forma práctica de empleo del programa: definición de la estructura, interfaz de usuario y representación gráfica, resultados obtenidos, etc.

El programa Celo3d es de uso público y gratuito: es posible redistribuirlo y / o modificarlo bajo los términos de la "GNU General Public License" publicada por la "Free Software Foundation", en su versión 3.

## Generalidades sobre Celo3d

El programa Celo3d efectúa el análisis de estructuras de celosía espacial de cualquier tipo, en particular las de gran tamaño.

Celo3d es un programa interactivo, que permite efectuar el análisis de la estructura desde el entorno de ventanas de un ordenador personal. La definición de la estructura se debe efectuar en un archivo de datos que es leído por el programa. Una vez leído el archivo de datos, el cálculo de la estructura se efectúa actuando sobre los elementos de la interfaz de usuario. Los resultados obtenidos se muestran de forma interactiva, en el mismo entorno de ventanas, de forma sencilla y fácil de interpretar. Además, pueden obtenerse listados numéricos de los resultados.

Las estructuras analizadas pueden estar formadas por barras articuladas en cualquier disposición en el espacio. Además, se pueden considerar barras empotradas, asimismo en cualquier disposición en el espacio. Ello permite calcular desde celosías puras hasta pórticos puros en el espacio, aunque la vocación del programa es el cálculo de celosías espaciales, siendo los elementos empotrados sólo un complemento para modelizar zonas especiales.

Pueden aplicarse fuerzas sobre los nudos o incrementos de temperatura sobre los elementos. Se pueden considerar apoyos elásticos, así como imponer deformaciones de valor conocido en los apoyos.

El programa calcula y representa gráficamente las deformaciones de los nudos, las reacciones en los apoyos, y los esfuerzos internos y tensiones en los elementos. Este cálculo puede efectuarse bien empleando un modelo lineal, válido para pequeñas deformaciones o un modelo no lineal de orden 2, para el caso de grandes deformaciones.

Asimismo, el programa Celo3d es capaz de efectuar el dimensionamiento automático de las barras de la celosía, eligiendo el perfil estructural más adecuado para cada una de ellas, cumpliendo con una serie de criterios de dimensionamiento de resistencia, estabilidad, etc.

El programa está dotado de un solver de grandes prestaciones, que le permiten calcular estructuras de gran tamaño, con varias decenas de miles de grados de libertad, en un tiempo de cálculo muy pequeño, permitiendo la respuesta interactiva.



## Elementos estructurales admitidos

El programa permite emplear dos tipos de elementos estructurales:

### *Barra articulada en ambos extremos*

Tiene tres grados de libertad de desplazamiento X, Y y Z en cada nudo extremo (Figura 1). Este elemento sólo produce rigidez en su dirección axial, y absorbe únicamente esfuerzo axial.

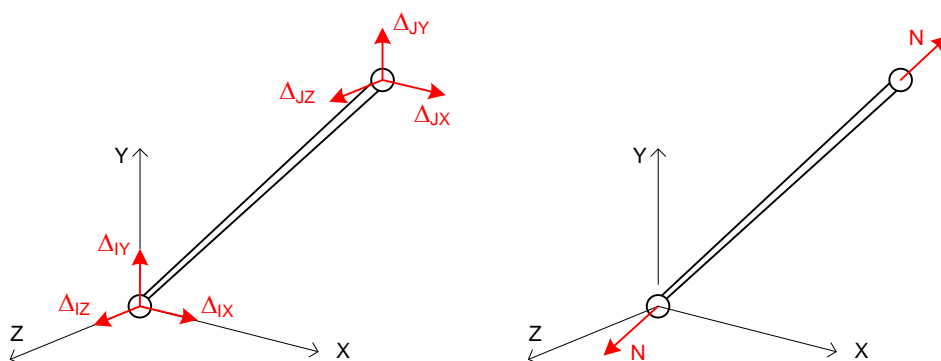


Figura 1. Elemento barra articulada en ambos extremos

Para las barras biarticuladas únicamente es necesario considerar un eje X local, con su origen en el nudo inicial (nudo 1) de la barra y orientado en la dirección del nudo 1 al nudo 2. No es necesario definir los ejes Y, Z locales, pues estas barras sólo están sometidas a esfuerzo axial.

### *Viga empotrada en ambos extremos*

Este elemento tiene 6 grados de libertad en cada extremo: tres desplazamientos según X, Y, Z, y tres giros según los tres ejes. (Figura 2). Este elemento absorbe esfuerzo axial, momentos de flexión y fuerza cortante en dos planos y torsión sobre su eje. Incluye la posibilidad de considerar la energía de esfuerzo cortante.

Para esta viga se considera un sistema de ejes local a la misma (Figura 3). Este sistema de ejes tiene su origen en el nudo inicial del elemento y su eje X en la dirección del propio elemento. Los ejes Y y Z del sistema local deben ser los principales de inercia de la sección recta de la barra. Los resultados calculados para estas vigas (p.e. los esfuerzos internos) están referidos a este sistema de ejes local, en el cual son más significativos.

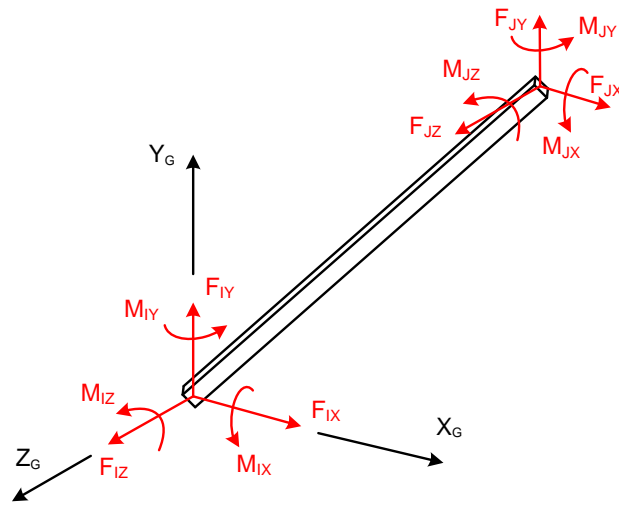
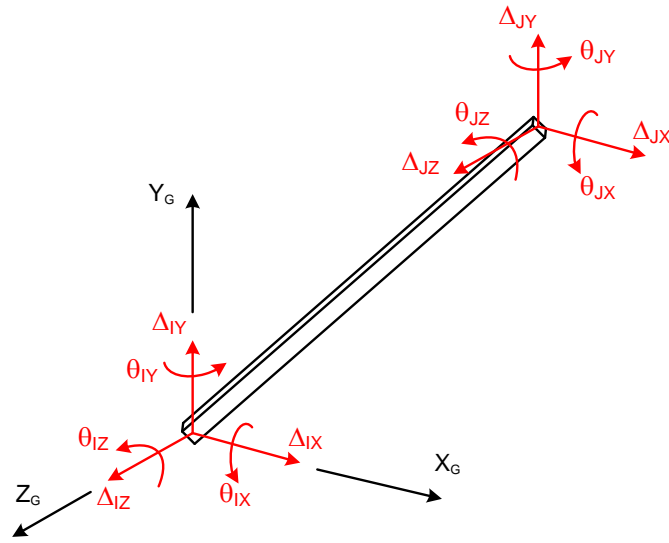


Figura 2. Elemento viga empotrada en ambos extremos

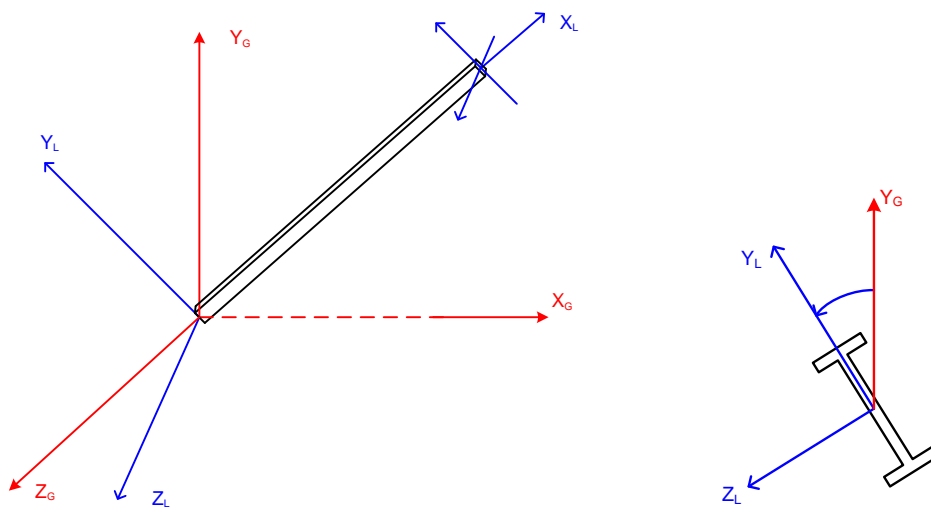


Figura 3. Sistema de ejes local para una viga empotrada

## Grados de libertad

Con los dos tipos de elementos empleados, cada nudo de la estructura puede tener 3 o 6 grados de libertad.

- Si todas las barras que llegan al nudo son biarticuladas, el nudo tendrá tres desplazamientos en las direcciones X, Y y Z. Esta es la situación más normal.
- Si al menos una barra es biempotrada, el nudo tendrá los 6 grados de libertad: tres desplazamientos y tres giros en las direcciones X, Y y Z.

## Propiedades de las barras

Las barras biarticuladas se supone que están formadas por un perfil tipo tubo circular hueco, el cual define tanto las características resistentes de la sección transversal de la barra (diámetro, área...) como del material que lo forma (módulo de elasticidad, límite elástico...). Pueden asociarse el mismo tubo a muchas barras, que entonces comparten las mismas propiedades.

Las vigas empotradas se supone que están formadas por perfiles estructurales normalizados (IPE, HEB, etc.). Asimismo, el material de dichas vigas empotradas se supone que corresponde a uno de los aceros de construcción habituales. Para ello se han incluido en el programa las propiedades resistentes de los aceros de construcción y de los perfiles estructurales más habituales. Los perfiles incluidos en el programa son: IPE, HEA, HEB, HEM, UPE y tubos huecos redondos o cuadrados.

## Fuerzas exteriores admitidas

Sobre los nudos pueden aplicarse fuerzas en las 3 direcciones X, Y, Z del sistema de ejes general de la estructura.

Sobre los elementos que componen la estructura (barras articuladas o vigas empotradas) pueden aplicarse tres tipos de acciones exteriores:

- Variación de temperatura entre la temperatura de trabajo y la temperatura de montaje de la barra. Se supone uniforme en toda la barra.
- Esfuerzo axial de pretensión del elemento durante el montaje. Se trata de dos fuerzas iguales y de sentido contrario aplicadas sobre la barra durante su montaje en la estructura.
- Error en la longitud del elemento. Se trata de una diferencia entre la longitud de la barra en su estado natural (descargado) y su longitud de montaje.

## Unidades

El programa utiliza el siguiente sistema de unidades para todas sus magnitudes:

Longitud: **cm**, fuerza: **kg** y temperatura: **°C**.

## Limitaciones

El programa no tiene ninguna limitación referente al tamaño máximo de la estructura a analizar, dado que toda la información necesaria para el modelo estructural se almacena dinámicamente en la memoria del computador. Por lo tanto, la única limitación al tamaño de la estructura a analizar es la cantidad de memoria disponible en el computador.

La magnitud que más influye en la cantidad de memoria requerida es el número de nudos de la estructura, la cual determina el número de grados de libertad y por lo tanto el tamaño de la matriz de rigidez. Esta matriz se almacena en la memoria RAM del ordenador utilizando un método de altura de columna variable. Además, el programa efectúa una reenumeración de los números asociados a los nudos con objeto de minimizar el ancho de banda de la matriz de rigidez, y así disminuir la cantidad de memoria ocupada.

La gran eficiencia de los algoritmos implementados en el programa hace que se puedan almacenar en memoria y calcular de forma interactiva estructuras con varios de miles de barras y de grados de libertad.

## Interfaz de usuario

La interfaz de usuario del programa tiene los elementos típicos de una aplicación basada en un entorno de ventanas. Consta de una ventana principal (Figura 4) que contiene los elementos fundamentales de la interfaz (menú, barra de herramientas...), que se describen a continuación. Además de la ventana principal, el programa utiliza varios diálogos específicos para comunicación con el usuario.

La ventana principal de la aplicación está ocupada en su mayor parte por la ventana de dibujo, en la cual se muestra una representación espacial de la estructura calculada.

El menú está situado en la parte superior de la ventana principal, y contiene una serie de opciones que permiten efectuar todas las operaciones permitidas por el programa: calcular la estructura, mostrar los distintos resultados, etc. La barra de herramientas principal contiene iconos que permiten la realización de las operaciones más frecuentes, como efectuar los cálculos, elegir la información que se visualiza, la hipótesis de carga activa, etc.

En la parte inferior de la ventana principal existe una ventana auxiliar que contiene dos controles deslizantes que permiten cambiar el ángulo horizontal de visión (acimut) y el ángulo de inclinación. Asimismo, la parte inferior de la ventana principal contiene una barra

## GENERALIDADES SOBRE CELO3D

de estado, que muestra las coordenadas Xv, Yv del punto donde está situado el ratón, y diversos mensajes. En la zona izquierda de la ventana principal existe una ventana auxiliar que contiene un control deslizante que permite cambiar el ángulo de visión vertical (elevación).

El ratón puede usarse para efectuar diversas operaciones de control de la visualización: zoom, traslación lateral, etc., que se describen más adelante.

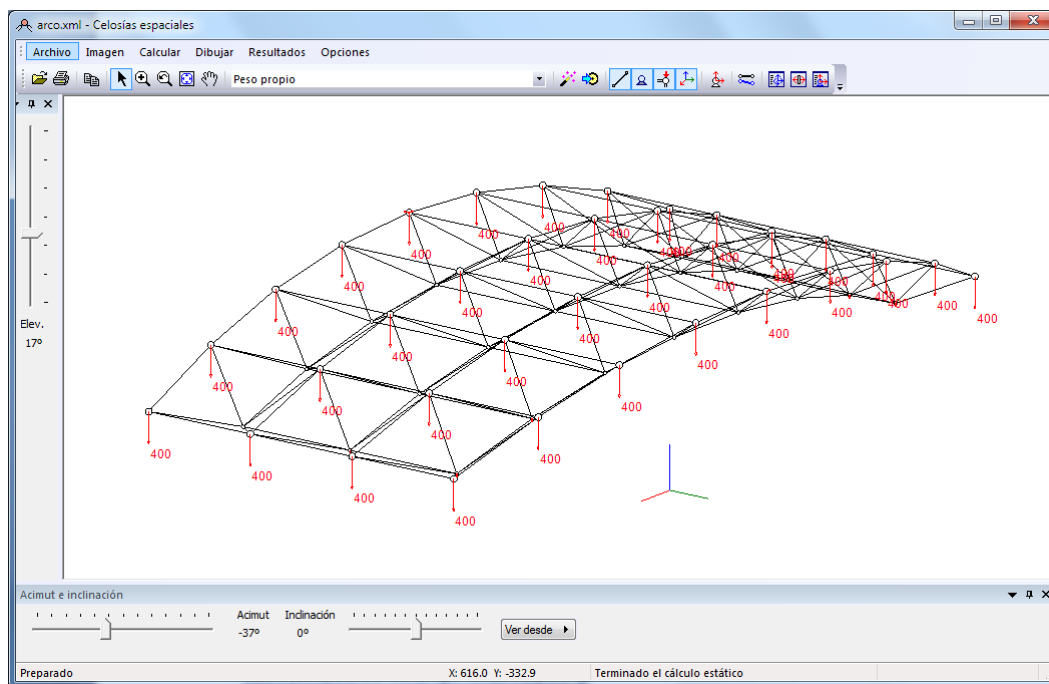



Figura 4. Ventana principal de la interfaz de usuario

## Operaciones con documentos

Toda la información necesaria para el cálculo de una estructura con Celo3d se almacena en un archivo de disco, denominado documento. Se trata de un archivo de texto en formato xml, que puede ser editado mediante cualquier editor de este tipo de formato. La extensión empleada para estos archivos es la **.xml**.

El programa emplea la técnica del documento único. Esto quiere decir que sólo se puede tener un documento abierto simultáneamente, y que al abrir uno de ellos, se cierra el que estaba activo. Para abrir un documento ya existente, se puede elegir la opción Archivo / Abrir del menú principal o pulsar en el icono  de la barra de herramientas. Aparece un diálogo que permite elegir el documento a cargar en el programa.

## Representación gráfica de la estructura

El programa muestra en la ventana de dibujo una representación esquemática de la estructura, de las cargas aplicadas sobre ella y de los resultados del cálculo.

Las barras articuladas se representan mediante una línea simple. Para las vigas se emplea asimismo una línea simple, pero de mayor grosor que para las barras articuladas.

Para representar los nudos se emplean los siguientes símbolos:

- Nudos totalmente articulados, con tres desplazamientos, y en los que no existe ningún giro: se presentan mediante un círculo blanco ○.
- Nudos totalmente empotrados, con tres desplazamientos y tres giros: se representan mediante un cuadrado blanco □.
- Nudos no usados: se trata de nudos a los que no hay conectados elementos estructurales. Se representan mediante un círculo negro ●.

El programa permite controlar de forma interactiva la información que se muestra en la zona de dibujo, para lo cual existen una serie de opciones de menú y de iconos específicos.

## Sistema de coordenadas de visión

Para efectuar la representación gráfica en dos dimensiones de la estructura, se utiliza una transformación de coordenadas que permite pasar de las tres coordenadas de la estructura en el espacio a las coordenadas de la ventana gráfica. Esta transformación de coordenadas se apoya en un sistema de coordenadas, denominado sistema de coordenadas de visión (SCV), cuyos ejes se denominan  $X_v$ ,  $Y_v$ ,  $Z_v$ . Se considera que el observador está situado en el eje  $Z_v$  y mira hacia el origen de coordenadas del SCV. La ventana gráfica de dibujo está situada en el plano  $X_v$ ,  $Y_v$ , en el cual se proyecta la imagen de la estructura.

La posición del SCV respecto del sistema de ejes de la estructura se define mediante tres rotaciones sucesivas (Figura 5):

- Rotación horizontal. Se gira un ángulo, denominado ángulo de acimut horizontal (**A**), alrededor del eje  $Z$ . Con esto el eje  $X$  se transforma en el eje  $X_a$  y el eje  $Y$  en el eje  $Y_a$ , ambos contenidos en el plano  $XY$ . El ángulo de acimut  $A$  se considera negativo medido desde el eje  $X$  hacia el  $X_a$ , en el sentido de giro que genere el eje  $Z$ .
- Rotación vertical. Se gira un ángulo, denominado ángulo de elevación (**E**), respecto al eje  $Y_a$ . Con esta rotación el eje  $X_a$  se transforma en la dirección de visión  $Z_v$ , y el

eje Z se transforma en el eje Ze. El ángulo de elevación E se considera positivo medido desde Xa hacia Zv, en el sentido que produzca el eje -Ya.

- Rotación de inclinación. Se gira un ángulo, denominado de inclinación (I), respecto al eje de visión Zv, de tal forma que el eje Ze se transforme en el eje Yv, y el eje Ya se transforme en el eje Xv. Normalmente esta rotación es nula, con lo que el eje Z de la estructura se hace coincidir con la dirección vertical de la ventana de dibujo.

El sistema SCV tiene su origen en el punto central de la estructura. Este punto se calcula como el punto medio de todos los nudos de la estructura.

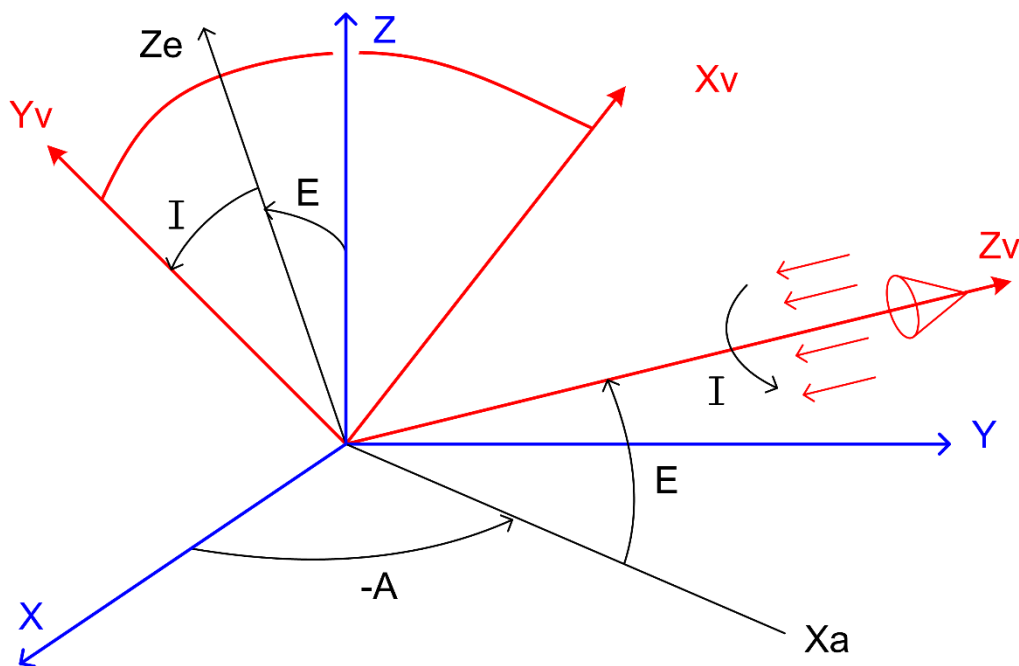


Figura 5. Sistema de coordenadas de visión

Una vez definido el SCV, la proyección de la estructura para efectuar su representación gráfica se produce de la forma siguiente:

- La dirección de visión coincide con el eje Zv del SCV: el observador está situado en dicho eje y mira hacia el origen del SCV.
- La estructura se proyecta sobre el plano Xv,Yv del SCV, y en él se efectúa la representación gráfica. Este plano Xv,Yv es el que se hace coincidir con la zona de dibujo en la ventana gráfica del programa. El eje Xv coincide con el eje horizontal de la ventana y el eje Yv con el eje vertical.
- La proyección de coordenadas es isométrica: todos los puntos se transforman con la misma dirección de visión (la dirección de eje Zv). Esto equivale a que el observador esté situado en el infinito en el eje Zv.

Los tres ángulos de rotación (A), (E), (I) pueden definirse desde la interfaz de usuario.

## Control de la imagen

La imagen de la estructura que se muestra en la zona de dibujo puede controlarse de forma interactiva, mediante una serie de opciones de menú y de iconos específicos. Las distintas operaciones que pueden efectuarse son:

## Control del punto de vista

La posición del punto de vista puede controlarse de forma interactiva dando valores a los tres ángulos que definen la dirección de visión del sistema de coordenadas de visión (SCV). Puede efectuarse de dos formas distintas:

- Control desde las barras de herramientas. Existen dos barras de herramientas dedicadas al control del punto de vista. La barra de herramientas del ángulo de elevación está situada a la izquierda de la ventana principal, y tiene un control de deslizamiento que permite variar el ángulo de elevación (E). La barra de herramientas del ángulo de acimut está situada en la parte inferior de la ventana principal, y tiene dos controles de deslizamiento, que permiten variar los ángulos de acimut (A) y de inclinación (I).
- Control mediante el ratón. Es posible cambiar la dirección de visión directamente mediante el ratón, cuando éste está en modo de selección (cursor en forma de flecha). Para ello basta con situar el cursor en un punto cualquiera del área de dibujo y pulsar el botón izquierdo del ratón. A continuación, se mueve el ratón sobre el área de dibujo, manteniendo el botón izquierdo pulsado, con lo que el punto de vista cambiará siguiendo el movimiento del ratón: los movimientos horizontales corresponden al ángulo de acimut (A) y los verticales al ángulo de elevación (E). El ángulo de inclinación no puede cambiarse mediante el ratón.

## Ampliar la imagen

Aumenta el tamaño de la imagen, consiguiendo un efecto de zoom. Puede efectuarse de dos formas:

Menú: Imagen / Ampliar

Rueda del ratón: girar la rueda del ratón hacia adelante.

La ampliación se efectúa tomando como punto central de referencia el centro de la imagen.

## Reducir la imagen


La imagen se reduce tomando como punto central de referencia el centro de dicha imagen. Puede efectuarse de dos formas:



Menú: Imagen / Reducir

Rueda del ratón: girar la rueda del ratón hacia atrás.

### Zoom

Permite ampliar una zona del dibujo. Para ello se emplea el icono  de la barra de herramientas. Al seleccionar este icono, el ratón adopta la forma de una lupa. A continuación, se sitúa el ratón sobre uno de los vértices de la zona que se desea ampliar y se actúa sobre su botón izquierdo. Manteniendo el botón izquierdo pulsado se mueve el ratón, con lo que se selecciona la zona del dibujo a ampliar. Al soltar el botón izquierdo del ratón, la imagen muestra sólo la zona seleccionada. También puede efectuarse una sola pulsación con el ratón, con lo que la zona a ampliar se toma alrededor del punto seleccionado.

### Deshacer zoom

Permite deshacer la última ampliación del dibujo (zoom) que se efectuó. Puede efectuarse de dos formas:


Menú: Imagen / Deshacer zoom

Icono de la barra de herramientas: 

### Centrar la imagen


Dibuja la imagen completa de la estructura de tal forma que ocupe toda la zona de dibujo, centrada en ella. Se eliminan todos los factores de ampliación y reducción anteriores. Puede efectuarse de dos formas:

Menú: Imagen / Centrar

Icono de la barra de herramientas: 

### Trasladar la imagen

La imagen dibujada en la pantalla puede desplazarse lateralmente mediante la rueda giratoria del ratón. Girando dicha rueda a la vez que se pulsa la tecla ctrl se desplaza la imagen en vertical. Si se gira dicha rueda manteniendo pulsada la tecla Mayúscula (⇧) el desplazamiento se produce en horizontal.

También se puede trasladar la imagen mediante el icono  de la barra de herramientas. Al seleccionar este icono, el ratón adopta una forma similar a él. Pulsando el botón izquierdo del ratón y moviendo éste mientras se mantiene pulsado, se puede trasladar la imagen en la pantalla. Durante la traslación la imagen se representa de forma simplificada: sólo se muestran las barras de la estructura, pero no los demás componentes de la misma.

## Tamaño de la letra

El tamaño de la letra usada para los valores numéricos en la representación gráfica de la estructura puede modificarse mediante la opción de menú: Opciones / Tamaño de letra. Dicho tamaño de las letras se define en las mismas unidades que la geometría de la estructura.

## Copiar la imagen

La imagen dibujada sobre la pantalla puede copiarse al portapapeles de Windows con objeto de poderla utilizar en otras aplicaciones informáticas.

Para ello se emplea la opción de menú Imagen / Copiar imagen.

## Hipótesis de carga activa

De entre todas las hipótesis de carga definidas, sólo una de ellas está activa en cada instante en el programa. Todos los datos y resultados mostrados en la interfaz gráfica del programa son los que corresponden a esta hipótesis activa.

La hipótesis activa puede cambiarse en cualquier momento mediante la lista desplegable situada en la barra de herramientas, que contiene una lista de todas las hipótesis definidas. Cuando se efectúa el cálculo de la estructura, se calculan los resultados para todas las hipótesis definidas.

## Visualización de los datos

El programa permite controlar de forma interactiva los datos que se muestran en la zona de dibujo, mediante una serie de opciones de menú y de iconos específicos.

## Barras y nudos que componen la estructura

Las barras se muestran mediante un trazo simple, que corresponde a su eje. Además de las barras se muestran también los nudos en las que éstas se conectan entre sí, con la nomenclatura ya descrita anteriormente.

Opción de menú: Dibujar / Barras

Icono de la barra de herramientas: 

## Números de los nudos

Se indica, junto a cada nudo, su número identificador.

Opción de menú: Dibujar / Número de nudos

## Números de las barras

Se indica, en el centro de cada barra, su número identificador.

Opción de menú: Dibujar / Números de barras

## Tipos de perfiles asociados a las barras


Se indica, en el centro de cada barra, el código del tubo o perfil estructural que le corresponde.

Opción de menú: Dibujar / Código de los perfiles

## Apoyos de la estructura

Para representar gráficamente los apoyos de la estructura se pueden emplear:

Opción de menú: Dibujar / Apoyos

Icono de la barra de herramientas: 

Los apoyos más comunes se representan en la forma habitual en análisis estructural. Los apoyos menos habituales, que no tienen una representación sencilla, se representan mediante el siguiente código:

- Desplazamiento fijo: un segmento rojo en el sentido positivo del eje en cuya dirección se impide el movimiento.
- Giro fijo: un segmento rojo en el sentido negativo del eje en cuya dirección se impide el giro.

Los apoyos elásticos se representan mediante el siguiente código:

- Apoyo elástico en un desplazamiento: un resorte azul en el sentido positivo del eje en cuya dirección está el apoyo elástico.
- Apoyo elástico en un giro: una hélice azul en el sentido negativo del eje en cuya rotación está el apoyo elástico.

## Fuerzas aplicadas

Se representan las fuerzas aplicadas sobre los nudos y sobre las barras, para la hipótesis activa. Las cargas térmicas se representan mediante una línea de color rojo a lo largo de la barra.

Opción de menú: Dibujar / Fuerzas aplicadas

Icono de la barra de herramientas: 

## Valores de las fuerzas

Se muestra el valor numérico de cada carga exterior aplicada. Para las cargas puntuales se indica con su valor absoluto, junto a su representación gráfica. Para las cargas térmicas o de pretensión se muestra su valor en el centro de la barra. Estos valores numéricos sólo se muestran si está seleccionada la opción correspondiente para representar gráficamente las fuerzas.

Opción de menú: Dibujar / Valores numéricos de las fuerzas

## Ejes generales de la estructura

Se muestran los ejes generales X, Y, Z de la estructura, situados en el origen de coordenadas.

Opción de menú: Dibujar / Ejes generales

## Ejes locales de las vigas

El sistema de ejes locales  $X_L$ ,  $Y_L$ ,  $Z_L$  de cada viga empotrada se puede representar gráficamente, mediante la opción de menú: Dibujar / Ejes locales de vigas empotradas.

Dichos ejes se representan situados aproximadamente en el centro de la viga por claridad del dibujo, pero en realidad el origen del sistema local está ubicado en el nudo inicial de la viga.

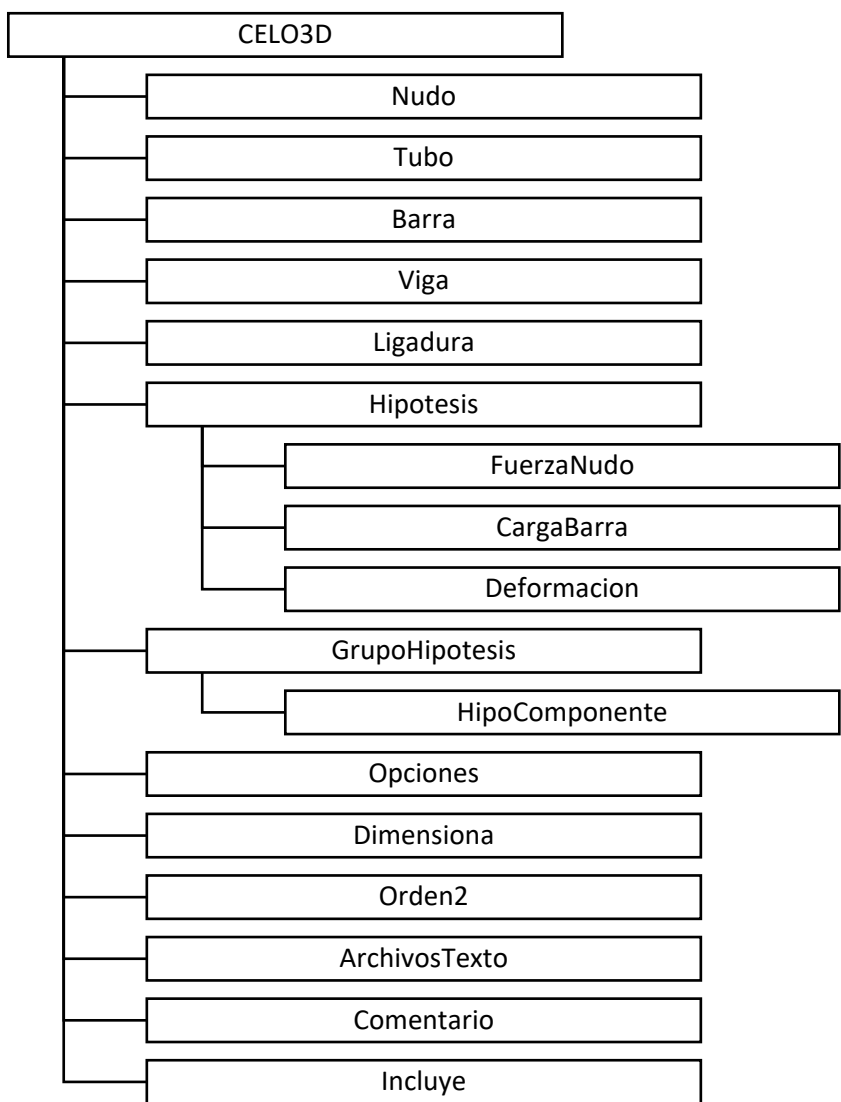
Para las barras articuladas no se representa ningún sistema de ejes local.

## Definición de la estructura

La definición completa de la estructura se efectúa en un archivo de disco, denominado documento. Se trata de un archivo de texto en formato xml. El contenido de este fichero puede modificarse mediante un editor adecuado para ficheros xml, con lo cual se puede modificar el modelo de la estructura o incluso crearlo por completo.

La información se organiza en este fichero de forma jerárquica, mediante en una serie de elementos, cada uno de los cuales tiene una serie de atributos, así como otros elementos descendientes.

El siguiente gráfico muestra los distintos elementos que puede haber en el fichero y la relación de dependencia entre ellos.



En el archivo sólo puede haber un nodo raíz (CELO3D), pero puede haber cualquier cantidad de los restantes elementos, sin límite alguno.

Los elementos pueden aparecer en cualquier orden en el fichero. La única condición que debe cumplirse es que cuando un elemento del archivo haga referencia a otro, el elemento referenciado debe estar situado en el archivo antes que el elemento que lo referencia.

Los nombres de los elementos y de sus atributos son sensibles a las mayúsculas y minúsculas.

Además de los elementos descritos aquí, pueden situarse otros elementos distintos, que serán ignorados, dándose un aviso. Pueden emplearse asimismo elementos de tipo comentario (#comment) o texto (#text) del lenguaje xml, que serán ignorados.

Los atributos de un elemento pueden aparecer en cualquier orden. Debe cumplirse la condición de que cuando un atributo de un elemento haga referencia a otro atributo, el atributo referenciado debe estar situado en el elemento antes que el que lo referencia

Los elementos o atributos obligatorios, o la parte mínima de los nombres que es obligatoria, están indicados mediante subrayado.

En las secciones siguientes se describen los distintos elementos, indicando la dependencia entre unos y otros y sus atributos. Para indicar la naturaleza de estos atributos se emplea la siguiente notación:

Int: valor numérico entero.

Float: valor numérico de punto flotante.

Texto: valor alfabético.

[*n*]: vector de *n* componentes.

## Elemento raíz del documento

Nombre: **CELO3D**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: ninguno.

Nodos hijos: Nudo, Tubo, Barra, Viga, Ligadura, Hipotesis, GrupoHipotesis, Opciones, Dimensiona, Orden2, ArchivosTexto, Comentario, Incluye.

Atributos:

Nombre	Tipo	Descripción
<u>Version</u>	Int [3]	Versión del programa Celo3D que creó el archivo

## Elemento Nudo

Se emplea para definir un nudo de la estructura.

Nombre: **Nudo**

## DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: CELO3D.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos:

Nombre	Tipo	Descripción
<u>ID</u>	Int	Identificador numérico del nudo. Cualquier entero positivo. Debe ser diferente para cada nudo de la estructura.
<u>X</u>	Float	Coordenada X del nudo.
<u>Y</u>	Float	Coordenada Y del nudo.
<u>Z</u>	Float	Coordenada Z del nudo.

## Elemento Tubo

Se emplea para definir un perfil estructural en forma de tubo circular, incluyendo tanto sus propiedades geométricas como las del material que lo forma.

Nombre: **Tubo**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: CELO3D.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos:

Atributo	Tipo	Descripción
<u>Codigo</u>	Texto	Código único que identifica el perfil entre todos los demás de todas las familias (Nota 1).
<u>Diam</u>	Float	Diámetro exterior del tubo.
<u>Esp</u>	Float	Espesor del tubo.
FactorDiamEsp	Float	Factor por el que se debe multiplicar el diámetro y el espesor del tubo para convertirlos a las unidades en que está el resto del modelo. Valor de defecto 1.
Area	Float	Área de la sección transversal del tubo. Si no se incluye este atributo, el área se calcula por el programa mediante el diámetro y el espesor.
<u>CurvaPandeoCT</u>	Texto	Código alfabético de un carácter, que indica la curva de pandeo a emplear según EN 1993-1-1

		(tabla 6.1). Sus valores pueden ser: 0 (curva a <sub>0</sub> ), a, b, c, d.
<u>LimiteElastico</u>	Float	Límite elástico del material del tubo.
<u>E</u>	Float	Módulo de elasticidad del material del tubo.
<u>Alfa</u>	Float	Coefficiente de dilatación lineal del material.
<u>PesoEspecifico</u>	Float	Peso por unidad de volumen del material

**Notas:**

- (1) El código de un tubo no puede coincidir con ninguno de los perfiles normalizados. Por ello no puede comenzar por las siguientes palabras ya reservadas: TUBOCUAD, TUBORED, TUBORECT, IPE, HEA, HEB, HEM, UPE.

## Elemento Barra

Se emplea para definir una barra biarticulada de la estructura.

Nombre: **Barra**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: CELO3D.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos:

Atributo	Tipo	Descripción
<u>ID</u>	Int	Identificador numérico de la barra. Cualquier entero positivo. Debe ser diferente para cada barra y cada viga de la estructura.
<u>N1</u>	Int	Identificador (atributo ID) del nudo 1 de la barra.
<u>N2</u>	Int	Identificador (atributo ID) del nudo 2 de la barra.
<u>Tubo</u>	Texto	Código (atributo <i>Codigo</i> ) del Tubo asociado al elemento estructural.

## Elemento Viga

Se emplea para definir una viga empotrada en ambos extremos.

Nombre: **Viga**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: CELO3D.

Nodos hijos: ninguno.



## DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA

Atributos:

Atributo	Tipo	Descripción
<u>ID</u>	Int	Identificador numérico del elemento. Cualquier entero positivo. Debe ser diferente para cada barra y cada viga de la estructura.
<u>N1</u>	Int	Identificador (atributo ID) del nudo 1 del elemento.
<u>N2</u>	Int	Identificador (atributo ID) del nudo 2 del elemento.
<u>Perfil</u>	Texto	Código del perfil asociado a la viga (Nota 1).
<u>Material</u>	Texto	Código del material asociado a la viga (Nota 2).
EnergiaCortante	Int	Indica si se debe considerar la energía del esfuerzo cortante (=1) o no (=0). (Nota 3).
ModoSistemaLocal	Int	Indica el método empleado para definir el sistema local de la viga en el espacio. 0: definición mediante el ángulo auxiliar, 1: definición mediante un punto auxiliar. Si no se define este atributo se toma el valor de defecto ModoSistemaLocal=0.
AnguloFi	Float	Ángulo de rotación para ubicar el sistema local de la viga respecto del sistema general, en grados. Sólo es necesario si ModoSistemaLocal=0.
Xaux	Float	Coordenada X general de un punto auxiliar cualquiera situado en el plano XY local de la viga, salvo en el eje X local. Sólo es necesario si ModoSistemaLocal=1.
Yaux	Float	Ídem para la coordenada Y del punto auxiliar.
Zaux	Float	Ídem para la coordenada Z del punto auxiliar.
BetaXY	Float	Coefficiente de pandeo de esta barra para el pandeo en su plano XY local.
BetaXZ	Float	Ídem en su plano XZ local.

**Notas:**

- (1) El código del perfil puede corresponder al atributo *Codigo* de un elemento de tipo Tubo definido previamente en el fichero, o al atributo *Codigo* de un perfil normalizado. Los códigos de los perfiles normalizados pueden obtenerse del archivo *perfiles.xml* que se suministra con el programa.
- (2) El código del material debe corresponder al atributo *Codigo* de un material normalizado. Los códigos de los materiales normalizados pueden obtenerse del

archivo materiales.xml que se suministra con el programa. Los códigos más habituales, para el acero de construcción, son ACEROS235, ACEROS275, ACEROS355, ACERO420 y ACEROS460 y corresponden a los aceros de construcción tipo S235, S275, S355, S420 y S460.

## Elemento Ligadura

Se emplea para definir una condición de ligadura de la estructura con su sustentación.

Nombre: **Ligadura**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: CELO3D.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos:

Atributo	Tipo	Descripción
<u>Nudo</u>	Int	Identificador del nudo donde está aplicada la ligadura. Debe corresponder al atributo ID de un elemento Nudo.
DXFIJO		Indica que el desplazamiento X está impedido.
DYFIJO		Indica que el desplazamiento Y está impedido.
DZFIJO		Indica que el desplazamiento Z está impedido.
GXFIJO		Indica que la rotación X está impedida.
GYFIJO		Indica que la rotación Y está impedida.
GZFIJO		Indica que la rotación Z está impedida.
DXELAS	Float	Indica que el desplazamiento X está apoyado elásticamente, con una rigidez dada por el valor del atributo.
DYELAS	Float	Ídem para el desplazamiento Y.
DZELAS	Float	Ídem para el desplazamiento Z.
GXELAS	Float	Ídem para la rotación X.
GYELAS	Float	Ídem para la rotación Y.
GZELAS	Float	Ídem para la rotación Z.

### Notas:

- (1) Pueden definirse varias ligaduras aplicadas sobre un mismo nudo, sin límite y en cualquier orden. En este caso, sobre cada grado de libertad se aplicarán una tras

## DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA

otra todas las ligaduras definidas para el nudo. En este proceso de aplicación, tiene máxima prioridad la restricción de desplazamiento impedido (desplazamiento nulo), seguida de la de apoyo elástico y de la de desplazamiento libre.

- (2) Si se definen varias ligaduras de apoyo elástico sobre un mismo grado de libertad, la rigidez final del apoyo es la suma de todas las rigideces definidas.

### Elemento Hipotesis

Se emplea para definir una hipótesis de cargas.

Nombre: **Hipotesis**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: CELO3D.

Nodos hijos: FuerzaNudo, CargaBarra, Deformacion.

Atributos:

Atributo	Tipo	Descripción
<u>ID</u>	Int	Identificador numérico de la hipótesis. Cualquier entero positivo. Debe ser diferente para cada hipótesis de carga.
<u>Nombre</u>	Texto	El nombre alfabético de la hipótesis.
PesoPropio	Int	Código que indica si se debe añadir el peso propio de las barras y en su caso la dirección en la que actúa. Puede valer: no incluir peso propio: 0, eje +X: +1, eje -X: -1, eje +Y: +2, eje -Y: -2, eje +Z: +3, eje -Z: -3. Este peso propio se calcula empleando las longitudes ideales de las barras y su área teórica.
TemperaturaBarras	float	Código que indica si se debe aplicar una variación de temperatura a todas las barras de la estructura, y su valor.

### Elemento FuerzaNudo

Se emplea para definir una fuerza o un momento exterior puntuales aplicados sobre un nudo.

Nombre: **FuerzaNudo**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: Hipotesis.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos:

Atributo	Tipo	Descripción
<u>Nudo</u>	Int	Identificador del nudo donde está aplicada la fuerza. Debe coincidir con el atributo ID de un elemento Nudo.
FX	Float	Valor de la fuerza aplicada en la dirección X general.
FY	Float	Valor de la fuerza aplicada en la dirección Y general.
FZ	Float	Valor de la fuerza aplicada en la dirección Z general.
MX	Float	Valor del momento aplicado en la dirección X general.
MY	Float	Valor del momento aplicado en la dirección Y general.
MZ	Float	Valor del momento aplicado en la dirección Z general.

**Nota:**

- (1) Pueden definirse varias fuerzas actuando sobre un mismo nudo, sin límite y en cualquier orden. Sobre dicho nudo se aplicará la suma de todas las fuerzas definidas sobre él.
- (2) Los momentos sólo pueden aplicarse sobre nudos que tengan 6 grados de libertad.

## Elemento CargaBarra

Se emplea para definir una carga aplicada sobre un elemento de la estructura.

Nombre: **CargaBarra**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: Hipotesis.

Nodos hijos: ninguno.

## DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA

Atributos:

Atributo	Tipo	Descripción
<u>Elemento</u>	Int	Identificador del elemento donde está aplicada la carga. Debe coincidir con el atributo ID de un elemento Barra o Viga.
<u>Tipo</u>	Texto	Tipo de carga aplicada (Nota 1).
Tm	Float	Temperatura media de la barra.
ErrorLongitud	Float	Error en la longitud de la barra. Positivo si la barra en su estado natural (descargado) es más larga que su longitud de montaje.
PretAxial	Float	Fuerza de pretensión axial aplicada sobre la barra durante su montaje. Positiva a tracción sobre la barra.

**Nota:**

- (1) Los distintos valores que puede adoptar el atributo Tipo se muestran en la tabla siguiente. Para cada tipo de carga se indica qué atributo es necesario:

Tipo	Descripción	Atributo necesario
TER	Carga térmica	Tm
ERR	Error en la longitud de la barra	ErrorLongitud
PRET	Fuerza de pretensión sobre la barra	PretAxial

### Elemento Deformacion

Se emplea para imponer una deformación de valor conocido sobre un nudo en que ya hay aplicada una condición de ligadura.

Nombre: **Deformacion**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: Hipotesis.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos:

Atributo	Tipo	Descripción
<u>Nudo</u>	Int	Identificador del nudo donde se impone la deformación. Debe coincidir con el atributo ID de un elemento tipo Nudo.
<u>GDL</u>	Texto	Identificación del grado de libertad donde se impone la deformación (Nota 1).
<u>Valor</u>	Float	Valor de la deformación impuesta, en la dirección de los ejes generales.

**Nota:**

- (1) Los valores del atributo GDL pueden ser: DX: desplazamiento en dirección X, DY: desplazamiento en dirección Y, DZ: desplazamiento en dirección Z, GX: giro alrededor del eje X, GY: giro alrededor del eje Y o GZ: giro alrededor del eje Z.

## Elemento GrupoHipotesis

Se emplea para definir un grupo de hipótesis de cargas que son mutuamente excluyentes a efectos de combinación de resultados.

Nombre: **GrupoHipotesis**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: CELO3D.

Nodos hijos: HipoComponente.

Atributos:

Nombre	Tipo	Descripción
<u>Nombre</u>	Texto	El nombre del grupo de hipótesis de carga.
<u>GamaDesfResist</u>	Float	Coeficiente de mayoración de este grupo de hipótesis para el caso desfavorable, en la comprobación de resistencia.
<u>GamaFavoResist</u>	Float	Idem para el caso favorable
Activo	Int	Indica si este grupo de hipótesis de carga está activo en las comprobaciones (=1) o no (=0). Por defecto todos los grupos están activos.

## Elemento HipoComponente

Se emplea para definir una hipótesis de cargas que es componente de un grupo de hipótesis de cargas.

Nombre: **HipoComponente**

Valor asociado: Identificador numérico de la hipótesis que es componente del grupo. Debe coincidir con el atributo ID de un elemento Hipotesis definido previamente.

Nodo padre: GrupoHipotesis.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos: ninguno.

## Elemento Opciones

Se emplea para definir información general sobre el modelo.

Nombre: **Opciones**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: CELO3D.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos:

Nombre	Tipo	Descripción
FormatoResultados	Texto	NO: no se generarán archivos de resultados numéricos. STD: se generarán los archivos de resultados numéricos estándar.
TramosCSColor	Float[4]	Valores del coeficiente de seguridad de las barras para cada uno de los colores empleados para colorear las barras.
PrintInfoRenum	Int	Código para generar un archivo con información sobre el proceso de renumeración seguido para minimizar la anchura de banda de la matriz de rigidez. Puede valer:  1: generar el archivo con información sobre el proceso de renumeración.  0: no generar el archivo.
BorrarPerfil	Int	Borrar todas las barras de la estructura que utilicen el perfil indicado.

## Elemento Dimensiona

Se emplea para definir los parámetros que controlan el proceso de dimensionamiento.

Nombre: **Dimensiona**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: CELO3D.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos:

Nombre	Tipo	Descripción
MaxPasos	Int	Número máximo de pasos de diseño a efectuar.
OrdenBusquedaTubos	Texto	Criterio para la selección de los tubos para cada barra. Puede ser:  TABLA: se eligen los tubos en el mismo orden que están en el fichero de datos.  AREA: se eligen los tubos en orden de área creciente.  AXIAL: se eligen los tubos en orden creciente de esfuerzo axial admisible.
Inicio	Texto	Criterio para iniciar el dimensionamiento de cada barra. Puede ser:  PERFILMIN: empezar por el tubo más pequeño de la tabla de tubos.  PERFILACT: empezar por el tubo actual.
EspesorMinimo	Float	Espesor mínimo de los tubos.
EsbeltezMaximaCompresión	Float	Esbeltez adimensional máxima a compresión. Valor por defecto: 2.
EsbeltezMaximaTracción	Float	Esbeltez adimensional máxima a tracción. Valor por defecto: 3.
ComprobarVientoLocal	Int	Indica si se debe efectuar la comprobación por vibración local debida al viento (1), o no (0).
VelocidadVientoLocal	Float	Velocidad de viento para la comprobación de las barras ante vibraciones locales debidas al viento.



## DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA

OrdenModoVibracionLocal	Int	Orden de la frecuencia de vibración de las barras que debe ser superior a la frecuencia del remolino asociada a la velocidad de viento máxima (valor por defecto: 1).
AjusteFinal	Int	Forzar a efectuar un ajuste final de todas las barras hasta sus tamaños mínimos (1) o no (0).
NivelListado	Int	Nivel de listado de información durante el proceso de diseño. Sus valores pueden ser 0: mínimo, 1: medio, 2: máximo.

### Elemento Orden2

Se emplea para definir los parámetros que controlan el proceso de cálculo estático de segundo orden.

Nombre: **Orden2**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: CELO3D.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos:

Nombre	Tipo	Descripción
PasosCarga	Int	Número de pasos que se emplean para aplicar las cargas de cada hipótesis.
MaximoIncrementoIteracion	Float	Máximo incremento de deformación que se permite en cada iteración para búsqueda del equilibrio, en cada paso de carga.
FullNewton	Int	Indica si se emplea al método de iteración de Newton completo (1) o modificado (0) para la búsqueda del equilibrio. En el método completo se forma la matriz de rigidez tangente en cada iteración y se factoriza, mientras que en el modificado se emplea la misma matriz en todas las iteraciones. El método modificado requiere más iteraciones, pero cada una es menos costosa.

## Elemento ArchivosTexto

Se emplea para definir los nombres de una serie de archivos que contienen información sobre la estructura.

Nombre: **ArchivosTexto**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: CELO3D.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos:

Nombre	Tipo	Descripción
Nudos	Texto	Nombre del archivo que contiene las coordenadas de los nudos.
Tubos	Texto	Nombre del archivo que contiene la definición de los tubos que forman las barras de la estructura
Barras	Texto	Nombre del archivo que contiene la definición de las barras de la estructura.
Fuerzas	Texto	Nombre del archivo que contiene las fuerzas exteriores aplicadas sobre los nudos de la estructura.
Ligaduras	Texto	Nombre del archivo que contiene las restricciones impuestas a las deformaciones de los nudos.

Todos los atributos de este elemento son opcionales.

Pueden emplearse varios elementos de tipo ArchivosTexto, cada uno con cualquiera de sus atributos.

Los formatos de los archivos de texto referenciados en este elemento se describen en el “Anejo B. Formato de los archivos de texto de datos”.

## Elemento Comentario

Se emplea para introducir un comentario en el archivo de datos.

Nombre: **Comentario**

Valor asociado: Un texto cualquiera.

Nodo padre: CELO3D.

## DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA

Nodos hijos: ninguno.

Atributos: ninguno.

Los comentarios situados bajo el nodo de máximo nivel (CELO3D) serán listados en los archivos de resultados.

### Elemento Incluye

Se emplea para incluir otro archivo de datos xml en el archivo de datos actual.

Nombre: **Incluye**

Valor asociado: El nombre del archivo de datos a incluir.

Nodo padre: CELO3D.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos: ninguno.

El archivo de datos xml incluido debe estar también en el formato de Celo3D, y puede contener cualquier tipo de elementos. Su elemento raíz debe ser asimismo CELO3D.

No existe límite en el número de archivos incluidos ni en los niveles de inclusión.

## Cálculo de la estructura

El programa permite efectuar sobre la estructura dos tipos diferentes de análisis estático:

- Análisis estático lineal: cálculo de deformaciones y esfuerzos en la hipótesis de pequeñas deformaciones.
- Análisis estático de segundo orden: cálculo de deformaciones y esfuerzos en la hipótesis de grandes deformaciones.

### Cálculo estático lineal

Consiste en la determinación de los esfuerzos y las deformaciones que aparecen en la estructura bajo la acción de las cargas aplicadas sobre ella. Este cálculo se efectúa para todas las hipótesis de carga definidas. Puede activarse de dos formas distintas:

Opción de menú: Calcular / Deformaciones y esfuerzos

Icono de la barra de herramientas: 

Como resultado del cálculo se obtienen:

- Las deformaciones de todos los nudos de la estructura.
- Los esfuerzos internos que aparecen en los elementos.
- Las fuerzas y momentos de reacción en los puntos de apoyo de la estructura.

Si la estructura no es estable, interna o externamente, se genera un mensaje de aviso y no se calcula ningún resultado.

La ejecución del cálculo estático produce un archivo de texto donde se almacenan todos los resultados del mismo: deformaciones en los nudos, esfuerzos en las barras, y reacciones, así como las tensiones pésimas en las barras. El nombre de este archivo coincide con el del archivo de datos, cambiando la extensión .xml por la extensión lisest.txt.

Además, se generarán los archivos numéricos de resultados descritos en el “Anejo B. Formato de los archivos de texto de datos”, en función del valor del atributo FormatoResultados del elemento Opciones del archivo de datos.

### Cálculo estático de segundo orden

En este caso se aplica la teoría de segundo orden, considerando que las deformaciones no son despreciables y aplicando las ecuaciones de equilibrio en la posición deformada. Ello produce un problema no lineal que se resuelve aplicando las cargas de forma incremental, por pasos, e iterando en cada incremento de carga hasta alcanzar el equilibrio entre las

## CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA

fuerzas interiores y los esfuerzos interiores en las barras. La iteración para la búsqueda del equilibrio se efectúa mediante el método de Newton.

Este cálculo se efectúa para todas las hipótesis de carga definidas, una tras otra. Puede activarse mediante la opción de menú: Calcular / Cálculo estático de segundo orden.

Como resultado del cálculo de segundo orden se obtiene el mismo tipo de resultados que en el análisis lineal (deformaciones en los nudos, esfuerzos en las barras, y reacciones). Los pasos de carga durante el proceso de resolución y los resultados del mismo se almacenan en un archivo de texto cuyo nombre coincide con el del archivo de datos, cambiando la extensión .xml por la extensión lisest2.txt.

## Resultados del análisis estático

El programa permite obtener los siguientes resultados:

- Deformaciones de los nudos de la estructura.
- Reacciones en los apoyos.
- Esfuerzos y tensiones en las barras articuladas.
- Esfuerzos internos en las vigas empotradas.

Los resultados se presentan agrupados por hipótesis de carga. Todos ellos pueden visualizarse en la interfaz de usuario, utilizando las opciones adecuadas.

### Deformaciones de los nudos

Se obtienen como solución al sistema de ecuaciones de equilibrio del método de rigidez. Están formadas por los 3 desplazamientos según los 3 ejes X, Y, Z. Si el nudo tiene 6 grados de libertad, se obtienen además los tres giros. Estas deformaciones están expresadas en el sistema de ejes general de la estructura.

Pueden obtenerse mediante las opciones siguientes:

Opción de menú: Resultados / Deformaciones de nudos

Icono de la barra de herramientas: 

Se activa un diálogo (Figura 6) que muestra los valores numéricos de las deformaciones en los distintos nudos de la estructura, para cada hipótesis de carga.

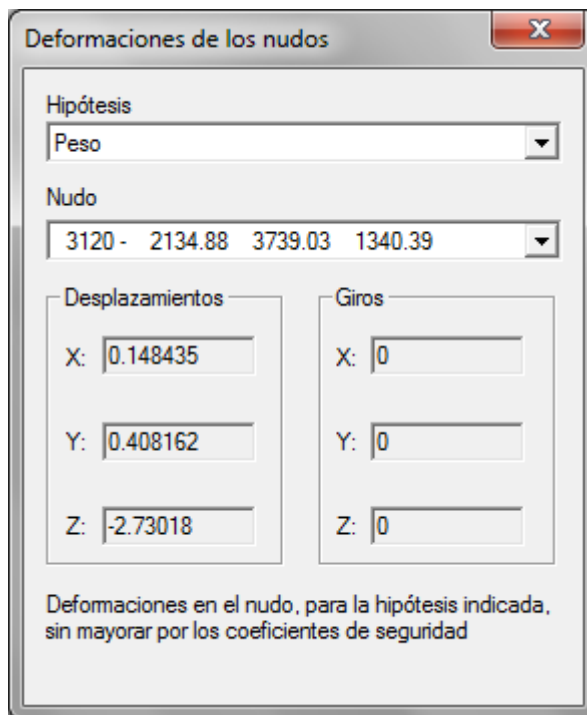



Figura 6. Deformaciones de los nudos

### Deformada estática de la estructura

Se puede representar la deformada elástica de todas las barras de la estructura, debidamente escalada.

Opción de menú: Dibujar / Deformada

Icono de la barra de herramientas: 

El factor de escala por el cual se multiplican las deformaciones de la estructura para su representación gráfica se calcula automáticamente por el programa. Este factor se puede controlar mediante la opción de menú: Opciones / Factor de amplificación de las deformaciones.

### Esfuerzo axial y tensión en las barras articuladas

Se obtiene el esfuerzo axial ( $N$ ) en la dirección del eje de la barra y la tensión axial de diseño  $\sigma$ , producida por él. Esta tensión se calcula mediante las expresiones:

Barras a tracción: 
$$\sigma = \frac{N}{A}$$

Barras a compresión: 
$$\sigma = \frac{N}{\chi A}$$

siendo  $A$  el área de la sección.

En las barras sometidas a compresión se considera el efecto del pandeo mediante un coeficiente de pandeo  $\chi$  según EN 1993-1-1, apartado 6.3.1, para materiales de acero. Este coeficiente  $\chi$  de reducción por pandeo, depende de la esbeltez adimensional  $\bar{\lambda}$  de la pieza y de la curva de pandeo empleada. La esbeltez adimensional de la barra  $\bar{\lambda}$  depende a su vez de su longitud de pandeo y del material:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{con} \quad N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L_p^2}$$

siendo  $f_y$  el límite elástico del material,  $E$  su módulo de elasticidad, e  $I$  el momento de inercia de la sección. Como longitud de pandeo  $L_p$  de las barras articuladas se toma la longitud geométrica ideal entre nudos  $L_p = L$ . Para cada tipo de tubo usado es posible elegir una curva de reducción de pandeo distinta.

Finalmente, el coeficiente de seguridad se obtiene como:

$$CS = \frac{f_{yd}}{\sigma}$$

siendo  $f_{yd}$  la resistencia de cálculo del material, cuyo valor es:

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

siendo  $\gamma_{M0}$  el coeficiente parcial de seguridad del material, de valor  $\gamma_{M0} = 1.05$

El esfuerzo axial y las restantes magnitudes anteriores se pueden obtener mediante las opciones:

Opción de menú: Resultados / Esfuerzos en barras

Icono de la barra de herramientas: 

Ello muestra un diálogo con las magnitudes anteriores (Figura 7).



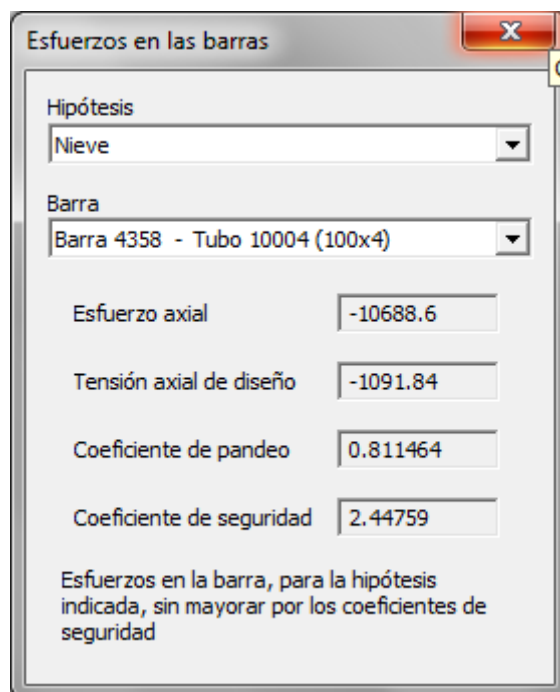


Figura 7. Esfuerzos internos en las barras

### Esfuerzos internos en las vigas empotradas

Se obtienen los 6 esfuerzos interiores existentes en un elemento viga en el espacio: esfuerzo axial, momentos flectores en ambos ejes locales Y, Z, esfuerzos cortantes en ambos ejes locales Y, Z y momento de torsión. Estos esfuerzos se obtienen en los dos extremos de la viga.

Estos esfuerzos internos están referidos al sistema de ejes local de la barra.

### Reacciones en los apoyos

Se trata de las fuerzas exteriores de reacción que es necesario aplicar desde el exterior sobre los distintos apoyos de la estructura para mantenerla en equilibrio. Se obtienen como solución de la ecuación de equilibrio del método de rigidez y sólo existen para aquellos nudos donde se ha aplicado alguna condición de ligadura.

Las reacciones están compuestas por tres fuerzas en las direcciones X, Y y Z. Además, si en el nudo hay alguna barra empotrada se obtienen los tres momentos de reacción. Todas las reacciones están referidas a los ejes generales de la estructura y se considera que son las acciones que efectúa la sustentación sobre la estructura.

En caso de haber apoyos elásticos los esfuerzos en dichos apoyos elásticos se incluyen también entre las reacciones.

Las reacciones pueden obtenerse numéricamente en un diálogo mediante las opciones:

Opción de menú: Resultados / Reacciones en apoyos

Icono de la barra de herramientas: 

Se activa un diálogo que permite obtener los valores numéricos de las reacciones en los distintos nudos donde hay aplicadas condiciones de ligadura, para cada hipótesis de carga.

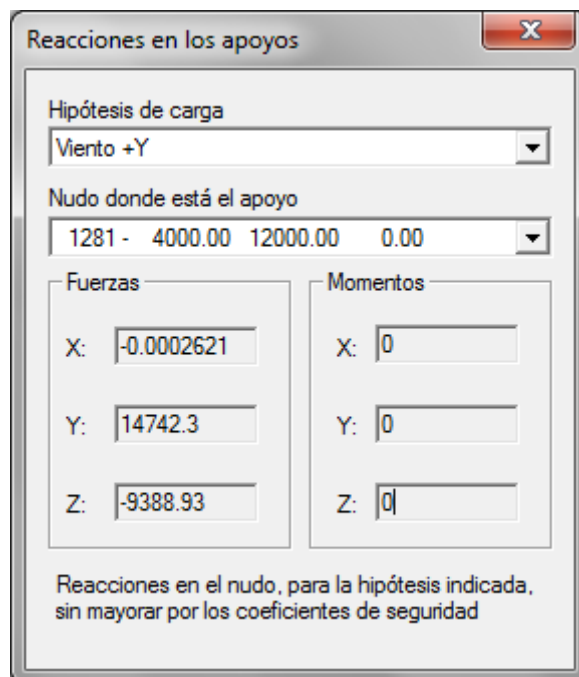


Figura 8. Reacciones en los apoyos

Las reacciones en los apoyos se pueden representar gráficamente en la ventana de dibujo, actuando sobre la estructura. Las fuerzas se representan mediante flechas simples, y los momentos mediante flechas de doble cabeza, a la escala correspondiente. Para ello se puede utilizar:

Opción de menú: Dibujar / Reacciones

Icono de la barra de herramientas: 

Asimismo, se puede mostrar el valor numérico de cada reacción, en valor absoluto, junto a su representación gráfica. Estos valores numéricos sólo se muestran si está seleccionada la opción correspondiente para representar gráficamente las reacciones.

Opción de menú: Dibujar / Valores numéricos de las reacciones

## Resultados combinados

Para el diseño de las celosías se emplean en la realidad una serie de hipótesis de diseño, que tienen en cuenta la importancia de las distintas acciones, y el hecho de que no todas ellas se producen simultáneamente. Las hipótesis de diseño son una combinación lineal de las acciones exteriores, afectadas de unos coeficientes de seguridad. En esta combinación debe tenerse en cuenta que los coeficientes de seguridad son distintos según que el efecto

sea desfavorable (se suma) o favorable (se resta), y que hay acciones que pueden existir o no y que otras son mutuamente excluyentes.

El programa Celo3d permite combinar los resultados de tensión y deformación calculados para cada una de las hipótesis de tal manera que puedan obtenerse los valores máximos (pésimos) que pueden presentarse al efectuar combinaciones entre las hipótesis de carga.

La combinación de resultados se efectúa para las tensiones en las barras y para las deformaciones nodales. Se efectúa una vez calculada la estructura, siguiendo los pasos que se indican a continuación.

### Definición de los grupos de hipótesis

Previamente a la combinación de resultados es necesario definir los denominados *grupos de hipótesis de carga*. Cada grupo de hipótesis contiene a todas las hipótesis de carga que son *mutuamente excluyentes* y no pueden actuar a la vez. El ejemplo típico son las hipótesis de viento, que normalmente son dos (viento desde la izquierda y viento desde la derecha) pero de las que sólo una puede actuar a la vez. Lo mismo ocurre con las distintas hipótesis de sobrecarga de uso, de las que sólo una actúa a la vez, aunque sean posibles muchas configuraciones distintas de las mismas.

Para la definición de los grupos de hipótesis se emplea la instrucción GrupoHipotesis del archivo de datos. Cada grupo tiene un nombre, así como dos coeficientes de mayoración, que juegan el papel de coeficientes de seguridad. Uno de dichos coeficientes de mayoración es para el caso de que la hipótesis sea desfavorable y el otro para el caso de que la hipótesis sea favorable. Se considera que una hipótesis es desfavorable cuando su efecto aumenta el valor absoluto del nivel de tensión (lo hace más positivo o más negativo). Además, un grupo puede estar activo o no. En el segundo caso el programa no lo tiene en cuenta a la hora de generar todas las posibles combinaciones de acciones. El programa no considera ningún coeficiente de minoración por efecto de la posible simultaneidad de las acciones variables.

En el caso simple de haber sólo una hipótesis de carga, debe definirse un grupo compuesto por dicha hipótesis.

### Ver combinaciones de hipótesis

En base a los grupos de hipótesis definidos en el archivo de datos, el programa determina todas las combinaciones que es posible formar con ellos. Estas posibles combinaciones se pueden ver mediante la opción de menú: Resultados / Combinaciones de hipótesis posibles.

Se muestra un diálogo que contiene todas las posibles combinaciones diferentes que es posible formar con los grupos de hipótesis definidos.

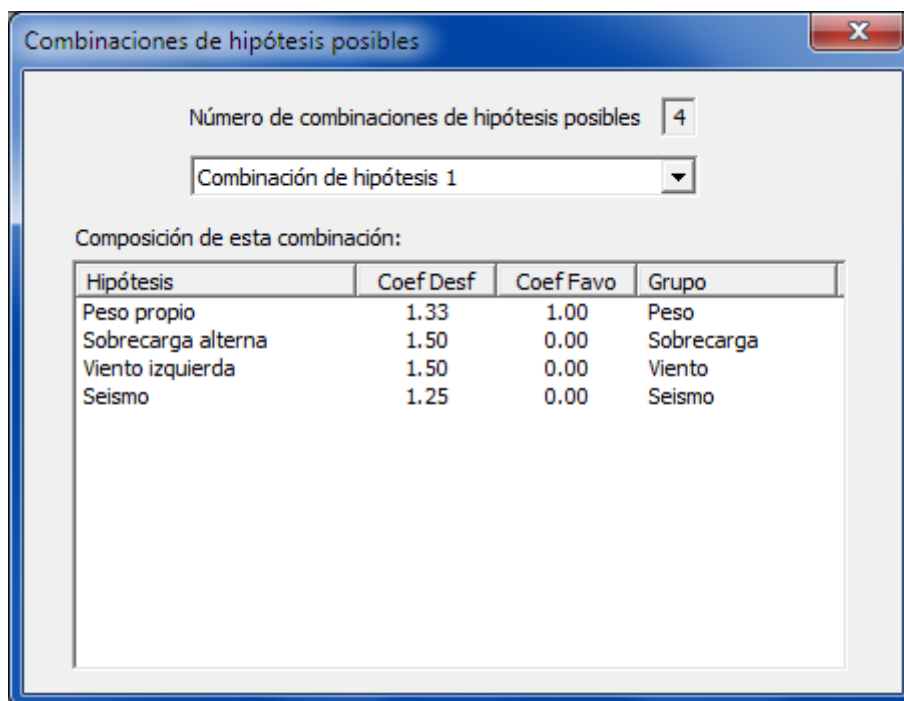


Figura 9. Combinaciones de hipótesis posibles

### Tensiones combinadas pésimas

Es posible obtener los valores de las máximas tensiones que aparecen en las barras de la celosía ante cualquier combinación de las hipótesis de carga definidas.

Para ello es necesario en primer lugar calcular los esfuerzos axiales extremos que pueden aparecer bajo las diferentes combinaciones de cargas. Los esfuerzos axiales extremos se pueden calcular de forma simplista mediante la combinación del esfuerzo en cada hipótesis  $N_i$  y el factor de mayoración correspondiente:

$$N = \sum_i \gamma_i N_i$$

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los coeficientes de seguridad  $\gamma$  son distintos según que el efecto de la hipótesis de carga sea desfavorable  $\gamma_D$ , es decir que los esfuerzos son del mismo signo y se suman, o favorable  $\gamma_F$ , si los esfuerzos son de distinto signo y se restan.

Además, hay acciones que pueden existir o no (p. e. la nieve), lo cual se tiene en cuenta considerando un coeficiente de mayoración favorable nulo  $\gamma_F=0$ .

Para tener en cuenta estos hechos, y obtener los valores más extremos de cualquier esfuerzo, es suficiente con considerar dos combinaciones posibles:

## RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO

- La combinación en la que todos esfuerzos positivos (denominados  $N_i^+$ ) se consideran desfavorables y los negativos ( $N_i^-$ ) se consideran favorables. El sumatorio total se debe dividir en dos, uno para los esfuerzos positivos afectados del coeficiente desfavorable y otro para los negativos afectados del coeficiente favorable:

$$N^{+D} = \sum_{i+} \gamma_{Di} N_i^+ + \sum_{i-} \gamma_{Fi} N_i^-$$

Esta combinación se representa en los resultados del programa mediante el código +D-F.

- La combinación opuesta a la anterior, en la que todos los esfuerzos positivos se consideran favorables y los negativos se consideran desfavorables.

$$N^{-D} = \sum_{i-} \gamma_{Di} N_i^- + \sum_{i+} \gamma_{Fi} N_i^+$$

Esta combinación se representa en los resultados del programa mediante el código -D+F.

De esta forma se obtienen los dos valores extremos del esfuerzo axial. Cualquier otra combinación de hipótesis dará un esfuerzo axial de valor intermedio entre los dos anteriores.

Conociendo los dos valores extremos del esfuerzo axial ( $N^{+D}$  y  $N^{-D}$ ), se calculan las dos tensiones extremas en la barra que les corresponden, según sean de tracción o compresión, como se ha indicado en el apartado “Esfuerzo axial y tensión en las barras articuladas”. Nótese que las dos tensiones extremas así obtenidas pueden ser de cualquier signo, por lo que a continuación es necesario tomar la de mayor valor absoluto que se considera la tensión pésima de diseño de la barra.

Para obtener los valores de las máximas tensiones que aparecen en las barras de la estructura ante cualquier combinación de hipótesis se emplea la opción de menú: Resultados / Tensiones combinadas pésimas, que muestra un diálogo de la Figura 10.

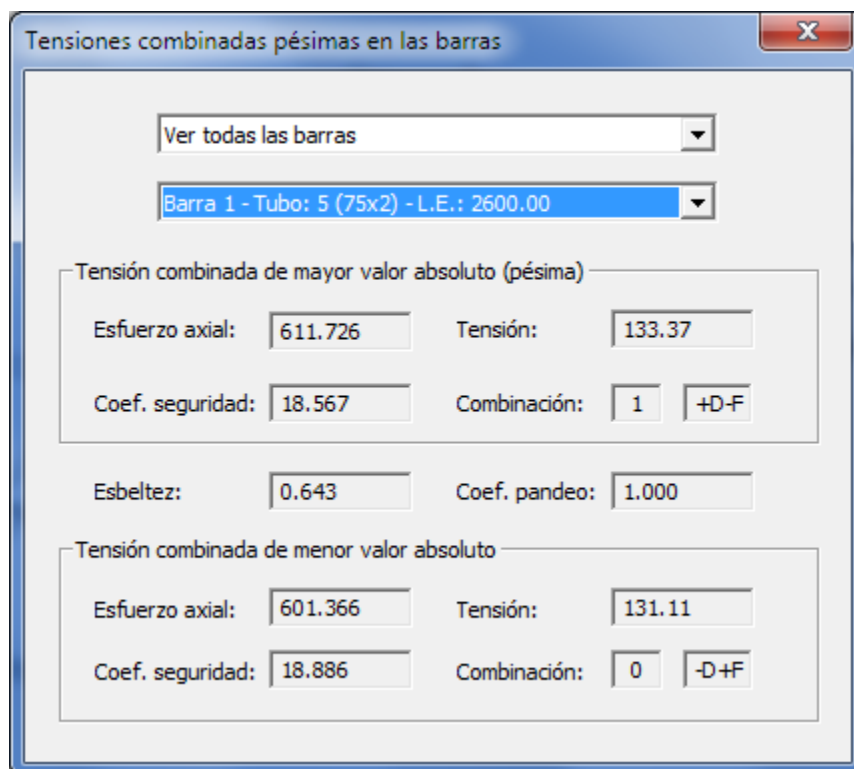


Figura 10. Tensiones combinadas en las barras

La lista de selección de la parte superior permite elegir la barra con la que se quiere trabajar. Para la barra elegida, se muestra en el diálogo su situación pésima. Esta situación pésima es aquella que produce la tensión combinada de mayor valor absoluto, mayorada por el coeficiente correspondiente a cada hipótesis de carga. Además, se indica en qué combinación de hipótesis se produce el valor pésimo de la tensión y en cuál de los dos modos arriba descritos se ha producido la situación pésima.

El diálogo muestra asimismo la tensión de menor valor absoluto y la combinación de hipótesis en que se produce.

En la parte superior del diálogo existe otra lista que permite elegir las barras con las que se quiere trabajar: o bien todas ellas, o bien sólo aquellas que superan la tensión de trabajo.

### Deformaciones combinadas máximas

Es posible obtener los valores de las máximas deformaciones que aparecen en los nudos de la estructura ante cualquier combinación de hipótesis de cargas. La combinación de las deformaciones en los nudos se efectúa de la misma forma ya explicada para los esfuerzos, aunque para las deformaciones se emplean unos coeficientes de mayoración de valor unidad. En el caso de coeficientes de mayoración nulos (como en el caso de acciones que desaparecen), lógicamente se respeta su valor nulo.

Para obtener los valores de las máximas deformaciones se emplea la opción de menú: Resultados / Deformaciones combinadas máximas, que muestra el diálogo de la Figura 11.

En la parte superior del mismo hay dos listas desplegables. Una de ellas permite elegir el nudo con el que se quiere trabajar y la otra la dirección en la que se quiere obtener la deformación. Para el nudo y la dirección elegidos, se muestra en el diálogo la deformación combinada de mayor valor absoluto, *sin mayorar* por el coeficiente correspondiente a cada hipótesis de carga. Además, se indica en qué combinación de hipótesis se produce dicho valor máximo de la deformación. El diálogo muestra asimismo la deformación de menor valor absoluto y la combinación de hipótesis que la produce.

En la parte inferior del diálogo existe un botón que permite buscar el nudo en el que se produce la deformación máxima (en valor absoluto), para la dirección considerada.

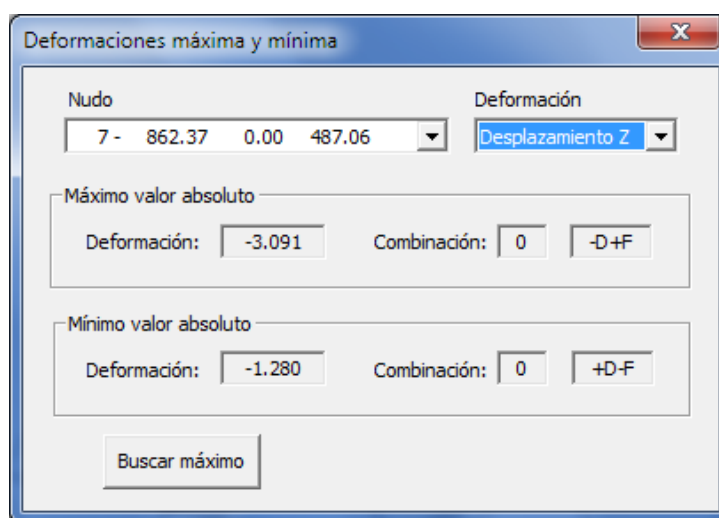


Figura 11. Deformación máxima y mínima en un nudo

## Impresión y listado de los resultados

Los distintos resultados obtenidos pueden imprimirse, o guardarse en un archivo de disco, para su utilización posterior. Las operaciones permitidas se describen a continuación.

### Imprimir la representación gráfica

Esta opción imprime en la impresora la representación gráfica de la estructura tal y como se muestra en ese instante en la ventana de dibujo.

Opción de menú: Archivo / Imprimir

Icono de la barra de herramientas: 

## **Presentación preliminar del dibujo impreso**

Esta opción permite mostrar el aspecto que tendría en la impresora la representación gráfica de la estructura mostrada en ese instante en la ventana de dibujo.

Opción de menú: Archivo / Presentación preliminar



## Dimensionamiento de las barras

El programa permite efectuar un dimensionamiento de los perfiles tubulares de cada una de las barras, con el objetivo de encontrar unos perfiles que cumplan las limitaciones de tensión, estabilidad, esbeltez, etc. Este proceso se efectúa sobre las barras articuladas, pero no afecta a las vigas empotradas, para las cuales se mantiene siempre el perfil inicial. Para efectuar el dimensionamiento es necesario definir en el modelo al menos una hipótesis de combinación de cargas, como se ha explicado.

### Criterios de dimensionamiento

En el proceso de dimensionamiento se emplean los criterios que se describen a continuación.

#### Criterio de resistencia a esfuerzo axial

Se aplica a todas las barras comprobando que el esfuerzo axial satisface la condición:

$$N_{Ed} \leq A \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Siendo  $N_{Ed}$  el esfuerzo de tracción de diseño, obtenido en la situación pésima de la barra, y  $f_y$  el límite elástico del material.

El coeficiente parcial de seguridad del material es  $\gamma_{M0} = 1.05$ .

#### Criterio de resistencia a pandeo para barras sometidas a compresión

Se comprueba mediante la fórmula de EN 1993-1-1, apartado 6.3.1:

$$N_{Ed,c} \leq \chi A \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

siendo  $N_{Ed,c}$  el esfuerzo axial de compresión de diseño de la barra, obtenido en la situación pésima de la barra,  $\chi$  el coeficiente de reducción por pandeo y  $\gamma_{M1} = 1.05$  el coeficiente parcial de seguridad del material para fenómenos de inestabilidad.

El coeficiente de reducción por pandeo  $\chi$  depende de la esbeltez adimensional  $\bar{\lambda}$  de la pieza y de la curva de pandeo empleada. La esbeltez adimensional de la pieza  $\bar{\lambda}$  depende a su vez de su longitud de pandeo y del material.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{con} \quad N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L_p^2}$$

Como longitud de pandeo  $L_p$  se toma la longitud geométrica ideal entre nudos.

El programa Celod3d tiene implementado el cálculo del coeficiente de reducción por pandeo  $\chi$  siguiendo la norma EN 1993-1-1, apartado 6.3.1. Para cada tipo de tubo usado es posible elegir una curva de reducción de pandeo distinta.

### Criterio de esbeltez máxima

Se considera una esbeltez adimensional  $\bar{\lambda}$  máxima de valor 2.0 para piezas sometidas a compresión y de 3.0 para piezas a tracción.

### Criterio de vibración local por viento

En estructuras abiertas, en las que el viento pueda actuar directamente sobre las barras puede producirse un fenómeno de vibración local de las barras debido a los remolinos que las corrientes de aire producen alrededor de las barras. Este fenómeno puede producir vibraciones excesivas de las barras si la frecuencia de vibración de éstas coincide con la frecuencia natural del remolino. Para una barra cilíndrica de diámetro  $D$ , en una corriente de viento de velocidad  $V_{viento}$ , la frecuencia natural del remolino  $\omega_R$  es:

$$\omega_R \geq St \frac{V_{viento}}{D}$$

En esta ecuación  $St$  es el número de Strouhal, que depende del número de Reynolds, pero que, para los rangos de diámetros de barras y velocidades de viento habituales en estructuras de celosía, se puede suponer constante. En Celod3d se supone  $St=0.2$ .

Para evitar estas vibraciones, las frecuencias naturales de vibración de las barras deben ser mayores que la del remolino. Esta condición se tiene en cuenta en el proceso de dimensionamiento en la forma:

$$\omega_n \geq \omega_R$$

Siendo  $\omega_n$  la frecuencia de vibración  $n$ -sima de la barra, que se calcula mediante su expresión analítica, suponiendo que la barra está simplemente apoyada en los dos extremos.

De ordinario  $n=1$  con lo cual se garantiza que todas las frecuencias de vibración de las barras sean superiores a la del remolino.

Para emplear este criterio de dimensionamiento deben definirse dos parámetros en el fichero de datos: la velocidad máxima de viento  $V_{viento}$  y el orden ( $n$ ) de la frecuencia de

vibración de las barras que debe ser superior a la frecuencia del remolino asociada a dicha velocidad de viento.

### Criterio de espesor mínimo

Se puede incluir un criterio de mínimo espesor de pared en los tubos, que se define como dato de entrada.

## Ejecución del dimensionamiento

Para efectuar el dimensionamiento se emplea la opción del menú: Calcular / Dimensionar nuevos perfiles para las barras. Esta opción no estará activa si no se ha definido al menos un grupo de hipótesis en el modelo.

Los parámetros empleados en el proceso de dimensionamiento se pueden definir en el fichero de datos mediante la instrucción Dimensiona. Si no se incluye esta instrucción en el fichero de datos se emplearán los valores por defecto.

El proceso de dimensionamiento se efectúa de manera automática, por pasos. Al final de cada paso se muestra un diálogo con el resumen del estado de las barras tras el paso de diseño (Figura 12). La aparición de este diálogo puede activarse o desactivarse mediante la opción del menú: Opciones / Pausa tras cada paso de diseño.

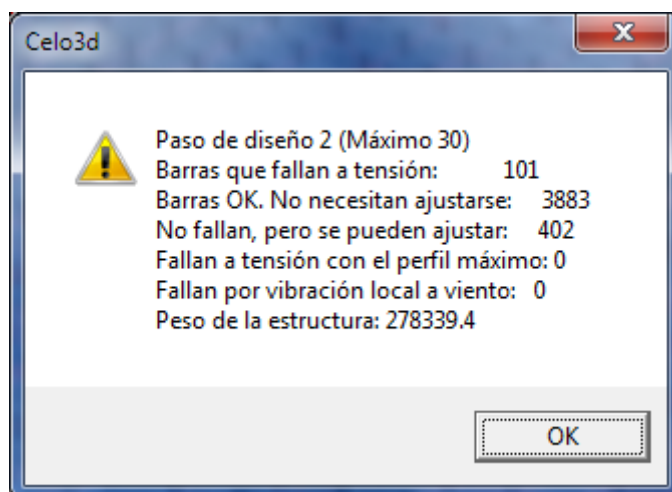


Figura 12. Paso de diseño de barras

Asimismo, es posible hacer que el programa actualice la representación gráfica de la estructura después de cada paso durante el proceso de diseño. Para ello se emplea la opción de menú: Opciones / Actualizar imagen a cada paso de diseño. En la imagen que se representa tras cada paso de diseño las barras que no cumplen algún criterio de dimensionamiento se representan en rojo, y las que ya están correctamente dimensionadas se muestran en negro.

Al finalizar el proceso se muestra un diálogo con un resumen final (Figura 13).

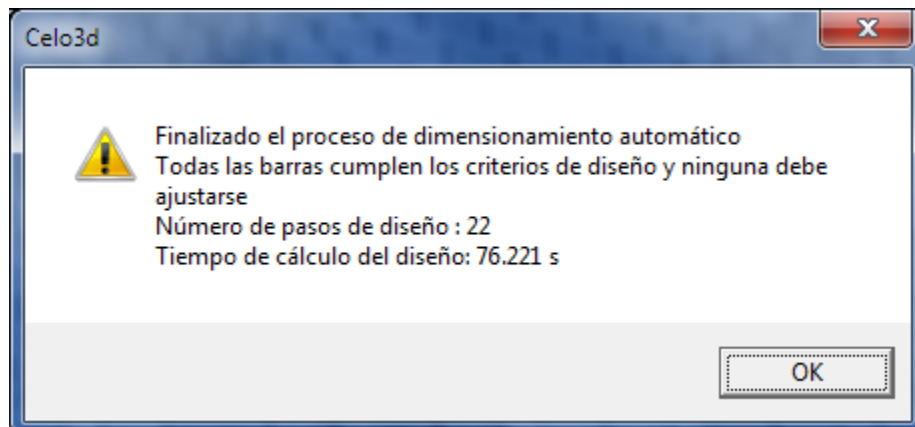


Figura 13. Diálogo final de dimensionamiento de barras

La ejecución de dimensionamiento produce un fichero de texto donde se almacenan todos los pasos intermedios del mismo, así como las tensiones pésimas en las barras tras el proceso de dimensionamiento. El nombre de este fichero coincide con el del archivo de datos, cambiando la extensión .xml por la extensión lisdim.txt.

## Observaciones

El valor de la tensión empleado en el dimensionamiento de perfiles es el valor pésimo obtenido por combinación de las hipótesis cargas. Por esta razón, para efectuar el dimensionamiento es necesario por lo menos haber definido un grupo de hipótesis de carga. Véase la sección “Resultados combinados” para la definición de dichos grupos de hipótesis.

El redimensionamiento se efectúa en el sentido de aumentar el tamaño del perfil si las tensiones son excesivas y también en el sentido de disminuirlo si las tensiones son muy pequeñas. El proceso trata de encontrar el menor perfil que cumple con los criterios de dimensionamiento impuestos. Si en una barra el perfil más grande disponible no cumple con los criterios de dimensionamiento, el programa adopta dicho perfil máximo.

La determinación del nuevo perfil se efectúa utilizando los valores actuales del esfuerzo axial el cual se ha calculado con el perfil original de la barra. Al cambiarse el perfil por uno diferente y volverse a calcular de nuevo el esfuerzo axial, puede ocurrir que el nuevo perfil elegido no sea válido y supere los límites de tensión. De la misma forma puede ocurrir que el nuevo perfil elegido, una vez recalculados el nuevo esfuerzo sea excesivamente grande. En estructuras muy hiperestáticas como las celosías espaciales, este proceso puede ser oscilante.

## Ejemplos

### Cubierta curva

Como ejemplo de utilización del programa con una celosía espacial de tamaño grande, se presenta una cubierta de doble curvatura, con directriz parabólica y planta rectangular, de dimensiones 120 m x 80 m. La estructura está organizada como una celosía espacial con malla semioctaédrica, apoyada en los dos lados opuestos de menor luz (paralelos al eje X).

El canto de la celosía es de 1.80 m, y la base del semioctaedro es un cuadrado de lado 2 m, con lo cual hay 40 módulos en la dirección X y 60 módulos en la dirección Y. El número de nudos es 4901, y el de barras 19200.

La Figura 14 muestra una vista general de la estructura.

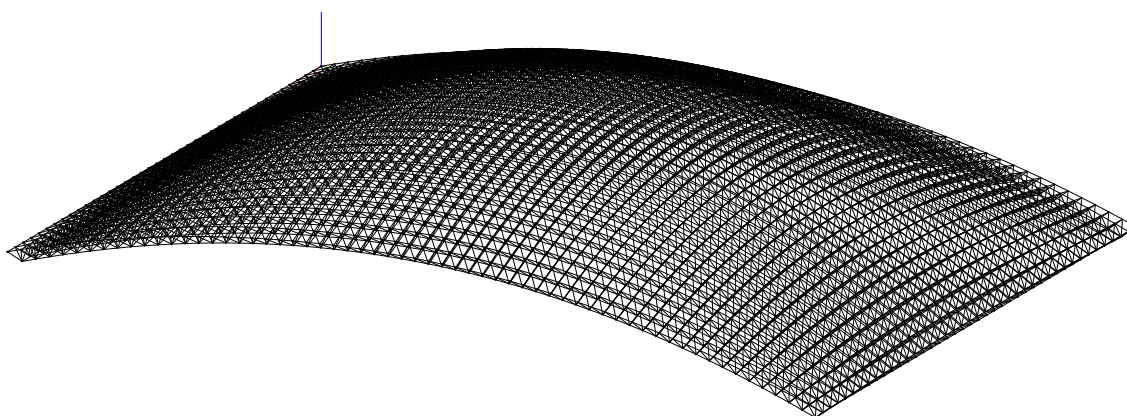


Figura 14 Cubierta curva

La celosía está sometida a un total de 8 hipótesis de carga individuales:

- Cargas permanentes debidas al peso propio, de valor  $30 \text{ kg/m}^2$ .
- Sobrecarga debida a la nieve de  $40 \text{ kg/m}^2$ .
- Acción del viento en el eje X, soplando en las dos direcciones +X y -X, con  $50 \text{ kg/m}^2$  de presión dinámica, y los correspondientes coeficientes de presión y exposición según el Código Técnico de la Edificación.
- Acción del viento en el eje Y, soplando en las dos direcciones +Y y -Y, también con  $50 \text{ kg/m}^2$  de presión dinámica.
- Calentamiento de la capa superior de la estructura de valor  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

- Enfriamiento de la capa superior de la estructura de valor  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El modelo de la estructura tiene 14703 grados de libertad. Tras la minimización de la anchura de banda, la matriz de rigidez de la estructura requiere de  $2.85 \cdot 10^6$  términos para su almacenamiento, es decir aproximadamente 23 Mbytes, lo cual representa sólo un 2.6% del tamaño total de la misma. El cálculo estático de esfuerzos y deformaciones de la celosía requiere un tiempo de 2.5 seg en un ordenador personal de tipo medio.

Las 8 hipótesis de cargas definidas se agrupan entre ellas en 4 grupos: cargas permanentes (1 hipótesis), nieve (1 hipótesis), viento (4 hipótesis), e incrementos de temperatura (2 hipótesis). De esta forma se obtienen un máximo de 8 combinaciones de hipótesis de cargas posibles, eligiendo una hipótesis de cada grupo.

Empleando las 8 combinaciones de hipótesis posibles el programa determina cuáles son los esfuerzos axiales y las tensiones pésimas en las barras de la estructura para cualquier situación de cargas que pueda presentarse.

El programa efectúa la elección automática del perfil más adecuado para cada barra, empleando las 8 combinaciones de hipótesis posibles y considerando los criterios de dimensionamiento ya explicados de resistencia, estabilidad, esbeltez y vibración local.

El proceso de dimensionamiento requiere de 12 pasos de rediseño, al final de los cuales todas las barras cumplen todos los criterios exigidos, para cualquier combinación de hipótesis de carga posible. El tiempo de cálculo para el dimensionamiento es de 290 seg.

### Celosía simple no lineal

Este ejemplo es clásico en los textos de no linealidad geométrica. Se trata de una celosía plana formada por dos barras que forman un triángulo isósceles de gran base (800 cm) y poca altura ( $H=20$  cm), sobre cuyo vértice se aplica una fuerza vertical hacia abajo, que comprime las barras (Figura 15). Las barras forman un ángulo muy pequeño con la horizontal (aprox.  $2.9^{\circ}$ ), por lo que la estructura tiene un comportamiento muy no lineal y está muy cerca de su posición de inestabilidad.

Las propiedades de las barras son:  $A_0=2\text{ cm}^2$ ,  $E=2 \cdot 10^6\text{ kg/cm}^2$ , y su longitud inicial es  $L_0=400.4997\text{ cm}$ .

## EJEMPLOS

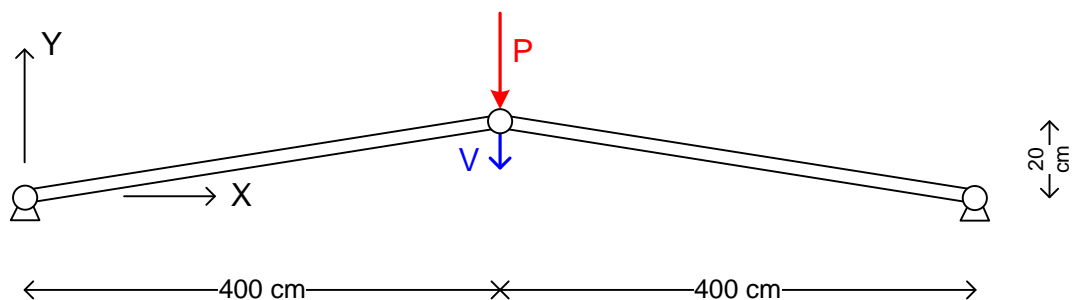


Figura 15 Celosía simple no lineal

Este ejemplo tiene solución analítica exacta. La relación entre la fuerza vertical aplicada  $P$  y la deformación vertical del vértice  $V$ , considerando ambas positivas hacia abajo, está dada por la relación cúbica:

$$P = \frac{2EA_0 H^3}{L_0^3} \left( \frac{V}{H} - \frac{3}{2} \left( \frac{V}{H} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{V}{H} \right)^3 \right)$$

siendo  $H=20$  cm el valor de la altura del triángulo.

La rigidez vertical de la estructura es la derivada de la relación fuerza-deformación respecto de la deformación vertical  $V$ . Efectuando dicha derivada respecto de  $V$  e igualándola a cero, se obtiene que para un valor de la deformación  $V=8.453$  cm la estructura no tiene rigidez en dirección vertical. A dicha deformación le corresponde una fuerza aplicada  $P=191.73$  kg, que representa un valor de la fuerza para la cual la estructura se vuelve inestable por falta de rigidez y presenta un fenómeno de *snap-through* hasta otra posición deformada mucho mayor.

La tabla siguiente muestra el valor de la deformación vertical  $V$  calculada por el programa Celo3d, para distintos niveles de la fuerza aplicada, hasta llegar a las proximidades del valor crítico de inestabilidad. Se observa la buena correlación con el valor teórico. Al llegar al valor de la carga crítica, el programa Celo3d detecta la pérdida de rigidez de la estructura e interrumpe el proceso de carga. La misma tabla muestra el valor del esfuerzo axial en las barras.

Nótese la gran influencia del comportamiento no lineal: para una carga aplicada de 190 kg, el análisis lineal proporciona una deformación vertical de -3.81 cm y un esfuerzo axial en las barras de -1902 kg.

CÁLCULO DE CELOSÍAS ESPACIALES CON CELO3D

Fuerza $P$ (kg)	Deformación $V$ Celo3D (cm)	Deformación $V$ teórica (cm)	Esfuerzo axial (kg)
20	0.414	0.414	-204.5
40	0.857	0.857	-418.4
60	1.335	1.335	-643.6
80	1.856	1.856	-882.8
100	2.433	2.434	-1139.6
120	3.085	3.087	-1420.3
140	3.849	3.852	-1735.4
160	4.800	4.804	-2107.5
180	6.182	6.193	-2609.0
190	7.533	7.568	-3058.2
191	7.820	7.875	-3152.2
191.5	8.034	8.127	-3227.4

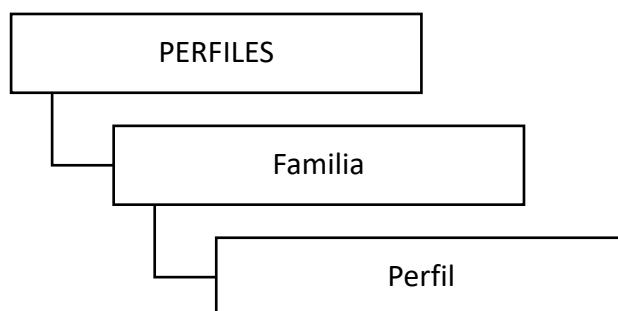


## Anejo A. Perfiles normalizados

El programa tiene predefinidos la mayor parte de los perfiles estructurales normalizados de acero usados en la construcción. Toda la información relativa a los perfiles normalizados está contenida en un archivo de disco, que se lee por el programa al comienzo de cada ejecución. Este archivo de definición de perfiles está situado en el mismo directorio donde está situado el programa ejecutable y su nombre es perfiles.xml.

El contenido de este fichero puede modificarse, para ampliarlo a otros perfiles similares. Está concebido para la definición de perfiles con forma de I, de U o de tubo rectangular o circular.

Se trata de un fichero de texto en formato xml, que puede por lo tanto ser editado mediante un editor adecuado a este formato. La información se organiza de forma jerárquica en una serie de elementos, según el esquema de la figura siguiente.



A continuación se describen los distintos elementos, indicando sus atributos. Para indicar la naturaleza de estos atributos se emplea la siguiente notación:

Int: valor numérico entero.

Float: valor numérico de punto flotante.

Texto: valor alfabético.

[*n*]: vector de *n* componentes.

Los atributos obligatorios están indicados mediante subrayado.

### Elemento raíz

Nombre: **PERFILES**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: ninguno.

Nodos hijos: Familia.

Atributos:

Nombre	Tipo	Descripción
<u>UnidadesL</u>	Texto	Unidades de la información contenida en el archivo. Puede valer: cm, mm o m.

## Elemento Familia

Este elemento se emplea para definir una familia de perfiles semejantes, aunque con diferentes dimensiones.

Nombre: **Familia**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: PERFILES.

Nodos hijos: Perfil.

Atributos:

Nombre	Tipo	Descripción
<u>Nombre</u>	Texto	Nombre de la familia de perfiles
<u>TipoSeccion</u>	Int	Código numérico que indica el tipo de sección para el cálculo de tensiones. Los valores permitidos son: 1: perfiles en forma de I, 2: perfiles en forma de C, 3: tubos de 4 lados y 4: tubos redondos.
<u>TipoSeccionPandeoCT</u>	Int	Código numérico que indica el tipo de sección para el cálculo del coeficiente de reducción por pandeo, según tabla 6.2 de EN 1993-1-1. Sus valores pueden ser: -1: no considerar el pandeo, 0: perfiles laminados en forma de I, 1: perfiles armados en I, 2: agrupación de perfiles laminados soldados, 3: tubos laminados en caliente, 4: tubos conformados en frío, 5: perfiles armados en cajón, 6: perfiles en U, T, chapa y redondo macizo, y 7 perfiles en L.
<u>Activo</u>	Int	1: familia activa, 0: familia no activa (se ignora).

## Elemento Perfil

Este elemento se emplea para definir un perfil estructural particular.

**ANEJO A. PERFILES NORMALIZADOS**

Nombre: **Perfil**

Valor asociado: ninguno.

Nodo padre: Familia.

Nodos hijos: ninguno.

Atributos:

Nombre	Tipo	Descripción
<u>Nombre</u>	Texto	Nombre del perfil.
<u>Codigo</u>	Texto	Código único que identifica el perfil entre todos los demás de todas las familias.
<u>Area</u>	Float	Área de la sección transversal del perfil.
<u>I<sub>x</sub></u>	Float	Módulo de torsión de la sección respecto al eje X local.
<u>I<sub>y</sub></u>	Float	Momento de inercia de la sección respecto al eje Y local.
<u>I<sub>z</sub></u>	Float	Momento de inercia de la sección respecto al eje Z local.
<u>AcortY</u>	Float	Área a cortadura para cortantes según el eje local Y.
<u>AcortZ</u>	Float	Área a cortadura para cortantes según el eje local Z.
<u>h</u>	Float	Canto del perfil en la dirección Y local.
<u>b</u>	Float	Ancho del perfil, en la dirección Z local.
<u>tw</u>	Float	Espesor del alma.
<u>tf</u>	Float	Espesor del ala.
<u>p</u>	Float	Parámetro que depende del tipo de perfil. Para perfiles en I este valor se ignora. Para perfiles en U define la posición del centro de gravedad respecto de la cara exterior del alma. Para tubos huecos representa el radio de curvatura de las esquinas.

## Anejo B. Formato de los archivos de texto de datos

Es posible definir los elementos más importantes de la estructura (coordenadas de los nudos, barras, fuerzas aplicadas y ligaduras) en archivos de texto, con un formato fijo muy sencillo. Esto facilita la definición de modelos estructurales empleando programas que no generan archivos en formato xml, como algunos programas de CAD.

### Archivo de coordenadas de nudos

Este archivo contiene una línea para cada nudo a definir. Todas las líneas son iguales y contienen 4 valores:

ID	X	Y	Z
----	---	---	---

Estas magnitudes son las mismas descritas para el elemento Nudo.

### Archivo de tubos

Este archivo contiene una línea para cada tubo a definir. Todas las líneas son iguales y contienen los 11 valores siguientes:

Codigo	Diam	Esp	FactorDiamEsp	Area	CurvaPandeoCT
--------	------	-----	---------------	------	---------------

TipoCT	LimiteElastico	E	Alfa	PesoEspecifico
--------	----------------	---	------	----------------

Las distintas magnitudes son las mismas descritas para el elemento Tubo. El campo TipoCT no se emplea.

### Archivo de barras

Este archivo contiene una línea para cada barra a definir. Todas las líneas son iguales y contienen 4 valores:

ID	N1	N2	Tubo
----	----	----	------

Estas magnitudes son las mismas descritas para el elemento Barra.

## Archivo de fuerzas exteriores sobre los nudos

Este archivo contiene una línea para cada fuerza a definir. Todas las líneas son iguales y contienen 5 valores:

ID_Hipo	ID_Nudo	FX	FY	FZ
---------	---------	----	----	----

**ID\_Hipo:** Identificador numérico de la hipótesis en la que se incluye esta fuerza. Si no se ha definido previamente una hipótesis con este identificador, se creará.

**ID\_Nudo:** identificador del nudo donde está aplicada la fuerza. Debe corresponder al atributo ID de un elemento Nudo ya definido.

**FX:** valor de la fuerza aplicada en la dirección X.

**FY:** valor de la fuerza aplicada en la dirección Y.

**FZ:** valor de la fuerza aplicada en la dirección Z.

Ver notas en la descripción del Elemento FuerzaNudo.

## Archivo de cargas exteriores sobre las barras

Este archivo contiene una línea para cada carga a definir. Todas las líneas son iguales y contienen 4 valores:

ID_Hipo	Elemento	Tipo	Valor
---------	----------	------	-------

**ID\_Hipo:** Identificador numérico de la hipótesis en la que se incluye esta carga. Si no se ha definido previamente una hipótesis con este identificador, se creará.

**Elemento:** identificador de la barra donde está aplicada la carga. Debe corresponder al atributo ID de un elemento Barra ya definido.

**Tipo:** un carácter que define el tipo de carga, como se indica a continuación.

**Valor:** el valor de la carga aplicada. Su significado es distinto en función el tipo de carga, como se indica a continuación.

Los distintos valores que puede tener el campo Tipo y el significado del campo Valor se muestran en la tabla siguiente, en función del tipo de carga a definir:

Tipo de carga	Tipo	Significado del campo Valor
Carga térmica	T	Temperatura media en la barra
Error en la longitud de la barra	E	Error en la longitud de la barra. Positivo si la barra en su estado natural (descargado) es más larga que su longitud de montaje.
Fuerza de pretensión axial sobre la barra	P	Fuerza axial de pretensión (positiva a tracción)

Ver notas en la descripción del elemento CargaBarra.

## Archivo de ligaduras

Este archivo contiene una línea para cada condición de ligadura individual a definir. Todas las líneas son iguales y contienen 7 valores:

ID_Nudo	TipoX	TipoY	TipoZ	RigX	RigY	RigZ
---------	-------	-------	-------	------	------	------

- ID\_Nudo:** identificador del nudo donde está aplicada la ligadura. Debe corresponder al atributo ID de un elemento Nudo ya definido.
- TipoX:** Tipo de ligadura aplicada en el desplazamiento X del nudo. Este campo es un solo carácter que puede ser: L para grado de libertad libre, F para grado de libertad fijo (desplazamiento nulo) o E para grado de libertad apoyado elásticamente.
- TipoY:** ídem a TipoX pero para el desplazamiento Y del nudo.
- TipoZ:** ídem a TipoX pero para el desplazamiento Z del nudo.
- RigX:** valor de la rigidez del apoyo en la dirección del desplazamiento X del nudo. Sólo se aplica si el campo TipoX=E. En caso contrario se ignora.
- RigY:** ídem a RigX, pero para el desplazamiento Y del nudo.
- RigZ:** ídem a RigX, pero para el desplazamiento Z del nudo.

Ver notas en la descripción del Elemento Ligadura.

## Anejo C. Formato de los archivos de texto de resultados

Es posible obtener los resultados del cálculo estático en archivos de texto ASCII, con un formato fijo muy sencillo. Esto facilita la utilización posterior de dichos resultados mediante otros programas.

En nombre de estos archivos corresponde al nombre del fichero de datos, sustituyendo la extensión original .xml por otra extensión que describe el tipo de resultado que contiene.

Los archivos de resultados no contienen ninguna cabecera, sino únicamente los valores numéricos de los resultados, estructurados como se describe a continuación.

### Archivo de deformaciones de los nudos

Este archivo contiene una línea para cada nudo y cada hipótesis de cargas. Todas las líneas son iguales y contienen 5 valores, separados por un espacio en blanco:

ID_Hipo	ID_Nudo	DX	DY	DZ
---------	---------	----	----	----

**ID\_Hipo:** Identificador numérico de la hipótesis. Coincide con el atributo ID de un elemento Hipotesis del archivo de datos.

**ID\_Nudo:** Identificador numérico del nudo. Corresponde al atributo ID de un elemento Nudo del archivo de datos.

**DX:** Valor del desplazamiento del nudo en la dirección X.

**DY:** Valor del desplazamiento del nudo en la dirección Y.

**DZ:** Valor del desplazamiento del nudo en la dirección Z.

De los dos identificadores numéricos (hipótesis de cargas y nudos) el de los nudos (ID\_Nudo) es el que varía más rápidamente, y el de las hipótesis más lentamente.

La extensión de este archivo es .desp.txt.

### Archivo de reacciones en los apoyos

Este archivo contiene una línea para cada nudo donde se ha definido alguna ligadura y por cada hipótesis de cargas. Si sobre un nudo se han definido varias ligaduras, dicho nudo aparecerá sólo una vez en el archivo de reacciones.

Todas las líneas son iguales y contienen 5 valores, separados por un espacio en blanco:

ID_ Hipo	ID_ Nudo	RX	RY	RZ
----------	----------	----	----	----

ID\_ Hipo: Identificador numérico de la hipótesis. Coincide con el atributo ID de un elemento Hipotesis del archivo de datos.

ID\_ Nudo: Identificador numérico del nudo donde se ha definido alguna hipótesis de cargas. Corresponde al atributo ID de un elemento Nudo del archivo de datos.

RX: Valor de la fuerza de reacción actuante sobre el nudo en la dirección X.

RY: Valor de la fuerza de reacción actuante sobre el nudo en la dirección Y.

RZ: Valor de la fuerza de reacción actuante sobre el nudo en la dirección Z.

De los dos identificadores numéricos (hipótesis de cargas y nudos) el de los nudos (ID\_ Nudo) es el que varía más rápidamente, y el de las hipótesis (ID\_ Hipo) más lentamente.

La extensión de este archivo es .reac.txt.

### Archivo de esfuerzos en las barras

Este archivo contiene una línea para cada barra de la estructura y por cada hipótesis de cargas.

Todas las líneas son iguales y contienen 7 valores, separados por un espacio en blanco:

ID_ Hipo	ID_ Barra	Axial	Sigma	CS	Esbel	Chi
----------	-----------	-------	-------	----	-------	-----

ID\_ Hipo: Identificador numérico de la hipótesis. Coincide con el atributo ID de un elemento Hipotesis del archivo de datos.

ID\_ Barra: Identificador numérico de la barra. Corresponde al atributo ID de un elemento Barra del archivo de datos.

Axial: Esfuerzo axial en la barra.

Sigma: Tensión en la barra debida al esfuerzo axial.

CS: Coeficiente de seguridad de la barra respecto a la tensión límite de trabajo.

Esbel: Esbeltez adimensional de la barra  $\bar{\lambda}$ , según se define en la norma EN 1993-1-1.



## ANEJO C. FORMATO DE LOS ARCHIVOS DE TEXTO DE RESULTADOS

Chi: Coeficiente de reducción por pandeo  $\chi$ , según se define en la norma EN 1993-1-1.

El significado y la relación entre las distintas magnitudes pueden verse en el apartado “Resultados del análisis estático”.

De los dos identificadores numéricos (hipótesis de cargas y barras) el de las barras es el que varía más rápidamente, y el de las hipótesis más lentamente.

La extensión de este archivo es .esfu.txt.

### Archivo de esfuerzos extremos en las barras

Este archivo contiene una línea para cada barra de la estructura, en la que se describen los dos estados de esfuerzos extremos en que puede encontrarse la barra en cualquier combinación de hipótesis de cargas, denominados estado pésimo y estado mínimo.

El estado pésimo es aquél que produce la tensión axial de mayor valor absoluto, y el estado mínimo es aquél que produce la tensión axial de menor valor absoluto. El significado de dichos estados puede verse en el apartado “Resultados combinados”.

La extensión de este archivo es .pesi.txt.

Todas las líneas son iguales y contienen 15 valores, separados por un espacio en blanco, y agrupados en tres bloques:

Barra	AxialPesi	SigmaPesi	CSPesi	EsbelPesi	ChiPesi	CombiPesi	ModoPesi
	AxialMin	SigmaMin	CSMin	EsbelMin	ChiMin	CombiMin	ModoMin

Identificación de la barra:

Barra: Identificador numérico de la barra. Corresponde al atributo ID de un elemento Barra.

Estado pésimo de la barra:

AxialPesi: Esfuerzo axial en la barra que produce la tensión de mayor valor absoluto en cualquier combinación de hipótesis de cargas, mayorado por los coeficientes de mayoración. Es el esfuerzo axial que produce la tensión SigmaPesi que se indica a continuación.

- SigmaPesi:** Tensión axial de mayor valor absoluto en la barra (tensión pésima) en cualquier combinación de hipótesis de cargas. Es la tensión provocada por el valor anterior AxialPesi.
- CSPesi:** Coeficiente de seguridad pésimo en la barra respecto a la tensión límite de trabajo. Es el menor coeficiente de seguridad en cualquier combinación de hipótesis de cargas.
- EselPesi:** Esbeltez adimensional  $\bar{\lambda}$ , de la barra en el estado pésimo.
- ChiPesi:** Coeficiente de reducción por pandeo  $\chi$  en el estado pésimo.
- CombiPesi:** Número de la combinación de hipótesis que provoca el estado pésimo en la barra.
- ModoPesi:** Modo de combinación de la combinación de hipótesis que provoca el estado pésimo en la barra. Vale +1 para el modo de combinación +D-F (tensiones positivas desfavorables y negativas favorables), y -1 para el modo opuesto -D+F.

Estado mínimo de la barra:

- AxialMin:** Esfuerzo axial en la barra que produce la tensión de menor valor absoluto en cualquier combinación de hipótesis de cargas, mayorado por los coeficientes de mayoración. Es el esfuerzo axial que produce la tensión SigmaMin que se indica a continuación.
- SigmaMin:** Tensión axial de menor valor absoluto en la barra (tensión mínima) en cualquier combinación de hipótesis de cargas. Es la tensión provocada por el valor anterior AxialMin.
- CSMin:** Coeficiente de seguridad mínimo en la barra respecto a la tensión límite de trabajo. Es el mayor coeficiente de seguridad en cualquier combinación de hipótesis de cargas.
- EselMin:** Esbeltez adimensional  $\bar{\lambda}$ , de la barra en el estado de esfuerzo mínimo.
- ChiMin:** Coeficiente de reducción por pandeo  $\chi$  en el estado mínimo.
- CombiMin:** Número de la combinación de hipótesis que provoca el estado de mínimo esfuerzo en la barra.
- ModoMin:** Modo de combinación de la combinación de hipótesis que provoca el estado de mínimo esfuerzo en la barra. Vale +1 para el modo de combinación +D-F, y -1 para el modo opuesto -D+F.

## Anejo D. Ejecución desde la línea de comandos

Es posible ejecutar el solver de cálculo estático sin activar el entorno de ventanas, desde el “Command Prompt” de Windows. Para ello:

- Ejecutar el “Command Prompt” de Windows, con lo que se creará una ventana de comandos.
- Ejecutar el solver:

**Celo3dSol.exe** **archivoDatos** [ **codigoEjecucion** ] [ **listado | nolistado** ]

Siendo:

archivoDatos: nombre del archivo donde está el modelo de la estructura.

codigoEjecucion: campo numérico entero, opcional, que se usa para identificar los resultados.

listado | nolistado: palabras clave opcionales que indican si se debe o no crear el archivo de texto con el listado de los resultados.

Este solver solamente efectúa el cálculo estático lineal de deformaciones y esfuerzos.

Este tipo de ejecución utiliza los mismos datos y produce los mismos resultados que la ejecución desde el entorno de ventanas.