

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE NAVES INDUSTRIALES

González Nicieza, Celestino; Prendes Gero, María Belén; Alvarez Fernández, Inmaculada; Díaz Aguado, María Belarmina.

Departamento de Explotación y Prospección de Minas.

Universidad de Oviedo.

Telf: 985 10 42 66

Fax: 985 10 42 65

Email: celes@git.uniovi.es

RESUMEN

En la Universidad de Oviedo se ha desarrollado un programa informático denominado EMR para el diseño, cálculo y optimización de naves metálicas. El objetivo fundamental del programa es agilizar la realización de este tipo de proyectos de construcción, permitiendo a una persona no especialista en el diseño de estructuras obtener un prediseño de la nave, con el fin de facilitar al departamento comercial la elaboración de las ofertas lo más ajustadas posible a las necesidades del cliente, y en las que se valoren todos los aspectos técnicos de interés. Para ello el programa, tipifica las naves y realiza la optimización de las secciones mínimas utilizadas, partiendo de la geometría inicial en tres dimensiones de la nave y calculando los coeficientes de seguridad que marca la Norma MV-110 para los perfiles de aceros conformados y la Norma MV-103 en los perfiles de aceros laminados, destacando el análisis que se hace en estos últimos de los esfuerzos de torsión, en concreto los necesarios para estimar el abollamiento de las alas. A partir de los resultados se obtienen todos los planos en CAD, la memoria del proyecto y las correspondientes estimaciones de costes. Describiremos en este trabajo, como se ha implementado programa EMR en lo relativo a la tipología de las naves, las disposiciones de los distintos elementos estructurales, las bases del cálculo, y la forma en la que se gestiona y visualiza toda esa información geométrica y alfanumérica.

1. INTRODUCCIÓN Y PROBLEMÁTICA

El análisis de estructuras metálicas, y concretamente de naves industriales, se ha venido realizando tradicionalmente mediante programas que operan en dos dimensiones. En función de la experiencia de un calculista experto, y haciendo un cálculo bien por pórticos, plantas o alineaciones, dichos programas permiten obtener un dimensionamiento de la estructura, cuya interpretación nunca está exenta de las simplificaciones derivadas del cálculo en dos dimensiones.

Por otra parte, si el estudio se realiza en tres dimensiones, en general hay que recurrir a programas más complejos, que al no estar diseñados concretamente para estructuras de naves, requieren un considerable esfuerzo de configuración por parte del usuario. Es necesario introducir un gran número de datos, labor, que por lo general, sólo podrá hacer un usuario especializado en el cálculo. Asimismo los distintos elementos estructurales, no suelen estar sometidos a todas las comprobaciones de seguridad marcadas por las Normas, ya que algunas de ellas son demasiado específicas para ser consideradas dentro de un programa de propósito general.

Para solucionar estos inconvenientes, se ha realizado un programa informático denominado EMR, que se ajusta a la ejecución y diseño específico de naves industriales con la mínima introducción de datos, capaz de ser manejado por personas no expertas en diseño de estructuras, pero en el que se realicen los cálculos en tres dimensiones necesarios para obtener un diseño lo mas ajustado posible.

2. MODULOS DEL PROGRAMA EMR.

El programa se estructura en una serie de módulos independientes, tal y como se ilustra en la figura 1. En primer lugar se introducen los datos, organizado dicho módulo entorno a un conjunto de formularios donde se especifica cada variable hasta que se definen geoméricamente toda la estructura. Después entran a trabajar una serie de módulos de calculo de secciones con la determinación de los coeficientes de seguridad, para luego seguir con los módulos de dimensionamiento de la cimentación, uniones y placas base.

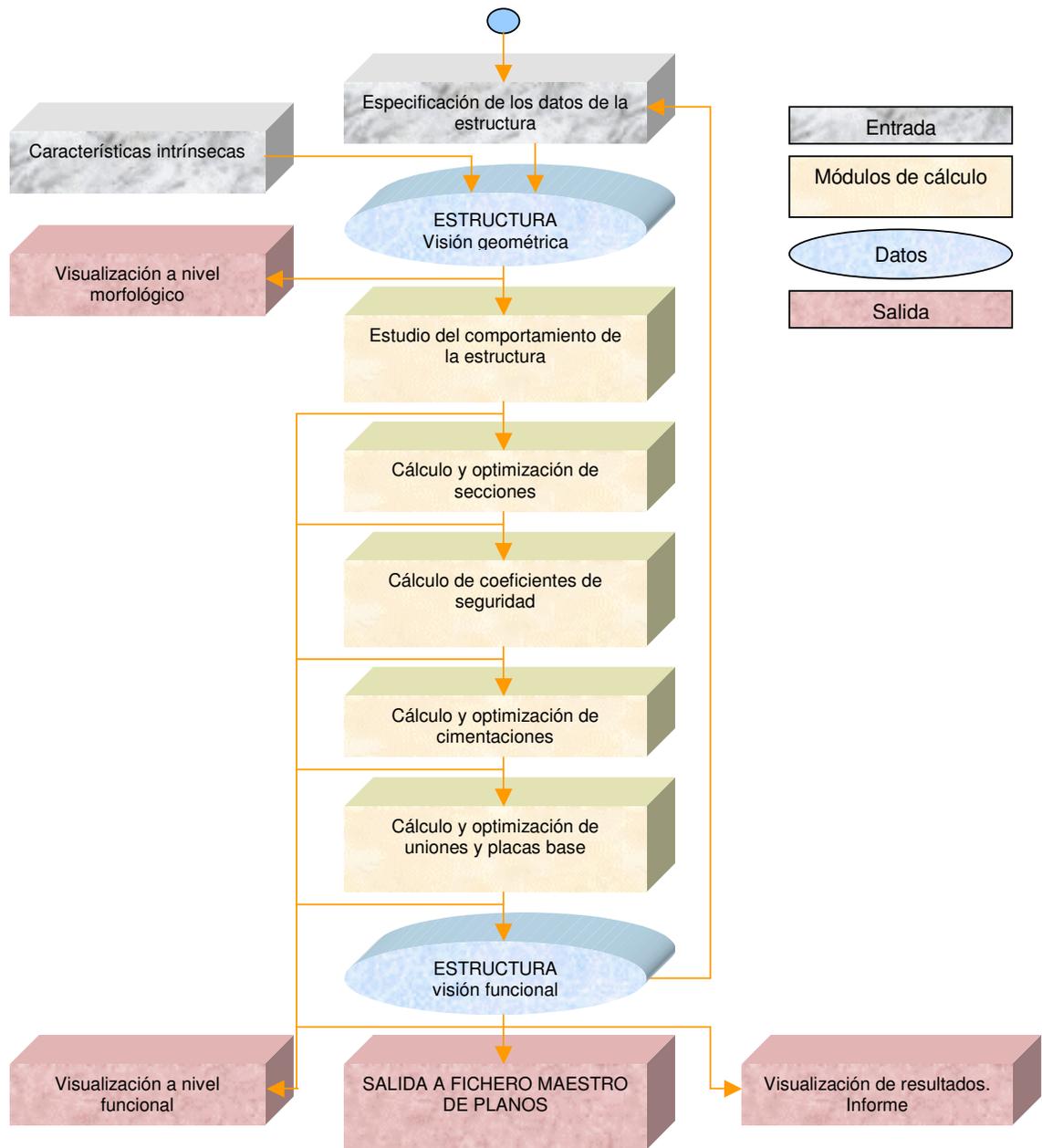


Figura 1. Módulos del programa.

Por ultimo, se ejecutan los módulos de visualización y salida gráfica que permiten exportar un fichero maestro con todos los datos del dimensionamiento (barras, zapatas, uniones, placas base) para la posterior generación de los planos DXF de detalle y de montaje de la estructura.

3. ENTRADA DE DATOS PARA LAS NAVES

En el desarrollo del programa EMR lo primero que se hizo fue tipificar geoméricamente las naves más características, de forma que a partir de un reducido número de parámetros de entrada, éstas naves quedasen perfectamente definidas, (véase figura 2).

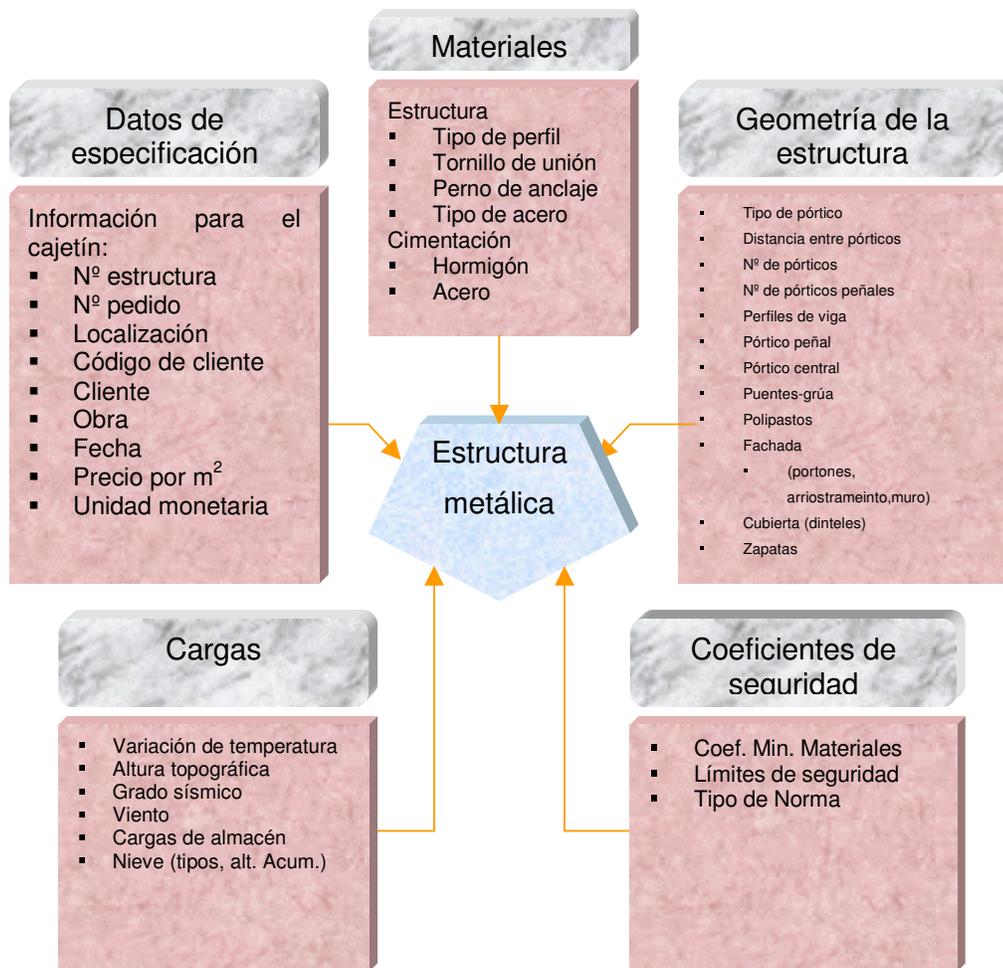


Figura 2.- Datos de entrada en EMR

Así, el programa permite al usuario introducir los datos de la estructura metálica, desde las características morfológicas y geométricas hasta los elementos del inicio del cálculo (normas, coeficientes de seguridad, tipos de cargas, materiales a utilizar y sus características, tipo de perfiles, uniones, zapatas, datos de especificación del proyecto y referidos al presupuesto, etc.). Para ello habilita los correspondientes formularios, en los que la mayor parte de los datos están definidos por defecto, siendo preciso modificar aquellos en función de las especificidades de cada estructura.

4. METODO DE CÁLCULO EMPLEADO EN EMR

Una vez introducidos todos los datos, se ejecuta el proceso de cálculo usando un método matricial en 3D convencional. Primero se calculan las matrices de rigidez local de cada barra, y luego se ensambla para obtener la rigidez global. Como el tamaño de dicha matriz depende del criterio de numeración de nodos y barras, se define una permutación que permite reordenar los nodos de forma que la matriz de rigidez global pueda almacenarse de la forma más económica posible. El método considerado para implementar la permutación o reordenación de los grados de libertad ha sido el algoritmo de Mckee, mientras que para el almacenamiento de la matriz final, se ha utilizado un método basado en la envuelta conexa [1].

Una vez almacenada la matriz, se resuelve el sistema de ecuaciones del sistema matricial mediante una factorización LU, deshaciendo posteriormente la permutación de Mckee con el fin de reasignar los valores de desplazamientos y giros a cada nodo así como determinar las tensiones de cada barra para todas las hipótesis de carga que establecen en las normas.

5. DIMENSIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

En el programa EMR se realizan los cálculos necesarios para optimizar tanto los perfiles de barras, las uniones y la cimentación. La seguridad de la estructura es aceptable cuando, una vez realizado el cálculo con acciones ponderadas, en la combinación de carga más desfavorable, cada elemento es estáticamente estable y las tensiones calculadas no sobrepasan la correspondiente condición de agotamiento.

En concreto para determinar si los perfiles asignados por el usuario son válidos se comprueban los coeficientes de seguridad marcados por la Norma MV-103 para perfiles laminados y la Norma MV-110 para perfiles conformados. De forma específica han sido considerados los siguientes: compresión simple, flexión, flecha, pandeo, pandeo lateral, agotamiento, abolladura del alma, etc.

En el caso de que alguno de los coeficientes no se cumpla, se incrementa la sección del perfil seleccionando. Este procedimiento, será una constante a lo largo de la comprobación de todos los coeficientes estudiados, salvo en aquellos cuyo *no cumplimiento* lleve a la colocación de rigidizadores, en cuyo caso la selección de un perfil superior se produce cuando la distancia entre rigidizadores es más pequeña que la altura del alma del perfil.

En EMR, se realiza un calculo clásico de los coeficientes de seguridad considerados, pero por su interés indicaremos como se ha tenido en cuenta el análisis de la torsión considerando los efectos del alabeo.

En este estudio se ha considerado la torsión mixta de Saint-Venant (M_{xs}) que no se puede despreciar frente a la torsión no uniforme (M_{xw}) y se ha obtenido el bimomento (B_{xw}). Así la torsión total se considera como suma de las torsiones mencionadas, obteniendo la ecuación diferencial:

$$M_x = M_{xs} + M_{xw} = G \cdot I_T \cdot \phi' - E_S \cdot I_A \cdot \phi'' \quad (1)$$

$$B_x = -E_S \cdot I_A \cdot \phi'' \quad (2)$$

La solución general de la ecuación diferencial será del tipo:

$$\phi = C_1 + C_2 \cdot \varepsilon + C_3 \cdot \operatorname{senh}k\varepsilon + C_4 \cdot \operatorname{cosh}k\varepsilon + \phi \quad (3)$$

donde:

C_1, C_2, C_3 y C_4 = constantes de integración función de las condiciones de contorno.

ϕ = solución particular de la ecuación diferencial función del tipo de carga aplicada.

ε, k, k_1 = constantes deducidas a partir de datos geométricos y propiedades mecánicas de la sección torsionada, de valor:

$$\varepsilon = \frac{x}{L} \quad k = \frac{L}{k_1} \quad k_1 = \sqrt{\frac{E \cdot I_A}{G \cdot I_T}} \quad (4)$$

Donde L es la longitud de la barra, E el módulo de Young, G es el módulo a cizalladura, I_A es el módulo de alabeo e I_T el módulo de torsión.

Considerando como tipo de carga el momento torsor puntual se obtienen las siguientes soluciones particulares.

$$\begin{array}{ll}
 \varepsilon < \alpha & \phi = 0 \\
 \varepsilon \geq \alpha & \phi = \frac{M_D \cdot L}{G \cdot I_T} \cdot \left[\frac{L}{k} \cdot \operatorname{senhk}(\varepsilon - \alpha) - (\varepsilon - \alpha) \right] \\
 \varepsilon < \alpha & \phi' = 0 \\
 \varepsilon \geq \alpha & \phi' = \frac{M_D \cdot L}{G \cdot I_T} \cdot \left[\operatorname{coshk}(\varepsilon - \alpha) - \frac{1}{L} \right] \\
 \varepsilon < \alpha & \phi'' = 0 \\
 \varepsilon \geq \alpha & \phi'' = \frac{M_D \cdot L}{G \cdot I_T} \cdot \left[\frac{k}{L} \cdot \operatorname{senhk}(\varepsilon - \alpha) \right] \\
 \varepsilon < \alpha & \phi''' = 0 \\
 \varepsilon \geq \alpha & \phi''' = \frac{M_D \cdot L}{G \cdot I_T} \cdot \left[\frac{k^2}{L^2} \cdot \operatorname{coshk}(\varepsilon - \alpha) \right]
 \end{array}$$

A partir de estas expresiones se determinan el bimomento y los alabeos, sobre los que después se aplica el criterio de dimensionamiento descrito en Norma MV-110 y MV-103, con el fin de estimar el posible fallo por abolladura en el ala de cada sección y en el caso de fallo redimensionar los perfiles.

6. APLICACIÓN DEL PROGRAMA EMR

Se presenta el cálculo de una nave a dos aguas con 4 pórticos y una separación entre los mismos de 5 m. La luz entre pilares será de 12 m con una altura total de 7 m y una altura del pilar de 6 m. Se supone dos portones, uno frontal y otro lateral y cimentaciones aisladas.

Una vez introducidas las características geométricas, las cargas, y los perfiles (IPE en todos los elementos, exceptuando los pilares que serán HEB), se obtiene la vista preliminar de la estructura como se muestra en la figura 3. Si la vista preliminar es correcta se pasa al cálculo de la estructura. Calculada la estructura se pueden obtener los resultados, uniones, cimentaciones, placas base, coeficientes, etc. gráficamente o mediante documentos de texto. A su vez se permite la obtención de los planos destinados al taller y los planos de proyecto con la consiguiente memoria y la lista de materiales. En la figura 4 se puede observar los desplazamientos producidos por la hipótesis de viento frontal en tres dimensiones.

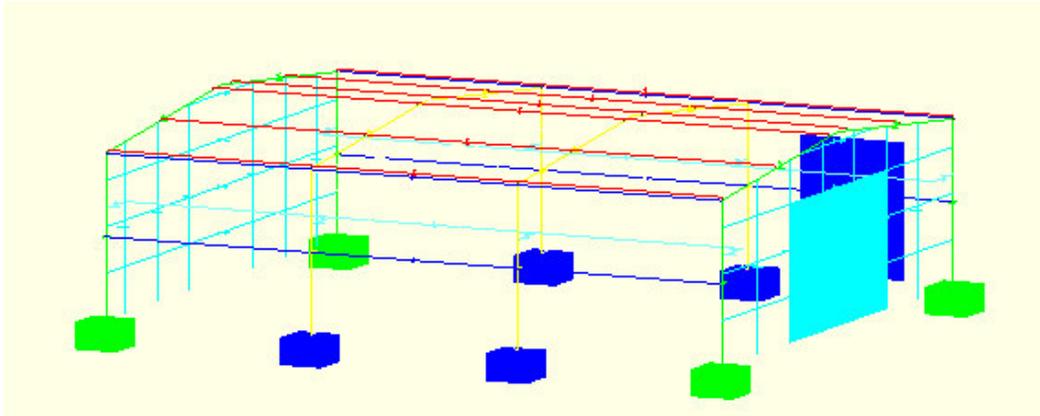


Figura 3.- Vista preliminar de una nave a dos aguas en EMR

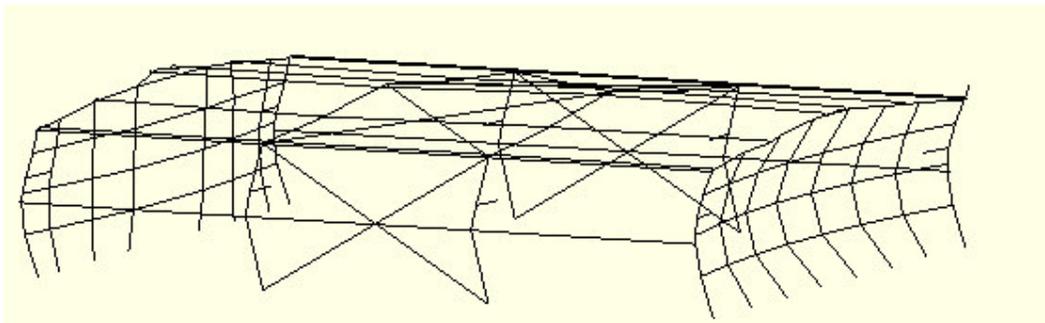


Figura 4.- Desplazamientos por hipótesis de viento frontal en EMR

7. CONCLUSIONES

Desde nuestro punto de vista el programa EMR para el diseño de naves industriales, ha conseguido cumplir con los objetivos inicialmente marcados: facilita una herramienta de fácil manejo accesible a personal no cualificado, integra los cálculos según la normativa vigente con el fin de liberar de dichas tareas al personal técnico, agiliza la capacidad de producción del taller hasta entonces infrutilizada debido a la laboriosidad de los cálculos y comprobaciones, y por último, optimiza la estructura diseñada con el fin de lograr ofertas competitivas reduciendo costes.

En cuanto a las futuras líneas se prevé la introducción de nuevas Normas incluyendo la adaptación al Eurocódigo.

8. REFERENCIAS

- [1]** George A.; Liu J.; “**Computer Solution of Large Sparse Positive Definite Systems**”, Prentice-Hall Inc; New Jersey, 1981.
- [2]** Ensidesa “**Prontuario de Ensidesa**”