

DESARROLLO DE SOFTWARE PARA LA DOCENCIA DE CÁLCULO DE ESTRUCTURAS

Enrique Nieto García
Dpto. Mecánica Medios Continuos
E.U.P. de Sevilla

RESUMEN

En los programas comerciales de cálculo de estructuras se obtiene una relación directa entre las causas (cargas, ...) y los efectos (esfuerzos, deformaciones, ...) que se producen en una estructura y el usuario no tiene acceso a los resultados intermedios, por lo que no tiene información de cómo se ha calculado la estructura. El software desarrollado para la docencia de cálculo de estructuras, pretende mostrar precisamente "cómo" se calcula una estructura y los resultados parciales de varios métodos de cálculo. La utilización de diferentes métodos de cálculo es una característica significativa muy importante en este software.

ABSTRACT

En los programas comerciales de cálculo de estructuras se obtiene una relación directa entre las causas (cargas, ...) y los efectos (esfuerzos, deformaciones, ...) que se producen en una estructura y el usuario no tiene acceso a los resultados intermedios, por lo que no tiene información de cómo se ha calculado la estructura. El software desarrollado para la docencia de cálculo de estructuras, pretende mostrar precisamente "cómo" se calcula una estructura y los resultados parciales de varios métodos de cálculo. La utilización de diferentes métodos de cálculo es una característica significativa ya que el procedimiento de cálculo es tan importante en este software.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. APORTACIÓN A LA DOCENCIA DE CÁLCULO DE ESTRUCTURAS

Las asignaturas de cálculo de estructuras, con referencia a un relativamente corto espacio de tiempo, se encuentran con una nueva situación, derivada de la incidencia de la informática.

La facilidad del uso del software comercial del cálculo de estructuras, en comparación con la complejidad operatoria que supone el cálculo manual de estructuras, hace que se tienda a la utilización del ordenador.

Esta situación tiene una serie de consecuencias, en la docencia de cálculo de estructuras, de las que destacaríamos las siguientes:

1. Poca atención, en la bibliografía y en la docencia, a la resolución de estructuras de una cierta complejidad, en detrimento del conocimiento de los procedimientos operativos de los diferentes métodos de cálculo, con un excesivo desarrollo de la teoría.
2. Pérdida del concepto físico del comportamiento de las estructuras de una cierta complejidad, lo que unido a la utilización del software comercial, incide en la escasa formación acerca de la interpretación de los resultados obtenidos con ordenador. Ello incide en la aparición de patologías estructurales, inducidas por la utilización de programas de cálculo, sin una formación adecuada en estructuras.
3. Los programas de cálculo de estructuras, que se encuentran en el mercado, siguen criterios de normativa, muchas veces empírica, y otros criterios de orden comercial, si pretender la enseñanza del proceso de cálculo y por ello no cumplen el objetivo docente que se pretende.
4. El coste de los programas comerciales de cálculo de estructuras, junto con el número de licencias necesarias para hacer operativa su utilización con un grupo de alumnos, es una dificultad muy importante para su empleo.

1.2. OBJETIVOS

Existe un conjunto de objetivos que podría resumirse en dos :

1. Elaboración de material didáctico, para la docencia de cálculo de estructuras, para que los alumnos de cálculo de estructuras de la E.U.P. de Sevilla dispongan de un software que, ahorrándole operaciones, siga poniendo de manifiesto los resultados parciales obtenidos y el proceso de cálculo, para diferentes métodos.
2. Permitir una utilización amplia por ser muy barato y fácil de usar. El coste de los programas de cálculo de estructuras hace que no sea posible su utilización masiva, mientras que el conjunto de programas elaborado permite su utilización, con el coste de un disquete y disponiendo de un ordenador normal que tenga instalado Windows'95.

1.3. FUENTES

No se ha encontrado bibliografía sobre este tema, por lo que las fuentes utilizadas se han reducido a:

NIETO GARCÍA, E. (1998). Estructuras Arquitectónicas e Industriales : su cálculo. Madrid, Ed. Tébar Flores

2. METODOLOGÍA Y PROCESO

Al tratarse de la elaboración de una serie de programas en Visual Basic, que aporten al alumno la posibilidad de poder corregir sus cálculos de estructuras, se han ido realizando una serie de actividades, que definen el proceso seguido:

2.1. REUNIONES DE COORDINACIÓN DEL GRUPO

Dicho grupo está formado por 6 componentes: 5 alumnos y 1 profesor (director del proyecto), habiendo realizado reuniones de coordinación de diferentes tipos:

- Del conjunto de los alumnos con el director del proyecto, para coordinación en aspectos de contenido, que afectan a la totalidad.
- Entre los alumnos, para coordinación en aspectos de desarrollo y operatoria de software.
- De cada alumno con el director del proyecto, para resolver problemas específicos.

2.2. ESTABLECIMIENTO DEL ÁMBITO DEL TRABAJO

El ámbito del trabajo quedó definido en los siguientes términos:

1. Elaboración de pantallas de entrada de datos y salida de resultados acorde con Windows'95, de forma que resulten conocidas y de fácil utilización.
2. Entradas de datos no en la forma que se solicitan en los programas comerciales, sino como se hace en la resolución manual de los problemas de cálculo de estructuras. Por ejemplo, se piden los datos necesarios para definir una barra, como son el área, los momentos de inercia, etc. y no si es un perfil IPE, HEB, etc. Otro ejemplo: se pide, como dato de entrada, la conectividad de una barra y no su dibujo gráfico, como en los programas comerciales, para que el alumno tome conciencia de la topología de la estructura, de las vinculaciones interiores, etc.

Una vez definida la conectividad de las barras, se dibujan en una parte de la pantalla, de forma que el alumno pueda visualizar y comprobar la estructura que ha definido.
3. Salida de resultados parciales, para que el alumno siga el proceso de cálculo y tenga una guía acerca de los cálculos a realizar, de forma que pueda corregir sus propios problemas de cálculo de estructuras.
4. Se trata de aportar herramientas aplicables a gran número de problemas y por tanto de elegir los métodos de cálculo más representativos y de mayor significatividad conceptual.

En el apartado de contenidos concretaremos los métodos a desarrollar.

5. Elaboración de una ayuda, referente al propio proceso de cálculo, datos de entrada, etc. que recoja varios cálculos de estructuras de barras, para facilitar al alumno que desarrolle un proceso de autoaprendizaje.

2.3. DEFINICIÓN Y ADQUISICIÓN DE LOS MEDIOS NECESARIOS

Una vez definido el ámbito de actuación se definieron y adquirieron, con la financiación del Programa de Calidad de la Enseñanza para el curso 1997-98, I.C.E. de la Universidad de Sevilla, los medios necesarios en cuanto a software de programación, documentación y mate-

rial fungible, utilizando el equipamiento informático del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y otro de la E.U.P. de Sevilla .

2.4. FASES DEL TRABAJO REALIZADO

El desarrollo de software aplicado a la docencia de cálculo de estructuras se ha realizado de forma coordinada, mediante trabajo en equipo, asignándosele a cada miembro del mismo un conjunto de funciones.

Las fases desarrolladas han sido :

1. Fase de presentación general del trabajo, en la que se trató del diseño global del software, definiendo los aspectos comunes y de conjunto, que deben seguir los trabajos de los miembros del grupo.
2. Fase de elaboración de los correspondientes algoritmos de cálculo, para los diferentes programas.
3. Fase de elaboración de los correspondientes diagramas de flujo, para los diferentes programas.
4. Fase de desarrollo de software, en Visual Basic, para Windows'95.
5. Fase de elaboración de pantallas, para entradas de datos y salidas de resultados, siguiendo razones didácticas y buscando un máximo de facilidad operativa.
6. Fase de testeo de resultados.
7. Fase de elaboración de ayudas y ejemplos prácticos.

2.5. EQUIPO HUMANO

Han desarrollado el presente proyecto de elaboración de software para la docencia de cálculo de estructuras un equipo de personas, todas ellas de la Escuela Universitaria Politécnica de Sevilla, que son las siguientes:

- | | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| 1. Alumnos: | 2. Coordinador del proyecto: |
| - D. Marcos García-Donas | D. Enrique Nieto García |
| - D. Antonio Miguel Contreras | Profesor de Cálculo de Estructuras |
| - D. Manuel Jesús Camacho | E.U.P. - Sevilla - |
| - D. Luis Carlos Gonzalez | |
| - D. Fernando Arjona | |

Todos los alumnos anteriores tienen aprobada la asignatura de Cálculo de Estructuras de la E.U.P. de Sevilla y tienen experiencia en el desarrollo de software.

3. RESULTADOS DEL PROYECTO: ENTRENADOR INFORMÁTICO DE ESTRUCTURAS

Los resultados se concretan en un conjunto de módulos de programa desarrollados, que han sido los siguientes:

1. Un programa para resolver el cálculo de estructuras hiperestáticas planas, de barras, de nudos rígidos, siguiendo el método de Cross y considerando nudos intraslacionales, que solamente permiten giro.

El método de Cross permite el cálculo de las estructuras más usuales en edificación arquitectónica, siendo muy utilizado por su potencialidad explicativa y de cálculo, pero presenta un gran número de operaciones.

Corresponde a estructuras que se pueden calcular utilizando exclusivamente las etapas 1ª y 2ª del Método de Cross, bien por razones del tipo de cargas que actúan o bien por las vinculaciones a que se encuentran sometidas.

2. Un programa para resolver el cálculo de estructuras hiperestáticas planas, de barras, de nudos rígidos, siguiendo el método de Cross y cuyos nudos permiten un desplazamiento horizontal, además de un giro.

Corresponde a estructuras que pueden desplazarse horizontalmente por la acción de las cargas horizontales, como por ejemplo el viento, y por la inexistencia de vínculos que lo impidan y por tanto habremos de utilizar también la 3ª y 4ª etapas del método de Cross.

Estos dos programas se han agrupado en un mismo módulo, que denominamos: **Módulo sobre el método de Cross**

3. Un programa para resolver el cálculo matricial de estructuras, mediante el método de la rigidez, recogido en el MÓDULO SOBRE CÁLCULO MATRICIAL.

Se obtiene la matriz de rigidez de los siguientes tipos de estructuras :

- Estructuras planas de barras de nudos articulados y de nudos rígidos.
- Emparrillados, que son estructuras planas pero con cargas perpendiculares al plano de la estructura.

Con ello se puede acceder al proceso operatorio del cálculo matricial, que es la metodología de más amplia utilización, por su gran potencia de cálculo y amplitud de aplicaciones, siendo además base de otras metodologías como el método de los elementos finitos (F.E.M.), presentando como inconveniente la prolijidad operatoria que implica.

4. Un programa para el cálculo de estructuras planas de nudos articulados, utilizando Castigliano, recogido en el MÓDULO SOBRE CÁLCULO POR CASTIGLIANO.

Con dicho programa se utiliza Castigliano, aplicado a estructuras de barras, planas, de nudos articulados, para cálculo de esfuerzos hiperestáticos y desplazamientos en nudos.

5. Un programa para el cálculo de estructuras planas y espaciales, isostáticas, utilizando el método de los nudos, recogido en el MÓDULO SOBRE CÁLCULO POR EL MÉTODO DE LOS NUDOS.

Se pretende que el conjunto de módulos desarrollados permita calcular un gran número de estructuras, sirviendo de guía en la utilización de diferentes métodos de cálculo.

En los siguientes apartados, vamos a describir los módulos de software desarrollado para la docencia de cálculo de estructuras, presentando varias de las pantallas de dichos módulos, sin pretender ser un manual de utilización de los mismos, que es más detallado, sino solamente tratar de poner de manifiesto la amplitud del trabajo desarrollado.

3.1. MÓDULO SOBRE EL MÉTODO DE CROSS

En la figura 1 se representa un menú de persiana, para tratamiento de Archivos.

Al igual que hay una persiana desplegable para Archivo, que vemos en la Ilust.1, hay otra para: Ver, Cálculos y Ayuda.

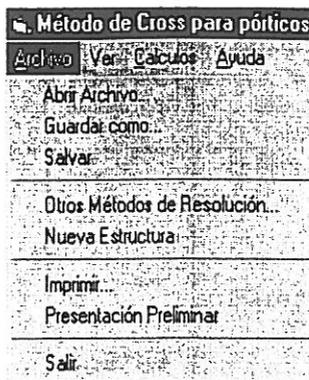


Figura 1.

En la siguiente figura (2) se puede ver la pantalla de introducción de datos, que es común a todas las pantallas de los módulos.

Habremos de definir:

1. Nudos: coordenadas, tipo de nudo y pertenencia a un "forjado".
2. Barras: conectividad y momento de inercia.
3. Cargas en las barras: tipo de carga y definición cuantitativa.

Conforme se van rellenando los datos, aparecen nuevas filas de nudos, barras y cargas. La estructura se dibuja automáticamente en el recuadro correspondiente, permitiendo comprobar su correcta definición topológica.

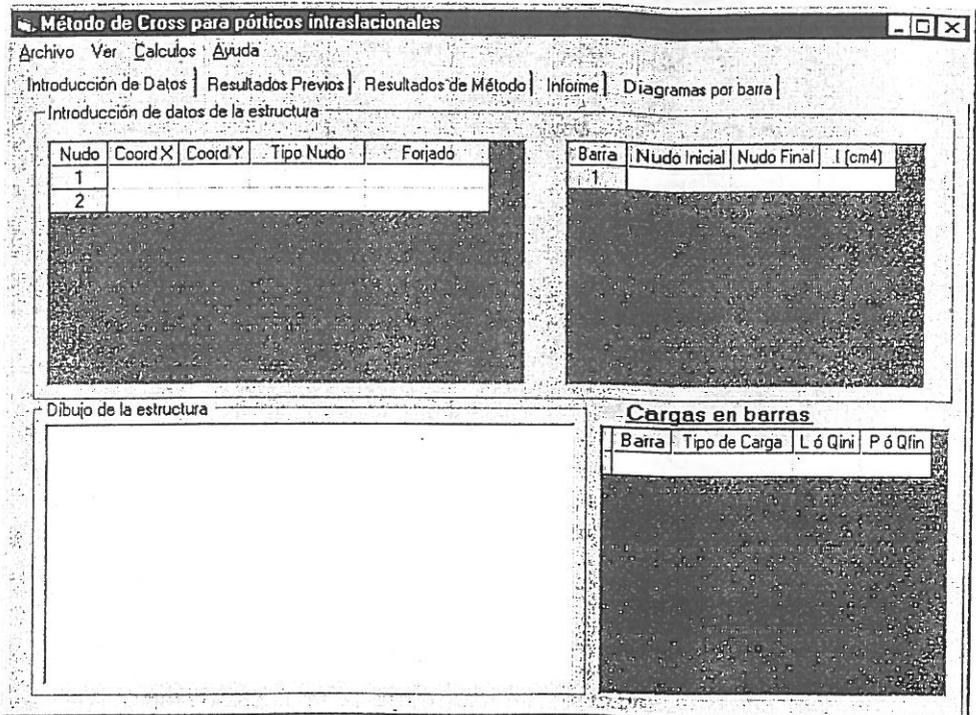


Figura 2.

En la siguiente figura (3) se puede ver la pantalla de operaciones y resultados intermedios de cálculo:

1. En la parte superior de la pantalla, para cada barra: Longitud, K(rigidez), Coeficientes de reparto, Momentos de 1ª etapa.
2. En la parte inferior de la pantalla, para una carga puntual o distribuida: los momentos de empotramiento perfecto en los extremos.

Con la forma de definición utilizada para las cargas distribuidas, se pueden abarcar las cargas distribuidas uniformes (de valor constante), las triangulares y las de forma trapezoidal.

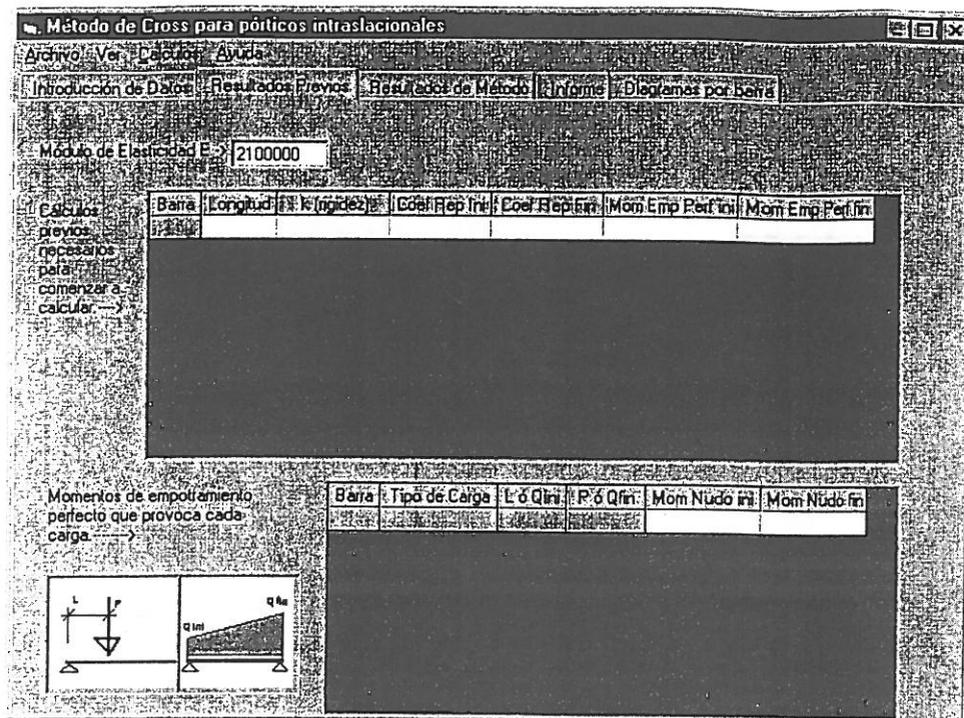


Figura 3.

En la figura siguiente (4) se representa la pantalla de operaciones y resultados finales de método de Cross, por ciclos, definiendo:

- Número de iteraciones a realizar.
- Cálculo intraslacional ó traslacional.

Se obtienen, para cada ciclo, el momento de reparto, de envío (en el caso traslacional también los momentos suplementarios) y los momentos totales, en los extremos de cada barra.

Existen otras pantallas, que son:

- Informe: Para obtener un informe, que puede verse en pantalla, pasarse a fichero o imprimirse, de los datos y resultados intermedios y finales obtenidos.
- Diagramas por barra: En el que se representa la distribución de flectores totales.

El alumno cuando calcula manualmente una estructura, realiza el proceso de obtención del diagrama de flectores totales de la estructura barra a barra, superponiendo los diagramas isostático e hiperestáticos y por ello se representan así las distribuciones de flectores totales.

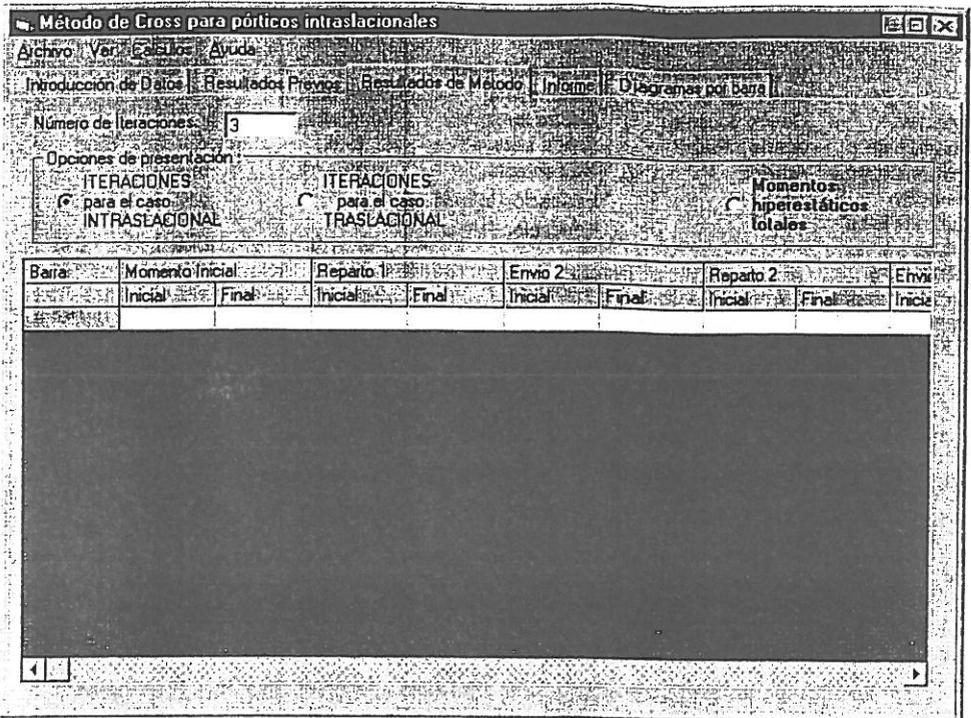


Figura 4.

3.2. MÓDULO SOBRE EL CÁLCULO MATRICIAL

Se mantiene la pantalla de introducción de datos anteriormente expuesta en el módulo de Cross, añadiendo:

- En la definición de la estructura: Si es plana o emparrillado y tipo de nudo.
- En la definición de las barras: la sección.

En la figura siguiente (5) que se corresponde con la pantalla: Resultados intermedios, se pueden obtener:

1. La expresión simbólica de la matriz de rigidez de la estructura, definida en la pantalla de introducción de datos o bien procedente de un archivo, que es la que se ve en la figura.

Permite que el alumno pueda comprobar el proceso de ensamblaje de la matriz de rigidez, por el método directo, de una estructura, tanto de nudos rígidos como articulados.

2. Las matrices de transformación de coordenadas de las barras.
3. Las matrices de rigidez en locales de las barras.
4. Las matrices de rigidez en globales de las barras.

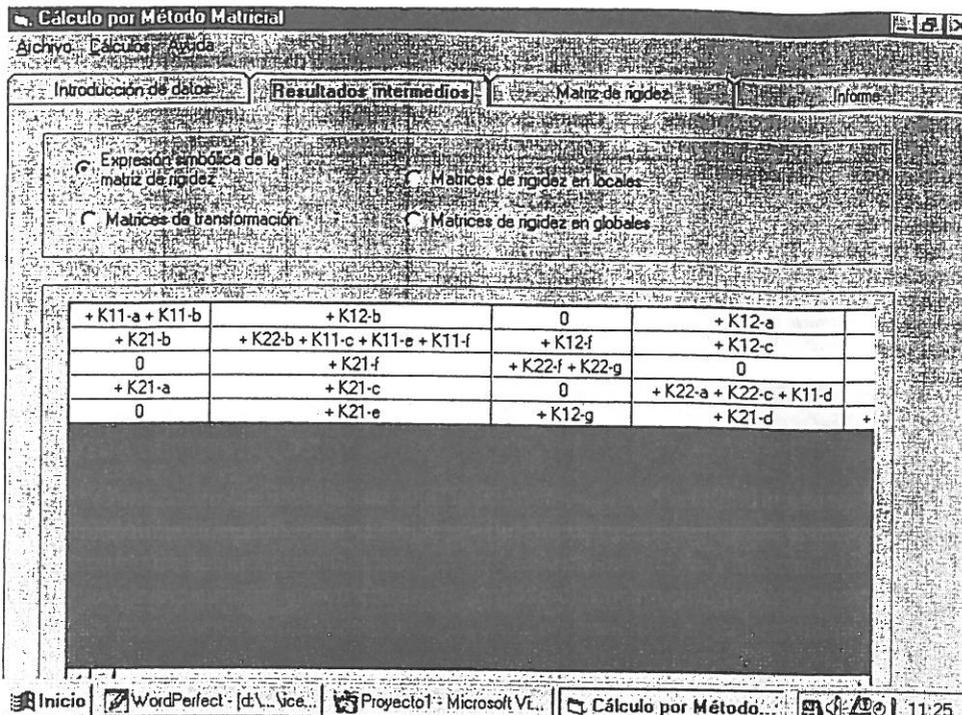


Figura 5.

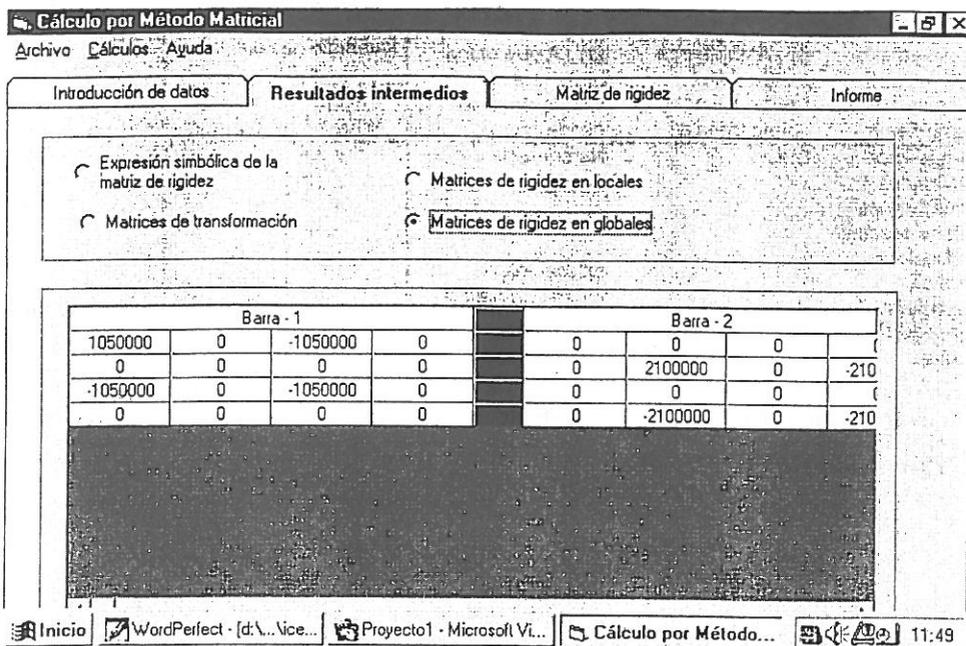


Figura 6.

En la anterior figura (6) vemos cómo en la misma pantalla de resultados intermedios se obtienen las matrices de rigidez en globales de las barras, en este caso para una estructura de nudos articulados. Moviéndonos sobre las guías horizontales del tipo Windows'95, podemos ver en pantalla la matriz de rigidez de la totalidad de las barras.

En forma análoga aparecen las matrices de rigidez de las barras en coordenadas locales, tanto para nudos articulados como de empotramiento elástico.

Con el conjunto de datos, que se obtienen de esta pantalla, el alumno puede comprobar los cálculos realizados, para definir las matrices correspondientes a la totalidad de las barras, que son necesarias para obtener la matriz de rigidez de una estructura.

En la figura siguiente (7) que se corresponde con la pantalla: Matriz de rigidez, podemos ver la matriz de rigidez de la estructura que, en este caso, es de nudos articulados.

Existe otra pantalla correspondiente a la elaboración de un informe sobre los cálculos realizados, de estructura análoga a la del módulo de Cross.

Cálculo por Método Matricial [_] [F] [X]

Archivo Cálculos Ayuda

Introducción de datos | Resultados intermedios | **Matriz de rigidez** | Informe

Matriz de rigidez

	Despl.- 1X	Despl.- 1Y	Despl.- 2X	Despl.- 2Y	Despl.- 3X	Despl.- 3Y	Despl.- 4X
Carga- 1X	1050000	0	-1050000	0	0	0	0
Carga- 1Y	0	0	0	0	0	0	0
Carga- 2X	-1050000	0	2125200	-806400	0	0	-1075200
Carga- 2Y	0	0	-806400	2704800	0	-2100000	806400
Carga- 3X	0	0	0	0	2906400	604800	-2100000
Carga- 3Y	0	0	0	-2100000	604800	2553600	0
Carga- 4X	0	0	-1075200	806400	-2100000	0	3175200
Carga- 4Y	0	0	806400	-604800	0	0	-806400
Carga- 5X	0	0	0	0	-806400	-604800	0
Carga- 5Y	0	0	0	0	-604800	-453600	0
Carga- 6X	0	0	0	0	0	0	0
Carga- 6Y	0	0	0	0	0	0	0

[<] [>]

[Inicio] [WordPerfe...] [Proyecto1 ...] [Cálculo ...] [Proceso de...] [12:20]

Figura 7.

3.3. MÓDULO SOBRE CÁLCULO POR CASTIGLIANO

El módulo desarrollado está exclusivamente aplicado a estructuras de barras de nudos articulados.

En la figura siguiente (8) podemos ver la pantalla de inicio, donde se definen las opciones de cálculo realizables con el módulo:

1. Esfuerzos en sistemas hiperestáticos, por vinculación interior o exterior.
2. Desplazamientos en sistemas isostáticos.

El Teorema de Castigliano se utiliza aquí para el cálculo de las estructuras de nudos articulados. En relación a los esfuerzos, permite obtener los axiles en estructuras hiperestáticas interiores (por barras superabundantes) e hiperestáticas exteriores (por vinculación hiperestática), siendo necesaria la definición de la causa de hiperestaticidad.

En cuanto a los desplazamientos permite obtener el desplazamiento vertical y horizontal de un nudo cualquiera de una estructura isostática de nudos articulados.

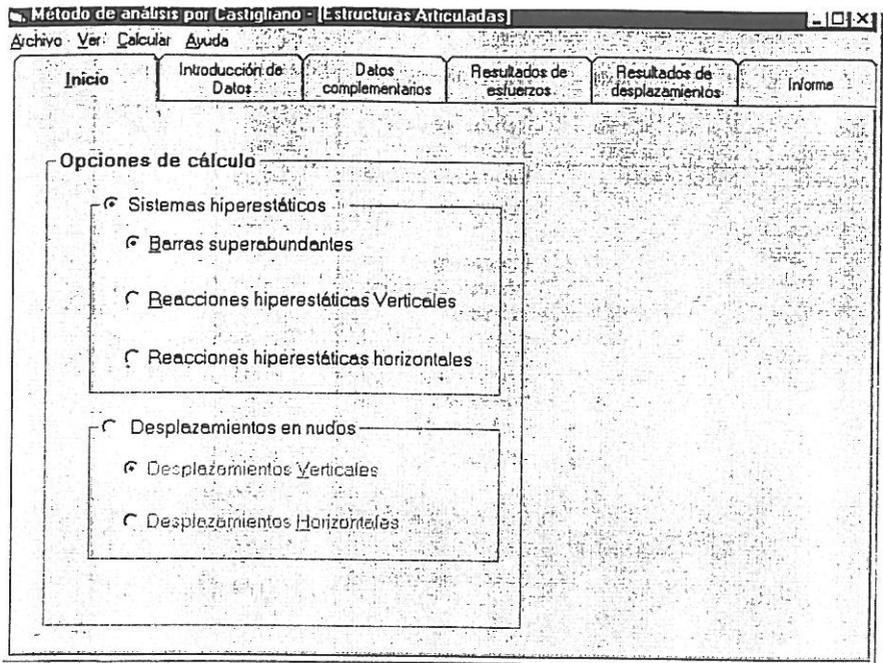


Figura 8.

En la figura siguiente (9) se representa la pantalla de introducción de datos, correspondiente a

- Coordenadas y cargas (nudos) .Conectividad de las barras y área.
- Análisis del sistema virtual.

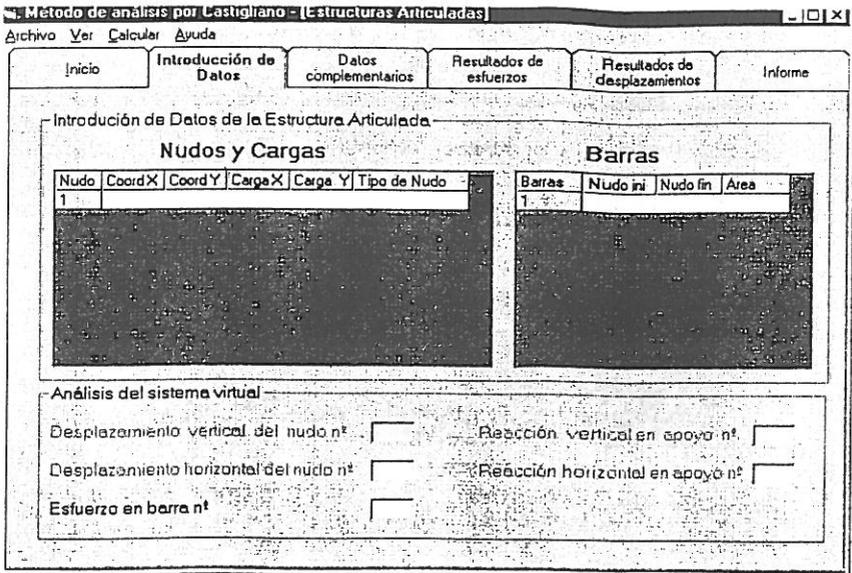


Figura 9.

En la figura siguiente (10) se puede ver la pantalla de datos complementarios:

- Dibujo de la estructura, para comprobar una correcta definición de su topología.
- Estudio sobre la hiperestaticidad de la estructura.

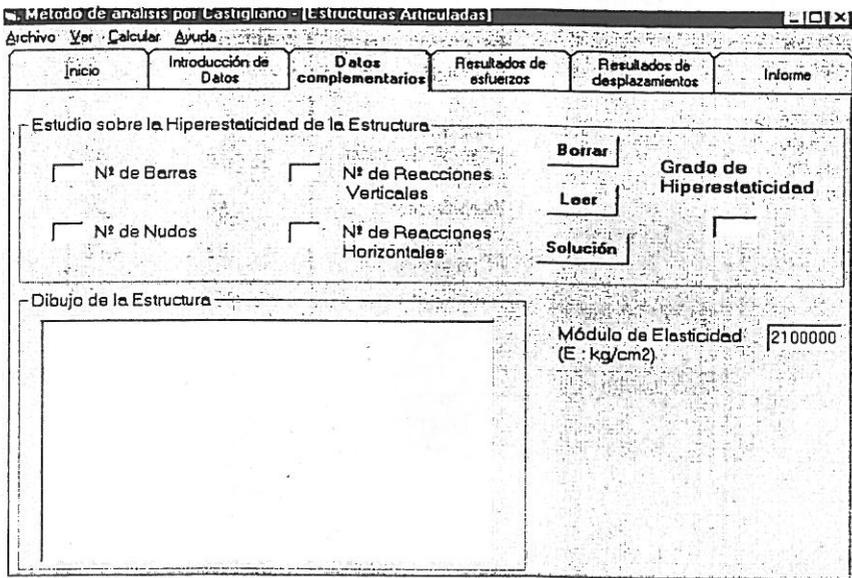


Figura 10.

En las figuras siguientes (11 y 12) se obtienen las salidas necesarias para rellenar las tablas operativas para el cálculo por Castigliano, de esfuerzos y desplazamientos.

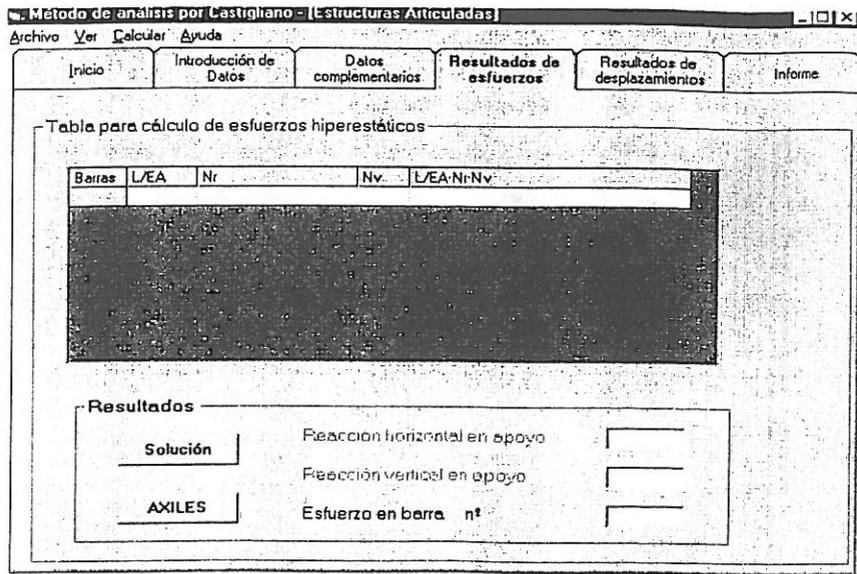


Figura 11.

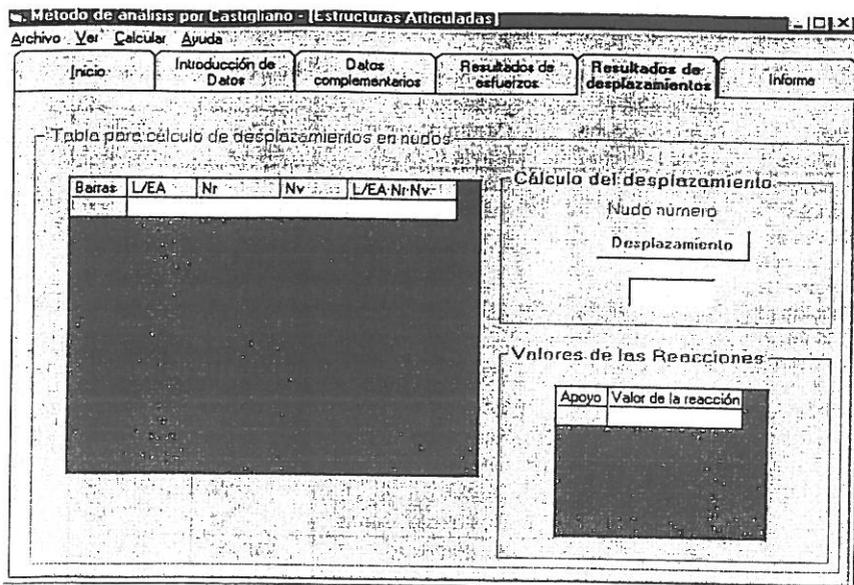


Figura 12.

3.4. MÓDULO SOBRE CÁLCULO POR EL MÉTODO DE LOS NUDOS

En las figuras siguientes (13 y 14) podemos ver la introducción de datos para estructuras isostáticas, espaciales y planas, respectivamente.

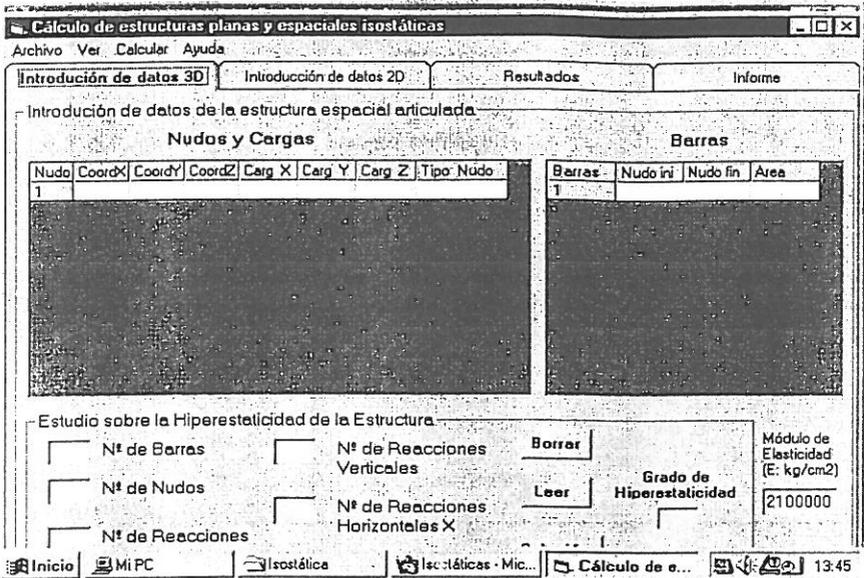


Figura 13.

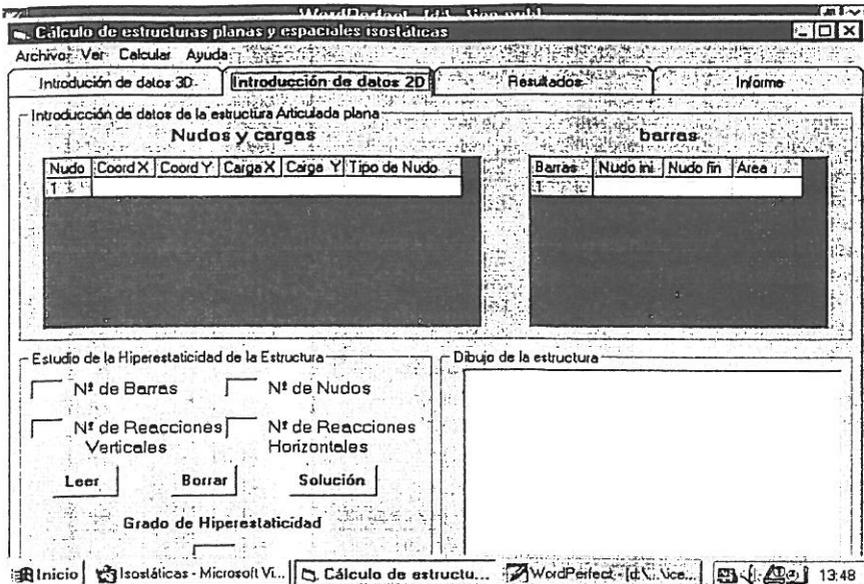


Figura 14.

En la figura siguiente (15) podemos ver la pantalla de resultados (Axiles y Reacciones), una estructura articulada isostática.

En la figura 16 vemos una pantalla de informe para sacar los resultados por impresora fichero, que hay en todos los módulos.

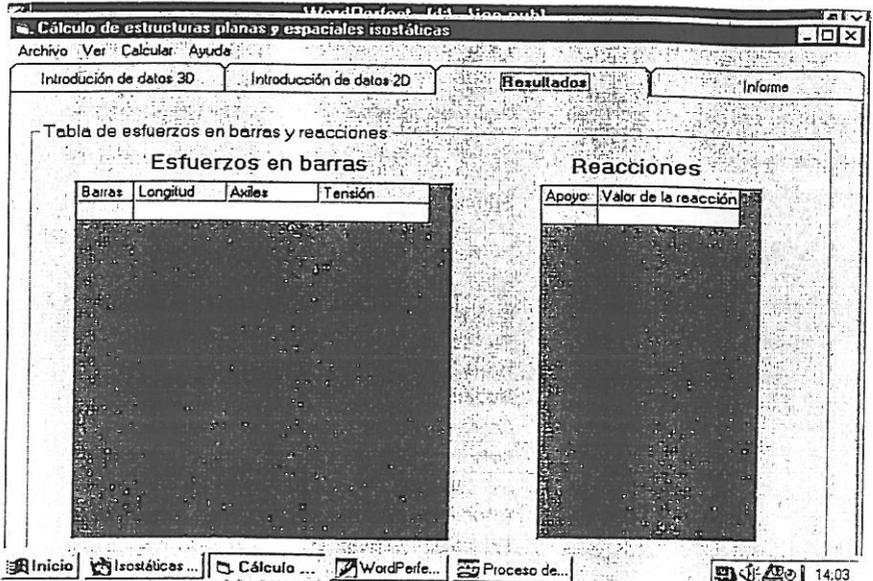


Figura 15.

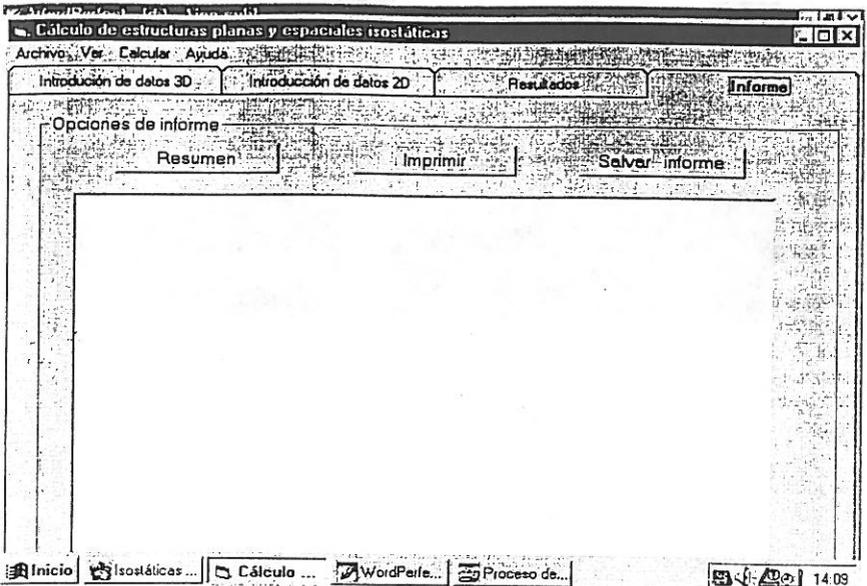


Figura 16.