

T
624.171
NAR.



Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Mecánica

Diseño de un Sistema para Análisis de Estructuras Tridimensionales

TESIS DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentada Por:

Ricardo Naranjo Suárez

Guayaquil - Ecuador

Año 1986



AGRADECIMIENTO

Al Ingeniero Jorge Kalil, Director de Tesis, por su ayuda en el desarrollo del presente trabajo.

Al Ingeniero Eduardo Orcés, Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica, por sus sugerencias y el interés mostrado en la realización de esta Tesis.

A las siguientes empresas y personas por las facilidades brindadas para utilizar sus equipos de computación: Delfini & Cia. Ltda. (DELTA), Sistemas de Información Computarizados Cia. Ltda. (SINFO-Q) y los Señores Robert y Víctor Pinzón Rojas.

DEDICATORIA



A MIS PADRES

TRIBUNAL DE GRADUACION



Ing. Eduardo Orces P.
DECANO DE LA FACULTAD
DE INGENIERIA MECANICA

Ing. Jorge Kalil Ch.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Ricardo Cassis M.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL
DE GRADO

Ing. Alfredo Torres G.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL
DE GRADO

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



Ricardo A. Naranjo Suárez

Ricardo A. Naranjo Suárez



RESUMEN

Utilizando los métodos del análisis de estructuras y las sugerencias para el desarrollo de programas de computadora presentados en la referencia bibliográfica 1, se desarrolla un conjunto de programas para analizar estructuras tridimensionales, el cual se implementa en el Sistema IBM 4341 del "Centro de Servicios Computacionales (Cesercomp)" de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Mediante el sistema desarrollado se puede analizar cualquier tipo de estructura tridimensional conformada por miembros prismáticos y de sección simétrica respecto a sus ejes transversales mayor y menor. Proporcionando como datos de entrada la geometría de la estructura, el tipo de apoyos, las propiedades mecánicas de los miembros y las condiciones de carga aplicadas, el análisis permite obtener -para cada condición de carga-, los desplazamientos de traslación y rotación de los nudos, las fuerzas y momentos en los extremos de cada miembro y las reacciones en los apoyos.

Los programas están elaborados en WATCOM BASIC, versión del lenguaje Basic desarrollada por la Waterloo Computing System Ltd. de Canadá.

ÍNDICE GENERAL



RESUMEN	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	IX
SIMBOLOGÍA	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
INTRODUCCION	1
CAPÍTULO 1	
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Análisis de estructuras indeterminadas: métodos y selección	4
1.3. Planteamiento matricial del método de las rigideces	10
1.4. Matrices de rotación y transformación de miembros en el espacio	18
CAPÍTULO 2	
2. DISEÑO DEL SISTEMA	33
2.1. Descripción del equipo	33

2.2. Sistema operativo	36
2.2.1. Lenguaje EXEC	36
2.2.2. Archivos	38
2.2.3. Editor de archivos	39
2.3. Lenguaje de programación	40
2.4. Organización y componentes del sistema	41
2.4.1. Programa ET	41
2.4.2. Programa ET100 y archivo AD02	42
2.4.3. Programa ET200 y archivo AD03	43
2.4.4. Programa ET300	43
2.4.5. Archivo AD04	44
2.4.6. Comandos para verificar e imprimir resultados	45

CAPÍTULO 3

3. FORMACION DE LA MATRIZ DE LOS DESPLAZAMIENTOS	50
3.1. Matriz de desplazamiento de los nudos	50
3.2. Diagrama de flujo	56
3.3. Procedimiento de formación de la matriz [D]	56
3.3.1. Inicialización de variables	56
3.3.2. Lectura de datos	57
3.3.3. Asignación de valores a los arreglos de coordenadas	58



3.3.4. Asignación de números de desplazamiento	58
--	----

CAPÍTULO 4

4. FORMACION DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ	60
4.1. Matriz de rigidez de la estructura	60
4.2. Diagrama de flujo	71
4.3. Descripción del procedimiento	71
4.3.1. Inicialización de variables	72
4.3.2. Procesamiento de datos de los miembros	72
4.3.3. Dimensionamiento del arreglo que contiene la matriz de rigidez	74
4.3.4. Cálculo y clasificación de los elementos de la matriz de rigidez	75

CAPITULO 5

5. FACTORIZACION DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ	81
5.1. Factorización de matrices	81
5.2. Diagrama de flujo	82
5.3. Descripción del procedimiento para determinar la matriz factorizada	83
5.3.1. Cálculo de los elementos de la diagonal principal	83
5.3.2. Cálculo de los elementos de cada columna	84

CAPÍTULO 6

6. FORMACION DE LA MATRIZ DE CARGA EN LOS NUDOS	90
6.1. Matriz de carga en los nudos	90
6.2. Diagrama de flujo	93
6.3. Procedimiento de formación de la matriz $[C_n]$	93
6.3.1. Inicialización de variables	94
6.3.2. Lectura de datos de las condiciones de carga	94
6.3.3. Análisis de carga en nudos	94
6.3.4. Análisis de carga en miembros	95

CAPÍTULO 7

7. CÁLCULO DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE LOS NUDOS	102
7.1. Método de resolución	102
7.2. Diagrama de flujo	105
7.3. Descripción del procedimiento	105
7.3.1. Cálculo del elemento h_1	106
7.3.2. Parámetros para calcular los elementos $h_2, h_3, \dots, h_n$	107
7.3.3. Sumatoria de los términos conocidos de la Ecuación	107
7.3.4. Cálculo de elementos $h_2, h_3, \dots, h_n$	108
7.3.5. Proceso de sustitución inversa	108
7.3.6. Asignación de resultados para impresión	109





CAPÍTULO 8

8. CALCULO DE LAS ACCIONES EN LOS MIEMBROS Y LAS

LAS REACCIONES EN LOS APOYOS	115
8.1. Acciones finales en los extremos de los miembros	115
8.2. Reacciones en los apoyos	118
8.3. Diagrama de flujo	119
8.4. Descripción del procedimiento	119
8.4.1. Lectura de datos	120
8.4.2. Cálculo de los desplazamientos en coordenadas locales	120
8.4.3. Cálculo de las acciones $[m]_i$	121
8.4.4. Cálculo de las acciones finales $[M]$	121
8.4.5. Reacciones en los nudos restringidos	122

CAPÍTULO 9

9. INSTRUCCIONES PARA EL USUARIO	127
9.1. Introducción	127
9.2. Consideraciones generales sobre la preparación de los datos de entrada	128
9.2.1. Sistema de referencia general	129
9.2.2. Optimización de la numeración de los nudos	129
9.2.3. Numeración de los miembros	130

9.2.4. Sistemas de referencia locales	133
9.2.5. Miembros en el espacio: Ángulo de Rotación	133
9.3. Pasos preliminares	138
9.4. Procedimiento para el ingreso de datos	139
9.5. Inicio de ejecución del programa de ingreso de datos generales	147
9.6. Ingreso de datos de los nudos	153
9.7. Ingreso de datos de los miembros	153
9.8. Ingreso de los datos de carga en los nudos	157
9.9. Ingreso de los datos de carga en los miembros	157
9.10. Revisión de resultados e impresión	162
9.11 Ejemplos de aplicación	164
9.11 Errores de ejecución	168
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	179
APENDICES	182
Apéndice A	183
Apéndice A.1. Programa ET	183
Apéndice A.2. Programa ET 100	184
Apéndice A.3. Programa ET200	187
Apéndice A.4. Programa ET300	193
BIBLIOGRAFIA	209



ABREVIATURAS

cm	Centímetros
CM	Centímetros (en impresión de computadora)
cm ²	Centímetros cuadrados
CM2	Centímetros cuadrados (en impresión de computadora)
cm ⁴	Centímetros a la cuarta potencia
CM4	Centímetros a la cuarta pot. (en impresión de computadora)
E	Módulo de elasticidad a la tensión
G	Módulo de elasticidad al corte
GRS	Grados (en impresión de computadora)
K	Kip (1 Kip= 1000 Lb)
Kg	Kilogramos fuerza
Kips	Miles de libras (1 Kip= 1000 Lb)
Lb	Libras fuerza
m	Metros
M	Metros (en impresión de computadora)
P	Pie
pg	Pulgadas
PG	Pulgadas (en impresión de computadora)
pg ²	Pulgadas cuadrados
PG2	Pulgadas cuadrados (en impresión de computadora)
pg ⁴	Pulgadas a la cuarta potencia
PG4	Pulgadas a la cuarta pot. (en impresión de computadora)
RAD	Radianes
T	Toneladas métricas
TON	Toneladas métricas



SIMBOLOGÍA

A	Arreglo real. Matriz de rigidez para los componentes de desplazamiento no restringidos de los nudos.
AFK	Arreglo Real. Acciones finales en los miembros.
AK	Arreglo real. Matriz de rigidez de los miembros en coordenadas locales del miembro.
AKT	Arreglo real. Matriz de rigidez de los miembros en coordenadas generales de la estructura.
CJ	Arreglo real. Torsión en nudo 'j' del miembro respecto al eje X.
CX	Variable real. Coseno director respecto a eje X.
CY	Variable real. Coseno director respecto a eje Y.
CZ	Variable real. Coseno director respecto a eje Z.
DK	Arreglo real. Torsión en nudo 'k' del miembro respecto al eje X.
DM	Arreglo real. Almacenamiento temporal de los desplazamientos de los extremos del miembro respecto a su eje.
EJ	Momentos en nudo 'j' del miembro respecto al eje Y.
FEM	Arreglo real. Almacenamiento temporal de las acciones en los extremos de los miembros respecto a los ejes del miembro.
FEMT	Arreglo real. Almacenamiento temporal de las acciones en los extremos de los miembros respecto a los ejes de la estructura.
FK	Arreglo real. Momento en nudo 'k' del miembro respecto al eje Y.
GJ	Arreglo real. Fuerza cortante en nudo 'j' del miembro respecto al eje Z.
HK	Arreglo real. Fuerza cortante en nudo 'k' del miembro respecto al eje Z.
IRX	Arreglo entero. No. de la coordenada X de desplazamiento del nudo (rotación).
IRY	Arreglo entero. No. de la coordenada Y de desplazamiento del nudo (rotación).
IRZ	Arreglo entero. No. de la coordenada Z de desplazamiento del nudo (rotación).
IXD	Arreglo entero. No. de la coordenada X de desplazamiento del nudo (traslación).
IYD	Arreglo entero. No. de la coordenada Y de desplazamiento del nudo (traslación).

IZD	Arreglo entero. No. de la coordenada Z de desplazamiento del nudo (traslación).
MX	Variable entera. Ancho de media banda de la matriz de rigidez.
NM	Variable entera. Número de posiciones de almacenamiento requeridas para la matriz de rigidez en formato de media banda.
NTEM	Variable entera. Número de posiciones de almacenamiento requeridas para la matriz de rigidez en formato de vector columna.
PJ	Arreglo real. Momento en nudo 'j' del miembro respecto al eje Z.
QK	Arreglo real. Momento en nudo 'k' del miembro respecto al eje
QL1	Arreglo real. Almacena longitud de los miembros.
RJ	Arreglo real. Fuerza cortante en nudo 'j' del miembro respecto al eje Y.
SK	Arreglo real. Fuerza cortante en nudo 'k' del miembro respecto al eje Y.
T	Arreglo real. Matriz de rotación.
TJ	Arreglo real. Fuerza axial en nudo 'j' del miembro respecto al eje X.
UK	Arreglo real. Fuerza axial en nudo 'k' del miembro respecto al eje X.
X	Arreglo real. Coordenadas de los nudos en el eje X.
Y	Arreglo real. Coordenadas de los nudos en el eje Y.
Z	Arreglo real. Coordenadas de los nudos en el eje Z.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Representación de indeterminación estática y cinemática de una viga	6
Figura 1.2	Representación de indeterminación estática y cinemática de una estructura plana	6
Figura 1.3	Representación de indeterminación estática y cinemática de una estructura tridimensional	7
Figura 1.4	Representación de una condición general de carga aplicada sobre una estructura plana	7
Figura 1.5	Representación de estructura plana reducida a una condición de equilibrio cinemático	9
Figura 1.6	Representación de reacciones y desplazamientos unitarios en una estructura plana	12
Figura 1.7	Selección de origen de sistema de referencia	13
Figura 1.8	Ejemplo de numeración de estructura	13
Figura 1.9	Vector asociado a un miembro en el espacio	19
Figura 1.10	Perfil estructural orientado en el espacio	19
Figura 1.11	Ejemplo de determinación de ángulo de rotación	23
Figura 1.12	Ejemplo de determinación de ángulo de rotación	23
Figura 1.13	Representación de vector fuerza en sistemas de referencia general y local de un miembro en el espacio	25
Figura 1.14	Sentidos asumidos positivos de vectores fuerza, traslación, rotación y momentos	25
Figura 1.15	Componentes de desplazamiento en los extremos de un miembro en el espacio	27
Figura 1.16	Componentes de las acciones en los extremos de un miembro en el espacio	27
Figura 2.1	Sistema IBM 4341 de Cesercomp	35
Figura 2.2	Pantalla de archivo accesado con XEDIT	37
Figura 2.3	Diagrama de flujo del programa ET100	46
Figura 3.1	Estructura tridimensional de ejemplo	52
Figura 3.2	Diagrama de flujo de la sección del programa que genera la matriz de rigidez	54
Figura 4.1	Representación de traslaciones unitarias de un	



	miembro en el espacio y sus respectivas reacciones	62
Figura 4.2	Respuesta en los extremos de un miembros en espacio bajo una condición general de desplazamiento	64
Figura 4.3	Representación de los desplazamientos de un miembro arbitrariamente orientado en el espacio	64
Figura 4.4	Diagrama de flujo de la sección del programa que prepara la matriz de rigidez de la estructura	77
Figura 5.1	Algoritmo de Cholesky para factorizar matrices	86
Figura 5.2	Diagrama de flujo de la sección del programa que factoriza la matriz de rigidez	87
Figura 6.1	Estructura tridimensional ejemplo para desarrollo de matriz de carga	91
Figura 6.2	Diagrama de flujo de la sección del programa que genera la matriz de carga en los nudos	98
Figura 7.1	Diagrama de flujo de la sección del programa que calcula las componentes de desplazamiento libres de los nudos	111
Figura 8.1	Acciones finales en extremos de un miembro "i"	116
Figura 8.2	Diagrama de flujo de la sección del programa que calcula las acciones finales en los extremos de los miembros y las reacciones en los apoyos	124
Figura 9.1	Selección de origen de sistema de referencia	131
Figura 9.2	Ejemplo de numeración de estructura	131
Figura 9.3	Vector asociado a un miembro en el espacio	132
Figura 9.4	Perfil estructural orientado en el espacio	132
Figura 9.5	Ejemplo de determinación de ángulo de rotación	135
Figura 9.6	Representación de vector fuerza en sistemas de referencia general y local de un miembro en el espacio	135
Figura 9.7	Archivo AD02 en blanco para el ingreso de datos generales de la estructura	141
Figura 9.8	Archivo AD03 en blanco para el ingreso de datos específicos del problema ejemplo	142
Figura 9.9	Estructura tridimensional tomada como ejemplo para explicar la aplicación del sistema	151
Figura 9.10	Archivo AD02 lleno con los datos generales del problema ejemplo	152
Figura 9.11	Vectores fuerza y momentos representados en el sentido asumiendo como positivo	156
Figura 9.12	Convención de signos para fuerzas y sus ángulos de incidencia sobre miembros en el espacio	156
Figura 9.13	Archivo AD03 con los datos completos previo al cálculo del problema ejemplo	159
Figura 9.14	Archivo AD03 con los resultados después del cálculo del problema ejemplo	165

Figura 9.15	Ejemplo de aplicación No.1: Armadura tridimensional	169
Figura 9.16	Ejemplo de aplicación No.2: Estructura tridimensional	169
Figura 9.17	Ejemplo de aplicación No.3: Armadura bidimensional	170
Figura 9.18	Ejemplo de aplicación No.4: Parrilla	170
Figura 9.19	Resultados del ejemplo de aplicación No.1	171
Figura 9.20	Resultados del ejemplo de aplicación No.2	173
Figura 9.21	Resultados del ejemplo de aplicación No.3	175
Figura 9.22	Resultados del ejemplo de aplicación No.4	177

INTRODUCCION

El diseño de una estructura implica el correcto dimensionamiento de sus miembros para que resistan los esfuerzos a los que estarán sometidos por efecto de las cargas externas aplicadas. Tanto los esfuerzos, como las consecuentes deformaciones que se producen en la estructura, deben estar dentro de los límites establecidos en las especificaciones técnicas aplicables al caso.

Para poder calcular los esfuerzos y las deformaciones mencionados, es necesario analizar la estructura en su conjunto a fin de determinar la magnitud de las fuerzas y momentos que actúan en los extremos de cada miembro, a la vez que los desplazamientos y rotaciones que se producen en sus nudos.

El análisis completo de una estructura tridimensional, en la que cada nudo presenta seis grados de libertad, lleva a plantear un sistema de ecuaciones con un elevado número de incógnitas. Por esta razón es muy útil usar computadoras digitales para efectuar tal análisis, ya que hacerlo mediante técnicas manuales resulta un proceso largo y engorroso.

El trabajo que aquí se presenta es un sistema para el análisis computarizado de estructuras tridimensionales, basado en el denominado "método de las

rigideces para análisis de estructuras indeterminadas". En el capítulo 1 se describe de una manera general los fundamentos de este método. El sistema de cómputo ha sido desarrollado para trabajar en el equipo IBM S/4341 de "Cesercomp", bajo el sistema operativo VM/SP CMS. En el capítulo 2 se explican las características del programa de cómputo desarrollado, en lo que se refiere a la manera como interactúa con los componentes del S/4341, a la organización de los programas que lo forman y a los archivos que maneja. Los dos primeros de los tres programas que conforman el sistema están relacionados con el ingreso de datos y se describen en ese mismo capítulo. El tercer programa del sistema es el que realiza el proceso de análisis propiamente dicho. Las diversas secciones de dicho programa son descritas en detalle en los capítulos 3 a 8. Todos estos programas han sido elaborados en lenguaje Basic.

Las instrucciones para utilizar el programa se dan en el capítulo 9. Las personas interesadas en pasar directamente a la aplicación del sistema, pueden leer este capítulo, que ha sido escrito para poder ser interpretado en forma independiente de los demás.

CAPÍTULO 1



1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. Planteamiento del Problema

Nuestro objetivo al analizar una estructura sometida a una condición de carga externa, será determinar las acciones (fuerzas y momentos) producidas en los extremos de cada uno de sus miembros, los desplazamientos (de traslación y rotación) que sufren sus nudos y, finalmente, las reacciones generadas en los apoyos.

Para realizar el análisis se requiere cierta información relacionada con la geometría de la estructura, las propiedades mecánicas de los miembros, la condición de los apoyos y las cargas externas aplicadas.

En el análisis se asumirá que los miembros son elásticos, que su centro de corte coincide con el centroide de la sección transversal y que ésta es constante en toda su longitud. Como consideramos estructuras con elementos elásticos, las acciones y los desplazamientos están relacionados linealmente según la ley de Hooke, es decir, no constituyen dos conjuntos independientes de incógnitas para el análisis. Por tanto, es necesario, definir a uno de ellos como aquel que representará a las incógnitas del problema; el otro conjunto podrá ser determinado luego a partir de éste.

1.2. Análisis de Estructuras Indeterminadas: Métodos y

Selección

Los casos más simples de análisis de estructuras son aquellos en los que al escoger a las acciones como incógnitas, hay un número suficiente de ecuaciones de equilibrio estático para calcularlas; tales estructuras se denominan **estáticamente determinadas**. Sin embargo, este no es el caso que presentan la mayoría de las estructuras, ya que por lo general, el número de incógnitas es mayor que el de ecuaciones de equilibrio, e.g. son estructuras **estáticamente indeterminadas**. Para el análisis de estas

estructuras se debe plantear un sistema de ecuaciones lineales independientes con un numero de ecuaciones equivalente al grado de indeterminación estática de la estructura. Dicho grado de indeterminación está dado por la cantidad de acciones desconocidas que exceden a aquellas que pueden ser determinadas de las ecuaciones de equilibrio estático. Los diversos procedimientos mediante los cuales se puede formular tal sistema de ecuaciones se los identifica genéricamente como **método de las flexibilidades**.

El procedimiento que se sigue al plantear el análisis tomando como incógnitas a los desplazamientos recibe el nombre de **método de las rigideces**. En este método también se formula un sistema de ecuaciones lineales independientes, pero el número de ecuaciones en este caso es equivalente al grado de indeterminación cinemática de la estructura. Una estructura es cinemáticamente determinada cuando los extremos de sus miembros están restringidos translacional y rotacionalmente. El numero de restricciones que hay que añadir a una estructura para hacerla cinemáticamente determinada define el grado de indeterminación cinemática de la misma.



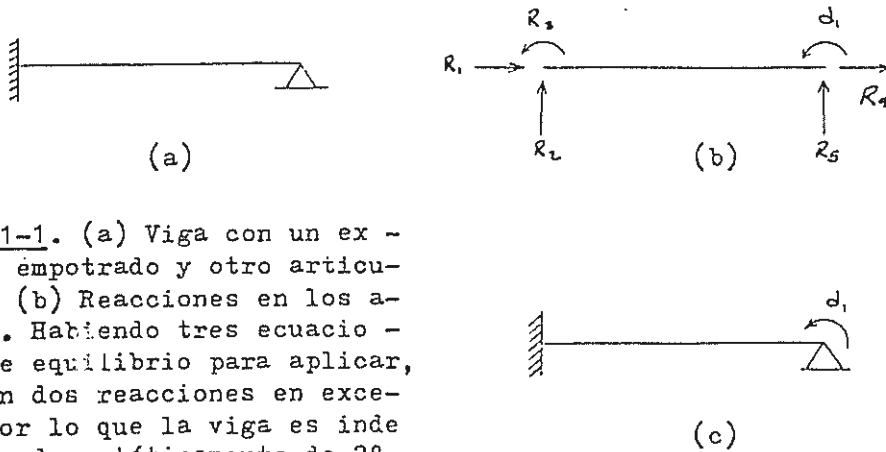


Fig. 1-1. (a) Viga con un extremo empotrado y otro articulado. (b) Reacciones en los apoyos. Habiendo tres ecuaciones de equilibrio para aplicar, quedan dos reacciones en exceso, por lo que la viga es indeterminada estáticamente de 2º grado. Hay una componente de rotación libre, por lo que es indeterminada cinemáticamente de 1er. grado (c).

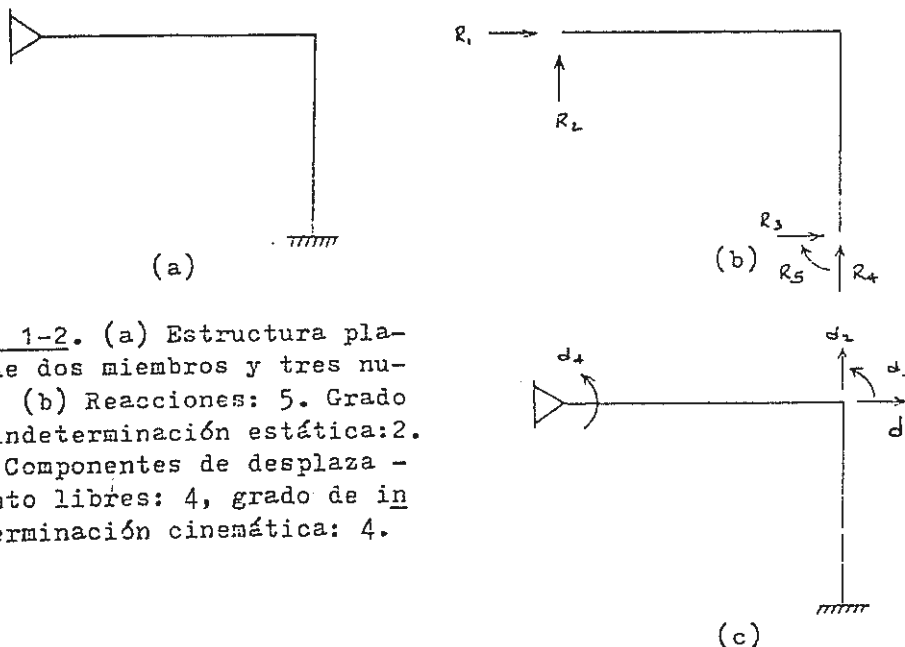
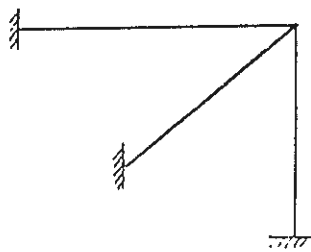
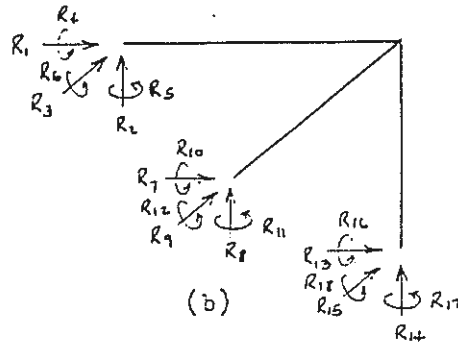


Fig. 1-2. (a) Estructura plana de dos miembros y tres nudos. (b) Reacciones: 5. Grado de indeterminación estática: 2. (c) Componentes de desplazamiento libres: 4, grado de indeterminación cinemática: 4.

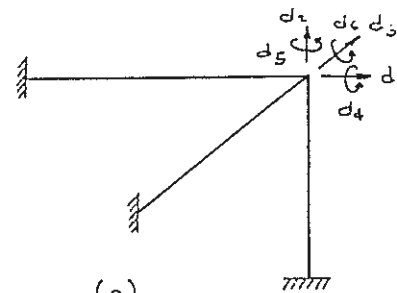


(a)



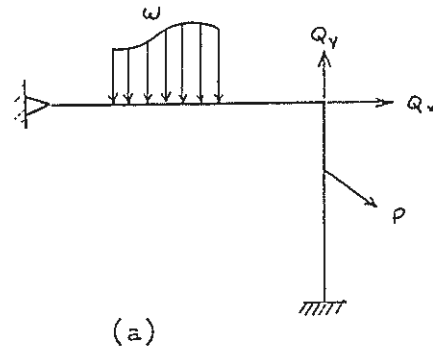
(b)

Fig. 1-3. (a) Estructura tridimensional. (b) Reacciones: 18, ecuaciones de equilibrio: 6, grado de indeterminación estática: 12. (c) Un nudo libre con 6 componentes de desplazamiento. Grado de indeterminación cinemática: 6.

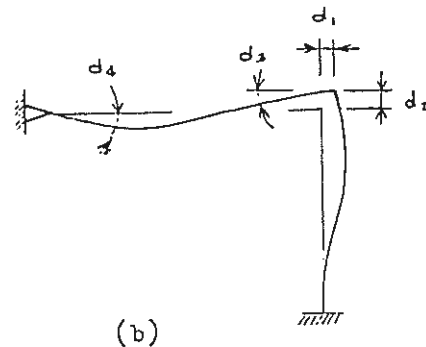


(c)

Fig. 1-4. (a) Estructura de la figura 1-2 sometida a una condición arbitraria de carga. (b) Deformaciones producidas (representadas de manera exagerada).



(a)

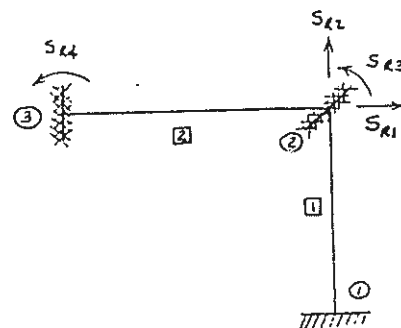


(b)

En las figuras 1-1 a 1-3 se presentan tres casos en que se indican los respectivos grados de indeterminación estática y cinemática. Como se puede observar, para un mismo caso los dos grados de indeterminación, esto es el numero de incógnitas, puede diferir según el método de análisis que se use.

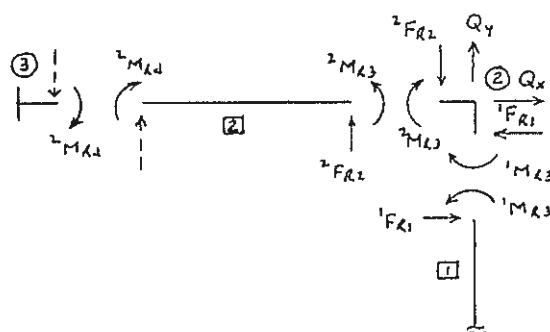
Al comparar los métodos indicados desde el punto de vista de su aplicación para elaborar un programa de cómputo para análisis de estructuras, es importante destacar el hecho de que el método de las rigideces presenta la ventaja de definir, en cualquier caso, un solo grupo de desplazamientos como incógnitas, puesto que hay solamente un conjunto de restricciones que hacen a una estructura cinemáticamente determinada. En el método de las flexibilidades, en cambio, existen varias alternativas para escoger al conjunto de incógnitas, ya que es arbitraria la selección de las acciones redundantes. Esta consideración lleva a escoger al método de las rigideces como el más adecuado para nuestro propósito ya que, al no requerir la intervención de quien utiliza el programa para el proceso de selección de las incógnitas del análisis, se reduce la interacción usuario-maquina, disminuyendo de esta forma la posibilidad de generar errores, así como tiempo de uso del equipo.

Fig. 1-5a. Estructura analizada, reducida a la condición de determinación cinemática mediante cuatro restricciones artificiales. S_{R1} y S_{R2} representan fuerzas, mientras que S_{R3} y S_{R4} momentos. El subíndice numérico de cada restricción guarda relación con el número del desplazamiento que restringe.



(1-5a)

Fig. 1-5b. Acciones en miembros y nudos actuando en la misma dirección de las restricciones artificiales.



(1-5b)

1.3. Planteamiento Matricial del Método de las Rigideces

La formulación del sistema de ecuaciones en términos de los desplazamientos desconocidos, que se plantea en el análisis según el método de las rigideces, se obtiene de la condición de equilibrio de los nudos de la estructura. A ésta se la restringe artificialmente para que hacerla cinemáticamente determinada. El procedimiento que se sigue se lo ilustrará con un caso específico, tomando como ejemplo la estructura bidimensional presentada en la figura 1-2. Este razonamiento se lo puede extender fácilmente a un caso en tres dimensiones.

En la figura 1-4 se tiene la estructura del ejemplo, sometida a una condición de carga arbitraria. La deformación producida (que se representa en forma exagerada), da lugar a cuatro posibles componentes de desplazamiento en concordancia con el grado de indeterminación cinemática de la estructura. Los desplazamientos -dos traslaciones y dos rotaciones-, se identifican por d_1 , d_2 , d_3 y d_4 .

Para hacer a la estructura cinemáticamente determinada, se deben aplicar cuatro restricciones, en forma de dos fuerzas y dos momentos, que eviten los desplazamientos indicados. Estas

restricciones, S_{R1} , S_{R2} , S_{R3} y S_{R4} , se representan en la figura 1-5a, donde los miembros de la estructura se encuentran totalmente restringidos translacional y rotacionalmente. Por las restricciones añadidas los extremos de los miembros están en una condición equivalente a la de empotramiento. Usando métodos de la Mecánica de Sólidos es posible determinar el valor de las reacciones en los empotramientos. Las reacciones de empotramiento que actúan en la misma dirección de las acciones de restricción señaladas son las fuerzas $^1F_{R1}$ y $^2F_{R2}$ en el nudo 2 (fig. 1-5b), los momentos $^1M_{R3}$ y $^2M_{R3}$ en ese mismo nudo, y el momento $^2M_{R4}$ en el nudo 3. Al establecer la condición de equilibrio de los nudos, debemos considerar que les son aplicadas cargas equivalentes a éstas, pero actuando en sentido contrario, como se muestra en la misma figura 1-5b para los nudos 2 y 3. De las condiciones de equilibrio del nudo 2 se tiene

$$S_{R1} = -Q_x + ^1F_{R1} \quad (1-1a)$$

$$S_{R2} = -Q_y + ^2F_{R2} \quad (1-1b)$$

$$S_{R3} = ^1M_{R3} + ^2M_{R3} \quad (1-1c)$$

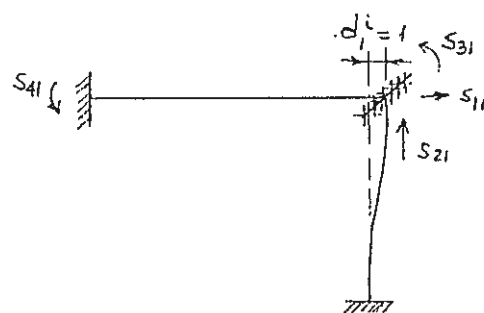


y de la condición de equilibrio de momentos en el nudo 3

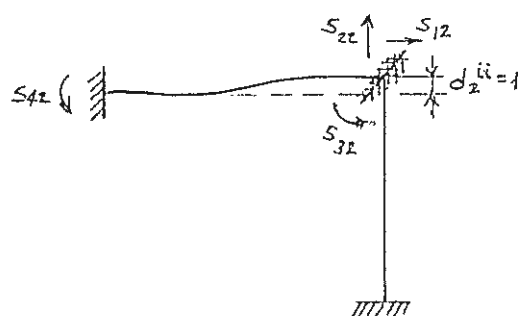
Fig. 1-6. Reacciones actuando en la misma dirección de las restricciones artificiales, resultantes de:

- (a) Desplazamiento unitario d_1^i
- (b) Desplazamiento unitario d_2^{ii}
- (c) Rotación unitaria d_3^{iii}
- (d) Rotación unitaria d_4^{iv}

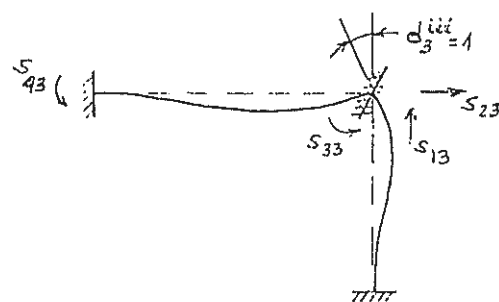
(Se omite la representación de las reacciones que tienen otras direcciones que las de los desplazamientos analizados).



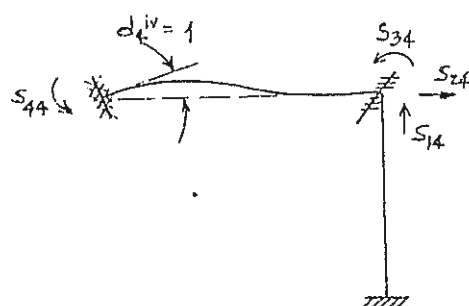
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1-7a.- El sistema de referencia elegido para esta estructura plana tiene como origen el nudo 4. De acuerdo a la numeración de los nudos, la máxima diferencia entre ellos se da en los miembros horizontales, siendo esa diferencia igual a 4.

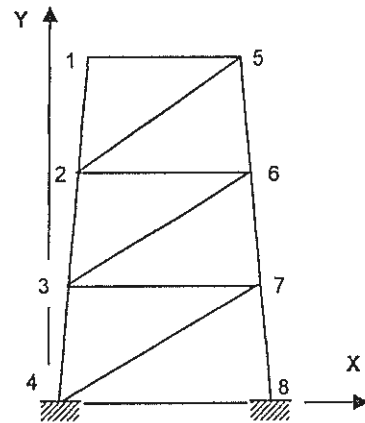


Fig. 1-7b.- Para la misma estructura, el sistema de referencia en este caso tiene origen en la mitad de la distancia entre los nudos 7 y 8. Por la nueva numeración de los nudos, la máxima diferencia numérica es 2. Esto optimiza el procesamiento de datos..

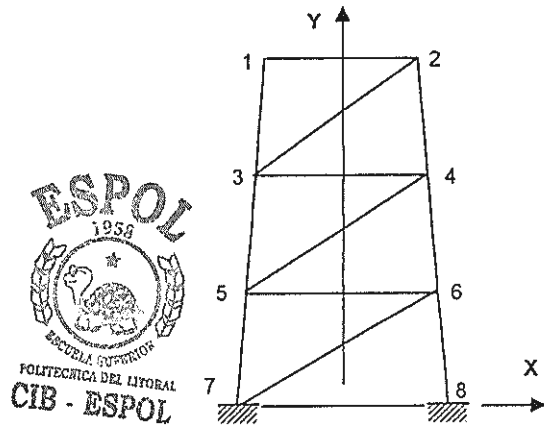
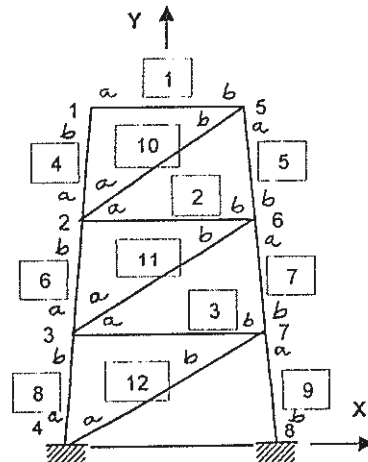


Fig. 1-8.- La estructura de la figura anterior con la numeración de los miembros y con los lados 'a' y 'b' asignados a cada uno de ellos.



$$S_{R4} = {}^2M_{R4}$$

(1-1d)



La determinación de S_{R1} , S_{R2} , S_{R3} y S_{R4} puede hacerse también mediante un análisis independiente del anterior. En este caso no se consideran aplicadas las cargas externas sobre la estructura; en vez de esto, se analiza la respuesta del sistema si, independientemente, cada uno de los cuatro desplazamientos d_1 , d_2 , d_3 y d_4 , toma un valor unitario mientras que los otros tres se mantienen restringidos. Se establecen las reacciones de empotramiento que actúan en las direcciones de S_{R1} , S_{R2} , S_{R3} y S_{R4} . De esta manera, al hacer $d_1^i=1$ con $d_2^i=d_3^i=d_4^i=0$; $d_2^{ii}=1$ con $d_1^{ii}=d_3^{ii}=d_4^{ii}=0$; $d_3^{iii}=1$ con $d_1^{iii}=d_2^{iii}=d_4^{iii}=0$; y, $d_4^{iv}=1$ con $d_1^{iv}=d_2^{iv}=d_3^{iv}=0$, las reacciones que respectivamente se generan son: S_{11} , S_{21} , S_{31} y S_{41} (fig. 1-6a); S_{12} , S_{22} , S_{32} y S_{42} (fig. 1-6b); S_{13} , S_{23} , S_{33} y S_{34} (fig. 1-6c); y, S_{14} , S_{24} , S_{34} y S_{44} (fig. 1-6d). En general estas reacciones pueden ser representadas por S_{ij} , donde 'i' corresponde al número de la restricción que actúa en la dirección de S_{ij} , y 'j' el numero del desplazamiento unitario que genera esa reacción. Los valores S_{ij} reciben el nombre de "coeficientes de rigidez" de la estructura.

Como asumimos que los miembros de la estructura son elásticos,

es posible aplicar el principio de superposición y, en base a los coeficientes de rigidez, determinar las reacciones en los extremos empotrados de los miembros para cualquier combinación de valores de las cuatro deflexiones analizadas. Si, por ejemplo, en lugar de que sea $d_1^i=1$, hacemos que $d_1^i=d_1$, entonces tendremos que S_{11} , S_{21} , S_{31} y S_{41} se harán d_1 veces mayores, es decir: $S_{11}d_1$, $S_{21}d_1$, $S_{31}d_1$ y $S_{41}d_1$. Al someter a la estructura a una deformación general $d_1^i=d_1$, $d_2^{ii}=d_2$, $d_3^{iii}=d_3$ y $d_4^{iv}=d_4$, los respectivos coeficientes de rigidez de la estructura se incrementaran en proporción a estos desplazamientos y las reacciones totales resultantes -denotadas por S_{R1}' , S_{R2}' , S_{R3}' y S_{R4}' -, serán:

$$S_{R1}' = S_{11}d_1 + S_{12}d_2 + S_{13}d_3 + S_{14}d_4 \quad (1-2a)$$

$$S_{R2}' = S_{21}d_1 + S_{22}d_2 + S_{23}d_3 + S_{24}d_4 \quad (1-2b)$$

$$S_{R3}' = S_{31}d_1 + S_{32}d_2 + S_{33}d_3 + S_{34}d_4 \quad (1-2c)$$

$$S_{R4}' = S_{41}d_1 + S_{42}d_2 + S_{43}d_3 + S_{44}d_4 \quad (1-2d)$$

El estado de deformación alcanzado por efecto de estas acciones es igual al producido por las cargas externas en la estructura no restringida. Para eliminar la deformación habría que aplicar acciones de la misma magnitud pero en sentido contrario, con lo que llegaríamos la estructura cinemáticamente determinada

analizada anteriormente. De aquí podemos concluir que $-S_{R1}'$, $-S_{R2}'$, $-S_{R3}'$ y $-S_{R4}'$ son equivalentes a S_{R1} , S_{R2} , S_{R3} y S_{R4} , por lo que pueden escribirse las siguientes expresiones

$$S_{11}d_1 + S_{12}d_2 + S_{13}d_3 + S_{14}d_4 = Q_x -^1F_{R1} \quad (1-3a)$$

$$S_{21}d_1 + S_{22}d_2 + S_{23}d_3 + S_{24}d_4 = Q_y -^2F_{R2} \quad (1-3b)$$

$$S_{31}d_1 + S_{32}d_2 + S_{33}d_3 + S_{34}d_4 = -^1M_{R3} -^2M_{R3} \quad (1-3c)$$

$$S_{41}d_1 + S_{42}d_2 + S_{43}d_3 + S_{44}d_4 = -^2M_{R4} \quad (1-3d)$$

De acuerdo al Algebra Matricial las expresiones 1-3 pueden expresarse en la forma

$$[S] [D] = [C_n] \quad (1-4)$$

donde:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix}$$



(1-5)

y

$$[D] = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

$$[C_n] = \begin{bmatrix} Q_x & -^1F_{R1} \\ Q_y & -^2F_{R2} \\ -^1M_{R3} & -^2M_{R3} \\ -^2M_{R4} \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

La matriz $[S]$ se denomina matriz de rigidez de la estructura, $[D]$ matriz de los desplazamientos libres y $[C_n]$ matriz de carga en los nudos para los desplazamientos no restringidos.

Los coeficientes de la matriz de rigidez de la estructura pueden ser calculados utilizando métodos de la Mecánica de Sólidos, por tanto, las únicas incógnitas en la expresión 1-4 son los desplazamientos, los mismos que pueden ser determinados de la expresión

$$[D] = [S]^{-1} [C_n] \quad (1-8)$$

donde $[S]^{-1}$ representa la inversa de la matriz de rigidez $[S]$ de la

estructura.

1.4. Matrices de Rotación y Transformación de Miembros en el Espacio

Es posible determinar la orientación de un miembro en el espacio, basándose en los cosenos directores asociados a un vector definido a partir de uno de sus extremos ('a') y dirigido hacia otro ('b') como se aprecia en la figura. 1-9). Si X_a, Y_a, Z_a y X_b, Y_b, Z_b son las coordenadas de los extremos 'a' y 'b' del miembro, respectivamente, entonces dichos cosenos directores son

$$C_X = \frac{X_b - X_a}{L_m} \quad (1-9a)$$

$$C_Y = \frac{Y_b - Y_a}{L_m} \quad (1-9b)$$

$$C_Z = \frac{Z_b - Z_a}{L_m} \quad (1-9c)$$

siendo

Fig. 1-9. Vector asociado a un miembro en el espacio.

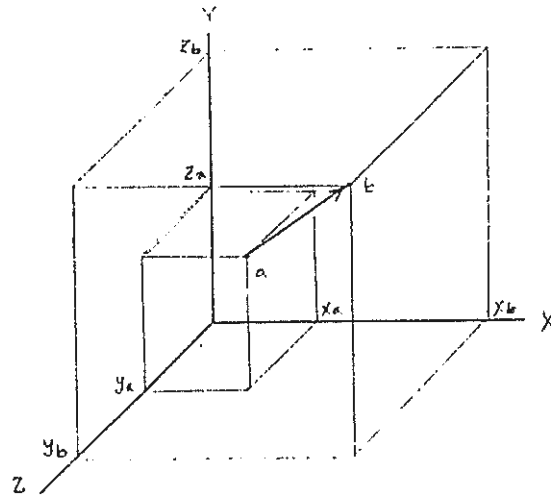
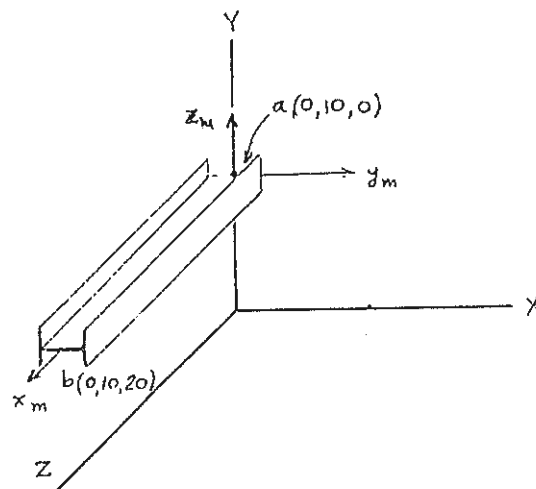
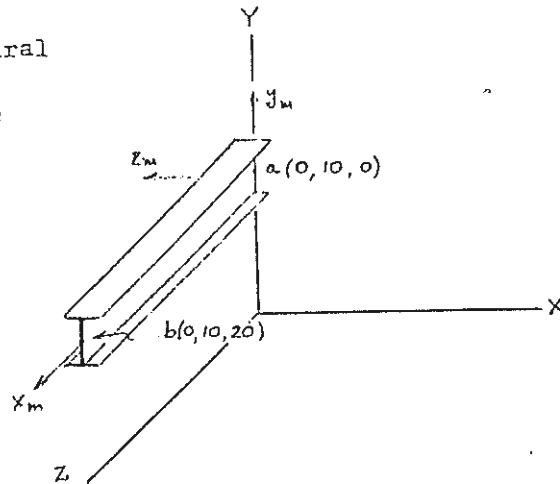


Fig 1-10. Perfil estructural orientado en el espacio con el plano principal de carga paralelo al plano Y-Z (a).

(b) El mismo perfil estructural, pero con el plano principal de carga paralelo al plano X-Z.



$$L_m = \sqrt{(X_b - X_a)^2 + (Y_b - Y_a)^2 + (Z_b - Z_a)^2} \quad (1-10)$$



la longitud del miembro.

De la inspección de la figura 1-10 se deduce que es necesaria información adicional para definir completamente la disposición de un miembro en el espacio. En las figuras 1-10a y 1-10b se muestra un mismo perfil estructural notándose que, aunque en ambos casos las coordenadas de sus extremos -e.g. sus cosenos directores- son iguales, la disposición del miembro en el espacio no es la misma. Para completar la información hay que especificar la posición relativa del sistema de referencia general X-Y-Z con respecto a un sistema de referencia $x_m-y_m-z_m$ asociado al miembro. Este sistema se define de manera que su origen coincida con el origen del miembro, estando su eje neutro dispuesto a lo largo del eje x_m , con su plano principal de carga coincidiendo con el plano x_m-y_m . De esta manera, la información que define al miembro en el espacio se complementa mediante un ángulo "I", denominado '**Angulo de Rotación**', el cual que se determina trasladando primeramente el sistema de referencia general X-Y-Z hasta hacer coincidir su origen con el del sistema de referencia particular $x_m-y_m-z_m$, procediendo luego a hacer rotar el



sistema de referencia trasladado $X'-Y'-Z'$ primero alrededor de su eje Y' y luego de eje Z' , o viceversa, haciendo que coincidan en dirección y sentido los ejes X de ambos sistemas. En el caso que estamos analizando, una rotación alrededor del eje Y' es suficiente para hacer coincidir los ejes X' y x_m . Las figuras 1-11 y 1-12 muestran las traslaciones y rotaciones para los casos de las figuras 1-10a y 1-10b respectivamente. Se define a " I " como el Angulo entre los ejes Y' y y_m o Z' y z_m , medido en sentido contrario a las manecillas del reloj, cuando se observa al miembro desde su lado 'b' hacia su lado 'a'. En las figuras indicadas se observa que para el primer caso $I = 0^\circ$ (tanto Y' y y_m como Z' y z_m coinciden), mientras que para el segundo caso $I = 270^\circ$.

Esta definición de I es de aplicación general, aunque el procedimiento seguido en la rotación de ejes no siempre se pueda realizar en forma tan simple. En el capítulo 9 sección 9-10 se presentan otros casos ilustrativos.

El orden seguido en la rotación de ejes tiene especial importancia al determinar I . Cuando la rotación se la inicia alrededor del eje Y' se dice que se efectúa una transformación $Y-Z-X$, añadiéndose a I el subíndice " Y ". Para una rotación de ejes que se inicia

alrededor del eje Z' , el Angulo de rotación se especifica como I_z y la transformación realizada se la denomina Z-Y-X; normalmente, I_y e I_z no son iguales. Al realizar la transformación es irrelevante el valor de los ángulos rotados alrededor de los ejes Y' o Z' , así como tampoco interesa si después de la primera rotación, al coincidir los ejes X' y x_m , es innecesaria una ulterior rotación alrededor del otro eje.

Conociendo los cosenos directores y el ángulo de rotación de un miembro, es posible formular un conjunto de expresiones que permitan pasar un vector, en términos de sus componentes, de un sistema de referencia a otro. Tal es el caso del ejemplo que se presenta en la figura 1-13, donde una fuerza F actúa en el extremo de un miembro arbitrariamente orientado en el espacio. En la figura 1-13a la fuerza está dada en términos de sus componentes en el sistema de referencia general X-Y-Z. Si se quiere saber cuál es la fuerza axial y las fuerzas cortantes actuando en ese extremo del miembro, es necesario conocer las componentes de la fuerza en su sistema de referencia particular $x_m-y_m-z_m$. Se puede demostrar que, en función de los cosenos directores y el Angulo I_y del miembro, dichas componentes están dadas por las expresiones

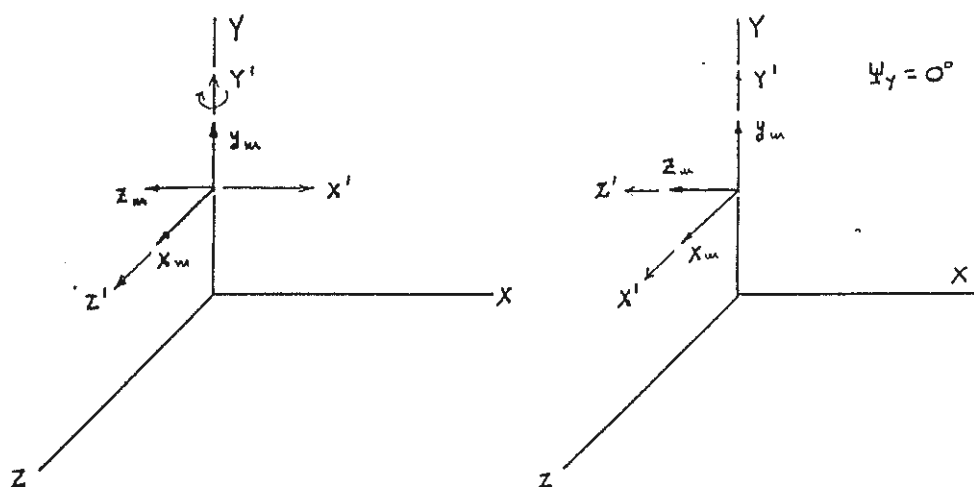


Fig. 1-11. Traslación del sistema de referencia general $X-Y-Z$ hasta hacer coincidir su origen con el sistema de referencia particular del miembro de la figura 1-10a. (b) Rotación del sistema trasladado $X'-Y'-Z'$, haciendo coincidir los ejes X' y x_m . El ángulo $\Psi_Y = 0^\circ$ ya que Y' y y_m tienen la misma dirección y sentido (de la misma manera que Z' y z_m).

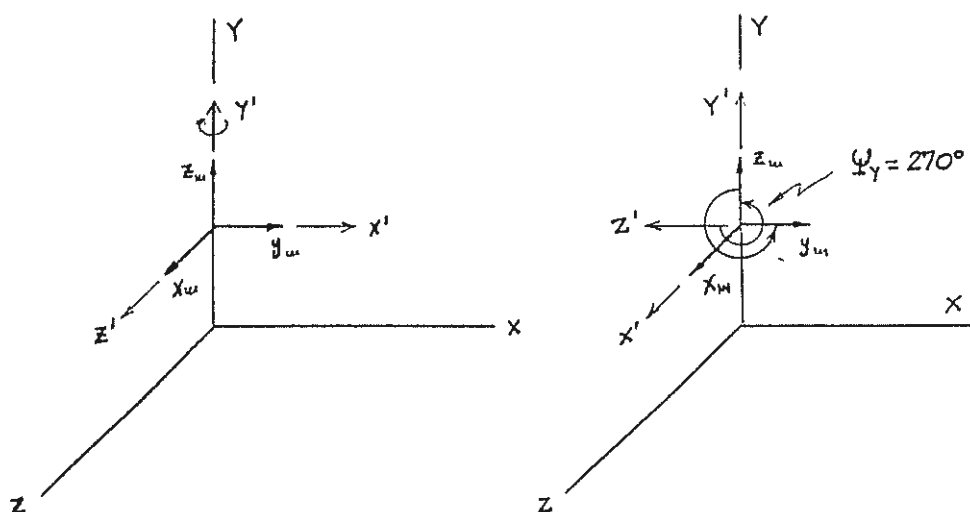


Fig. 1-12. (a) Traslación del sistema de referencia general $X-Y-Z$ haciendo coincidir su origen con el del sistema de referencia particular del miembro de la figura 1-10b. (b) Rotación del sistema trasladado, haciendo coincidir los ejes X' y x_m . Por inspección $\Psi_Y = 270^\circ$.

$$F_x = C_X F_X + C_Y F_Y + C_Z F_Z \quad (1-11a)$$

$$F_y = \frac{(-C_X C_Y \cos \gamma - C_Z \cos \gamma) F_X}{\sqrt{C_X^2 + C_Z^2}} + (\sqrt{C_X^2 + C_Z^2}) \cos \gamma F_Y + \frac{(-C_X C_Z \cos \gamma + C_Z \sin \gamma) F_Z}{\sqrt{C_X^2 + C_Z^2}} \quad (1-11b)$$

$$F_z = \frac{(C_X C_Y \sin \gamma - C_Z \cos \gamma) F_X}{\sqrt{C_X^2 + C_Z^2}} - (\sqrt{C_X^2 + C_Z^2}) \sin \gamma F_Y + \frac{(C_X C_Z \sin \gamma + C_Z \cos \gamma) F_Z}{\sqrt{C_X^2 + C_Z^2}} \quad (1-11c)$$

Representando por $[F]$ y $[\mathbf{F}]$ las matrices columna formadas por las componentes de la fuerza F y $\mathbf{F}$ en las coordenadas local y general respectivamente, las expresiones anteriores se pueden expresar matricialmente en la forma

$$[F] = [C_Y] [\mathbf{F}] \quad (1-12)$$

donde

$$[C_Y] = \quad (1-13)$$

$$\begin{vmatrix} C_X & C_Y & C_Z \\ \frac{(-C_X C_Y \cos \gamma - C_Z \cos \gamma)}{\sqrt{C_X^2 + C_Z^2}} & (\sqrt{C_X^2 + C_Z^2}) \cos \gamma & \frac{(-C_X C_Z \cos \gamma + C_Z \sin \gamma)}{\sqrt{C_X^2 + C_Z^2}} \\ \frac{(C_X C_Y \sin \gamma - C_Z \cos \gamma)}{\sqrt{C_X^2 + C_Z^2}} & -(\sqrt{C_X^2 + C_Z^2}) \sin \gamma & \frac{(C_X C_Z \sin \gamma + C_Z \cos \gamma)}{\sqrt{C_X^2 + C_Z^2}} \end{vmatrix}$$

Fig. 1-13. (a) Fuerza en el extremo de un elemento estructural, descompuesta en el sistema de referencia general X-Y-Z. (b) La misma fuerza descompuesta en el sistema de referencia particular x_m - y_m - z_m del miembro.

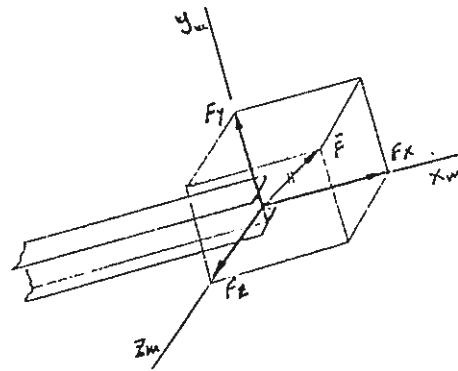
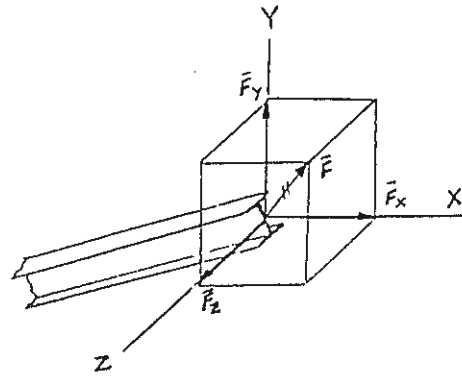
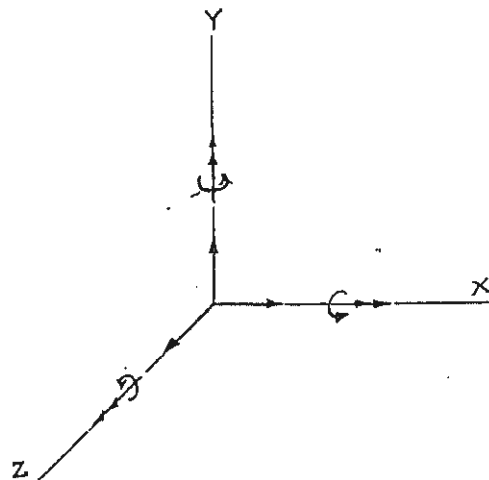


Fig. 1-14. Vectores fuerza/traslación y momento/rotación, representados en los sentidos asumidos positivos en un sistema de referencia ortogonal tridimensional X-Y-Z.



$[C_Y]$ recibe el nombre de **matriz de rotación del miembro** para una transformación Y-Z-X.

El proceso inverso, es decir la determinación de las componentes de la fuerza en el sistema de referencia general, a partir de las componentes en el sistema de referencia particular, puede deducirse de la expresión 1-12, esto es

$$[F] = [C_Y]^{-1} [F]$$



(1-14)

La matriz $[C_Y]$ tiene la propiedad de ser ortogonal, por lo que su inversa es igual a su transpuesta, es decir

$$[C_Y]^{-1} = [C_Y]^T \quad (1-15)$$

Usando esta expresión se puede describir la 1-14 en la forma

$$[F] = [C_Y]^T [F] \quad (1-16)$$

Un procedimiento de transformación similar se seguiría si el ángulo dado fuera I_Z , pero en este caso la matriz de rotación sería:

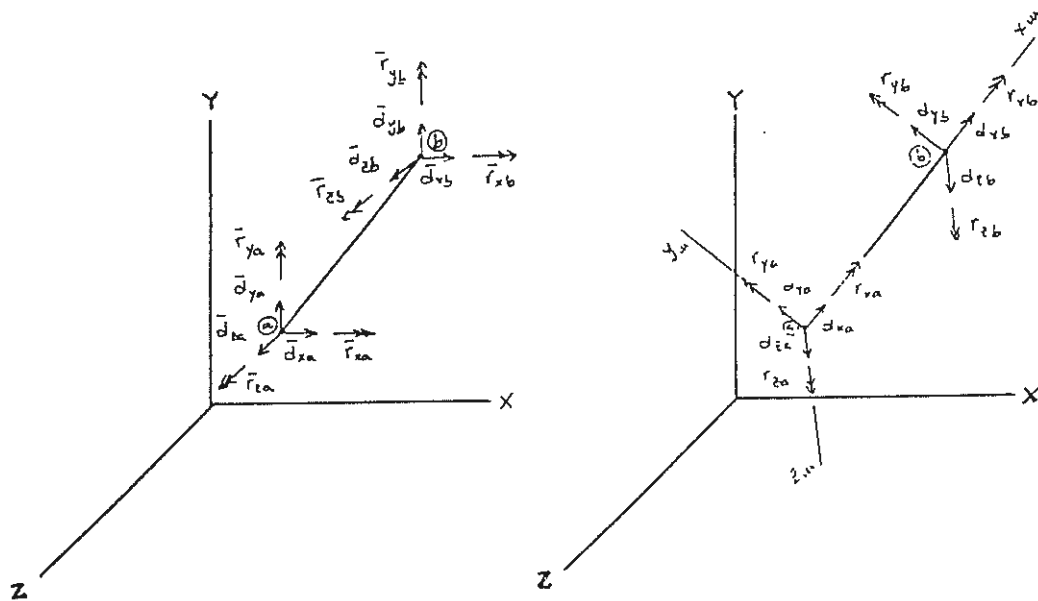


Fig. 1-15. Componentes de desplazamiento de los extremos de un miembro en: (a) sistema de coordenadas general X-Y-Z, y (b) sistema de coordenadas particular del miembro x_m - y_m - z_m .

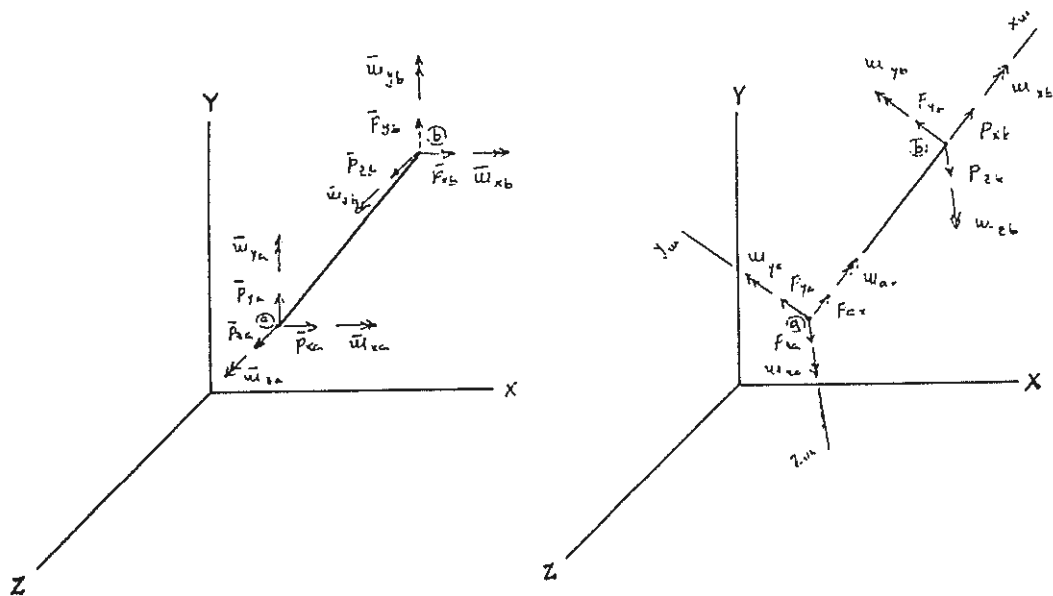


Fig. 1-16. Componentes de las acciones en los extremos de un miembro: (a) en el sistema de coordenadas general X-Y-Z y (b) en el sistema de coordenadas particular del miembro x_m - y_m - z_m .

$$[C_z] =$$

$$\begin{vmatrix} C_x & C_y & C_z \\ \frac{(-C_x C_z \text{sen} l_z - C_y \text{cos} l_z)}{\sqrt{C_x^2 + C_y^2}} & \frac{(-C_y C_z \text{sen} l_z + C_z \text{cos} l_y)}{\sqrt{C_x^2 + C_y^2}} & (\sqrt{C_x^2 + C_y^2}) \text{sen} l_y \\ \frac{(C_x C_z \text{cos} l_y - C_y \text{sen} l_y)}{\sqrt{C_x^2 + C_y^2}} & \frac{(-C_y C_z \text{cos} l_z + C_x \text{sen} l_y)}{\sqrt{C_x^2 + C_y^2}} & (\sqrt{C_x^2 + C_y^2}) \text{cos} l_z \end{vmatrix}$$

(1-17)

que se denomina matriz de rotación para una transformación Z-Y-X. Las matrices $[C_y]$ y $[C_z]$ se pueden aplicar en forma general para transformar cualquier tipo de vector -incluyendo acciones y desplazamientos-, de un sistema de coordenadas a otro.

Para efectos de representar vectorialmente todas las acciones y desplazamientos, a los momentos y rotaciones se les atribuye un carácter vectorial, siguiendo la regla de la mano derecha. En la figura 1-14 se representan los sentidos asumidos positivos para los vectores traslación/fuerza y rotación/momento (flechas con doble saeta), en un sistema de coordenadas tridimensional X-Y-Z.

Hay que considerar tres componentes de traslación y tres de rotación a cada extremo del miembro, al generalizar la anterior

transformación para involucrar, en una sola operación, a las doce posibles componentes de desplazamiento de los extremos de un miembro en el espacio. En las figuras 1-15a y 1-15b se muestran dichas componentes en el marco de los sistemas de coordenadas general y local respectivamente.

Las componentes de desplazamiento, en los sistemas de referencia general y particular de un miembro cualquiera 'i', se representan en forma de matrices columna de la siguiente manera

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{xa} \\ d_{ya} \\ d_{za} \\ r_{xa} \\ r_{ya} \\ r_{za} \\ d_{xb} \\ d_{yb} \\ d_{zb} \\ r_{xb} \\ r_{yb} \\ r_{zb} \end{bmatrix} \quad (1-18a)$$



$$[D] = \begin{bmatrix} d_{xa} \\ d_{ya} \\ d_{za} \\ r_{xa} \\ r_{ya} \\ r_{za} \\ d_{xb} \\ d_{yb} \\ d_{zb} \\ r_{xb} \\ r_{yb} \\ r_{zb} \end{bmatrix} \quad (1-18b)$$

La transformación de todas las componentes de desplazamiento de un sistema a otro puede hacerse por una operación matricial similar a las de las componentes de un solo vector, usando una matriz desarrollada en base a los coeficientes de la matriz de rotación $[C_Y]$ o $[C_Z]$. Dicha matriz tiene la forma

$$[T]_i = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (1-19)$$

En esta expresión, los elementos de la submatriz

$$[C]_i = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (1-20)$$

representan a los del las matrices $[C_Y]$ o $[C_Z]$ dependiendo de si la transformación usada para definir al miembro en el espacio fue del tipo Y-Z-X o Z-Y-X, en su orden.

La matriz $[T]_i$ recibe el nombre de matriz de transformación del miembro 'i', y opera en la forma

$$[D]_i = [T]_i [D]_i \quad (1-21)$$

Se puede demostrar que $[T]$ es una matriz ortogonal, por lo cual también se cumple que

$$[D]_i = [T]_i^T [D]_i \quad (1-22)$$

Relaciones similares pueden establecerse entre las componente de las acciones en los extremos de los miembros, dadas en los sistemas de referencia general y local. En las figuras 1-16a y 1-16b se muestran ambos conjuntos de componentes. Las matrices

(siguiente página)

$$[m] = \begin{bmatrix} p_{xa} \\ p_{ya} \\ p_{za} \\ m_{xa} \\ m_{ya} \\ m_{za} \\ p_{xb} \\ p_{yb} \\ p_{zb} \\ m_{xb} \\ m_{yb} \\ m_{zb} \end{bmatrix} \quad (1-23a)$$

$$[m] = \begin{bmatrix} p_{xa} \\ p_{ya} \\ p_{za} \\ m_{xa} \\ m_{ya} \\ m_{za} \\ p_{xb} \\ p_{yb} \\ p_{zb} \\ m_{xb} \\ m_{yb} \\ m_{zb} \end{bmatrix} \quad (1-23b)$$

están relacionadas según las expresiones

$$[m]_i = [T]_i [m]_i \quad (1-24)$$

y

$$[m]_i = [T]^T_i [m]_i \quad (1-25)$$

CAPÍTULO 2



2. DESARROLLO DEL SISTEMA

2.1. Descripción del Equipo

El conjunto de programas elaborado con el propósito de analizar estructuras tridimensionales ha sido diseñado en el sistema IBM 4341 del "Centro de Servicios Computacionales (CESERCOMP)" de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. La configuración de este sistema esta representada en la figura 2-1.

La comunicación del usuario con el sistema se establece mediante cualquiera de los 32 terminales TELEX 2782 que se conectan a la Unidad Central de Proceso IBM 4341 a través de la Unidad de Control de Terminales IBM 3782. En la unidad de disco fijo IBM 3370 identificada por 'VMPK02', se asigna a cada usuario un área

de memoria para que almacene los archivos de programas y de datos por él creados. El usuario recibe además, una copia del área común de la misma unidad de disco, la cual contiene el conjunto de comandos, lenguajes, utilitarios etc., que conforman el sistema operativo del equipo. La unidad de control de almacenamiento IBM 3380 coordina la interacción con los dispositivos de memoria de todos los usuarios que comparten el uso del equipo.

Los archivos de los que se requiera una transcripción escrita pueden ser listados mediante la impresora IBM 3302. Los comandos de impresión no actúan directamente del terminal a la impresora, sino que, una vez enviados, la ejecución de la impresión es ordenada por el operador del sistema a través de la consola VM/SP.

Los dispositivos periféricos que constan en la figura 2-1 y que no han sido mencionados, no se relacionan directamente con el sistema de programas desarrollado en esta tesis. Información detallada sobre la configuración del equipo puede ser obtenida en los respectivos manuales en la biblioteca de Cesercomp. En la bibliografía se indican los manuales que pueden consultar los usuarios.

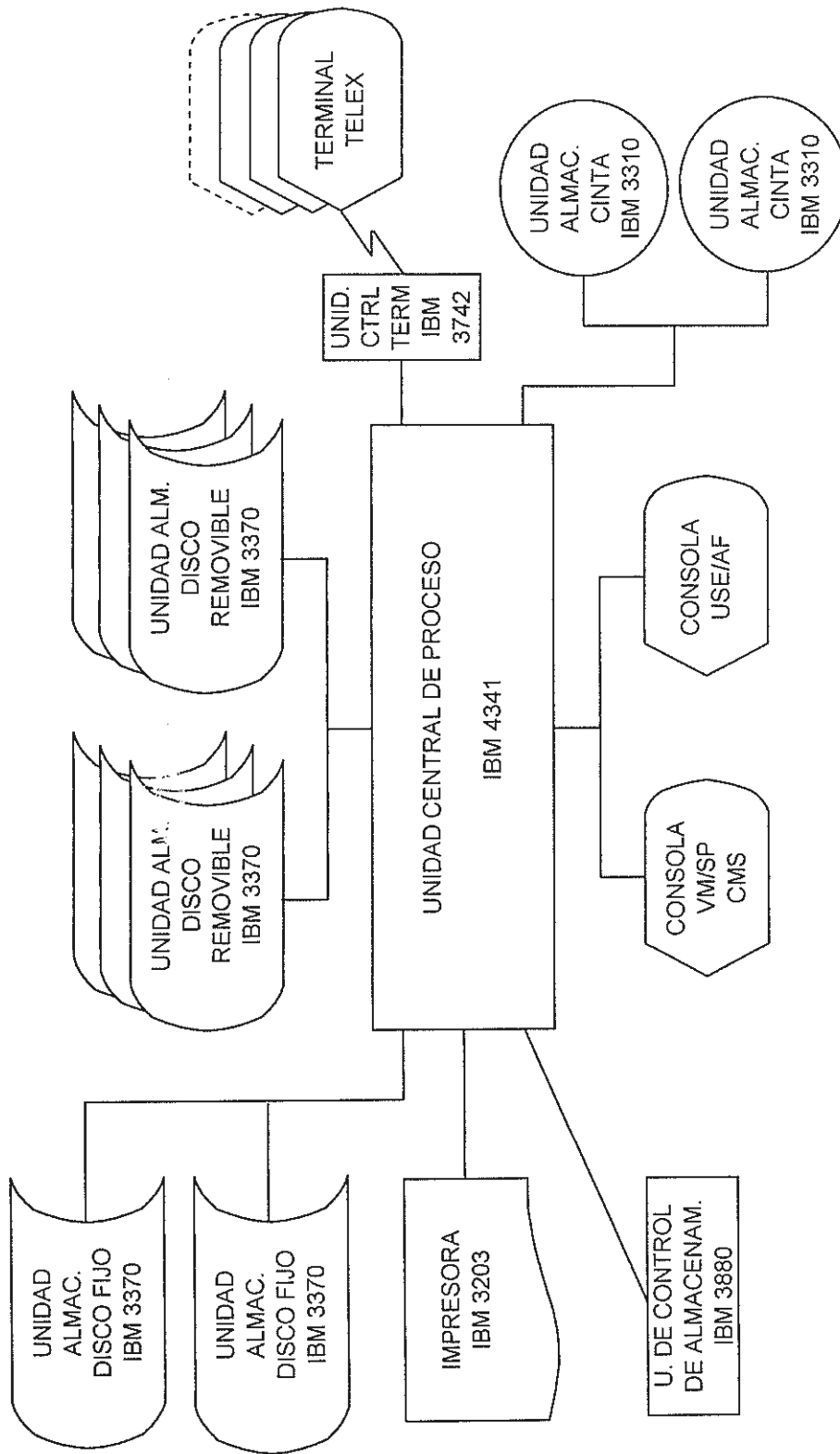


Fig. 2-1.- Sistema IBM 4341 del Centro de Servicios Computacionales CESERCOMP-ESPOL

2.2. Sistema Operativo

El sistema operativo usado, el VM/SP CMS, permite que el usuario interactúe con el computador simultáneamente, sin interferencias, con otros usuarios. En estas condiciones, se dice que el usuario trabaja en una 'maquina virtual' que actúa en forma análoga a la de un computador real independiente.

Si el usuario sigue las instrucciones para aplicar el programa que se dan en el capítulo 9, no necesita estar ampliamente familiarizado con el VM/SP CMS para efectuar el análisis de una estructura. Sin embargo es conveniente un conocimiento básico del sistema en el caso de que durante la ejecución ocurra alguna situación no prevista en las instrucciones, debido por ejemplo a una tecla presionada por error.

Amplia información sobre el sistema operativo se puede encontrar en la referencia 6 de la bibliografía. A continuación se describen los conceptos básicos, las características y facilidades del VM/SP CMS, en lo que tiene que ver con el sistema desarrollado.

2.2.1. Lenguaje EXEC 2

Este lenguaje es una de las facilidades incluidas en el

```

AD02  FILE  A1  V 80  TRUNC=80  SIZE=40  LINE=1  COLUMN=1

==>
0...+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7...
00001
00002                                ANALISIS DE ESTRUCTURAS
00003
00004  =====
00005  PROYECTO   :
00006  DESCRIPCION :
00007  FECHA      :
00008  POR        :
00009  =====
00010
00011                                DATOS GENERALES
00012
00013
00014
00015

```

Fig. 2-2. Forma como aparece en pantalla un archivo al ser accesado con editor XEDIT.

sistema operativo que permite definir una rutina de comandos, almacenarlos en un archivo y recurrir a ella para que los mismos se ejecuten en la forma programada.

Información específica sobre este lenguaje se encuentra en el manual IBM VM/SP: EXEC 2 Reference (ver bibliografía).

2.2.2. Archivos

El usuario puede tener tantos archivos de datos, de programas, etc., como quepan en la porción de memoria a él asignada. Estos archivos se identifican por tres parámetros:

NOMBRE [TIPO] [MODO]



El nombre puede ser de hasta 8 caracteres alfanuméricos, sin blancos, no pudiendo comenzar con ceros o asteriscos. El tipo y el modo, si no son especificados al crear el archivo, reciben denominación del sistema. El primero se forma también por hasta 8 caracteres y en algunos casos su especificación se la reserva el sistema para indicar un tipo especial de archivo (fortran, exec, etc.). El modo guarda

relación con las características internas de almacenamiento.

La información contenida en los archivos se almacena en registros (líneas) cuya longitud depende del tipo de archivo definido. El número de registros es limitado solamente por la cantidad de memoria disponible.

2.2.3. Editor de Archivos

El acceso a los archivos, para ingresar o modificar datos, se realiza a través del editor, que es un estado al que el sistema operativo permite llegar usando el comando XEDIT seguido del nombre del archivo que se quiere modificar. El editor muestra el contenido del archivo en la pantalla del terminal como se indica en la figura 2-2. Cada registro del archivo está identificado por un número de 5 dígitos a la izquierda. Como todos los registros no pueden presentarse en la pantalla al mismo tiempo, mediante comandos específicos se puede avanzar o retroceder la pantalla hacia otros registros del archivo. También hay comandos que permiten desplazar la pantalla a la derecha o a la izquierda, para revisar registros cuyo ancho excede los 73 caracteres que pueden visualizarse en la pantalla. La

amplia gama de comandos para manipular archivos se detalla en la referencia 7.

2.3. Lenguaje de Programación

El lenguaje usado para elaborar los programas de cálculo, es la versión de Basic denominada 'Watcom Basic', desarrollada por la Waterloo Computing Systems Limited de Ontario, Canadá, que trabaja bajo el sistema VM/SP CMS.

Al seleccionar este lenguaje, se ha considerado que combina la simplicidad propia del Basic -que lo hace accesible para futuras mejoras y/o ampliaciones-, con muy útiles extensiones respecto al Basic estándar, como son el control estructurado, procedimientos con parámetros invocados por instrucciones CALL, capacidad de acceso secuencial y relativo a los registros de los archivos de datos, entrada/salida de datos formateadas de los archivos y, particularmente, instrucciones especiales para operaciones matriciales que permiten manejar las muchas matrices que típicamente se presentan en el análisis de estructuras.

Información completa sobre este lenguaje y sus aplicaciones

puede ser encontrada en las siguientes publicaciones: Watcom Basic User's Guide, Watcom Basic Primer y Watcom Basic Reference Manual.

2.4. Organización y Componentes del Sistema

El sistema esta compuesto por cuatro programas y tres archivos para entrada/salida de datos. En los programas se incluye una rutina de ejecución en EXEC 2 denominada ET (siglas de Estructuras Tridimensionales). Los tres programas restantes están escritos en WBASIC y se denominan ET100, ET200 y ET300 respectivamente según el orden de ejecución. Los archivos de datos reciben los nombres AD02, AD03 y AD04. A continuación se explica la función de cada uno de los componentes del sistema.

2.4.1. Programa ET

EL conjunto de programas y archivos que forman el sistema son manejados por el programa ET. Este programa está escrito en lenguaje EXEC 2 y es el primero que se ejecuta. A continuación se transcribe el listado del mismo y en los párrafos subsiguientes se explica su operación



```
&TRACE OFF
CLRSRN
WBAS ET100 (RUN
XEDIT AD02 FILE
WBAS ET200 (RUN
XEDIT AD03 FILE
WBAS ET300 (RUN
&XEDIT AD03 FILE
&EXIT
```

La primera palabra del programa, &TRACE, es necesaria al iniciar cualquier rutina en EXEC 2 y, junto con la palabra OFF, determina que las instrucciones y comandos ejecutados no se impriman en pantalla; además, cualquier impresión previa en pantalla se borra con el comando CLRSRN.

2.4.2. Programa ET100 y Archivo AD02

La siguiente línea del Exec invoca al lenguaje Wbasic, carga el programa ET100 y lo ejecuta. Este programa crea el archivo AD02 que es una tabla para ingresar los datos generales de la estructura. El listado del programa se presenta en el apéndice A2 y el diagrama de flujo en la figura 2-3 al final del capítulo. El ingreso de datos se hace por pantalla editando el archivo AD02 mediante la instrucción XEDIT.



2.4.3. Programa ET200 y Archivo AD03

Similarmente al procedimiento anterior, el programa ET200 es ejecutado después de invocar el Wbasic. Este programa crea el archivo AD03 que es una tabla para el ingreso de los datos completos de los nudos y miembros de la estructura junto con las condiciones de carga a analizar. Dentro de esta tabla quedan reservados los registros para recibir los resultados del análisis. El listado del programa se presenta en el apéndice A3 y el diagrama de flujo en la figura 2-4.

El archivo AD03 es creado de tal manera que cada grupo de archivos para datos o resultados va precedido de registros de comentarios que hacen claro el ingreso de datos y la interpretación de los resultados. Los datos se ingresan por pantalla invocando el editor (XEDIT).

2.4.4. Programa ET300

El programa ET300 es el que efectúa el análisis de la estructura propiamente dicho. Para el efecto, al ser ejecutado mediante la correspondiente instrucción, el programa toma los valores de los datos que constan en los archivos AD02 y AD03, realiza las diversas operaciones y

cálculos siguiendo los lineamientos de análisis establecidos en el capítulo 1, y los resultados obtenidos para cada condición de carga los va grabando en los registros previamente reservados para ello en el archivo AD03.

El listado del programa ET300 se da en el apéndice A4 y el diagrama de flujo de la inicialización del programa se da en la figura 2-5. La inicialización de ET300 consiste en la apertura del acceso a los archivos, la lectura de los datos generales del archivo AD02, el dimensionamiento de los arreglos y matrices a usar en los cálculos y, finalmente, la ejecución de los procedimientos FORMATOS y ERRORES. El primero de estos procedimientos sirve para definir los formatos de lectura/escritura de datos y resultados en el archivo AD03, en tanto que el segundo se ejecuta para definir el control de la ejecución para cualquier condición de error que se presente. El resto del programa, con sus correspondientes diagramas de flujo, se describe a partir del Capítulo 4.

2.4.5. ARCHIVO AD04

En el proceso de análisis descrito se crea el archivo AD04,

archivo en el que se almacenan valores que son usados internamente por el programa.

2.4.6. Comandos para Verificar e Imprimir Resultados

El archivo AD03, que incluye datos y resultados, es revisado mediante la instrucción XEDIT, que lo muestra en pantalla para su verificación previo a la ejecución del comando que ordena la impresión del archivo.

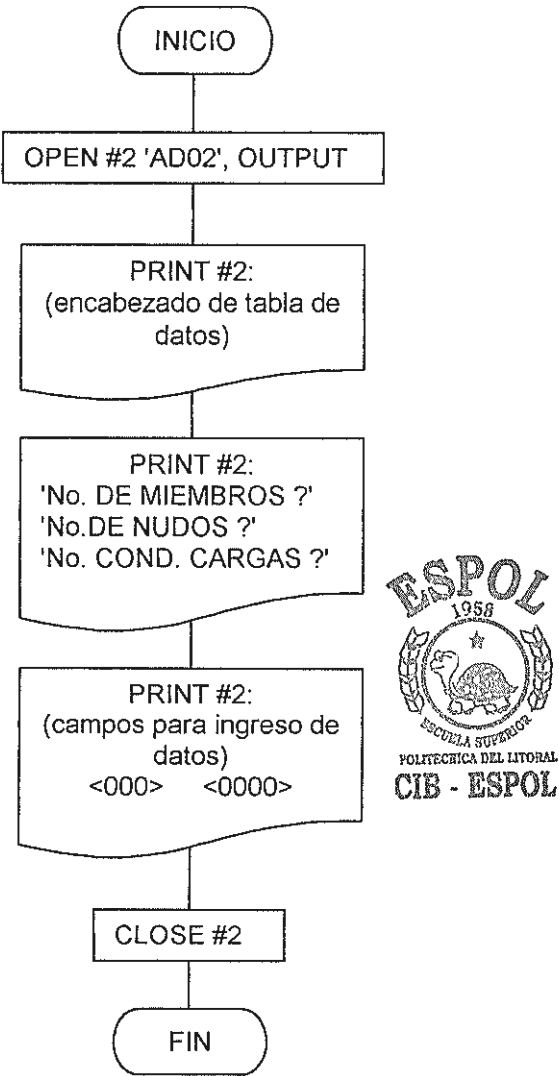


Fig. 2-3.- Diagrama de flujo del programa ET100 que crea el archivo AD02, el cual contiene la tabla para ingresar los datos generales de la estructura

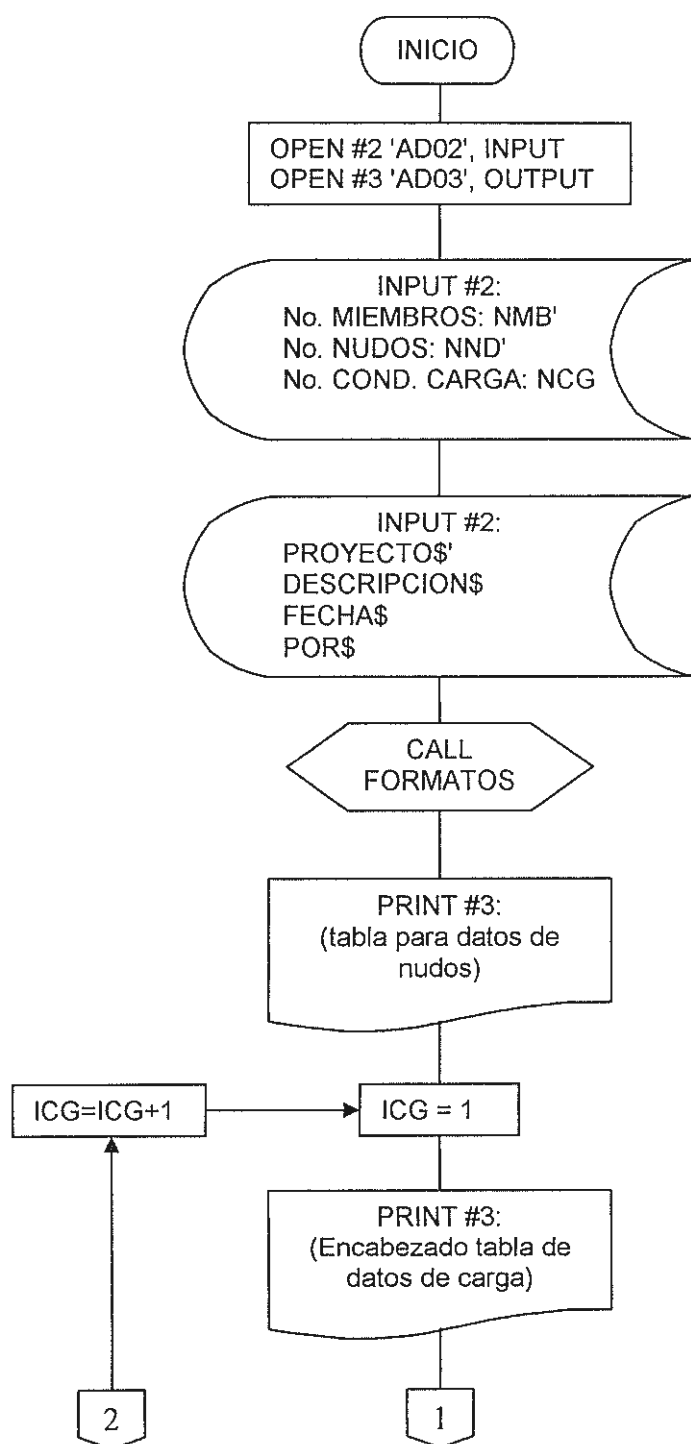


Fig. 2-4. Diagrama de flujo del programa ET200 que crea el archivo AD03, el cual contiene las tablas para ingresar los datos específicos de los componentes de la estructura y las condiciones de carga

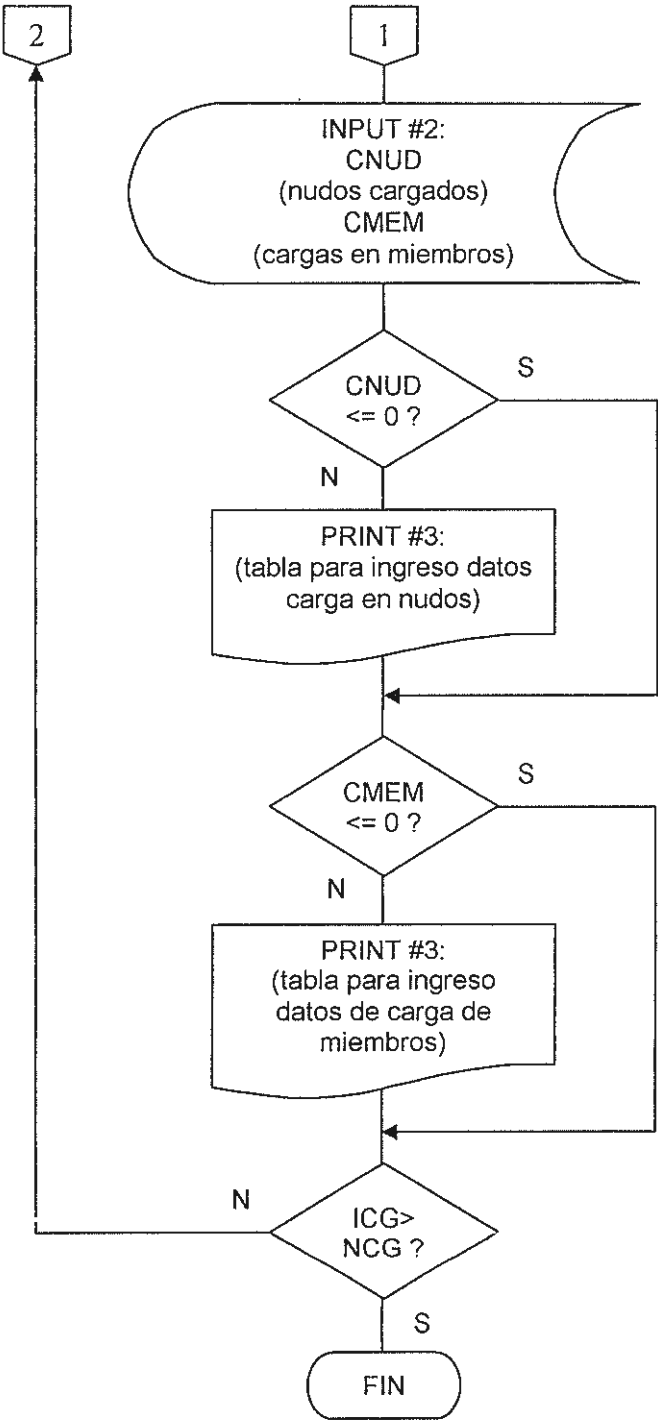


Fig. 2-4.- (cont.)

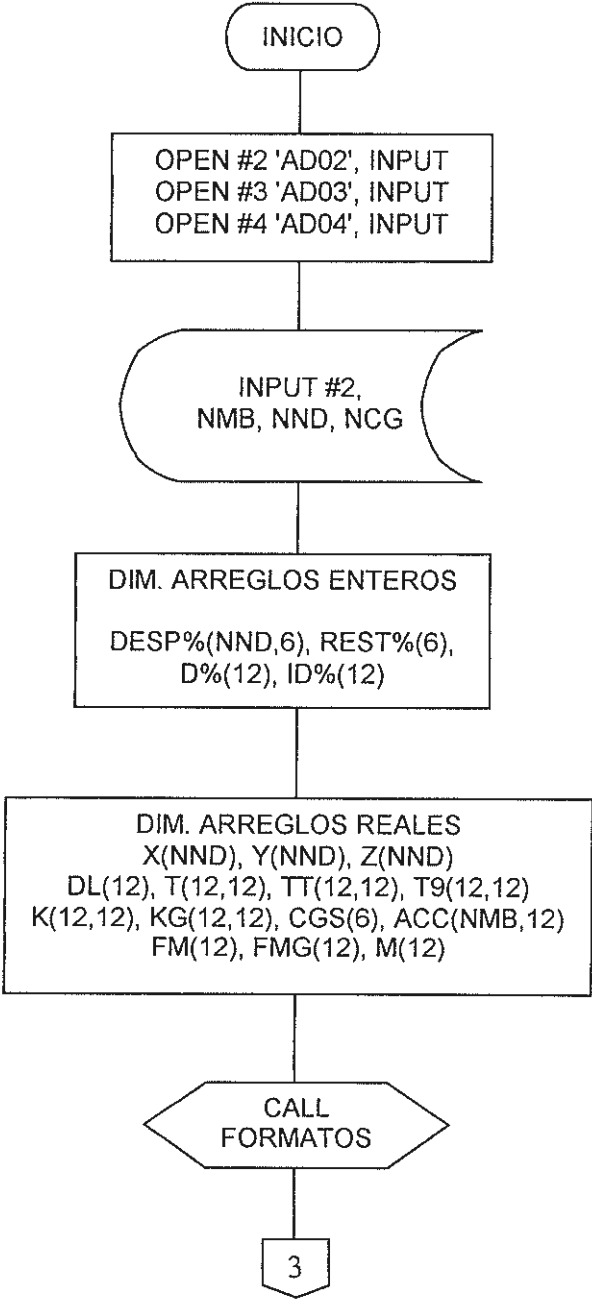


Fig. 2-5.- Diagrama de flujo los procesos iniciales del programa ET300.

CAPÍTULO 3

3. FORMACION DE LA MATRIZ DE LOS DESPLAZAMIENTOS

3.1. Matriz de Desplazamiento de los Nudos

La matriz de desplazamiento de los nudos es una matriz columna que tiene tantos elementos como componentes libres de desplazamiento de nudos hay en la estructura analizada. La matriz se forma con las componentes de desplazamiento libres de los nudos, tomando primero las componentes de traslación d_{xn} , d_{yn} , d_{zn} , y luego las de rotación r_{xn} , r_{yn} , r_{zn} , de cada nudo 'n' de la estructura, a partir del numero 1. A las componentes tomadas en ese orden se les asigna un número ordinal. Si alguna componente es restringida, no se la toma en cuenta para la numeración y se pasa a la siguiente. En la figura 3-1 se presenta un caso ilustrativo,

al cual corresponde la siguiente matriz de desplazamientos

[D] =

d_{x1}

d_{y1}

d_{z1}

r_{x1}

r_{y1}

r_{z1}

d_{x2}

d_{y2}

d_{z2}

r_{x2}

r_{y2}

r_{z2}

r_{x3}

r_{y3}

r_{z3}

r_{x4}

r_{y4}

r_{z4}

=

d₁

d₂

d₃

d₄

d₅

d₆

d₇

d₈

d₉

d₁₀

d₁₁

d₁₂

d₁₃

d₁₄

d₁₅

d₁₆

d₁₇

d₁₈

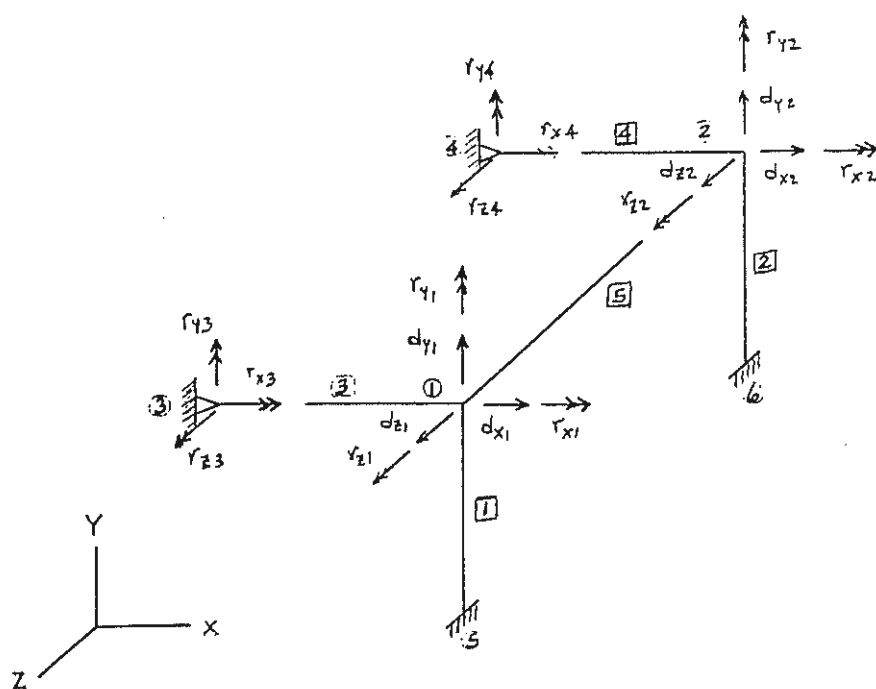
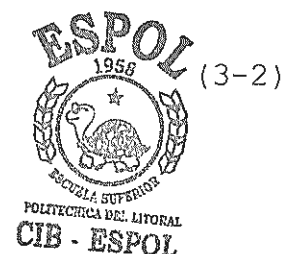


Fig. 3-1. Estructura tridimensional tomada como ejemplo para ilustrar el procedimiento de formación de la matriz de las componentes de desplazamiento.

Esta estructura tiene 6 nudos y 5 miembros. De los seis nudos los numero 1 y 2 son completamente libres, teniendo seis componentes de desplazamiento cada uno; los nudos 3 y 4 tienen restricción parcial y solamente tienen libertad de rotación, por lo que les corresponde tres componentes de desplazamiento a cada uno; finalmente, los nudos 5 y 6 son completamente restringidos, por lo que no tienen componentes de desplazamiento.

Para efectos del procesamiento de datos en el programa, la matriz formada no será columna, sino bidimensional, con seis columnas y tantas filas como nudos libres tenga la estructura. Los seis elementos de cada fila corresponden a los desplazamientos de traslación y rotación X, Y y Z de cada nudo, en su orden. Considerados fila a fila, los desplazamientos libres se numerarán ascendentemente a partir de '1', y los restringidos en orden descendente a partir de '-1'. Según este formato, a la estructura de la figura 3-1 le corresponderá una matriz bidimensional (equivalente a la 3-1) , dada por la expresión

$$[D] = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & d_4 & d_5 & d_6 \\ d_7 & d_8 & d_9 & d_{10} & d_{11} & d_{12} \\ d_{-1} & d_{-2} & d_{-3} & d_{13} & d_{14} & d_{15} \\ d_{-4} & d_{-5} & d_{-6} & d_{16} & d_{17} & d_{18} \end{bmatrix}$$



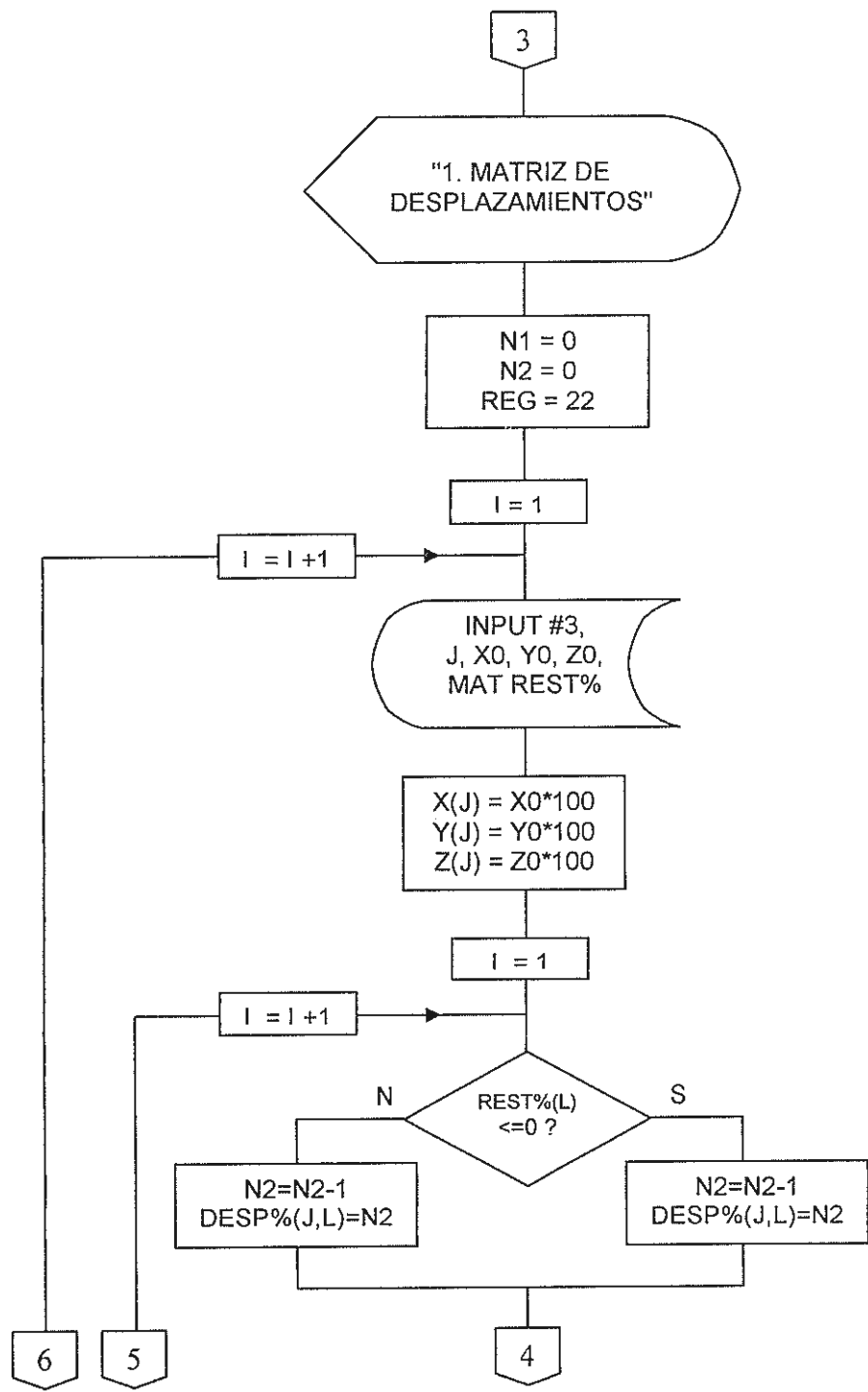


Fig. 3-2.- Diagrama de flujo de la sección del programa que genera la matriz de los desplazamientos de los nudos

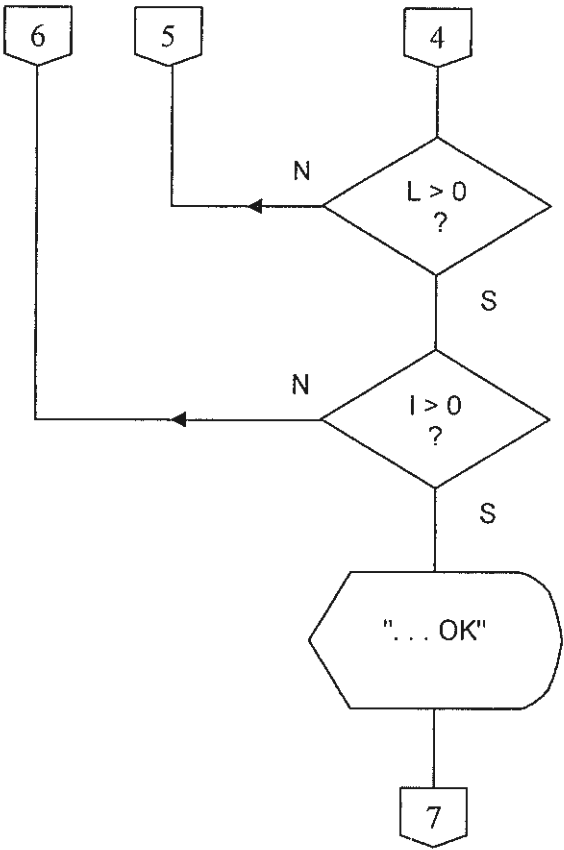


Fig. 3-2.- (Cont.)

3.2. Diagrama de Flujo

En la figura 3-2 se presenta el diagrama de flujo de la sección del programa que genera la matriz de los desplazamientos desconocidos. Esta sección se inicia a partir de la línea numero 1000 y tiene la etiqueta: `1. FORMACION DE LA MATRIZ DE DESPLAZAMIENTOS D'.

3.3. Procedimiento de Formacion de la Matriz [D]

Se forma la matriz [D] según lo denota la expresión 3-2. La lectura y procesamiento de los datos de los nudos se hace a través de un lazo que se repite para todos los nudos de la estructura. Dentro del lazo se leen los datos para cada nudo, se asignan los valores de las coordenadas a los arreglos correspondientes y se analizan las restricciones actuantes para formar la matriz de desplazamientos. El procedimiento es descrito a continuación en concordancia con los comentarios que anteceden a cada grupo de instrucciones indicadas en el listado del programa (ver apéndice A).

3.3.1. Inicialización de Variables

N1 y N2 son los contadores de los números de

desplazamiento libre y restringido de los nudos, respectivamente. Ambos se inicializan con un valor 0 (cero).

REG es el contador que controla el ingreso/salida de datos por registros (líneas) del archivo AA03. REG se inicializa con el número 22, que corresponde un registro previo al que tiene los datos del primer nudo.

El lazo de la sección 12 del programa, que se repite para todos los nudos de la estructura, comprende los siguientes procedimientos.

3.3.2. Lectura de Datos

Los datos son ingresados en el archivo AA03 nudo a nudo. Antes de cada lectura se incrementa en 1 el valor de REG para posicionar el puntero de acceso REC en el siguiente registro de datos del archivo.

La lectura de datos se realiza con la instrucción INPUT, usando el formato F_DN\$. Se leen: el número del nudo J; las coordenadas X0, Y0 y Z0; y, la especificación de las de las seis restricciones posibles mediante el arreglo REST%.



3.2.2. Asignación de Valores a los Arreglos de Coordenadas

Los valores de las coordenadas leídas $X0$, $Y0$ y $Z0$, se multiplican por 12 para convertirlos de pies a pulgadas y se asignan a los arreglos X , Y y Z .

3.2.3. Asignación de Números de Desplazamiento

Se asignan los números de desplazamiento, tanto libres como restringidos, al arreglo bidimensional $DESP\%$ mediante un lazo que se repite analizando la especificación de restricciones contenidas en $REST\%$.

El primer subíndice del arreglo $DESP\%$ recibe el numero del nudo considerado, es decir que puede tener un valor entero comprendido entre 1 y el numero del ultimo nudo. Este valor le es asignado por J . El segundo subíndice del arreglo toma el valor de L : entre 1 y 6, dependiendo de la restricción analizada (traslaciones y rotaciones en X , Y y Z respectivamente). Si no hay restricción, el elemento $DESP\%(J,L)$ recibirá el valor de $N1$. Si el desplazamiento es restringido, el elemento recibirá el valor de $N2$. El valor de $N1$ se incrementa, o el de $N2$ disminuye, en una unidad,

previamente a cada asignación.

Una vez efectuados los procedimientos descritos para todos los nudos, la matriz de desplazamientos de la estructura quedará formada.

CAPÍTULO 4

4. FORMACION DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ

4.1. Matriz de Rigidez de la Estructura

En el capítulo 1 se efectuó el análisis de una estructura plana para ilustrar la aplicación del método de las rigideces. Se planteó la solución a partir de la expresión

$$[S] [D] = [C_n] \quad (4-1)$$

El caso ilustrativo presentaba cuatro incógnitas por lo que la matriz de rigidez $[S]$ resultó una matriz cuadrada de 4 x 4 elementos. Un análisis similar para una estructura tridimensional con n componentes de desplazamientos como incógnitas, nos llevara a desarrollar una matriz de rigidez de $n \times n$ elementos. Si esta

matriz tiene inversa, entonces es factible determinar las incógnitas del análisis. Explicaremos ahora el procedimiento para calcular el valor de los elementos de la matriz de rigidez de estructuras en el espacio.

En el caso de miembros de estructuras en el espacio, hay que considerar la posibilidad de que los nudos de ambos extremos no tengan ninguna restricción externa al movimiento, habiendo por tanto doce grados de libertad asociados al miembro. En la figura 1-15 se mostró esos doce posibles desplazamientos tanto en las coordenadas generales como en las locales.

Para obtener la matriz de rigidez de la estructura hay que determinar previamente la matriz de rigidez individual de cada miembro. Esta matriz representa la respuesta del miembro aisladamente considerado con sus extremos artificialmente empotrados, al hacer que cada una de sus posibles componentes de desplazamiento experimente una traslación o rotación unitaria. En la figura 4-1 se indican las respuestas de un miembro i al someterlo a tales desplazamientos. En esas condiciones, en los extremos del miembro se desarrollan las reacciones necesarias para mantener al miembro en equilibrio estático, las mismas que



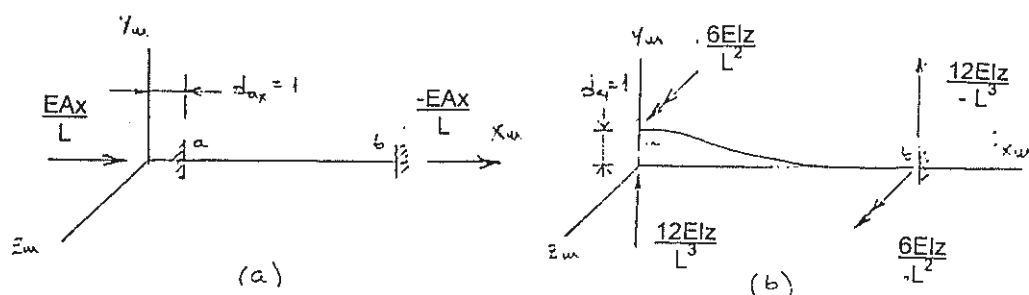


Fig. 4-1. (a), (b), (c):
traslaciones unitarias del
lado "a" en las direcciones
 x_w , y_w , z_w respectivamente
y sus correspondientes
reacciones.

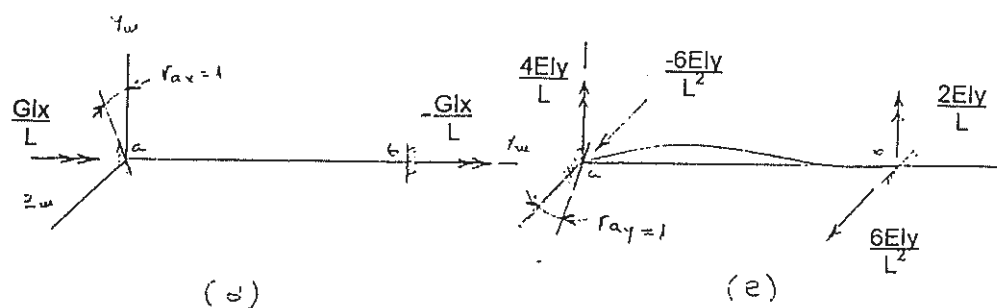
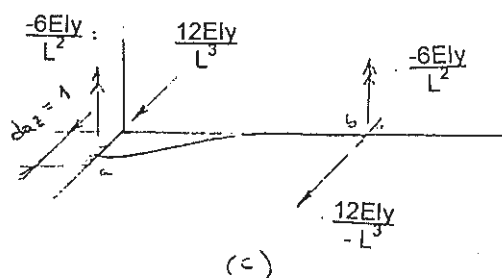
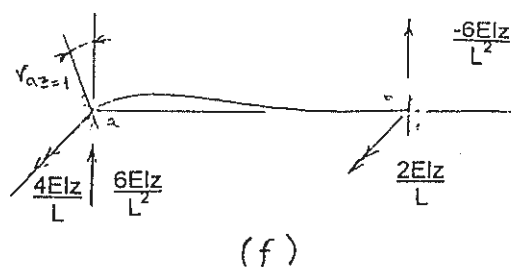


Fig. 4-1. (cont.) (d), (e), (f):
rotaciones unitarias
del lado "a" en los ejes
 x_w , y_w , z_w respectivamente
y sus correspondientes
reacciones.



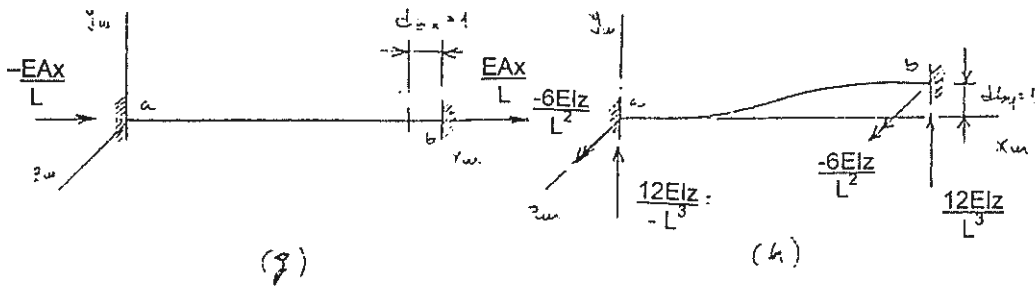


Fig. 4-1 (cont.).

(g), (h), (i):
traslaciones unitarias del
lado "b" en las direcciones
 x_m , y_m , z_m respectivamente
y sus correspondientes
reacciones.

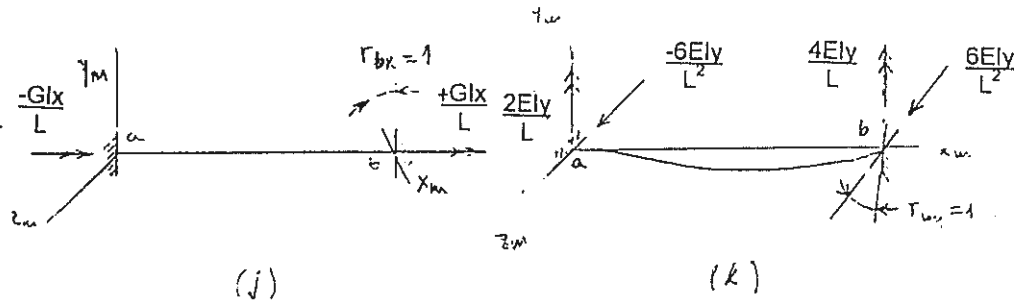
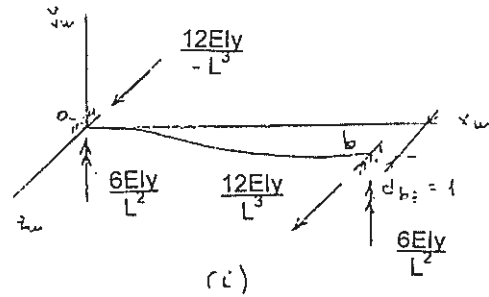
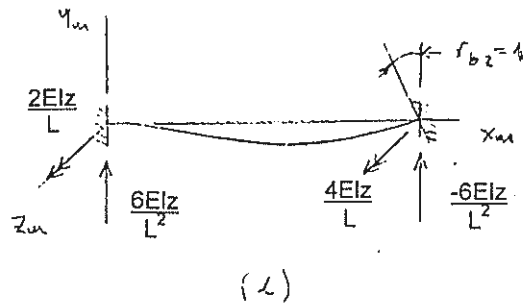


Fig. 4-1 (cont.).

(j), (k), (l):
Rotaciones unitarias
del lado "b" en los ejes
 x_m , y_m , z_m respectivamente
y sus correspondientes
reacciones.



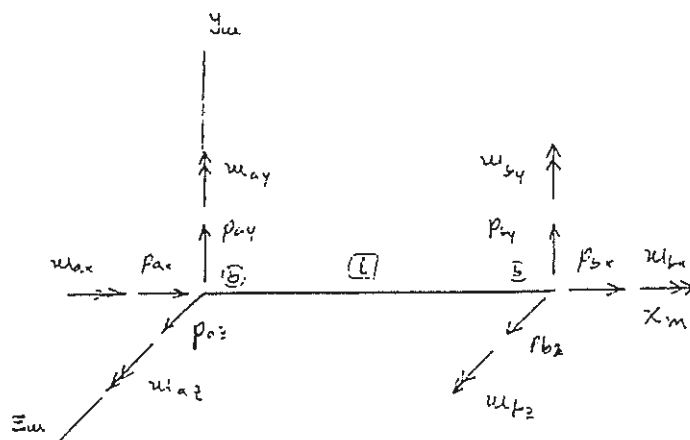


Fig. 4-2. Respuesta global en los extremos de un miembro al ser sometido a una condición general de desplazamiento.

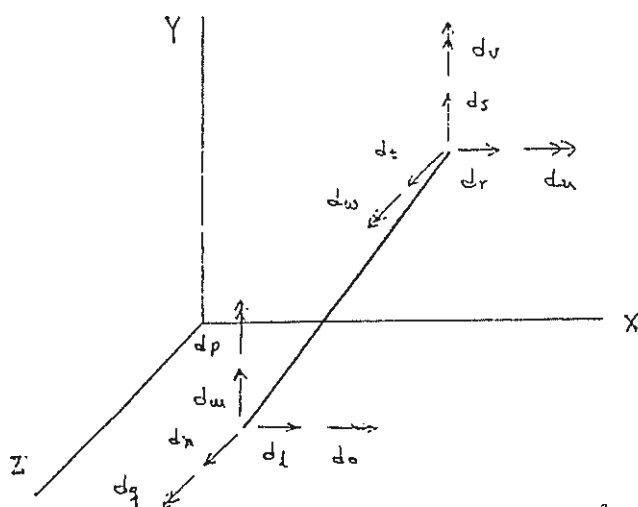


Fig. 4-3. Desplazamientos de un miembro arbitrariamente orientado en el espacio.

pueden ser determinadas por métodos de la Mecánica de Sólidos.

Al someter al miembro a una condición general de deformación, su respuesta global (fig. 4-2) será la superposición de las acciones indicadas en las figuras 4-1a a 4-1l, en virtud de las cuales el miembro se mantendrá en equilibrio estático. Dichas acciones - tres fuerzas y tres momentos en cada lado del miembro-, están relacionadas con los desplazamientos por las expresión 4-1, las cuales pueden ser agrupadas en la siguiente expresión matricial

$$[m]_i = [K]_i [D]_i \quad (4-2)$$

donde las matrices $[m]_i$ y $[D]_i$ están dadas por

$$[m]_i = \begin{bmatrix} p_{ax} \\ p_{ay} \\ p_{az} \\ m_{ax} \\ m_{ay} \\ m_{az} \\ p_{bx} \\ p_{by} \\ p_{bz} \end{bmatrix} \quad [D]_i = \begin{bmatrix} d_{ax} \\ d_{ay} \\ d_{az} \\ r_{ax} \\ r_{ay} \\ r_{az} \\ d_{bx} \\ d_{by} \\ d_{bz} \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} m_{bx} \\ m_{by} \\ m_{bz} \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$$\begin{bmatrix} r_{bx} \\ r_{by} \\ r_{bz} \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

y la matriz $[K]_i$ por

$$[K]_i = \begin{bmatrix} \frac{EAx}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EAx}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12Elz}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6Elz}{L^2} & 0 & \frac{12Elz}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6Elz}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12Ely}{L^3} & 0 & -\frac{6Ely}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12Ely}{L^3} & 0 & -\frac{6Ely}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{Glx}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{Glx}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6Ely}{L^2} & 0 & \frac{4Ely}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6Ely}{L^2} & 0 & \frac{2Ely}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6Elz}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4Elz}{L} & 0 & -\frac{6Elz}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2Elz}{L} \\ -\frac{EAx}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EAx}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12Elz}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6Elz}{L^2} & 0 & \frac{12Elz}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6Elz}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12Ely}{L^3} & 0 & \frac{6Ely}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12Ely}{L^3} & 0 & \frac{6Ely}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{Glx}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{+Glx}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6Ely}{L^2} & 0 & \frac{2Ely}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6Ely}{L^2} & 0 & \frac{4Ely}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6Elz}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2Elz}{L} & 0 & -\frac{6Elz}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4Elz}{L} \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

Las tres matrices de la expresión 4-2 están formuladas en el

marco del sistema de referencia local del miembro. $[K]_i$ recibe el nombre de "matriz de rigidez del miembro i respecto al sistema de coordenadas locales".

A partir de la expresión 4-2 se puede derivar otra equivalente para el sistema de referencia general. Usando la matriz de transformación $[T]_i$ tenemos que

$$[m]_i = [T]_i [m]_i \quad (4-6)$$

$$[D]_i = [T]_i [D]_i \quad (4-7)$$

Reemplazando estas expresiones en la 4-2 y recordando que $[T]^{-1}=[T]^T$, se llega a

$$[m]_i = [T]_i^T [K]_i [T]_i [D]_i \quad (4-8)$$

Esta expresión puede ser rescrita en la forma

$$[m]_i = [K]_i [D]_i \quad (4-9)$$

donde



$$[K]_i = [T]_i^T [K]_i [T]_i$$

(4-10)

A la matriz $[K]_i$ se la denomina "**matriz de rigidez transformada del miembro 'i' respecto al sistema de referencia general**".

La matriz $[K]_i$ debe ser determinada para todos los miembros de la estructura, obteniéndose matrices de rigidez de los miembros expresadas en un solo sistema de referencia: el general X-Y-Z. La **matriz de rigidez total de la estructura** $[S]$ se obtiene superponiendo las matrices $[K]_i$ de todos los miembros. Para el efecto, se identifica a las diferentes matrices $[K]_i$ asignando a sus elementos subíndices determinados por los números de los desplazamientos que corresponden a los extremos del elemento. Por ejemplo, para el miembro mostrado en la figura 4-3, siendo d_l , d_m , d_n , d_o , d_p y d_q los desplazamientos del lado 'a', y d_r , d_s , d_t , d_u , d_v y d_w los del lado 'b', los coeficientes 'k' de la matriz de rigidez $[K]_i$ recibirán las designaciones indicadas en la expresión 4-11.

Cada coeficiente S_{jk} de la matriz de rigidez total $[S]$ de la estructura, se formará sumando todos los coeficientes que aparezcan en las diferentes matrices $[K]_i$ que tengan los mismos

subíndices 'jk'. Así, para una estructura que tenga n desplazamientos libres, la matriz de rigidez será

$$\begin{aligned}
 [S] &= \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \dots & S_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \dots & S_{nn} \end{vmatrix} \\
 &= \begin{vmatrix} \Sigma K_{11} & \Sigma K_{12} & \Sigma K_{13} & \dots & \Sigma K_{1n} \\ \Sigma K_{21} & \Sigma K_{22} & \Sigma K_{23} & \dots & \Sigma K_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \Sigma K_{n1} & \Sigma K_{n2} & \Sigma K_{n3} & \dots & \Sigma K_{nn} \end{vmatrix} \quad (4-12)
 \end{aligned}$$

La matriz $[S]$ queda por supuesto formulada en el marco del sistema de referencia global X-Y-Z. En general, cualquier elemento S_{jk} de esta matriz está representado por la expresión

$$S_{jk} = \sum_i K_{jk}^i \quad (4-13)$$

donde 'i' indica que la sumatoria incluye a todos los coeficientes K_{jk} que estén contenidos en las matrices $[K]^i$ de los diferentes miembros 'i' de la estructura.

Es importante destacar que las matrices de rigidez que se obtienen al analizar estructuras son matrices de banda, es decir del tipo

$$\begin{vmatrix}
 S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & S_{32} & S_{33} & S_{34} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & S_{43} & S_{44} & S_{45} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & S_{65} & S_{66}
 \end{vmatrix} \quad (5-14)$$

Estas matrices presentan la característica de que todos sus elementos diferentes de cero están agrupados simétricamente alrededor de la diagonal principal de la matriz. El "ancho de banda", es decir número máximo de elementos en una línea, es igual a $2m+1$, siendo nulos todos los elementos S_{ij} para los cuales $|i-j| > m$. Al valor 'm' se lo denomina '**ancho de media banda**'; Para la matriz anterior $m=1$ y el ancho de banda es 3. El programa se ha elaborado de tal manera que reserva memoria solamente para almacenar los elementos no nulos de la matriz de rigidez en un arreglo lineal 'A'. Para almacenar estos elementos se requerirá una capacidad de memoria dada por la expresión

$$NM = N (MUD+1) - MUD (MUD+1) / 2 \quad (4-15)$$

donde: N = número de desplazamientos libres (incógnitas)
de la estructura.

MUD = ancho de media banda de la matriz de rigidez.

Mediante este procedimiento se disminuye significativamente la magnitud de la memoria usada en la ejecución del programa. Para la matriz de la expresión 4-14, por ejemplo, solo se necesita almacenar 16 valores, en lugar de los 36 que forman toda la matriz.



4.2. Diagrama de Flujo

En la figura 4-4 se presenta el diagrama de flujo de la sección del programa que genera la matriz de rigidez, la misma que se inicia a partir de la línea 2000 identificada con la etiqueta '3. FORMACION DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ S'.

4.3. Descripción del Procedimiento

El diagrama de flujo muestra que esta sección del programa

consta fundamentalmente de dos lazos. En el primero se establecen los parámetros principales de cada miembro en relación con sus propiedades mecánicas y con los desplazamientos desconocidos que corresponden a sus extremos. Estos datos se almacenan en el archivo AD04 para su posterior uso.

El segundo lazo tiene por objeto calcular la matriz de rigidez de cada miembro y clasificar sus elementos dentro del arreglo 'A'.

4.3.1. Inicializacion de Variables

Las variables que se inicializan son: MUD con un valor de 1, y los valores por omisión 2100 y 840 Ton/cm² de EG y GG - módulos de elasticidad a la tensión y a la torsión-, correspondientes al acero estructural común.

4.3.2. Procesamiento de Datos de los Miembros

Para el procesamiento de datos de los miembros, éstos son primeramente leídos del archivo de AD03. Las variables a las cuales se asignan son:

IM número del miembro.

TM	tipo de miembro.
A,B	números de nudos en los lados 'a' y 'b' del miembro.
IZ	momento de inercia respecto al eje zm.
IY	momento de inercia respecto al eje ym.
JX	constante de torsión.
AT	área transversal de la sección.
E,G	módulos de elasticidad a la tensión y a la torsión (si se ingresa 0 se asignarán los valores por omisión).
YZ	tipo de rotación usada para definir I.
PSI	ángulo I.



A continuación se asignan los valores de los módulos de elasticidad asumidos si es que no se ha ingresado en el archivo ningún valor específico para ellos. Se asignan los números de desplazamiento que corresponden a los extremos del miembro, para poder identificar posteriormente los subíndices de los elementos en la matriz de rigidez.

Inmediatamente se calcula el ancho de media banda para cada miembro como la diferencia máxima entre los números

de desplazamiento que corresponden a sus extremos. El mayor valor obtenido para MUD entre los distintos miembros es el que se usa para dimensionar al arreglo 'A'.

Se calculan los cosenos directores del miembro, su longitud y, como ultimo paso del lazo, se almacenan en el archivo AD04 los parámetros del miembro que se usaran en cálculos posteriores.

4.3.3. Dimensionamiento del Arreglo que Contiene la Matriz de Rigidez

El arreglo 'A', que contiene la matriz de rigidez, se estructura de tal forma que contenga en forma de una matriz columna a todos los elementos no nulos de la matriz de rigidez, tomados línea a línea. Para la matriz de la expresión 4-14, por ejemplo, el arreglo 'A' estará organizado en la forma:

$$[A] = \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{12} \\ S_{21} \\ S_{22} \\ S_{23} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} S_{32} \\ S_{33} \\ S_{34} \\ S_{43} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \text{etc.} \end{bmatrix}$$

Al arreglo 'A' se le da una dimensión igual al número de elementos no nulos de la matriz de rigidez más un número de elementos igual al número de incógnitas del análisis mas uno. El motivo de esta conformación se lo explicara en el siguiente capítulo.

4.3.4. Cálculo y Clasificación de los Elementos de la Matriz de Rigidez

Para cada miembro se recuperan los datos del archivo AD04 y se procede a calcular la matriz de transformación $[T]_i$ mediante la subrutina TRANSFORM. A continuación se calcula, mediante la subrutina MATRIZ, la matriz de rigidez del miembro en las coordenadas generales usando las expresiones 4-5 y 4-10. Finalmente, los elementos de esta matriz son clasificados por la subrutina CLASIF para

ubicarlos y sumarlos en la posición que les corresponde en el arreglo 'A', esto es, se efectúan las operaciones indicadas en la expresión 4-13 para formar la matriz de rigidez total $[S]$ de la estructura.

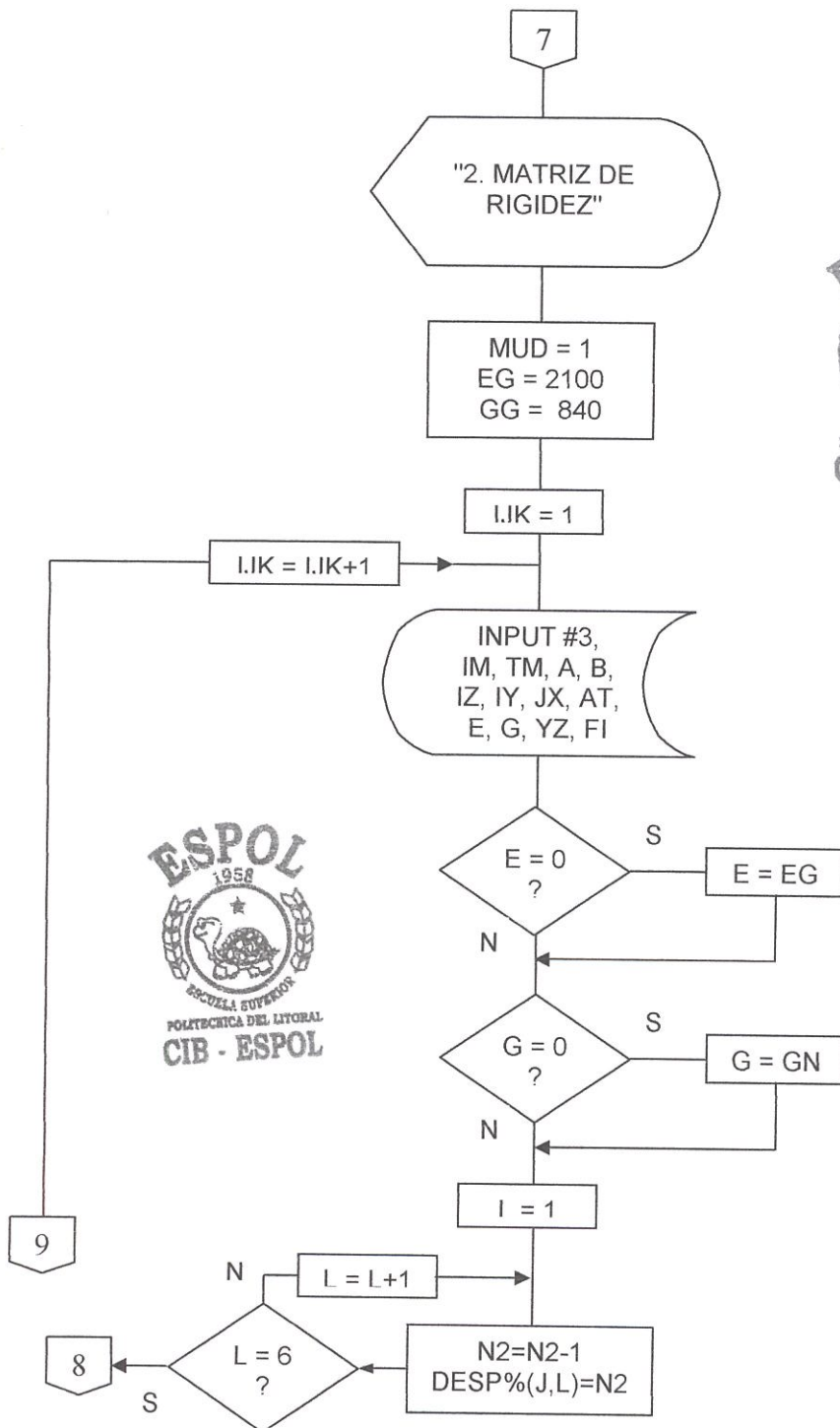


Fig. 4-4.- Diagrama de flujo de la sección del programa que prepara la matriz de rigidez de la estructura.

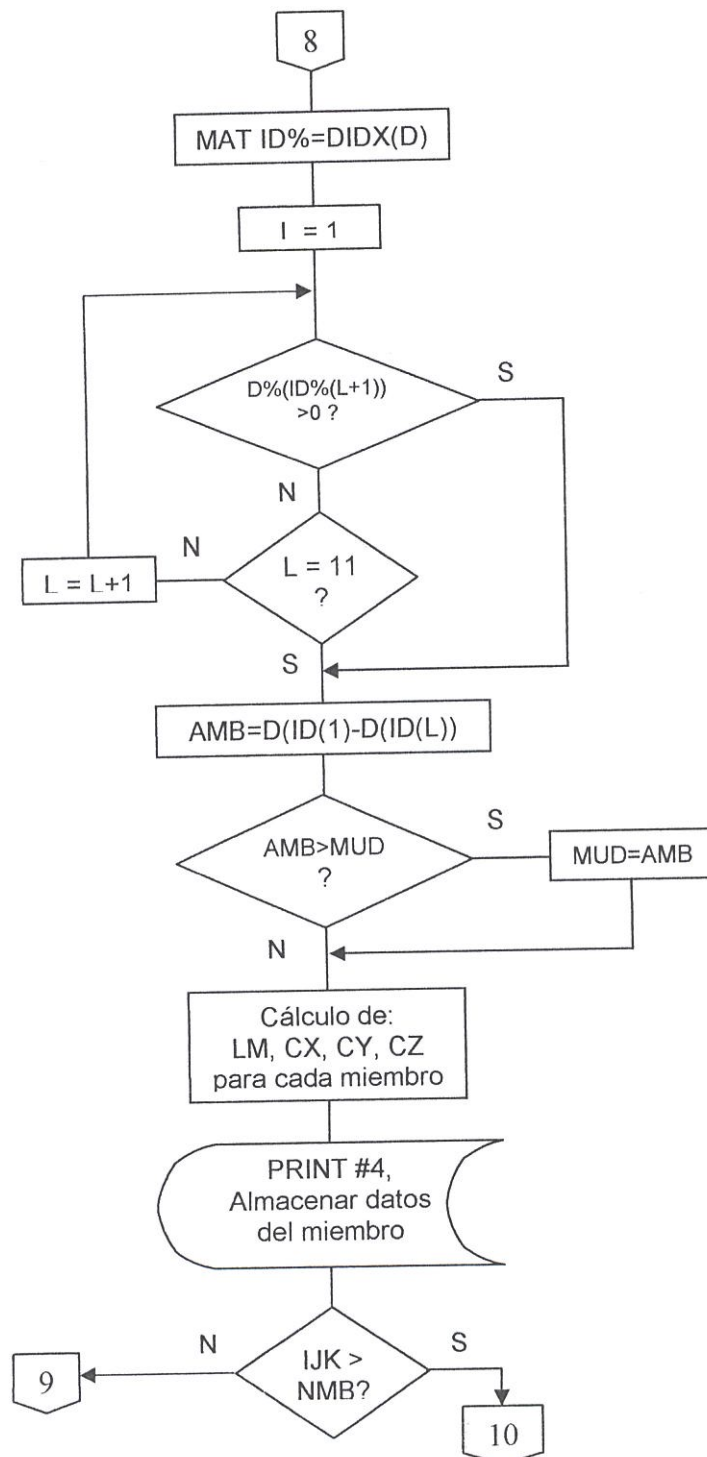


Fig. 4-4.- (Cont.)

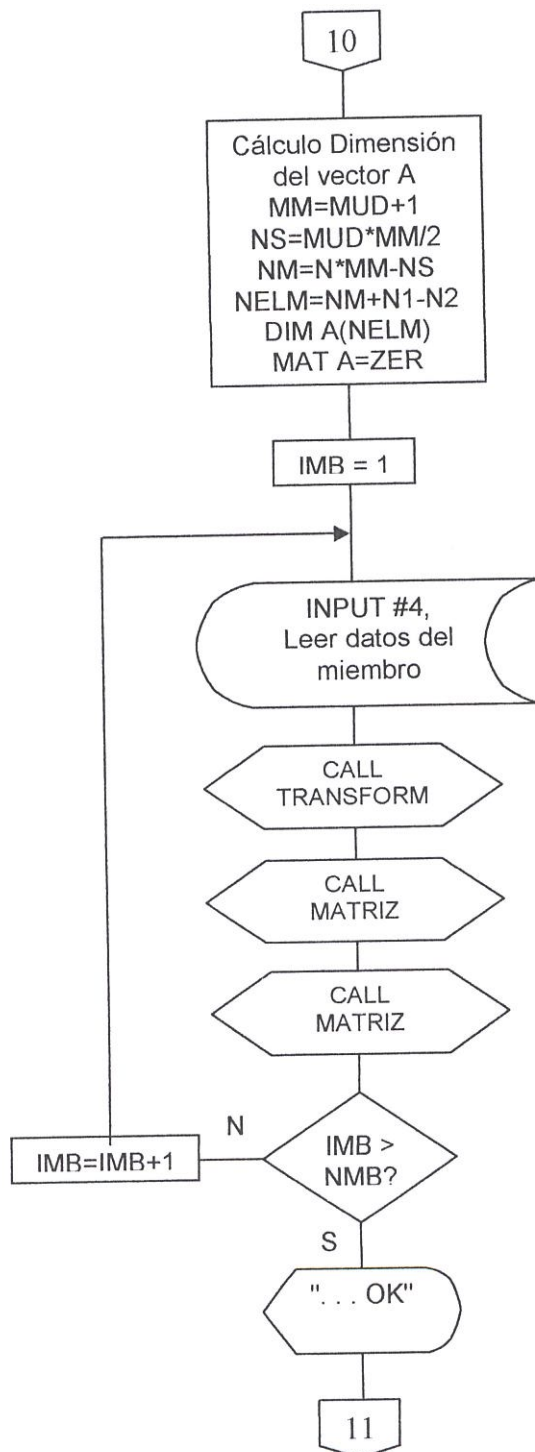


Fig. 4-4.- (Cont.)

CAPÍTULO 5

5. FACTORIZACIÓN DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ

5.1. Factorización de Matrices

El programa resuelve el sistema de ecuaciones planteado en la expresión 1-8 mediante el denominado 'método de Cholesky'. Para poder aplicar este método es necesario que la matriz de rigidez [S] cumpla con la condición

$$[X]^T [S] [X] > 0 \quad (5-1)$$

para toda matriz columna [X] diferente de cero. Si tal es el caso, entonces el algoritmo indicado en la figura 5-1 permitirá calcular una matriz triangular inferior [G] de orden n, con su diagonal principal formada por elementos positivos, tal que

$$[G] [G]^T = [S] \quad (5-2)$$

En esta expresión $[G]$ representa la matriz factorizada de $[S]$.
Como ejemplo, para el caso de la matriz $[S]$ de la expresión 4-14, ,
la matriz $[G]$ será de la forma

$$[G] = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & & 0 & 0 & 0 \\ g_{21} & g_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{32} & g_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{43} & g_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{54} & g_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_{65} & g_{66} \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

Se puede observar que siendo la matriz $[S]$ del ejemplo de ancho de media banda $m=1$, la matriz $[G]$ tiene un ancho de banda igual a 2, esto es, igual a $m+1$.

Usando la matriz $[G]$ y una vez que se haya determinado la matriz $[C_n]$, los desplazamientos desconocidos de la estructura $[D]$ podrán ser calculados siguiendo el procedimiento que se explica en el Capítulo 7. Como la matriz $[S]$ solo depende de la geometría

de la estructura, para una configuración estructural dada, la matrices $[S]$ y $[G]$, se mantendrán constantes, independientemente de las condiciones de carga aplicadas. Al plantear la solución del análisis en base a la matriz $[G]$, no es necesario que el programa duplique la memoria utilizada almacenando la matriz $[S]$. Es por esta razón que los elementos de $[G]$ son almacenados en las mismas posiciones del arreglo 'A' usadas por los elementos de $[S]$. La sección del programa que hace el cálculo de los elementos de $[G]$ ha sido desarrollada para trabajar de esa forma, aprovechando el hecho de que una vez que ha sido establecido un elemento g_{ij} , el elemento S_{ij} que se usó para generarlo no se vuelve a utilizar (ver el algoritmo de la fig. 5-1) y se aprovecha el lugar que ocupaba S_{ij} en el arreglo 'A' para almacenar al elemento g_{ij} .

5.2. Diagrama de Flujo

La sección del programa que realiza el cálculo de los elementos de la matriz $[G]$ se inicia a partir de la línea 4000, identificada por la etiqueta '4. FACTORIZACION DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ'. El diagrama de flujo correspondiente se indica en la figura 5-2 al final del capítulo.

5.3. Descripción del Procedimiento para Determinar la Matriz

Factorizada

En el diagrama de flujo de la figura 5-2 se identifican fundamentalmente dos partes contenidas dentro de un lazo que incluye a todas las instrucciones de esta sección. En la primera parte, se calculan los elementos g_{jj} de la diagonal principal de $[G]$ y, en la segunda, se lo hace con los elementos g_{ij} que están bajo g_{jj} en su misma columna. El procedimiento se explica a continuación.

5.3.1. Cálculo de los Elementos de la Diagonal Principal

De acuerdo con el algoritmo presentado en la figura 5-1, los elementos de la diagonal principal de la matriz $[G]$ se generan según la expresión

$$g_{jj} = \sqrt{S_{jj} - \sum_{k=q}^{j-1} g_{jk}^2} \quad (5-4)$$

Como estos elementos se almacenan en el arreglo 'A' línea a línea secuencialmente, el primer paso del procedimiento es determinar el subíndice que define la posición del elemento en $[A]$. Si el elemento g_{jj} corresponde a una fila que tiene menos elementos no nulos que el valor del ancho de

media banda (MUD), el subíndice esta dado por

$$L = 1 + J (J-1) / 2 \quad (5-5)$$

en caso contrario, el programa utiliza la expresión

$$L = J - MUD + (J-MM) MUD + NS \quad (5-6)$$

donde: $MM = MUD + 1$

$$NS = MUDMM/2$$



$$(5-7)$$

$$(5-8)$$

Posteriormente se ejecuta la sumatoria de los elementos g_{jk}^2 para calcular el elemento g_{jj} en forma equivalente a la expresión 5-4.

5.3.2. Cálculo de los Elementos de Cada Columna

Los elementos de cada columna que siguen a g_{jj} son determinados según la expresión

$$g_{jj} = \frac{S_{jj} - \sum_{k=1}^{j-1} g_{jk}^2}{g_{jj}} \quad (5-9)$$

El cálculo de dichos elementos se realiza mediante un lazo que se ejecuta el número de veces necesarias para completar los elementos no nulos de la columna. Similarmente al proceso anterior, el primer paso en este caso es seleccionar el subíndice que corresponde al elemento a almacenarse en 'A'. Siguiendo las operaciones indicadas en la expresión anterior, se efectúa la sumatoria de los elementos g_{ij} y g_{jk} , para calcular luego el correspondiente elemento g_{ij} .



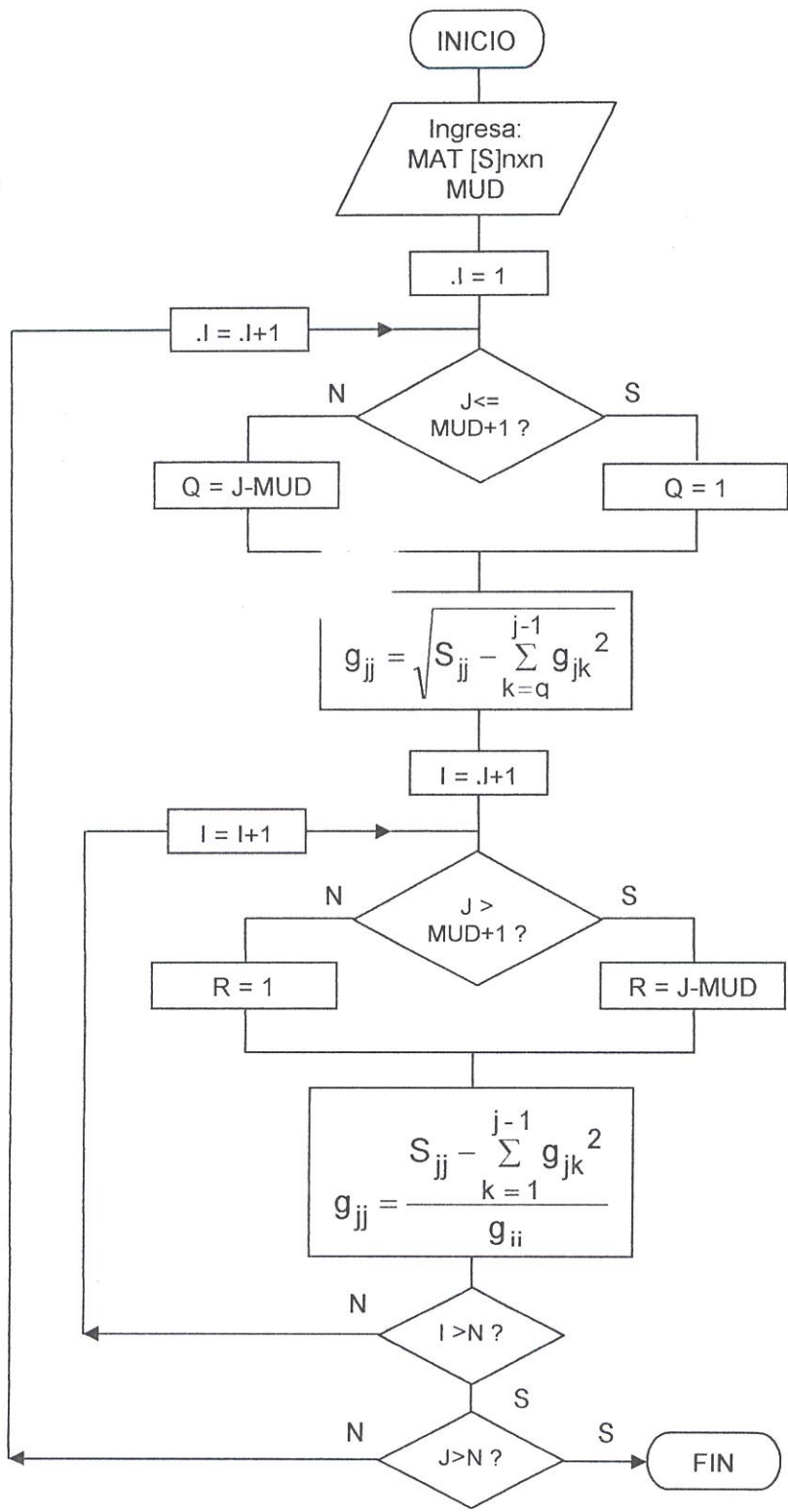


Fig. 5-1.- Algoritmo de Cholesky para factorizar matrices.

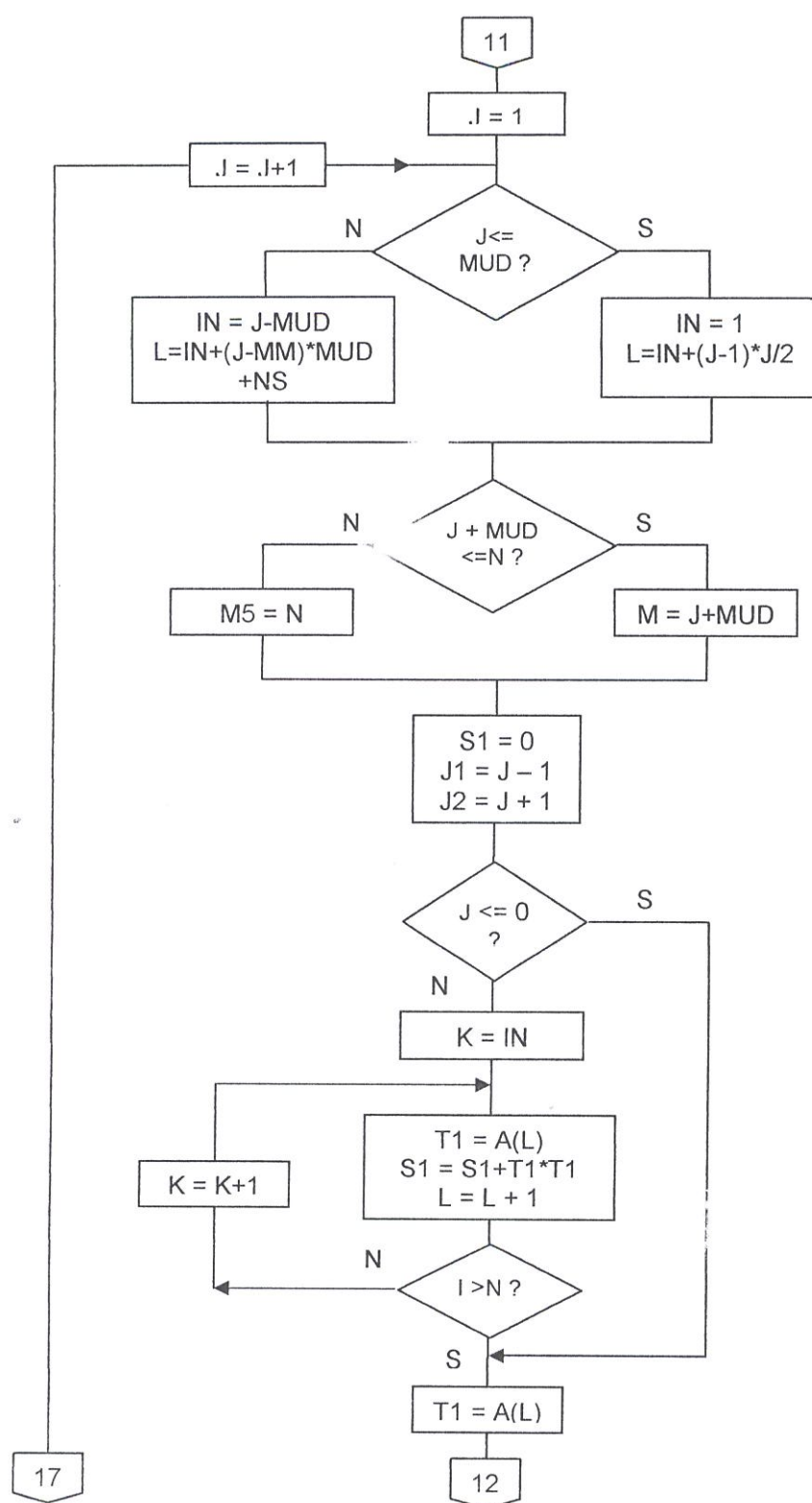


Fig. 5-2.- Diagrama de flujo de la sección que factoriza la matriz de rigidez

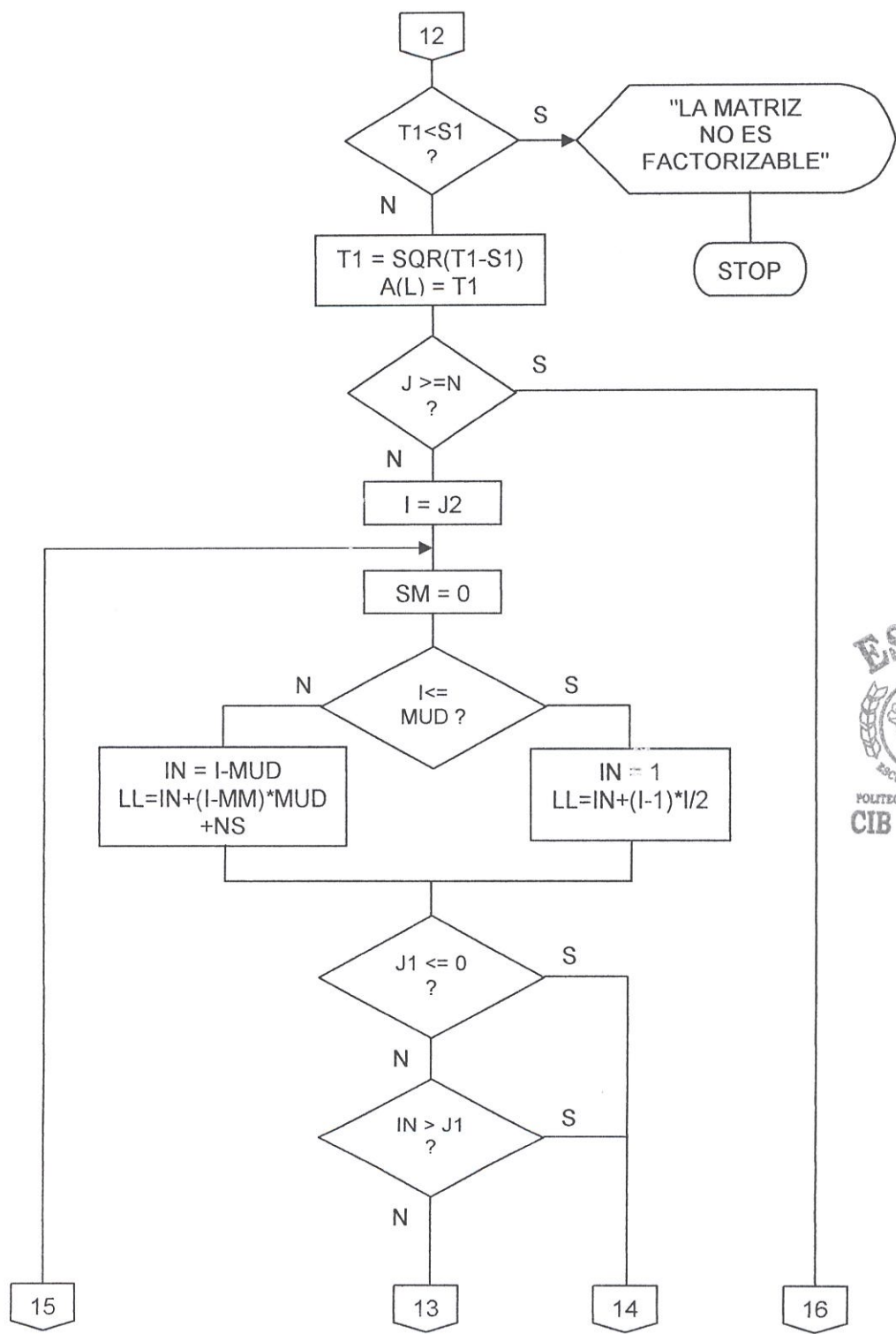


Fig. 5-2.- (Cont.)

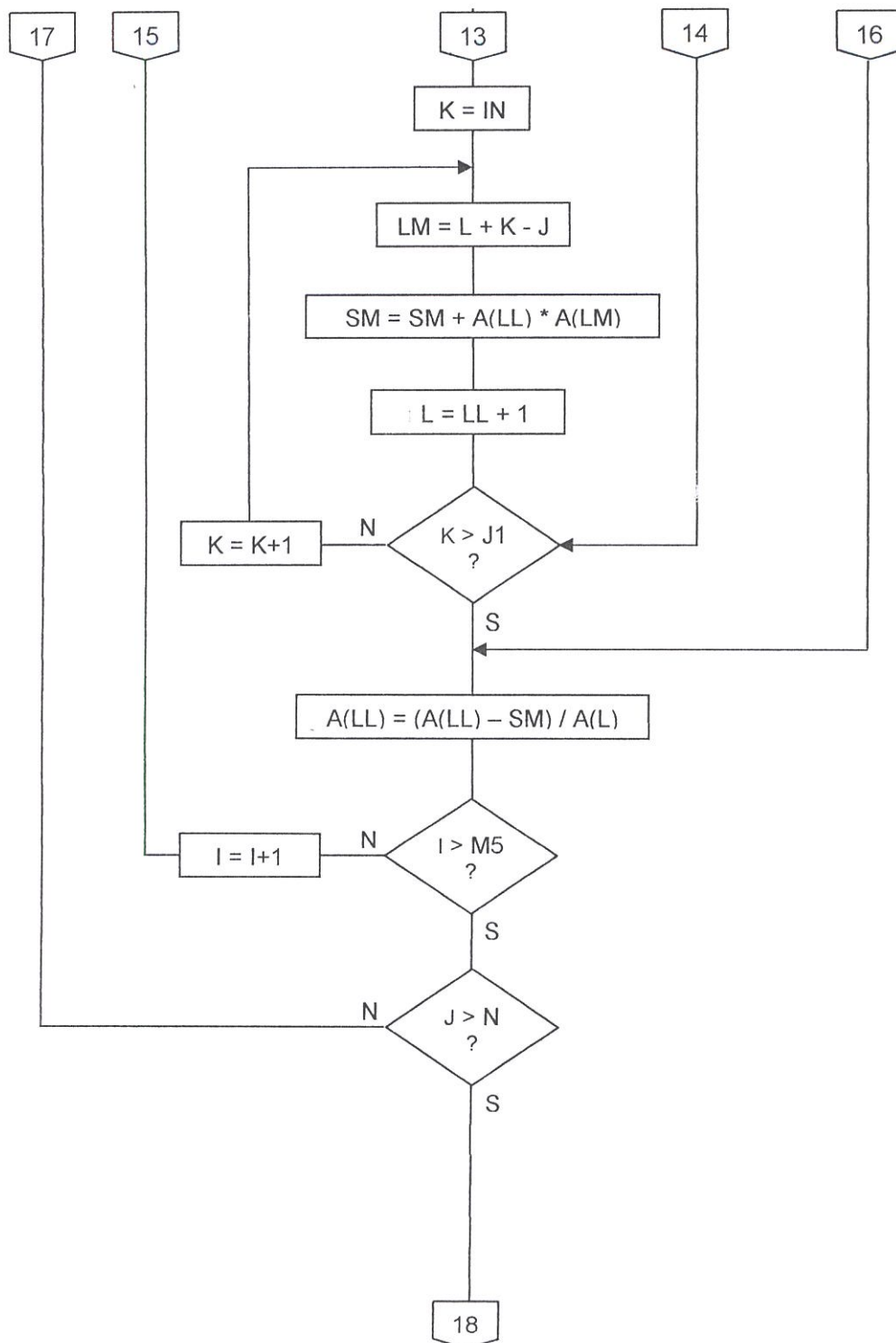


Fig. 5-2.- (Cont.)



CAPÍTULO 6

6. FORMACION DE LA MATRIZ DE CARGA EN LOS NUDOS

6.1. La Matriz de Carga en los Nudos

Como se indicó al desarrollar la expresión 1-8 en el capítulo 1, la matriz de carga en los nudos $[C_n]$ es una matriz columna en la que cada elemento corresponde a una componente de desplazamiento libre desconocida. Las cargas en los nudos pueden ser de dos tipos: a) cargas externas aplicadas a ellos directamente, o b) cargas transmitidas por los extremos de miembros. Estas últimas se producen por efecto de cargas externas aplicadas en tales miembros y son iguales en magnitud a las reacciones de empotramiento de los mismos, pero actúan en sentido contrario.

Como ejemplo ilustrativo se tiene la estructura de la figura 6-1, que presenta 18 componentes libres de desplazamiento y en la que solamente hay cargas externas en el miembro 5 y en el nudo 2. La matriz de carga correspondiente se da en la siguiente página.

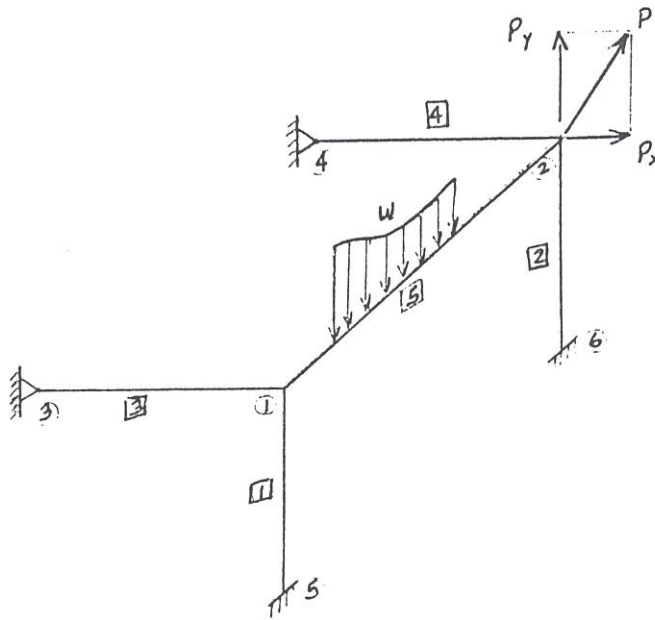


Fig. 6-1.- Estructura tridimensional cuya matriz de carga está dada por la expresión 6-1.

$$[C_n] = \begin{bmatrix} C_{n1} \\ C_{n2} \\ C_{n3} \\ C_{n4} \\ C_{n5} \\ C_{n6} \\ C_{n7} \\ C_{n8} \\ C_{n9} \\ C_{n10} \\ C_{n11} \\ C_{n12} \\ C_{n13} \\ C_{n14} \\ C_{n15} \\ C_{n16} \\ C_{n17} \\ C_{n18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -{}^5F_{R1} \\ -{}^5F_{R2} \\ -{}^5F_{R3} \\ -{}^5M_{R4} \\ -{}^5M_{R5} \\ -{}^5M_{R6} \\ -{}^5F_{R7} + P_x \\ -{}^5F_{R8} + P_y \\ -{}^5F_{R9} \\ -{}^5M_{R10} \\ -{}^5M_{R11} \\ -{}^5M_{R12} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6-1)$$

En este caso P_x y P_y son cargas aplicadas directamente al nudo 2 y las cargas $-{}^5F_{R1}$, $-{}^5F_{R2}$, $-{}^5F_{R3}$, ... $-{}^5M_{R12}$ son cargas equivalentes en los nudos 1 y 2 producidas por la carga distribuida 'w' en el

miembro 5. Los elementos C_{n13} a C_{n18} son nulos por cuanto no hay cargas externas actuando sobre los nudos 3 y 4 o sobre los miembros que se conectan a esos nudos.

6.2. Diagrama de Flujo

En la figura 6-2 se presenta el diagrama de flujo de la sección del programa que genera la matriz de carga en los nudos libres para cada condición de carga. Esta sección se inicia a partir de la línea 4000 identificada con la etiqueta '4. GENERACION DE LA MATRIZ DE CARGA EN LOS NUDOS LIBRES CN'.

6.3. Procedimiento de Formación de la Matriz $[C_n]$

La ejecución de esta sección del programa se realiza combinando datos de los archivos AD02 y AD03 para cada condición de carga. Del primer archivo se toman los datos referentes al número de nudos y de miembros cargados para la condición de carga analizada, y en base a esos datos se lee y procesan los datos archivados en AD03 de cada nudo y miembro cargado. Los resultados parciales se van clasificando y acumulando en los N1 elementos extra que se dimensionaron en el arreglo 'A'. De esta

manera se tiene que el arreglo 'A' no solamente almacena los NM elementos no nulos de la matriz de rigidez, sino también los N1 elementos de la matriz de carga. El procedimiento en detalle se describe a continuación.

6.3.1. Inicialización de Variables

Se inicializan los contadores RNL y REG que controlan la lectura de registros de los archivos AD02 y AD03 respectivamente. Al primero se le da el valor 25 y al segundo se lo incrementa en 6 para saltar los registros de comentarios del archivo AD03.

6.3.2. Lectura de Datos de la Condición de Carga

El numero de nudos cargados CNUD y miembros cargados CMEM son leídos registro a registro para cada condición de carga a partir del registro 26 (RNL+1) en el archivo AD02.

6.3.3. Análisis de Carga en Nudos

Si el valor leído de CNUD es cero, significa que para la condición de carga analizada no hay nudos cargados, por lo que se transfiere la ejecución a la sección de análisis de carga en miembros.

Si hay nudos cargados, se posiciona el contador REG para leer los datos de las cargas y se inicia un lazo que se repite para todos los nudos con carga. Al leer los datos, se asigna a J el numero del nudo y a la matriz CGS las seis posibles componentes de carga actuando sobre el nudo: tres componentes de fuerza y tres de momento en las direcciones X, Y y Z del sistema de referencia general. Como estas son cargas directamente aplicadas al nudo, su procesamiento se limita a acumular su valor en el elemento correspondiente del arreglo 'A', de acuerdo al número de los desplazamientos desconocidos indicado por el arreglo DESP%.

6.3.4. Análisis de Carga en Miembros

Si el numero de miembros cargados CMEM es cero, no hay ningún miembro por analizar y el control de la ejecución pasa a la siguiente sección del programa (línea 5000), quedando completamente definida la matriz $[C_n]$.

Si hay miembros cargados, comienza el procedimiento de análisis inicializando con cero la matriz ACC que almacenara las reacciones en los extremos del miembro.

Se leen los datos del miembro cargado asignándoles las siguientes variables:

IM	numero del miembro.
W	valor de la carga puntual o distribuida.
X1,X2	coordenadas de inicio y fin de la carga distribuida a lo largo del miembro. (X2=X1 para carga puntual).
ALFA	ángulo de incidencia de la carga.
PLANO	plano de acción de la carga (xm-ym o xm-zm).

A continuación se pasa a calcular las reacciones en los extremos del miembro mediante las subrutinas EMPOTRADO o ARTICULADO, dependiendo del tipo de apoyos del mismo. Antes de pasar a las subrutinas se verifica si la carga es puntual o distribuida, se calculan los argumentos de la subrutina y se leen del archivo AD03 los datos que indican el tipo y la longitud del miembro.



Los valores de las reacciones calculadas se transfieren al arreglo ACC pasándose a calcular las cargas equivalentes que en los nudos representan estas reacciones. Como las

cargas equivalentes deben ser expresadas en el sistema de referencia general, al efectuar este último proceso es necesario usar los datos del miembro para formular su matriz de transformación mediante la subrutina TRANSFORM. Usando la transpuesta de esta matriz y la matriz FM que recibe de ACC los valores de las reacciones en las coordenadas particulares del miembro, se calculan las reacciones en las coordenadas generales efectuando la operación indicada por la expresión 5-6. Dichas reacciones, con signo cambiado, son finalmente acumuladas en los elementos correspondientes del arreglo 'A', de acuerdo a los números de desplazamientos desconocidos asociados al miembro e identificados por el arreglo D%.

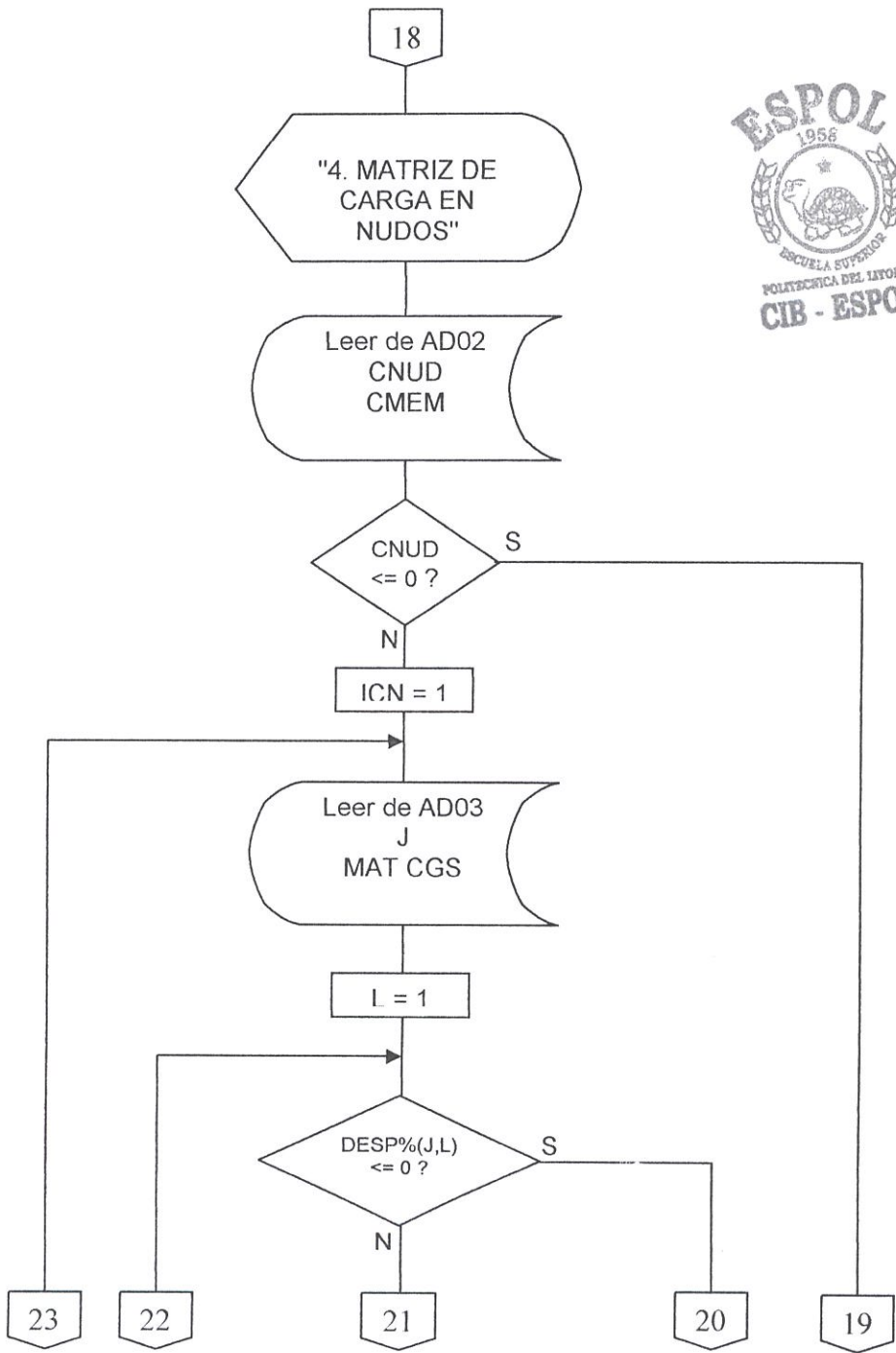


Fig. 6-2.- Diagrama de flujo de la sección del programa que genera la matriz de carga en los nudos C_n .

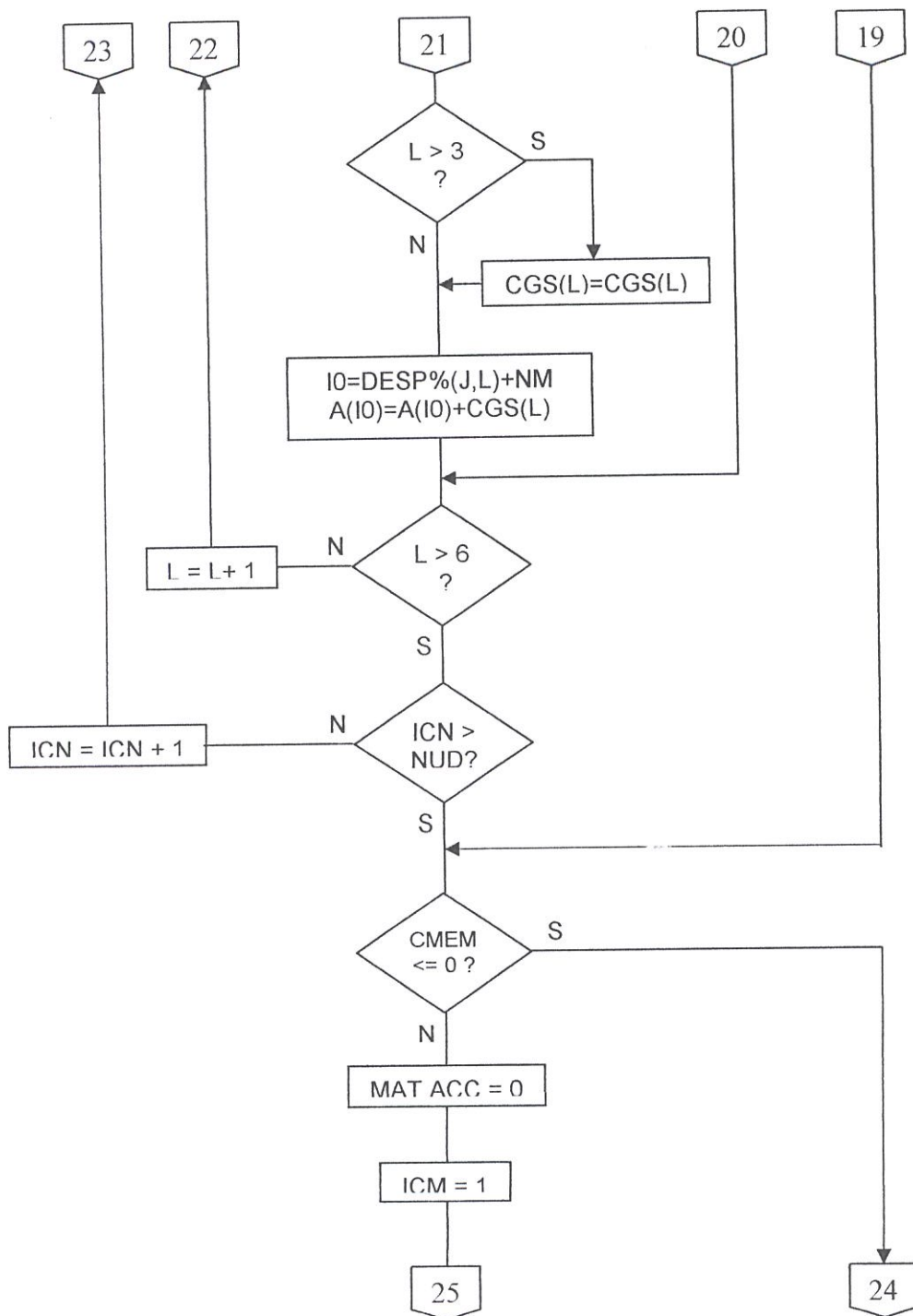
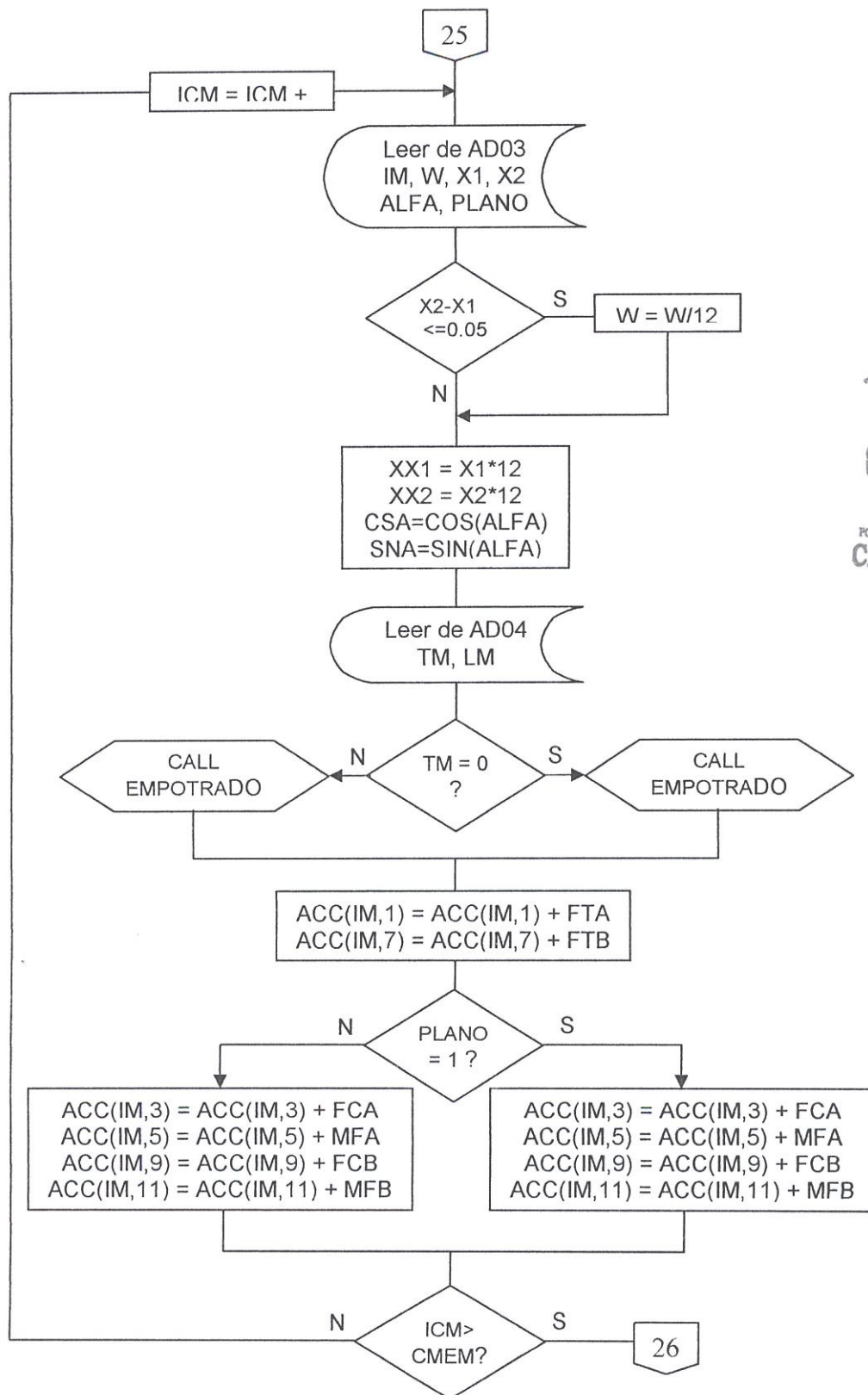


Fig. 6-2.- (Cont.)



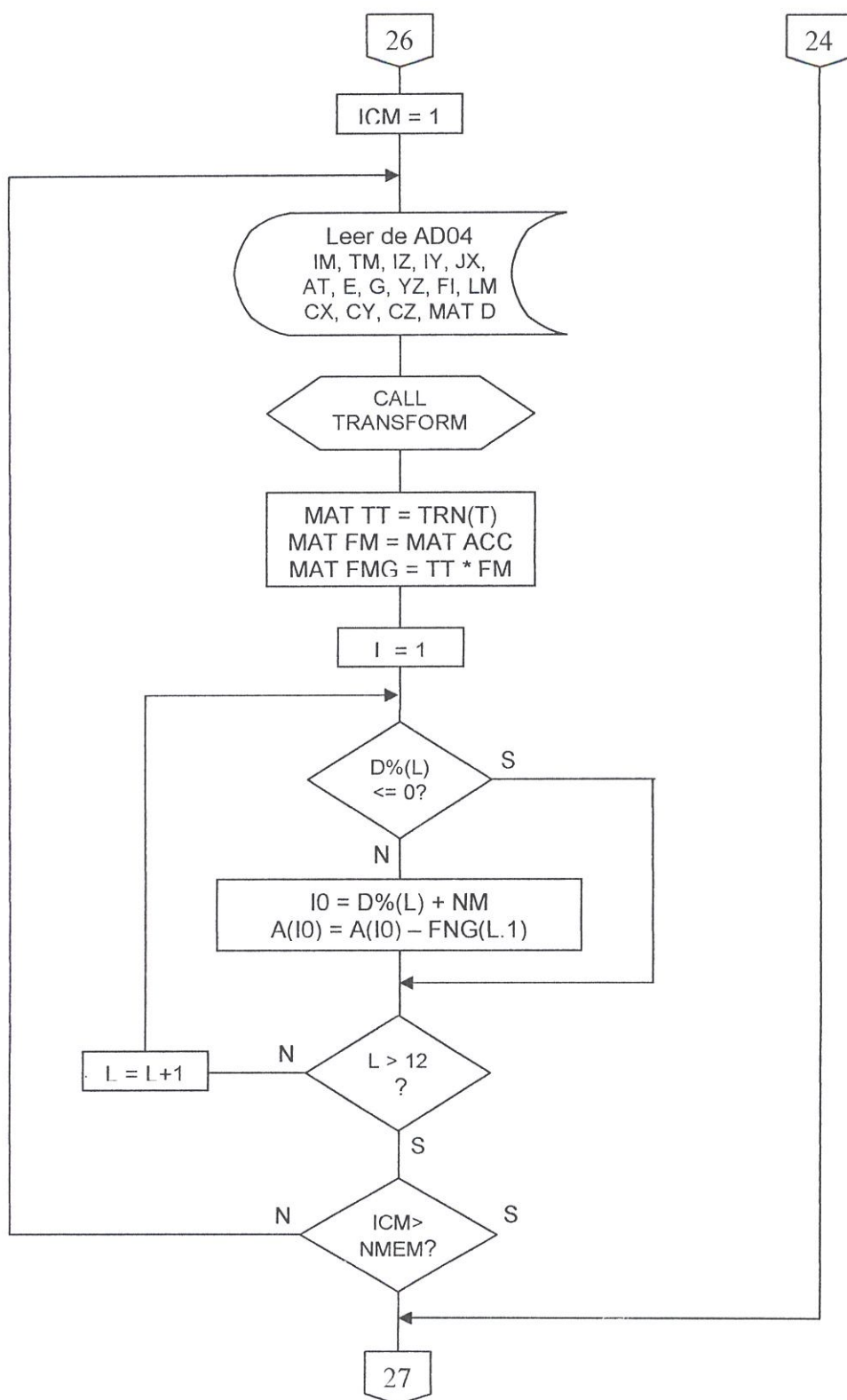


Fig. 6-2.- (Cont.)

CAPÍTULO 7

7. CÁLCULO DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE LOS NUDOS

7.1. Método de Resolución

En el capítulo anterior quedó planteada la expresión

$$[G] [G]^T [D] = [C_n] \quad (7-1)$$

en la cual se debe determinar la matriz de los desplazamientos desconocidos $[D]$.

El procedimiento seguido para calcular $[D]$ consiste en hacer el reemplazo

$$[G]^T [D] = [H] \quad (7-2)$$

con lo que la expresión 8-1 toma la forma

$$[G] [H] = [C_n] \quad (7-3)$$

En la expresión 7-3 los elementos de la matriz $[H]$ ($h_1, h_2, \dots, h_n$) pasan a tomar el lugar de incógnitas del problema. Estos elementos pueden ser obtenidos directamente del sistema de ecuaciones que la expresión 7-3 define. Si por ejemplo la matriz $[G]$ viene dada por

$$[G] = \begin{vmatrix} g_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{21} & g_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{32} & g_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{43} & g_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{54} & g_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_{65} & g_{66} \end{vmatrix} \quad (7-4)$$

el sistema de ecuaciones definido es:



(siguiente página)

$$g_{11}h_1 = C_{n1} \quad (7-5a)$$

$$g_{21}h_1 + g_{22}h_2 = C_{n2} \quad (7-5b)$$

$$g_{31}h_1 + g_{32}h_2 + g_{33}h_3 = C_{n3} \quad (7-5c)$$

$$g_{41}h_1 + g_{42}h_2 + g_{43}h_3 + g_{44}h_4 = C_{n4} \quad (7-5d)$$

$$g_{51}h_1 + g_{52}h_2 + g_{53}h_3 + g_{54}h_4 + g_{55}h_5 = C_{n5} \quad (7-5e)$$

$$g_{61}h_1 + g_{62}h_2 + g_{63}h_3 + g_{64}h_4 + g_{65}h_5 + g_{66}h_6 = C_{n6} \quad (7-5f)$$

De la expresión 7-5a se puede despejar y calcular directamente h_1 . Reemplazando este valor en la 7-5b se puede calcular a su vez h_2 y, por reemplazos sucesivos, pueden ser obtenidos el resto de elementos de $[H]$. En base a estos resultados, los elementos de la matriz de los desplazamientos se calculan de una manera análoga, resolviendo sistema de ecuaciones representado por la expresión 7-2, esto es:

$$g_{11}d_1 + g_{21}d_2 + g_{31}d_3 = h_1 \quad (7-6a)$$

$$g_{22}d_2 + g_{32}d_3 + g_{42}d_4 = h_2 \quad (7-6b)$$

$$g_{33}d_3 + g_{43}d_4 + g_{53}d_5 = h_3 \quad (7-6c)$$

$$g_{44}d_4 + g_{54}d_5 + g_{64}d_6 = h_4 \quad (7-6d)$$

$$g_{55}d_5 + g_{65}d_6 = h_5 \quad (7-6e)$$

$$g_{66}d_6 = h_6 \quad (7-6f)$$



En este caso, para calcular los elementos $d_1, d_2 \dots d_6$ de $[D]$, la sustitución de valores en el sistema se inicia desde la última ecuación. Como el primer elemento de $[D]$ que se calcula es el de mayor subíndice d_6 y el último calculado d_1 , el proceso recibe el nombre de 'sustitución inversa'.



7.2. Diagrama de Flujo

La sección del programa que efectúa el cálculo de los elementos de la matriz $[D]$, según el método descrito, se inicia en la línea 5000 y se identifica con la etiqueta '5. CALCULO DE LAS TRASLACIONES Y ROTACIONES DE LOS NUDOS'. El diagrama de flujo correspondiente se muestra en la figura 7-1 al final del capítulo.

7.3. Descripción del Procedimiento

Siguiendo el método indicado en la sección 7.1., se hacen los cálculos de sustitución directa para determinar los elementos de la matriz $[H]$. Los elementos de $[H]$ se almacenan en las mismas posiciones ocupadas por los elementos de la matriz de carga $[C_n]$ en el arreglo $[A]$ ya que estos no se vuelven a utilizar. A

continuación se efectúa el procedimiento de sustitución inversa, obteniéndose los valores de las N componentes de desplazamiento desconocidas, cuyos valores nuevamente se superponen en los elementos de $[A]$ indicados arriba. Finalmente, se imprimen nudo a nudo los resultados, transfiriendo al arreglo $[CGS]$ (usado aquí en forma auxiliar) los correspondientes valores almacenados en $[A]$. En detalle los pasos seguidos son los siguientes:

7.3.1. Cálculo del Elemento h_1

El primer elemento de $[H]$, e.g. h_1 , se despeja directamente de la ecuación 7-5a:

$$h_1 = C_{n1}/g_{11} \quad (7-5a')$$

C_{n1} y g_{11} están almacenados en los elementos $A(NM+1)$ y $A(1)$ respectivamente, por lo que en términos de las variables del programa la expresión equivalente es

$$A(NM+1) = A(NM+1)/A(1) \quad (7-7)$$

Después de ejecutarse esta instrucción, el elemento

$A(NM+1)$ almacenara el valor de h_1 .

7.3.2. Parámetros para Calcular los Elementos $h_2, h_3, \dots, h_n$

Los parámetros K_1 , K_2 y K_3 se utilizan para seleccionar los elementos del arreglo lineal $[A]$ que intervienen en el cálculo de los elementos $h_2, h_3, \dots, h_n$, pues tanto los elementos de $[C_n]$ como los de $[G]$ están almacenados en $[A]$.

Para cada elemento h_i , los parámetros indicados toman diferentes valores, controlando los procedimientos de cálculo que se explican en las dos siguientes secciones.

7.3.3. Sumatoria de los Términos Conocidos de la Ecuación

Conforme se puede observar en las expresiones 7-5, al efectuar el proceso de sustitución en cada ecuación se tiene una sola incógnita. Al calcular h_3 , por ejemplo, h_2 y h_1 han sido ya determinados, por tanto:

$$h_3 = \frac{c_{n3} - (g_{31}h_1 + g_{32}h_2)}{g_{33}} \quad (7-8)$$

En términos generales el elemento h_i estará dado por

$$h_i = \frac{c_{ni} - \sum_{j=1}^{j=i} g_{ij} h_j}{g_{ii}} \quad (7-9)$$



La sumatoria que aparece en la expresión 7-9 es calculada en el lazo iniciado por la instrucción FOR J=1 TO K3.

7.3.4. Cálculo de los Elementos $h_2, h_3, \dots, h_n$

Una vez determinada la sumatoria antedicha, cada elemento h_i se calcula con la instrucción

$$A(JR+1) = (A(JR+1) - SM) / A(ID) \quad (7-10)$$

$A(ID)$ representa al elemento g_{ii} de la expresión 7-9 y el valor $JR+1$ es igual subíndice del elemento de $[A]$ que contiene al elemento C_{ni} .

7.3.5. Proceso de Sustitución Inversa

El procedimiento de sustitución inversa, con el que finalmente se calculan los desplazamientos desconocidos, es análogo al de sustitución directa visto anteriormente, con la diferencia de que al usar la matriz $[G]^T$, que es triangular superior, la sustitución y el despeje de incógnitas empieza

por la última ecuación. Los comentarios referidos con los números 5121 a 5124 en el programa ET300 (apéndice A.4.) identifican claramente cada paso.

7.3.6. Asignación de Resultados para Impresión

Las componentes de desplazamientos calculadas, que corresponden a las de todos los nudos de la estructura, quedan almacenadas en los elementos $A(NM+1)$ a $A(NM+1+N)$. La relación entre componentes y nudos se establece a través del arreglo bidimensional $DESP\%$. Como se vio en el capítulo 4, el primer subíndice de cada elemento de $DESP\%$ representa al nudo al que corresponden las componentes, en tanto que el segundo (entre 1 y 6) indica la respectiva componente: traslaciones y rotaciones en X, Y y Z, en su orden.

La asignación de resultados se la hace mediante un lazo nudo a nudo. Para cada nudo se analizan los valores contenidos en el arreglo $DESP\%$. Si el valor de alguno de ellos es menor o igual a cero, significa que esa componente de desplazamiento es restringida y se pasa a revisar la siguiente componente. Si el valor de $DESP\%$ no es igual a

cero, a dicho valor se suma el de NM, obteniéndose el número del elemento de $[A]$ que contiene el valor de la correspondiente componente de desplazamiento. Este valor es transferido al elemento del arreglo $[CGS]$ (usado como auxiliar para impresión) que tiene el mismo subíndice de DESP%. Una vez analizadas las seis componentes de desplazamiento, la matriz $[CGS]$ es impresa y se pasa al siguiente nudo del lazo. El procedimiento se repite hasta que se imprimen los desplazamientos de todos los nudos.



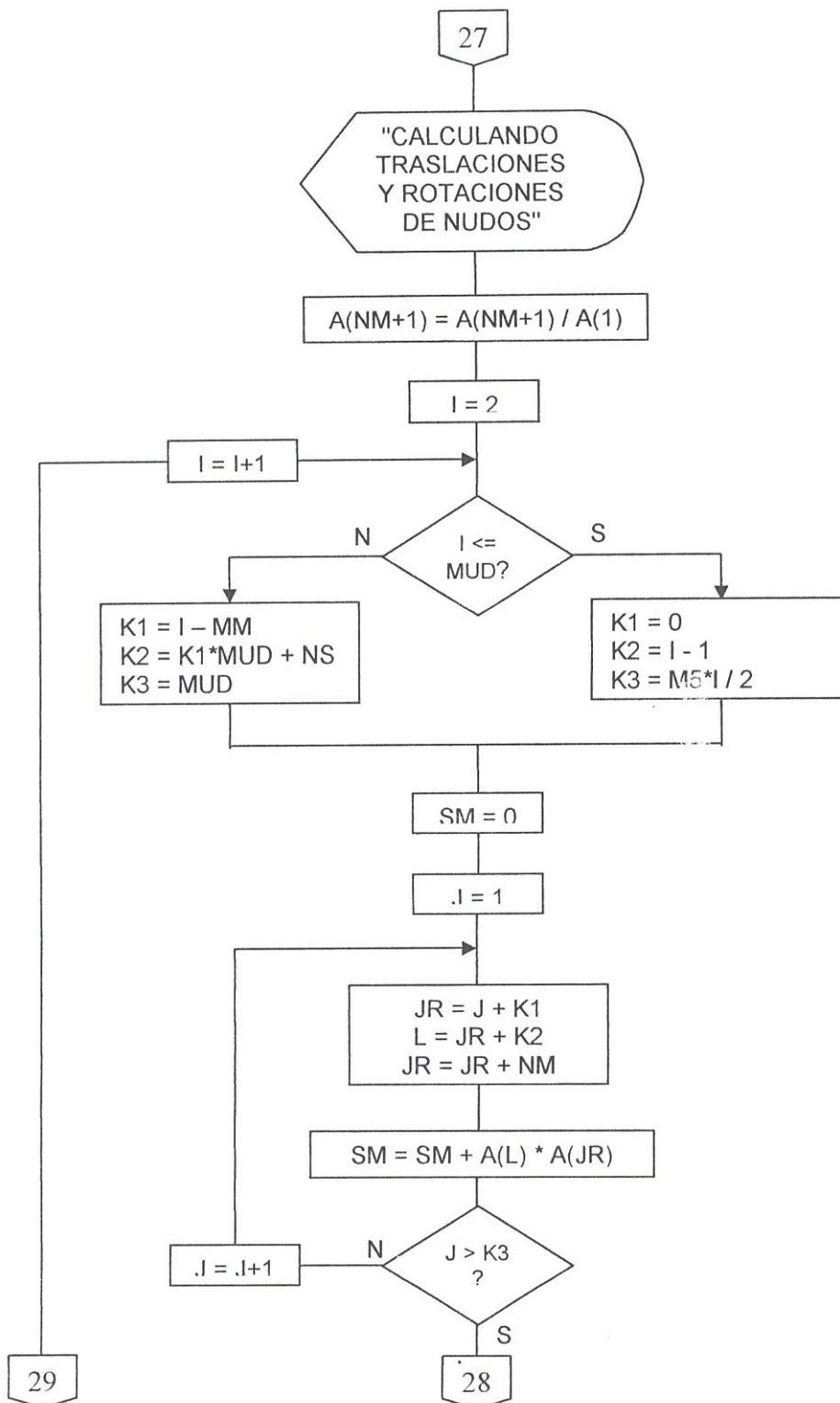


Fig. 7-1.- Diagrama de flujo de la sección del programa que calcula las componentes de desplazamiento libres de los nudos.

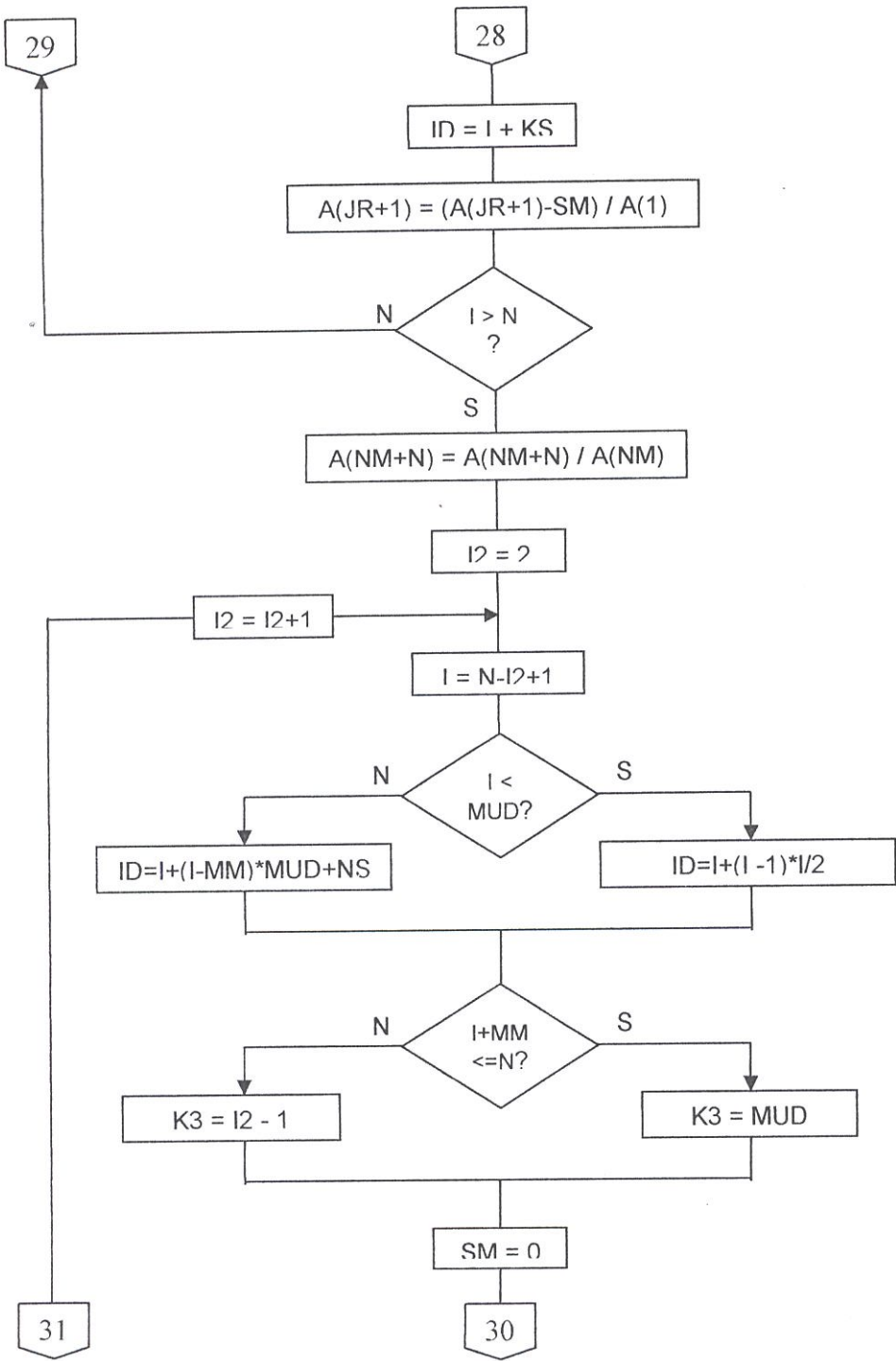


Fig. 7-1.- (Cont.)

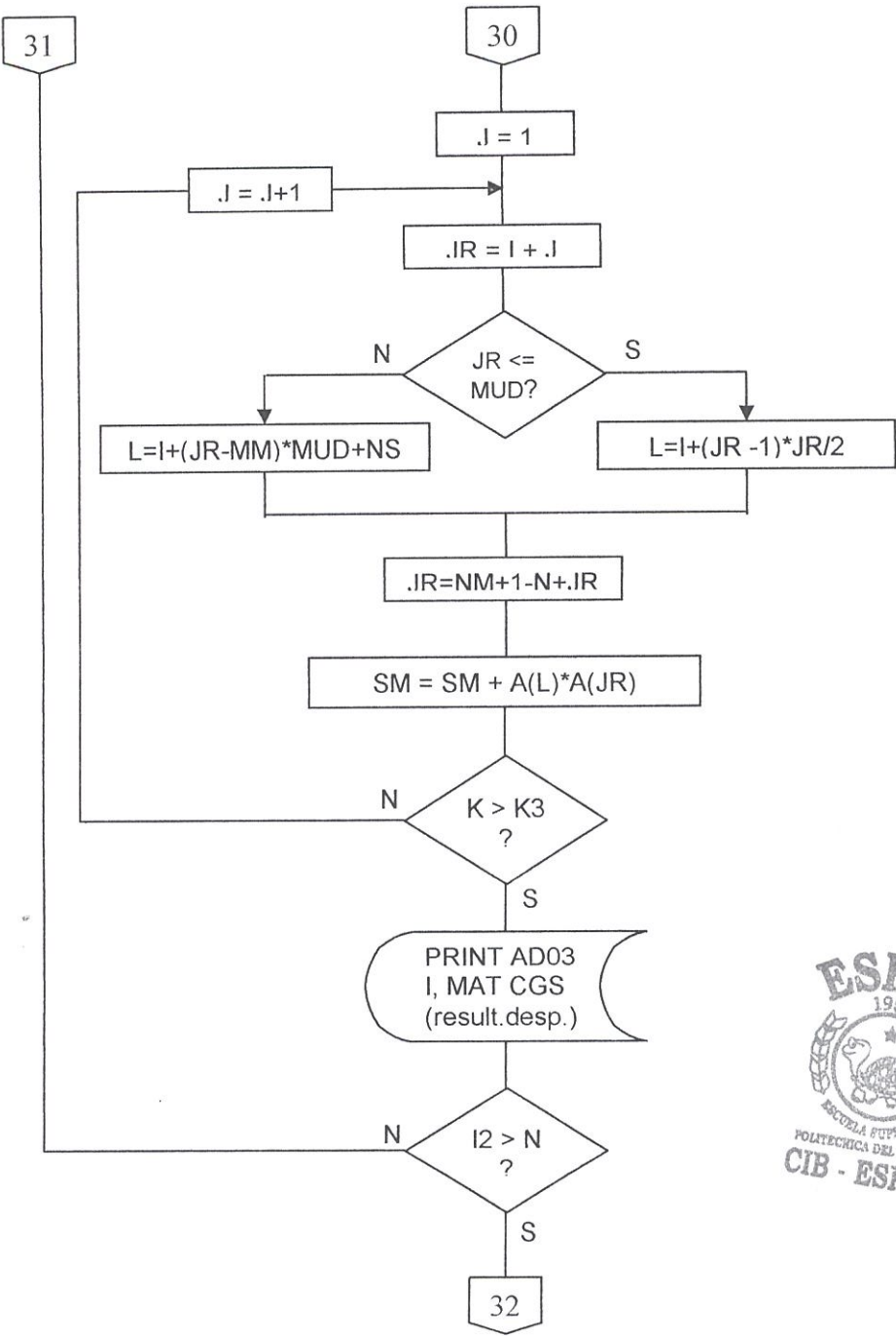


Fig. 7-1.- (Cont.)

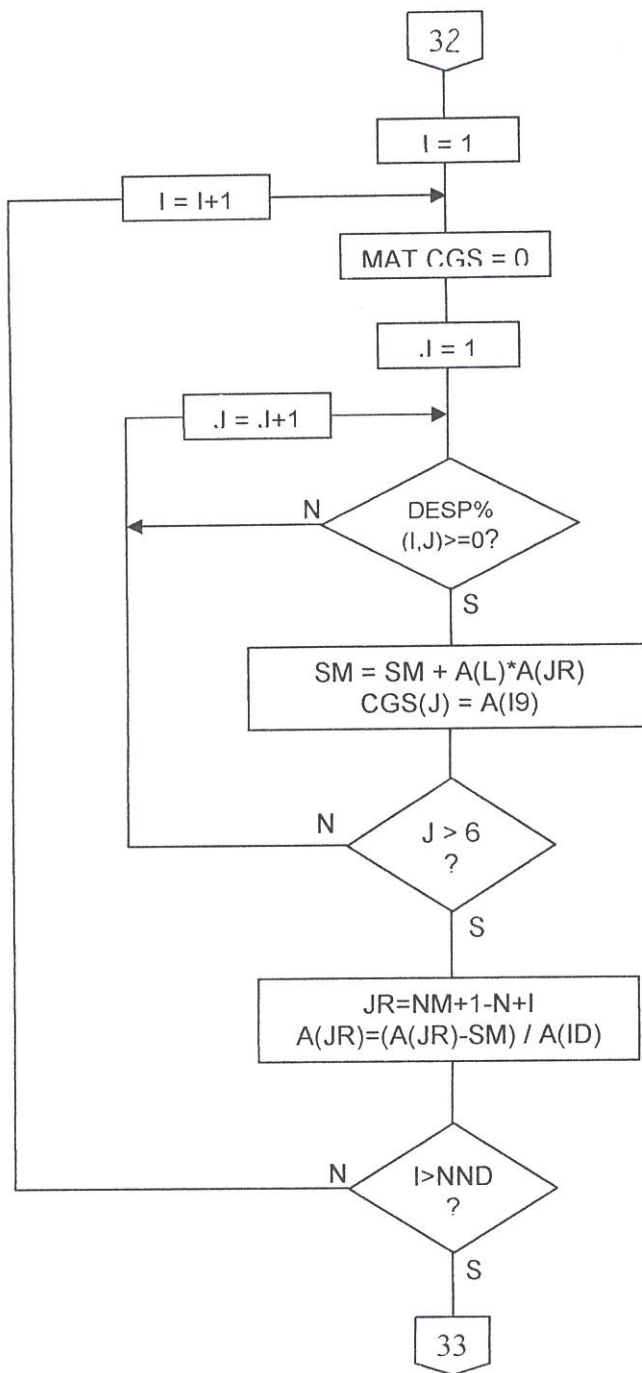


Fig. 7-1.- (Cont.)



CAPÍTULO 8

8. CÁLCULO DE LAS ACCIONES EN LOS MIEMBROS Y DE LAS REACCIONES EN LOS APOYOS

8.1. Acciones Finales en los Extremos de los Miembros

En el capítulo anterior se estableció la forma de calcular las componentes de desplazamiento libres de los nudos de la estructura. Conocidos esos valores se puede continuar con el siguiente paso del análisis, que es determinar las acciones finales en los extremos de cada miembro. Para un elemento representativo 'i', tales acciones se muestran en las figuras 8-1a y 8-1b para el sistema de referencia local $x_m-y_m-z_m$ y el general $X-Y-Z$. En forma matricial ambos grupos de acciones pueden ser representados por las expresiones 8-1 y 8-2, respectivamente (página 117).

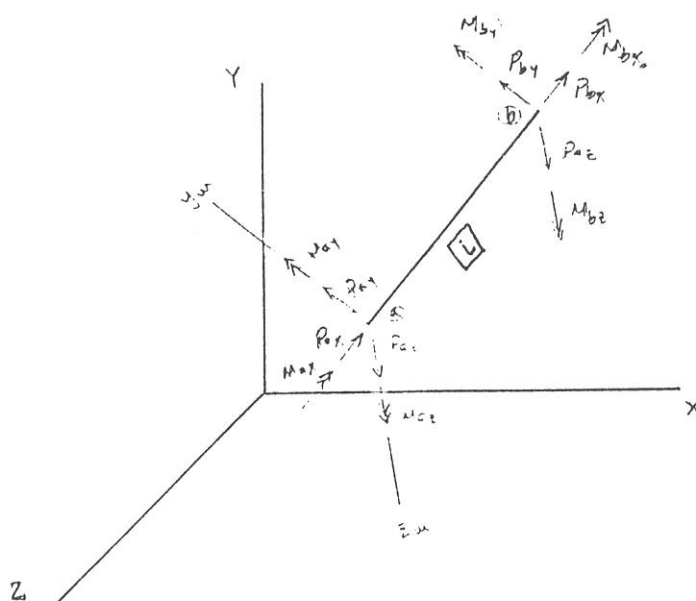


Fig. 8-1a. Acciones finales en extremos de un miembro "i", descompuestas en las direcciones de los ejes $x_m - y_m - z_m$ de las coordenadas locales.

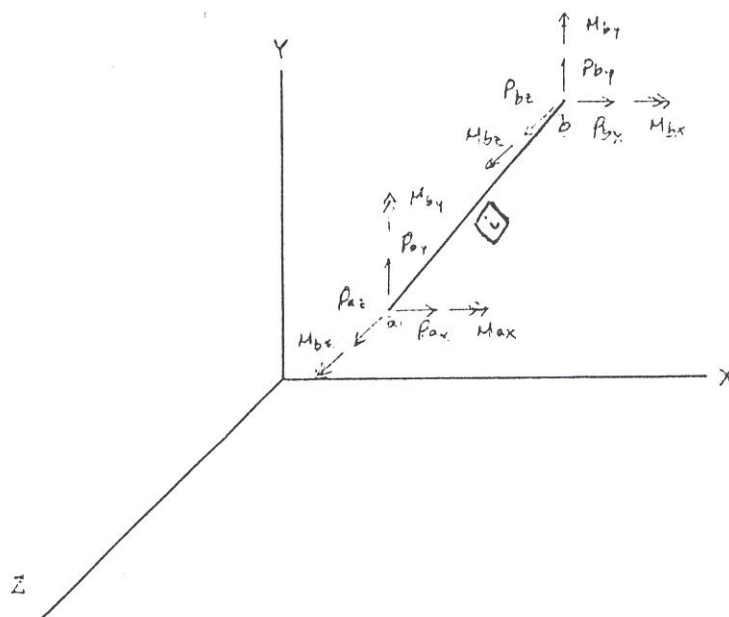


Fig. 8-1b. Acciones finales en los extremos de un miembro "i", descompuestas en las direcciones de los ejes $X-Y-Z$ de las coordenadas generales.

$$[M] = \begin{bmatrix} P_{ax} \\ P_{ay} \\ P_{az} \\ M_{ax} \\ M_{ay} \\ M_{az} \\ P_{bx} \\ P_{by} \\ P_{bz} \\ M_{bx} \\ M_{by} \\ M_{bz} \end{bmatrix} \quad (8-1)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} P_{ax} \\ P_{ay} \\ P_{az} \\ M_{ax} \\ M_{ay} \\ M_{az} \\ P_{bx} \\ P_{by} \\ P_{bz} \\ M_{bx} \\ M_{by} \\ M_{bz} \end{bmatrix} \quad (8-2)$$

Las acciones finales que se calculan en el programa son las correspondientes al sistema de referencia local, ya que con ellas se pueden determinar directamente los esfuerzos a los que está sometido cada miembro de la estructura. Dichas acciones, que se representan matricialmente por $[M]$, son calculadas superponiendo las acciones generadas por efecto de los desplazamientos de los extremos del miembro con las reacciones producidas por las cargas externas actuando en el miembro en condición de equilibrio cinemático, esto es:

$$[M]_i = [m]_i + [FM]_i \quad (8-3)$$

Los elementos de la matriz $[FM]_i$ pueden ser evaluados -según se vió en el capítulo 1-, en base al tipo de carga externa aplicada; los de la matriz $[m]_i$, en función de la matriz de rigidez $[K]_i$ y de la matriz de los desplazamientos de los extremos del miembro. $[D]$. Puesto que los desplazamientos obtenidos según el análisis del capítulo 7 están dados en el sistema de referencia general, usamos la transformación

$$[D] = [T] [D] \quad (8-4)$$

la cual reemplazamos en la expresión 8-3, obteniéndose que

$$[M]_i = [K] [T] [D] + [FM]_i \quad (8-5)$$

Aplicando la expresión 8-5 para cada uno de los miembros de la estructura, se determinan las respectivas acciones finales aplicadas en sus extremos.

8.2. Reacciones en los Apoyos

Los resultados anteriores pueden ser aprovechados para calcular

las reacciones en los nudos restringidos, evitando realizar el análisis rigidez completo de la estructura, lo que significaría incluir a las componentes de desplazamiento restringidas en un análisis similar al efectuado con las componentes libres. Como las reacciones se equilibran en cada apoyo con las acciones en los extremos miembros, en lugar de calcular dichas reacciones, lo que hace el programa es acumular el valor de las acciones aplicadas en cada nudo donde exista una reacción. El resultado es equivalente una vez que se han analizado todos los miembros.

8.3. Diagrama de Flujo

En la figura 8-2 se muestra el diagrama de flujo de esta sección del programa, la cual se inicia en la línea 6000 y tiene la etiqueta '6. ACCIONES EN LOS EXTREMOS DE LOS MIEMBROS Y REACCIONES EN LOS APOYOS'.

8.4. Descripción del Procedimiento

El cálculo de las acciones finales en los extremos de los miembros se realiza mediante un lazo que se repite para todos los miembros de la estructura. Al mismo tiempo que se van calculando las

acciones, aquellas que incidan el valor de alguna reacción de un apoyo de la estructura se acumula para después proceder a su clasificación y a la impresión de los valores totales de acuerdo a los nudos a los que correspondan.

8.4.1. Lectura de Datos

Del archivo AD04 se leen los datos correspondientes al miembro analizado. Los valores son asignados a las mismas variables listadas en el capítulo 3, sección 3.3.2.

8.4.2. Cálculo de los Desplazamientos en Coordenadas

Locales

Para calcular los desplazamientos en las coordenadas locales, según la expresión 8-4, se debe determinar primero la matriz de transformación $[T]$ del miembro, lo cual se hace invocando la subrutina TRANSFORM. Inmediatamente -por medio de un lazo-, se transfieren al arreglo auxiliar $[FMG]$ los valores ya calculados de las componentes de desplazamiento libre de los nudos tomados del arreglo $[A]$. Hecho esto se puede efectuar la operación matricial representada por la expresión 8-4 que, en términos de las variables del programa, toma la forma



$$\text{MAT DL} = \text{T} * \text{FMG} \quad (8-6)$$

8.4.3. Cálculo de las Acciones $[m]_i$

Los valores de $[m]_i$ se obtienen multiplicando la matriz de las componentes de desplazamiento del miembro en coordenadas locales $[DL]$ por la matriz del rigidez del miembro $[K]$ expresada en las mismas coordenadas. Para el efecto, se determina primeramente $[K]$ mediante la subrutina MATRIZ y se efectúa a continuación el producto matricial de $[K]$ y $[DL]$.

8.4.4. Cálculo de las Acciones Finales $[M]$

No se pueden obtener directamente las acciones finales en los miembros mediante una suma matricial, como lo indica la expresión 8-3, por cuanto las acciones debidas a las cargas en los miembros están en el arreglo bidimensional $[ACC]$. Lo que se hace es ejecutar un lazo en el que se toman de $[ACC]$ aquellas acciones que corresponden al miembro considerado. Al mismo tiempo, dentro de ese lazo, elemento a elemento se efectúa la suma con la matriz $[m]$. Los momentos torsores y flectores de ambos extremos se dividen para 12 a fin de que queden expresados en Kips-P.

8.4.5. Reacciones en los Nudos Restringidos

Obviamente, las reacciones en los nudos restringidos de la estructura deben darse en el sistema de referencia general X-Y-Z. Por esta razón, las acciones finales que se acumulan para calcular las reacciones, deben ser dadas en este sistema de referencia. La conversión de sistemas de referencia se hace mediante el producto matricial de la transpuesta de la matriz de transformación $[T]^T$ por la matriz de las acciones finales del miembro en coordenadas locales $[M]$.

Seguidamente, se verifica si los extremos del miembro están conectados a nudos con componentes de desplazamiento restringidas; de ser así, los elementos de $[M]$ que corresponde a las restricciones son acumulados en las posiciones del arreglo $[A]$, especialmente dimensionadas para este efecto (elementos con subíndices comprendidos entre $NM+N+1$ y $NM+N+N2$). La adecuada posición en $[A]$ es función de los valores especificados en el arreglo $[D\%]$.

Finalmente, con un lazo que se ejecuta para todos los nudos, se imprimen las reacciones de aquellos que

presentan componentes de desplazamiento restringidas.

Terminado este procedimiento, toda la información requerida del análisis, ha sido establecida y registrada en el archivo AD03, quedando lista para su revisión e impresión.



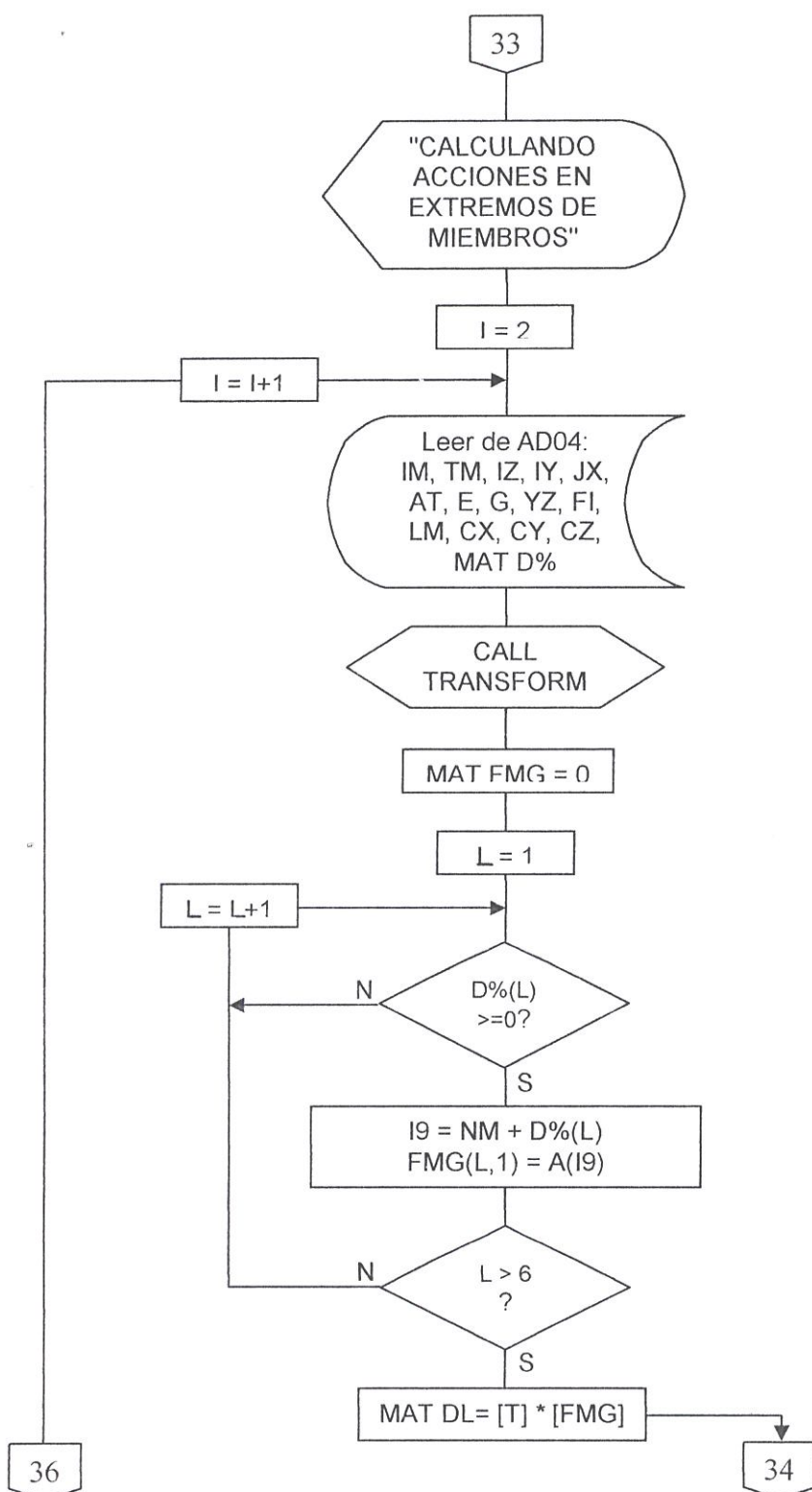


Fig. 8-2.- Diagrama de flujo de la sección del programa que calcula las acciones finales en los extremos de los miembros y las reacciones en apoyos

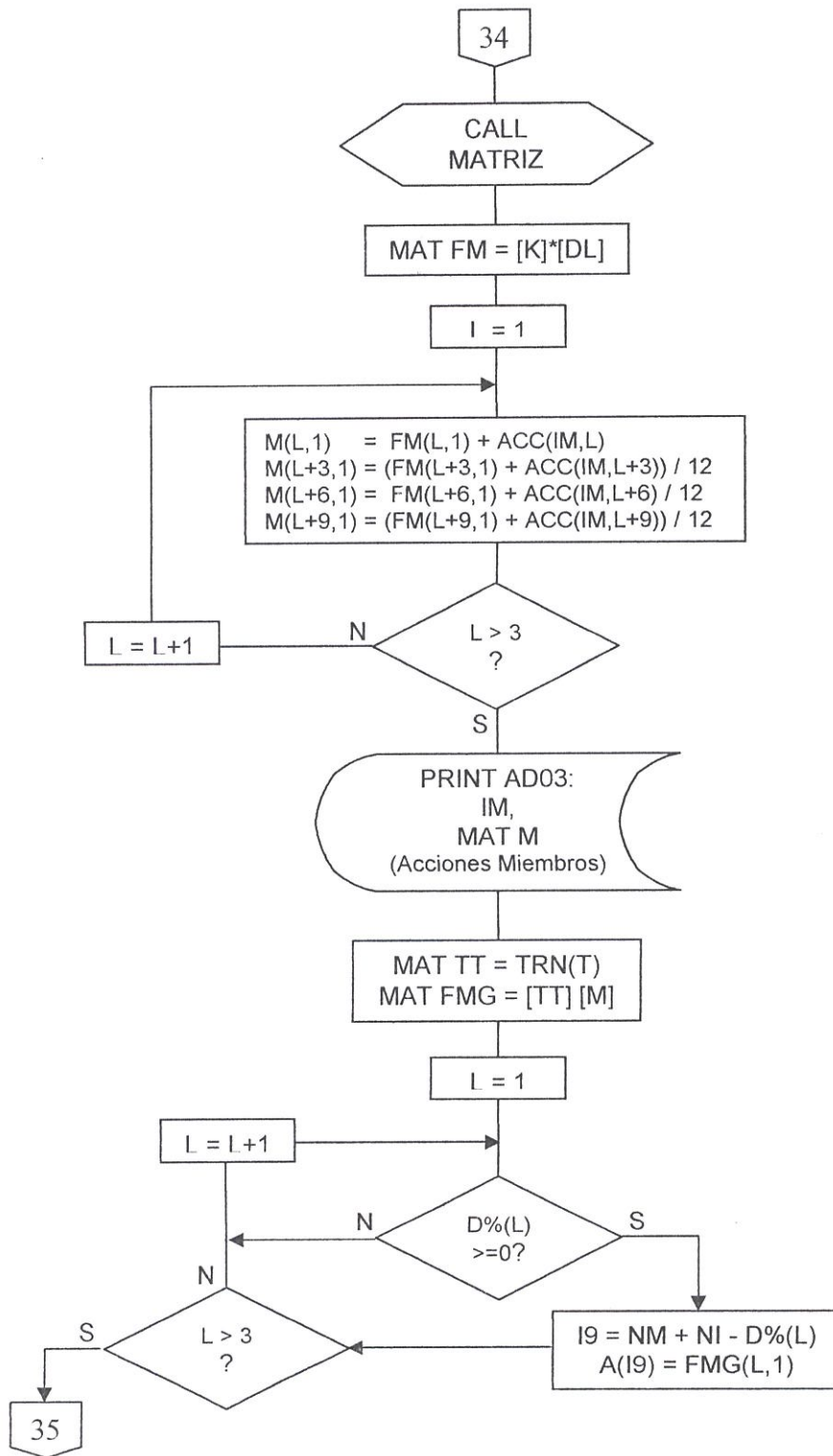


Fig. 8.2.- (Cont.)

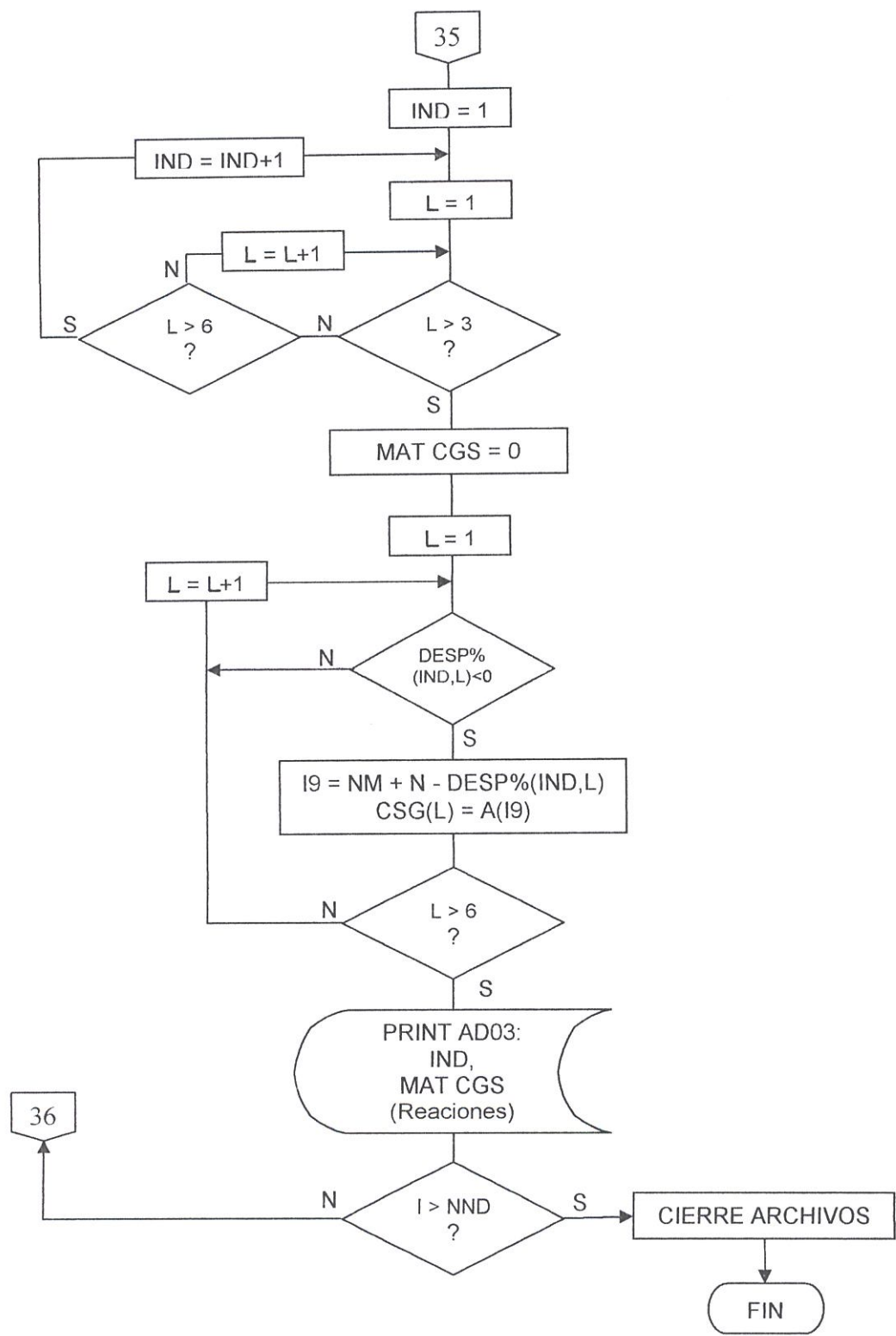


Fig. 8-2.- (Cont.)

CAPÍTULO 9

9. INSTRUCCIONES PARA EL USUARIO

9.1. Introducción

El programa "ET" permite analizar una estructura en tres dimensiones sometida a varias condiciones de carga, proporcionando como resultado las traslaciones y rotaciones de sus nudos, las fuerzas y momentos en los extremos de sus miembros y las reacciones producidas en los apoyos. Los miembros de la estructura deben ser prismáticos y de sección simétrica respecto a sus ejes transversales mayor y menor.

Como datos de entrada, el programa requiere información respecto a la geometría de la estructura, a las propiedades mecánicas de sus miembros y a las condiciones de carga

aplicadas. El límite de datos que el programa puede procesar es el siguiente:

- No. máximo de Miembros 9999
- No. máximo de Nudos 999
- No. máximo de condiciones de carga 9
- No. máximo de apoyos 999

El programa utiliza unidades de medida métricas de manera estándar. Eventualmente se puede solicitar a "Cesercomp" ejecutar una versión en unidades inglesas.

Cualquier usuario del sistema IBM 4341 de "Cesercomp", con la autorización de la Facultad de Ingeniería Mecánica, puede tener acceso al uso del programa ET. Se requiere que el usuario posea un conocimiento básico de las características del terminal del S/4341 y del sistema operativo VM/SP CMS.

9.2. Consideraciones Generales Sobre la Preparación de los Datos de Entrada

Antes de ingresar los datos requeridos para la ejecución del

programa, éstos deben ser preparados de una manera conveniente, atendiendo las observaciones que a continuación se hacen.

9.2.1. Sistema de Referencia General

El primer paso en la preparación de datos es determinar un sistema de referencia general que sirva tanto para proporcionar la Información al programa, como para interpretar los resultados del análisis. Como en este sistema de referencia hay que especificar el valor de las coordenadas de los nudos, se lo debe escoger adecuadamente ya que algunos sistemas pueden ser más convenientes que otros para el efecto. Por ejemplo, para la estructura de las figuras 9-1a y 9-1b, el sistema de referencia indicado en la figura b facilita la determinación de las coordenadas por la simetría de la estructura respecto al eje 'Y'.

9.2.2. Optimización de la Numeración de los Nudos

Los nudos de la estructura se numeran secuencialmente a partir del '1'. Se acostumbra identificarlos en el esquema de la estructura escribiendo junto a cada nudo el número que le

corresponde encerrado en un círculo. Aunque esta numeración es arbitraria, es muy importante tratar de minimizar la diferencia entre los números asignados a los extremos de un mismo miembro puesto que de esta diferencia depende la cantidad de memoria que necesitará el programa para su ejecución. Revisando nuevamente las figuras 9-1a y 9-1b, se puede observar que, de acuerdo con este criterio, en el segundo caso se ha efectuado una mejor numeración de los nudos.

9.2.3. Numeracion de los Miembros

Los miembros se numeran también en forma secuencial a partir de '1'. Para distinguirlos de los nudos, en el grafico de la estructura se los identifica escribiendo junto a cada uno de ellos su respectivo número encerrado en un cuadro. Se diferencian además los extremos del miembro, designando a uno de ellos como extremo inicial o de origen y al otro como extremo final. Al primero se lo denota con la letra 'a' y al segundo con la 'b', tal como se puede apreciar en la figura 9-2.



Fig. 9-1a.- El sistema de referencia elegido para esta estructura plana tiene como origen el nudo 4. De acuerdo a la numeración de los nudos, la máxima diferencia entre ellos se da en los miembros horizontales, siendo esa diferencia igual a 4.

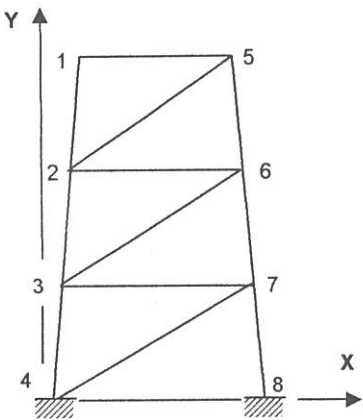


Fig. 9-1b.- Para la misma estructura, el sistema de referencia en este caso tiene origen en la mitad de la distancia entre los nudos 7 y 8. Por la nueva numeración de los nudos, la máxima diferencia numérica es 2. Esto optimiza el procesamiento de datos..

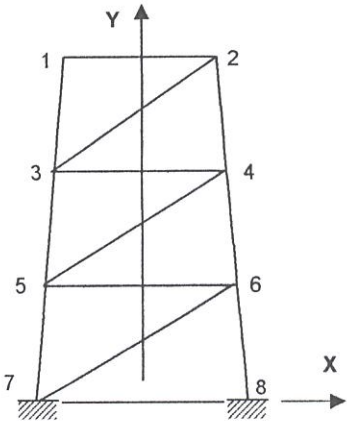


Fig. 9-2.- La estructura de la figura anterior con la numeración de los miembros y con los lados 'a' y 'b' asignados a cada uno de ellos.

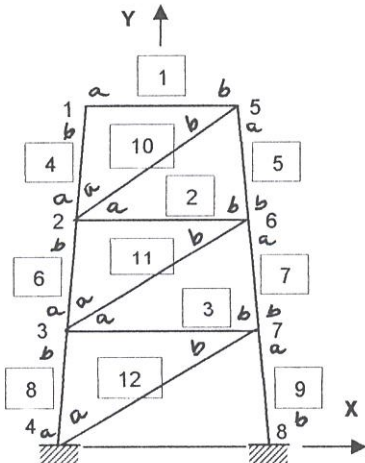


Fig. 9-3. Vector asociado a un miembro en el espacio.

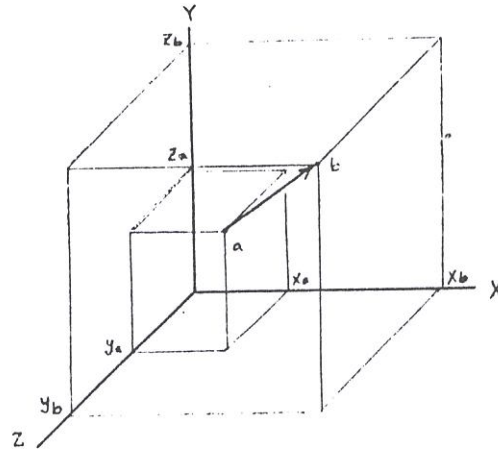
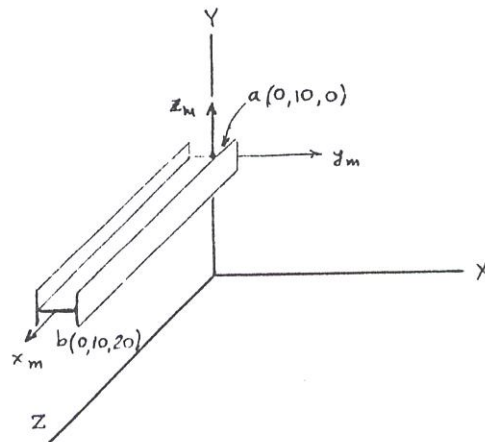
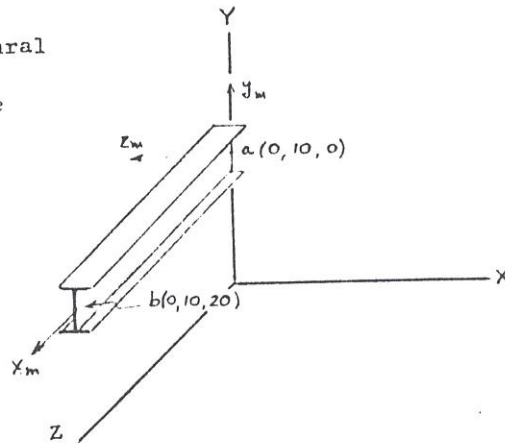


Fig. 9-4. Perfil estructural orientado en el espacio con el plano principal de carga paralelo al plano Y-Z (a).

(b) El mismo perfil estructural, pero con el plano principal de carga paralelo al plano X-Z.



9.2.4. Sistemas de Referencia Locales

Para cada miembro se define un sistema de referencia particular x_m - y_m - z_m que permite definir su posición en el espacio. Este sistema sirve además para especificar la información de las eventuales cargas externas aplicadas en el miembro, y es el marco de referencia en el cual se expresan las fuerzas y momentos que actúan en sus extremos, los cuales son calculados por el programa al realizar el análisis de la estructura.

El sistema de referencia particular o local se define de manera que su origen coincida con el extremo de origen del miembro, con su eje neutro dispuesto a lo largo del eje x_m y con su plano principal de carga coincidiendo con el plano x_m - y_m .

9.2.5. Miembros en el Espacio: Ángulo de Rotación

Es posible determinar la orientación de un miembro en el espacio basándose en los cosenos directores asociados a un vector con origen en el extremo 'a' y apuntando hacia el extremo 'b' (fig. 9-3). Si X_a , Y_a , Z_a y X_b , Y_b , Z_b son las coordenadas de los extremos 'a' y 'b' del miembro,

respectivamente, entonces, como se vió en el capítulo 1, dichos cosenos directores son

$$C_X = \frac{X_b - X_a}{L_m} \quad (9-1a)$$

$$C_Y = \frac{Y_b - Y_a}{L_m} \quad (9-1b)$$

$$C_Z = \frac{Z_b - Z_a}{L_m} \quad (9-1c)$$

donde

$$L_m = \sqrt{(X_b - X_a)^2 + (Y_b - Y_a)^2 + (Z_b - Z_a)^2} \quad (9-2)$$

es la longitud del miembro.

De la inspección de la figura 9-4, se deduce que es necesaria información adicional para definir completamente la disposición del miembro en el espacio. En las figuras 9-4a y 9-4b se muestra el mismo perfil estructural, observándose

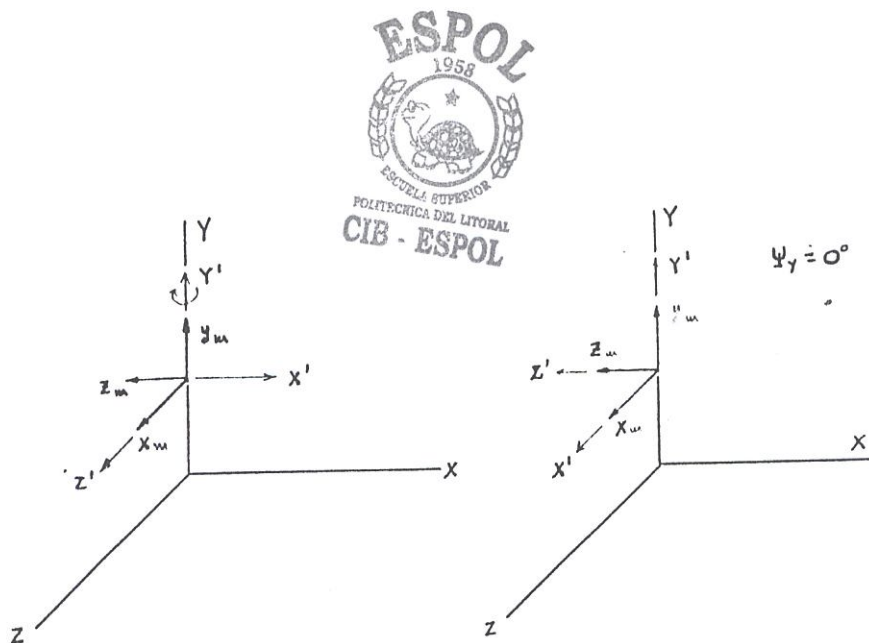


Fig. 9-5. Traslación del sistema de referencia general $X-Y-Z$ hasta hacer coincidir su origen con el sistema de referencia particular del miembro de la figura 9-4a (b) Rotación del sistema trasladado $X'-Y'-Z'$, haciendo coincidir los ejes X' y x_m . El ángulo $\Psi_Y = 0^\circ$ ya que Y' y y_m tienen la misma dirección y sentido (de la misma manera que Z' y z_m).

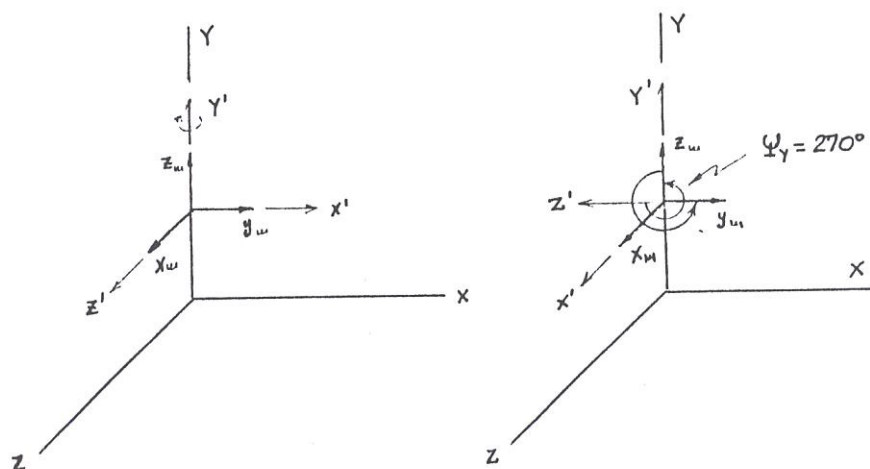


Fig. 9-6. (a) Traslación del sistema de referencia general $X-Y-Z$ haciendo coincidir su origen con el del sistema de referencia particular del miembro de la figura 9-4b (b) Rotación del sistema trasladado, haciendo coincidir los ejes X' y x_m . Por inspección $\Psi_Y = 270^\circ$.

que aunque en ambos casos las coordenadas de sus extremos -e.g. sus cosenos directores- son iguales, la disposición del miembro en el espacio no es la misma.

La información adicional requerida se formula en términos de la posición relativa de los sistemas de referencia local del miembro $x_m-y_m-z_m$ y general de la estructura $X-Y-Z$. Para el efecto se define un ángulo Ψ , denominado **ángulo de rotación del miembro**, el cual se determina trasladando primeramente el sistema de referencia general $X-Y-Z$ hasta hacer coincidir su origen con el del sistema de referencia particular $x_m-y_m-z_m$. Se procede luego a hacer rotar el sistema de referencia trasladado $X'-Y'-Z'$, primero alrededor de su eje Y' y luego del eje Z' , o viceversa, hasta que coincidan en dirección y sentido los ejes X' de ambos sistemas. En el caso que estamos analizando, una rotación alrededor del eje Y' es suficiente para hacer coincidir los ejes X' y x_m . Las figuras 9-5 y 9-6 muestran las traslaciones y rotaciones para los casos de las figuras 9-4a y 9-4b respectivamente. Se define a Ψ como el ángulo entre los ejes Y' y y_m o Z' y z_m , medido en sentido contrario a las manecillas del reloj, cuando se observa al miembro desde



su extremo 'b' hacia su extremo 'a'. En las figuras indicadas se observa que para el primer caso $\Psi = 0^\circ$ (tanto Y' y y_m como Z' y z_m coinciden), mientras que para el segundo caso $\Psi = 270^\circ$.

Esta definición de Ψ es general, aunque el procedimiento seguido en la rotación de ejes no siempre se pueda realizar en forma tan directa. En la sección 9-10 se presentan varios casos ilustrativos.

El orden seguido en la rotación de ejes tiene especial importancia al determinar Ψ . Cuando la rotación se la inicia alrededor del eje Y' se dice que se efectúa una transformación $Y-Z-X$, añadiéndose a Ψ el subíndice Y' . Para una rotación de ejes que se inicia alrededor del eje Z' , el ángulo de rotación se especifica como Ψ_Z y la transformación realizada se la denomina $Z-Y-X$; en general, Ψ_Y y Ψ_Z no son iguales. En estas transformaciones es irrelevante el valor de los ángulos rotados alrededor de los ejes Y' o Z' , así como tampoco interesa si después de la primera rotación, al coincidir los ejes X' y x_m , es innecesaria

una ulterior rotación alrededor del otro eje.

9.3. Pasos Preliminares

El primer paso de una sesión de trabajo consiste, obviamente, en conectarse con el sistema. El procedimiento normal es el siguiente:

1. Encienda el terminal.

En la pantalla del terminal aparece el logotipo
ESPOL-CESERCOMP.

2. Presione la tecla "ENTER" e ingrese su identificación de usuario. Por ejemplo: L U40100 (de "Enter").

Aparece el mensaje
ENTER PASSWORD:

3. Ingrese los cuatro caracteres su clave personal de identificación y presione la tecla "ENTER".

Aparecen una serie de mensajes de inicialización.

4. Cada vez que en la parte inferior derecha de la pantalla aparece el mensaje "MORE CESERCOMP...", presione simultáneamente las teclas "ALT" y "CLEAR".

Después de salir la pantalla que indica el 'status del usuario', al dar ALT CLEAR aparece un mensaje final de inicialización en la forma

DASD 222 DETACHED

R; T=0.15/0.44 10:21:06

En este momento el sistema queda listo para trabajar.

9.4. Procedimiento para el Ingreso de Datos

Los datos requeridos para el análisis de una estructura son ingresados a través de dos archivos que se crean y accesan automáticamente durante la ejecución del programa. Ambos archivos se construyen en forma de tablas, en las que los campos para ingresar los datos están inicializados con ceros, como se puede apreciar en las figuras 9-7 y 9-8 . En el primer archivo se

ingresan los datos generales de la estructura y, en el segundo, los datos específicos de nudos, miembros y cargas. Este segundo archivo incluye además, tablas con espacio reservado para registrar los resultados del análisis. El tamaño del segundo archivo es variable, ya que las tablas que contiene se dimensionan de acuerdo al número de componentes de la estructura. En el ejemplo de la figura 7-8 el program lo ha dimensionado automáticamente en base a la información inicial del archivo AD02, esto es: 3 miembros, 4 nudos y 2 condiciones de carga.

Para ingresar los datos el "cursor" debe ser movido a cada uno de los campos definidos, digitando sobre los ceros iniciales mostrados en la tabla, los valores que correspondan. No es necesario seguir ningún orden al digitar los datos dentro de un archivo y cualquier valor puede ser corregido rescribiendo sobre el mismo el nuevo valor. Lo único que es importante tener en cuenta, es que se debe respetar el perfecto encolumnamiento de los campos, pues de lo contrario se producirán errores de ejecución.

Como en la pantalla solo pueden observarse 20 líneas con 80 caracteres cada una, no es posible visualizar todo el contenido de un archivo de una sola vez. Para poder manipular el archivo con

ANALISIS DE ESTRUCTURAS

=====

PROYECTO
DESCRIPCION
FECHA
POR

=====

CERCI

DATOS GENERALES

1. NUMERO DE MIEMBROS	0000
2. NUMERO DE NUCCS	000
3. NUMERO DE CONDICIONES DE CARGA	0
4. NUMERO DE APCYGS	000

DATOS DE LAS CONDICIONES DE CARGA

COND. NC.	CANT. DE NUCCS CARGADOS	CANT. DE CARGAS EN MIEMBROS
----	-----	-----
1	CCC	0000
2	CCC	0000
3	CCC	0000
4	CCC	0000
5	CCC	0000
6	CCC	0000
7	CCC	0000
8	CCC	0000
9	CCC	0000

NOTA SOLAMENTE LLENE LOS CAMPOS CORRESPONDIENTES
AL NUMERO DE COND. DE CARGA INDICADO.

FIG. 5-7.- ARCHIVO ADO2

ANALISIS DE ESTRUCTURAS

PROYECTO

TESIS DE GRADO DE R.N.S.

DESCRIPCION

PROBLEMA DE EJEMPLO

FECHA

FEB 20/95

PGR

R.N.

RANS

DATOS GENERALES

3 MIEMBROS * 4 NUDOS * 2 COND. DE CARGA

DATOS DE NUDOS

NUDO NO.	COORDENADAS			RESTRICCIONES					
	X (M)	Y (M)	Z (M)	TRASL.			ROTAC.		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0
2	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0
3	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0
4	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0

DATOS DE MIEMBROS

MIEMBRO NO. TIPO A	LADO	MOM. DE INERCIA		CTE. Y-Y (CM4)	TORS. (CM4)	AREA (CM2)	MODULOS E (T/CM2)	ROTACION TIPC ANG- (O/1)(GRS)	LONG. (P)
		X-X (CM4)	Y-Y (CM4)						
1	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
2	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
3	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0

CONDICION DE CARGA NO. 1

(COMENT.)

DATOS DE CARGA EN NUDOS - CONDICION NO. 1

NUDO NO.	FUERZA-X (TCNS)	FUERZA-Y (TCNS)	FUERZA-Z (TCNS)	MOMENTO-X (TCN-M)	MOMENTO-Y (TCN-M)	MOMENTO-Z (TCN-M)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

DATOS DE CARGA EN MIEMBROS - CONDICION NO. 1

MBRO. NR.	CARGA PUNTUAL-KIP	DISTRIBUCION ORIGIN	ANG. PLANO DE CARGA
	DIST.-TON/M	(M)	(GRS) CARGA

Fig. 9-8.- Archivo en blanco para ingresar datos de problema ejemplo

C 0.00 0.00 0.00 0.00 0

RESULTADOS COND. DE CARGA NC. 1

DEFLEXIONES Y ROTACIONES

NUDC NO.	DEFL.X (CM)	DEFL.Y (CM)	DEFL.Z (CM)	ROTAC.X (RAD)	ROTAC.Y (RAD)	ROTAC.Z (RAD)
----------	-------------	-------------	-------------	---------------	---------------	---------------

1
2
3
4

ACCIONES EN EXTREMOS DE LOS MIEMBROS

MBRG. NO.	FUERZAS EN LADO A			FUERZAS EN LADO B			MOMENTOS EN LADO B		
	(TONS)			(TONS)			(TONS-MT.)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z

1
2
3

REACCIONES

NUDC NO.	FUERZA-X (TONS)	FUERZA-Y (TONS)	FUERZA-Z (TONS)	MOMENTO-X (TON-M)	MOMENTO-Y (TON-M)	MOMENTO-Z (TON-M)
----------	-----------------	-----------------	-----------------	-------------------	-------------------	-------------------

C
C
C

CONDICION DE CARGA NC. 2



DATOS DE CARGA EN MIEMBROS - CONDICION NC. 2

MBRG. NR.	CARGA PUNTUAL-KIP	DISTRIBUCION ORIGIN (H)	FIN (P)	ANG. PLANO DE CARGA (GRS)
-----------	-------------------	-------------------------	---------	---------------------------

C 0.00 0.00 0.00 0.00 0
C 0.00 0.00 0.00 0.00 0
C 0.00 0.00 0.00 0.00 0

Fig. 9-8.- (Cont.)

RESULTADOS COND. DE CARGA NO. 2
=====

DE FLEXIONES Y ROTACIONES

NUDO NO.	DEFL. X (CM)	DEFL. Y (CM)	DEFL. Z (CM)	ROTAC. X (RAD)	ROTAC. Y (RAD)	ROTAC. Z (RAD)
1						
2						
3						
4						

ACCIONES EN EXTREMOS DE LOS MIEMBROS

MEMBRO NO.	FUERZAS EN LADO A			MOMENTOS EN LADO A			FUERZAS EN LADO B			MOMENTOS EN LADO B		
	(TONS)			(TONS-MT.)			(TONS)			(TONS-MT.)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1												
2												
3												
4												

REACCIONES

NUDO NO.	FUERZA-X (TONS)	FUERZA-Y (TONS)	FUERZA-Z (TONS)	MOMENTO-X (TON-M)	MOMENTO-Y (TON-M)	MOMENTO-Z (TON-M)
1						
2						
3						
4						

Fig. 9-8.- (Cont.)

el fin de llenar las tablas de datos, se pueden utilizar las teclas de 'funciones predefinidas' PF, las cuales deben ser activadas por el usuario como primer paso al acceder a un archivo. Para el efecto, en la línea de comandos (parte superior de la pantalla) se debe digitar:

==> PFN

y a continuación dar "ENTER". Inmediatamente las teclas se activan y aparece un encabezado en la pantalla en el cual se indica la función que realiza cada una. Las funciones definidas son:

PF1=IZQ.<--20	Mueve la pantalla 25 columnas a la izquierda.
PF2=DER.-->20	Mueve la pantalla 25 columnas a la izquierda.
PF3=QUIT	Suspende la ejecución del programa.
PF5=PREV.LIN.	Retrocede una línea en el archivo.

PF6=SGTE.LIN.	Adelanta una línea en el archivo.
PF7=PREV.PAG.	Mueve la pantalla a la `pagina' anterior del archivo, esto es, retrocede 20 líneas
PF8=PAG.SGTE.	Mueve la pantalla a la siguiente pagina del archivo.
PF10=RPT	Repite la ejecución del programa de análisis después de corregir algún error de ejecución
PF11=CONTINUE	Continúa con la ejecución del programa. Este comando debe darse después de verificar que todos los campos para datos en el archivo han sido correctamente llenados.
PF12=PRINT	Ordena la impresión del archivo

Los usuarios familiarizados con los comandos del editor del sistema operativo pueden hacer uso de la línea de comandos, que

se traslada a la parte inferior de la pantalla después de activar las teclas de funciones.

9.5. Inicio de la Ejecución del Programa e Ingreso de Datos

Generales

Para iniciar la ejecución del programa, después de haber efectuado los pasos preliminares, simplemente digite:

ET (de "Enter")

El contenido de la pantalla se borrará y aparecerá el archivo para ingreso de datos generales.

A continuación active las teclas de funciones en la forma indicada en la sección anterior, e.g. digitando en la línea de comandos:

==> PFN (de "Enter")

La pantalla quedará como se muestra en la figura 9-8 con la información respecto a las funciones que realizan de las teclas PFN.



A partir de este momento se puede empezar el ingreso de los datos generales de la estructura. Con el propósito de explicar mas claramente el ingreso de datos, se usara a manera de ejemplo la estructura de la figura 9-9 que esta formada por 3 miembros y 4 nudos. Se la analizara para las dos condiciones de carga indicadas (figs. 9-9a y 9-9b).

Los datos generales a ingresar son: número de miembros, número de nudos y numero de condiciones diferentes de carga. Respecto a este último dato se debe aclarar que si se quiere analizar, por ejemplo, el comportamiento de una estructura bajo la acción independiente de la carga que soporta y de las fuerzas de viento, y además, bajo ambas acciones combinadas, se tienen tres condiciones diferentes de carga. Para cada una de ellas habrá un conjunto de resultados, e.g. desplazamientos de nudos, acciones en miembros y reacciones en apoyos. En este caso, los resultados de la tercera condición de carga serán la superposición de los de las dos primeras.

En general, no se puede afirmar que una estructura con un número de componentes igual o cercano a los máximos indicados arriba, podrá ser procesada con la cantidad de memoria asignada

al usuario. Esto se debe a que la magnitud de la memoria necesaria para la ejecución del programa puede variar significativamente en función de la forma de numeración de los nudos, como se explicó en la sección anterior. Si, a pesar de una numeración optimizada, la memoria disponible resulta insuficiente o, si de antemano se sospecha que ocurrirá tal situación, es posible obtener del sistema una mayor asignación de memoria antes de iniciar la ejecución del programa mediante el comando CMS "DEF STOR nnM".

Para identificar cada estructura analizada se ha previsto en el archivo de datos generales un encabezado en el que pueden digitarse caracteres alfanuméricos. En caso del ejemplo puede ser llenado de la siguiente manera:

PROYECTO :<TESIS DE GRADO DE R.N.S. >

DESCRIPCION :<PROBLEMA EJEMPLO >

FECHA :<FEB 20/85>

POR :<R.N. >

En la misma página del archivo se ingresa el número de miembros, nudos, apoyos y condiciones de carga. Para el ejemplo

los datos quedaran en la forma indicada en la figura 9-10. Es importante tener en cuenta que los valores deben escribirse marginados a la derecha. Las siguientes son formas **erróneas** de ingresar estos datos:

NUMERO DE MIEMBROS	< 3 >
NUMERO DE NUDOS	<4 >

Continuando en la siguiente página, para cada condición de carga ingrese el número de nudos cargados y el número de cargas diferentes que actúan sobre miembros. Debe estar bien claro que sobre un nudo cargado pueden estar actuando hasta 6 componentes de carga (3 de fuerza y 3 de momento respecto a X-Y-Z) y se contará como uno solo; pero para un miembro sobre el que actúan dos o mas tipos de carga al mismo tiempo (por ejemplo una en su plano xm-ym y otra en el xm-zm o, una puntual y una distribuida), se contará el numero de estas cargas. En el caso del ejemplo, los datos se llenaran como lo indica la figura 9-10. El programa no toma en cuenta datos ingresados en campos más allá de los que correspondan al número de condiciones de carga especificados.

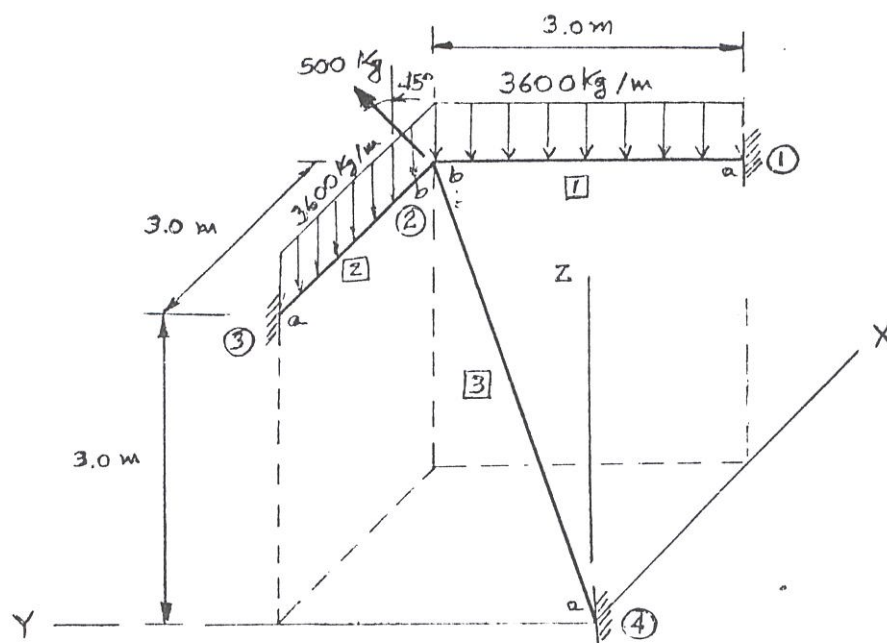


Fig. 9-9a. Estructura tridimensional tomada como ejemplo para explicar la aplicación del sistema. Los planos x_m-y_m de los sistemas de referencia particulares de todos los miembros son perpendiculares al plano X-Y. En esta condición de carga la fuerza en el nudo 2 es paralela al plano Y-Z.

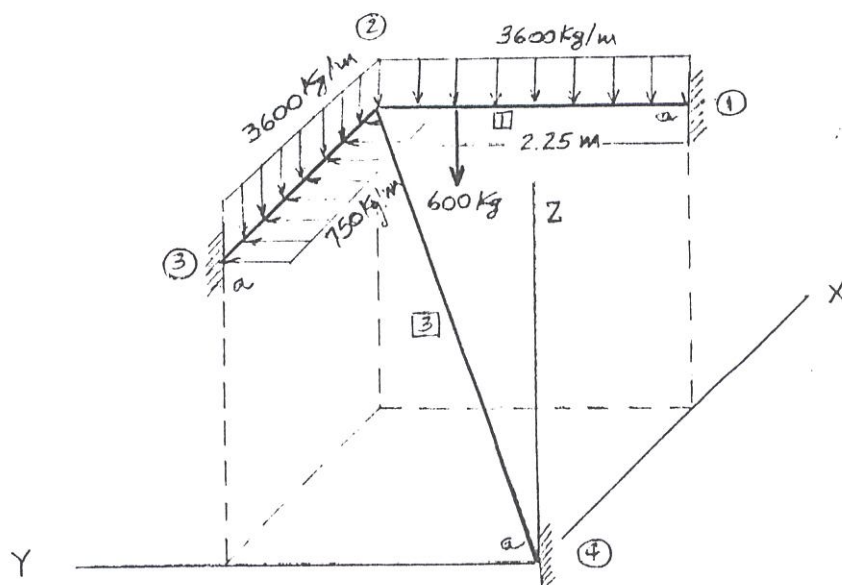


Fig. 9-9b. Condición de carga N° 2 aplicada a la misma estructura.

ANALISIS DE ESTRUCTURAS

```

=====
PROYECTO      TESIS DE GRADO DE R.N.S.
DESCRIPCION   PROBLEMA DE EJEMPLO
FECHA        FEB 20/85
POR          R.N.
=====

```

CEKG1

DATOS GENERALES

```

1. NUMERO DE MIEMBROS      0003
2. NUMERO DE NUDOS        004
3. NUMERO DE CONDICIONES DE CARGA  2
4. NUMERO DE APOYOS       003

```

DATOS DE LAS CONDICIONES DE CARGA

COND. NO.	CANT. DE NUDOS CARGADOS	CANT. DE CARGAS EN MIEMBROS
1	001	0002
2	000	0004
3	000	0000
4	000	0000
5	000	0000
6	000	0000
7	000	0000
8	000	0000
9	000	0000

NOTA SOLAMENTE LLENE LOS CAMPOS CORRESPONDIENTES
AL NUMERO DE COND. DE CARGA INDICADO.

9-10.- ARCHIVO A002 LLENO CON DATOS DE PROBLEMA EJEMPLO



9.6. Ingreso de Datos de los Nudos

Después de ingresar los datos generales, al ejecutar la función PF11 para continuar, aparece en pantalla el archivo para ingreso de datos específicos de nudos, miembros y condiciones de carga.

La primera tabla de datos en este archivo corresponde a los datos de nudos. Para cada nudo se ingresa el valor en metros (M) de sus coordenadas en el sistema de referencia general X-Y-Z y además, la especificación de las restricciones de cada una de las 6 posibles componentes de desplazamiento (3 traslaciones y 3 rotaciones respecto a los ejes X-Y-Z). Si la componente es restringida se ingresa '1' en la correspondiente columna o, en '0' en caso contrario .

9.7. Ingreso de Datos de los Miembros

La información que se requiere de cada miembro es la siguiente:

Tipo : Especificar 0 si el miembro esta rígidamente unido en sus extremos, o 1 si sus extremos son articulados.

Lados A y B : Numero de los nudos en los inciden los lados A y B del miembro.

Mom. de inercia

(X-X y Y-Y) : Momentos de inercia del miembro en cm^4 , respecto a los ejes transversales principal y secundario de su sección.

Cte. de torsión : Constante de torsión de la sección trasversal del miembro en cm^4 . Para perfiles estructurales no tabulados y cuya sección transversal esta conformada por secciones rectangulares, se puede usar la formula aproximada

$$J = \left(\frac{1}{3} \right) \sum I t^3 \quad (9-1)$$

donde l y t son, respectivamente los lados mayor y menor de cada sección.

Módulos E y G : Módulos de elasticidad a la tensión y al corte correspondientes al material del miembro. Se debe ingresar su valor en Kg/cm^2 en notación científica. Si no se ingresa ningún valor en

valor en este campo, el programa asume los módulos del acero estructural ASTM A-36:

$$E = 21 \times 10^2 \text{ Ton/cm}^2$$

$$G = 84 \times 10^1 \text{ Ton/cm}^2$$

En la tabla de datos los valores 00E+0 son reemplazados por estos valores al ejecutarse el programa.

Tipo de rotación : Si la rotación usada para definir al miembro en el espacio es la 'Z-Y-X', especifique 1 en la columna, y si es la rotación 'Y-Z-X', deje el 0 (cero) asumido por el programa.

Ang de rotación : Angulo de rotación del miembro en grados, determinado en la forma que se explica en la sección 3.2.

La longitud de los miembros no es un dato requerido, por cuanto esta es calculada por el programa e impresa en la misma tabla de datos de miembros a continuación la columna de los ángulos de rotación.

Fig. 9-11. Vectores de fuerzas y momentos representados en los sentidos asumidos positivos en un sistema de referencia ortogonal tridimensional.

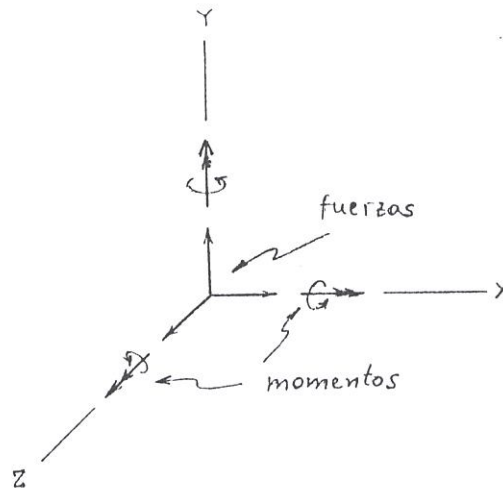
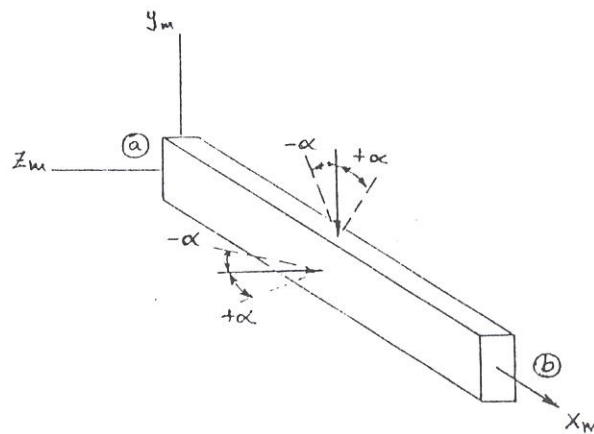


Fig. 9-12. Convención de signos para fuerzas aplicadas a miembros y para los ángulos de incidencia.

El plano de carga se especifica como ϕ si es el plano x_m - y_m , y como 1 si es el x_m - z_m .



9.8. Ingreso de los Datos de Carga en los Nudos

La convención de signos usada para el ingreso de datos de las cargas en nudos, se basa en los sentidos de fuerzas y momentos asumidos positivos que se muestran en la figura 9-11.

Las cargas en los nudos se ingresan en términos de las componentes de fuerza y momento respecto a las coordenadas X-Y-Z del sistema de referencia general de la estructura. La tabla para el ingreso de estos datos viene a continuación de la de 'Datos de Miembros'. Como se podrá apreciar en pantalla, el primer campo de cada línea es para el número del nudo cargado. A continuación hay definidos seis campos para ingresar las seis posibles componentes de carga actuando, e.g. 3 componentes de fuerza y 3 de momento en los sentidos X, Y, y Z. Para el caso del ejemplo, la tabla se llenará como lo muestra la figura 9-13.

9.9. Ingreso de los Datos de Carga en los Miembros

Los datos de carga en miembros se especifican en el marco de las coordenadas locales del miembro cargado, según las convenciones indicadas en la figura 9-12.

En la tabla 'Datos de Carga en Miembros' hay una línea para cada una de las cargas a especificar. El primer campo es el para el número del miembro sobre el que actúa la carga. A continuación se debe ingresar el valor de dicha carga, en Toneladas métricas (TONS) si es concentrada, o en Tons/metro si es distribuida. La forma de distribución de la carga se da en los dos siguientes campos. Para carga distribuida, en la columna titulada 'Origen', se ingresa la coordenada x_m del punto donde empieza la carga en el miembro (distancia en metros hasta el extremo 'A' del miembro); y, en la columna 'Fin', la coordenada del punto donde termina. En el caso de carga concentrada, en ambos campos se debe ingresar el mismo valor de la coordenada x_m del punto de aplicación de la carga. Los otros datos son los siguientes:

Ang. : Angulo de incidencia en grados de las cargas concentradas medido en la forma indicada en la figura 9-11.

Plano de carga : Si el plano de aplicación de la carga es el asumido por el programa (x_m - y_m), dejar el valor 0 (cero) en este campo. Si el plano de carga es el x_m - z_m , especificar 1.





ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS

PROYECTO TESIS DE GRADO DE R.-N.-S.
 DESCRIPCIÓN PROBLEMA DE EJEMPLO
 FECHA FEB 20/85
 POR R.N.
 RANS

DATOS GENERALES

3 MIEMBROS * 4 NUDOS * 2 COND. DE CARGA

DATOS DE NUDOS

NUDO NO.	COORDENADAS			RESTRICCIONES					
	X (M)	Y (M)	Z (M)	TRASL. X	TRASL. Y	TRASL. Z	ROTAC. X	ROTAC. Y	ROTAC. Z
1	3.00	0.00	3.00	1	1	1	1	1	1
2	3.00	3.00	0.00	0	0	0	0	0	0
3	0.00	3.00	3.00	1	1	0	1	1	1
4	0.00	0.00	0.00	1	1	1	1	1	1

DATOS DE MIEMBROS

MIEMBRO NO.	LADO A	MOM. DE INERCIA X-X (CM ⁴)	CTE. Y-Y (CM ⁴)	AREA (CM ²)	MÓDULOS E (T/CM ²)	ROTACIÓN G TIPO ANG. (O/1)(GRS)	LONG. (P)
1	0	124869.43	9281.96	202.70	150.32	21E+2 84E+1	1 50.0
2	0	124869.43	9281.96	202.70	190.32	21E+2 84E+1	0 50.0
3	0	124869.43	9281.96	202.70	190.32	21E+2 84E+1	1 50.0

CONDICIÓN DE CARGA NC. 1

CONDICIÓN DE CARGA DE FIG. 9-9A

DATOS DE CARGA EN NUDOS - CONDICIÓN NO. 1

NUDO NO.	FUERZA-X (TONS)	FUERZA-Y (TONS)	FUERZA-Z (TONS)	MOMENTO-X (TCN-M)	MOMENTO-Y (TCN-M)	MOMENTO-Z (TCN-M)
2	0.00	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00

DATOS DE CARGA EN MIEMBROS - CONDICIÓN NO. 1

MBRO. NR.	CARGA PUNTAL-KIP (TON/M)	DISTRIBUCION ORIGIN (M)	ANG. FIN (M)	PLANO DE CARGA (GRS)
-----------	--------------------------	-------------------------	--------------	----------------------

Fig. 9-13.- Archivo AD03 con los datos completos previo al cálculo del problema ejemplo.

RESULTADOS COND. DE CARGA NO. 1

DEFLEXIONES Y ROTACIONES

NUDO NO.	DEFL.X (CM)	DEFL.Y (CM)	DEFL.Z (CM)	ROTAC.X (RAD)	ROTAC.Y (RAD)	ROTAC.Z (RAD)
1						
2						
3						
4						

ACCIONES EN EXTREMOS DE LOS MIEMBROS

MBRO. NO.	FUERZAS EN LADO A			MOMENTOS EN LADO A			FUERZAS EN LADO B			MOMENTOS EN LADO B		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1												
2												
3												
4												

REACCIONES

NUDO	FUERZA-X (TONS)	FUERZA-Y (TONS)	FUERZA-Z (TONS)	MOMENTIC-X (TON-M)	MOMENTIC-Y (TON-M)	MOMENTIC-Z (TON-M)
0						
0						
0						

CONDICION DE CARGA NO. 2

CONDICION DE CARGA DE FIGURA 9-9B

DATOS DE CARGA EN MIEMBROS - CONDICION NO. 2

MBRO. NR.	CARGA PUNTUAL-KIP DIST.-TON/M	DISTRIBUCION ORIGEN (M)	ANG. PLANO DE FIN (GRS)	CARGA
1	3.60	0.00	3.00	0.00
1	0.60	2.25	2.25	0.00
2	3.60	0.00	3.00	0.00
2	0.75	0.00	3.00	0.00

RESULTADOS COND. DE CARGA NO. 2

Fig. 9-13.- (Cont.)

DEFLEXIONES Y ROTACIONES

NUDO NO.	DEFL.X (CM)	DEFL.Y (CM)	DEFL.Z (CM)	ROTAC.X (RAD)	ROTAC.Y (RAD)	ROTAC.Z (RAD)
1						
2						
3						
4						

ACCIONES EN EXTREMOS DE LOS MIEMBROS

MEMB. NO.	FUERZAS EN LADO A			MOMENTOS EN LADO A			FUERZAS EN LADO B			MOMENTOS EN LADO B		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1												
2												
3												

REACCIONES

NUDO	FUERZA-X (TONS)	FUERZA-Y (TONS)	FUERZA-Z (TONS)	MOMENTC-X (TCN-M)	MOMENTC-Y (TCN-M)	MOMENTC-Z (TON-M)
0						
0						
0						

Fig. 9-13.- (Cont.)

En la figura 9-13 también se puede apreciar la forma en la que quedan especificados los datos de carga en miembros para las dos condiciones de carga del ejemplo de las figuras 9-9a y 9-9b.

9.10. Revisión de Resultados e Impresión

Si el programa se ejecuta sin errores para todas las condiciones de carga, nuevamente aparece en pantalla el archivo de datos y resultados para que el usuario lo pueda revisar antes de ordenar su impresión. Se puede revisar todo el contenido del archivo usando las teclas de funciones PF definidas en la parte superior de la pantalla.

Los diferentes tipos de resultados del análisis se agrupan en sendas tablas a continuación de los datos de cada condición de carga. Las traslaciones de los nudos se dan en centímetros y las rotaciones en radianes; ambos en notación científica. Se deben interpretar en el marco del sistema de referencia general X-Y-Z. Las fuerzas en los extremos de los miembros se dan en Tons y los momentos en Tons-metro. Las direcciones y sentidos se deben asumir de acuerdo con la figura 9-11, con excepción de la fuerza axial en cada miembro que es positiva para tensión y negativa

para compresión.

Finalmente, las reacciones en los apoyos se dan en las mismas unidades que las acciones en los extremos de los miembros considerando que su dirección y sentido se deben interpretar en el marco del sistema de referencia general.

Si hay alguna corrección que hacer en los datos de entrada y se desea volver a correr el programa después de corregirlos, ejecute la función PF. Si no hay modificaciones y desea una copia escrita del archivo ejecute la función PF10. Después de esta acción, el programa concluye y el sistema queda listo para analizar otra estructura. Si no ha ordenado la impresión del archivo, puede terminar la ejecución del programa con la función PF12. El archivos de datos y resultados no se pierde por lo que posteriormente se puede ordenar su impresión mediante los respectivos comandos CMS. La identificación del archivo es 'AD03 FILE'.

En una sesión de trabajo se pueden analizar tantas estructuras como se desee y al final de cada ejecución del programa ordenar la impresión del archivo de datos y resultados sin que se

superponga a las anteriores órdenes de impresión. Una vez finalizada la sesión, el usuario debe dirigirse al operador del sistema en Cesercomp para obtener las diferentes impresiones ordenadas. La impresión de los resultados del ejemplo ejecutado se muestra en la figura 9-14. El formato de impresión es para hoja continua de 14-1/2 pulgadas de ancho.. En la figura 9-14 se ha reducido y dividido la impresión en tres partes para ajustarse al formato A4.

La salida del sistema se realiza según la forma normal, dando el comando "LOG" cuando, al concluir la ejecución del programa, aparece en pantalla un mensaje en la forma

R; 0.15/0.33 11:30:25

Hecho esto, aparece en pantalla el logotipo ESPOL-CESERCOMP, tras lo cual el terminal puede ser apagado.

9.11. Ejemplos de Aplicación

Del libro de la referencia 1, "Computer Methods of structural Análisis", se tomaron cuatro ejemplo de aplicación para probar el

ANALISIS DE ESTRUCTURAS

PROYECTO: TESIS DE GRADO DE R.N.S.
 DESCRIPCION: PROBLEMA DE EJEMPLO
 FECHA: FEB 20/85
 POR: R.N.
 RANS

DATOS GENERALES

3 MIEMBROS * 4 NUDOS * 2 COND. DE CARGA

DATOS DE NUDOS

NUDO NO.	COORDENADAS			RESTRICCIONES					
	X (M)	Y (M)	Z (M)	TRASL. X	TRASL. Y	TRASL. Z	ROTAC. X	ROTAC. Y	ROTAC. Z
1	3.00	0.00	3.00	1	1	1	1	1	1
2	3.00	3.00	3.00	0	0	0	0	0	0
3	0.00	3.00	3.00	1	1	0	1	1	1
4	0.00	0.00	0.00	1	1	1	1	1	1

DATOS DE MIEMBROS

MIEMBRO NO.	LADO A B	MOM. DE INERECIA		CIE. Y-Y (CM ⁴)	TGRS. (CM ⁴)	AREA (CM ²)	MÓDULOS E		ROTACION LONG. G	TIPO ANG. (O/I)(GRS) (P)
		X-X (CM ⁴)	Y-Y (CM ⁴)				1	2		
1	0	1	2	124869.43	9281.96	202.70	190.32	21E+2	84E+1	1 50.0 25.00
2	0	3	2	124869.43	9281.96	202.70	190.32	21E+2	84E+1	0 50.0 25.00
3	0	4	2	124869.43	9281.96	202.70	190.32	21E+2	84E+1	1 50.0 43.30

CONDICION DE CARGA NO. 1

CONDICION DE CARGA DE FIG. 9-9A

DATOS DE CARGA EN NUDOS - CONDICION NO. 1

NUDO NO.	FUERZA-X (TONS)	FUERZA-Y (TONS)	FUERZA-Z (TONS)	MOMENTO-X (TCN-M)	MOMENTO-Y (TCN-M)	MOMENTO-Z (TCN-M)
2	0.00	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00

DATOS DE CARGA EN MIEMBROS - CONDICION NO. 1

MBRO. NO.	CARGA PUNTUAL-KIP	DISTRIBUCION ORIGIN (M)	ANG. FIN (M)	PLANO DE CARGA (GRS)
-----------	-------------------	-------------------------	--------------	----------------------

Fig. 9-14.- Archivo AD03 con los resultados después del cálculo del problema ejemplo. Constan los resultados de las dos condiciones de carga.

1	3.60	0.00	3.00	0.00	0
2	3.60	0.00	3.00	0.00	0

RESULTADOS CONDO. DE CARGA NO. 1

DEFLEXIONES Y ROTACIONES

NUDO NO.	DEFL. X (CM)	DEFL. Y (CM)	DEFL. Z (CM)	ROTAC. X (RAD)	ROTAC. Y (RAD)	ROTAC. Z (RAD)
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	8.916E-03	9.179E-03	-6.854E-02	-6.021E-04	-6.384E-04	-8.311E-05
3	0.000E+00	0.000E+00	-2.106E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

ACCIONES EN EXTREMOS DE LOS MIEMBROS

MBRC. NO.	FUERZAS EN LADO A			FUERZAS EN LADO B			MOMENTOS EN LADO B		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-12.23	6.36	0.03	0.01	7.65	12.23	4.44	-0.03	-0.10
2	-11.88	0.00	0.19	-0.23	-10.98	11.88	10.80	-0.19	-0.34
3	22.40	2.39	-0.15	0.27	5.38	-22.40	-2.39	0.15	0.53

REACCIONES

NUCO NO.	FUERZA-X (TONS)	FUERZA-Y (TONS)	FUERZA-Z (TONS)	MOMENTO-X (TCN-M)	MOMENTO-Y (TCN-M)	MOMENTO-Z (TCN-M)
1	0.03	-12.23	6.36	7.65	0.00	0.01
3	-11.88	-0.19	0.00	0.00	-10.98	-0.23
4	11.85	12.07	14.89	3.70	-3.51	0.22

CONDICION DE CARGA NO. 2
CONDICION DE CARGA DE FIGURA 9-98

DATOS DE CARGA EN MIEMBROS - CONDICION NO. 2

MBRG. NR.	CARGA PUNTUAL-KIP	DISTRIBUCION ORIGIN	ANG. PLANO DE CARGA
		(M)	(GRS)
1	3.60	0.00	3.00
1	0.60	2.25	0.00
2	3.60	0.00	3.00
2	0.75	0.00	3.00

RESULTADOS CONDO. DE CARGA NO. 2

DEFLEXIONES Y ROTACIONES

NUDO NO.	DEFL-X (CM)	DEFL-Y (CM)	DEFL-Z (CM)	ROTAC-X (RAD)	ROTAC-Y (RAD)	ROTAC-Z (RAD)
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	9.414E-03	1.047E-02	-7.359E-02	-4.225E-04	-6.528E-04	6.807E-06
3	0.000E+00	0.000E+00	-2.197E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

ACCIONES EN EXTREMOS DE LOS MIEMBROS

MBRO. NO.	FUERZAS EN LADO A			MOMENTOS EN LADO A			FUERZAS EN LADO B			MOMENTOS EN LADO B		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-13.95	6.68	-0.05	0.00	0.13	8.26	13.95	4.72	0.09	0.00	0.14	-4.86
2	-12.54	-0.21	1.21	0.00	0.44	-11.42	12.54	11.01	1.04	0.00	-0.68	-5.41
3	23.85	2.48	-0.19	0.00	0.33	5.62	-23.85	-2.48	0.19	0.00	0.66	7.26

REACCIONES

NUDO NO.	FUERZA-X (TONS)	FUERZA-Y (TONS)	FUERZA-Z (TONS)	MOMENTO-X (TCN-M)	MOMENTO-Y (TCN-M)	MOMENTO-Z (TON-M)
1	-0.09	-13.95	6.68	8.26	0.00	0.13
3	-12.54	-1.21	0.00	0.00	11.42	0.44
4	12.62	12.89	15.79	3.84	-4.11	0.27

Fig. 9-14.- (Cont.)

programa ET. Los ejemplos tomados se ilustran en las figuras 9-15 a 9-18. La ejecución del programa generó las impresiones mostradas en las figuras 9-19 a 9-22, observándose que en todos los casos los resultados coincidían con lo indicados en la respectiva referencia. Por estar los ejemplos en unidades inglesas, el programa fue corrido para esta versión de unidades.

Una revisión detenida de las referidas tablas de estos ejemplos aclarará cualquier duda sobre el ingreso de datos y la interpretación de los resultados que genera el programa.

9.12. Errores de Ejecución

Los errores que puedan ocurrir aparecerán en pantalla suspendiéndose la ejecución del programa. Tales errores se deben interpretar de acuerdo a la explicación que el mismo sistema proporciona al usuario a través del terminal. Una explicación más amplia sobre los mismos se puede encontrar en las referencias 4, 5 y 6 indicadas en la bibliografía y que se pueden solicitar en "Cesercomp".

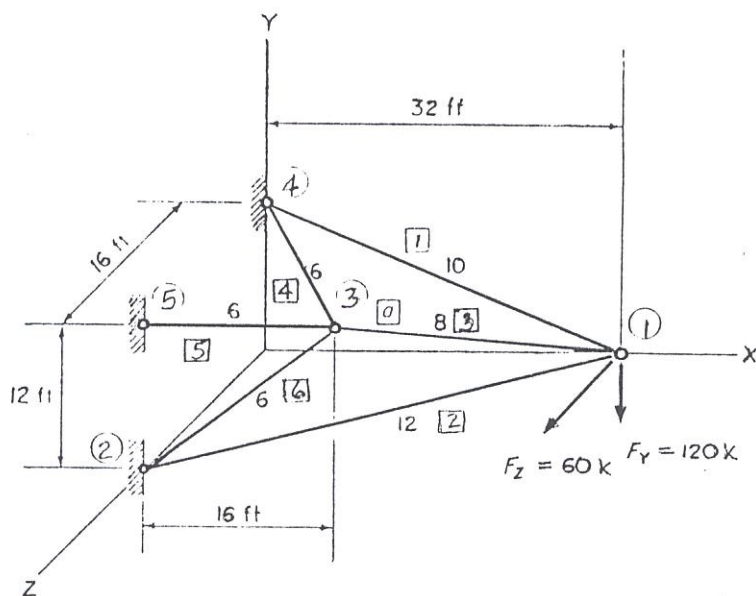


Fig. 9-15. Ejemplo de aplicación N° 1. Armadura tridimensional. La orientación de los ejes locales para cada miembro pueden seleccionarse en forma conveniente para facilitar el ingreso de datos. El área transversal de cada miembro se indica (en pg^2) junto a cada barra. $E = 30000 \text{ Klb/pg}^2$.

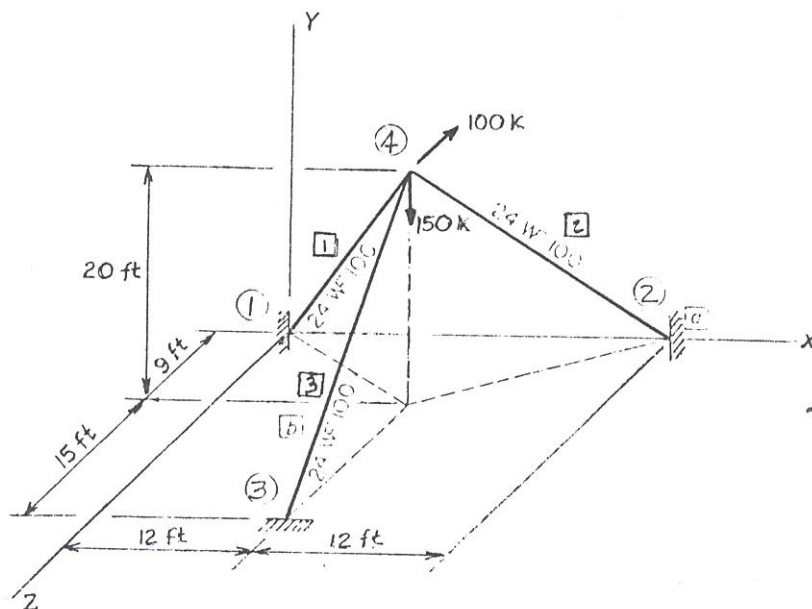


Fig. 9-16. Ejemplo de aplicación N° 2. Estructura tridimensional. Los miembros son perfiles 24W100. $E = 30000 \text{ Klb/pg}^2$, $G = 12000 \text{ Klb/pg}^2$. El plano $y_m - x_m$ de cada perfil es perpendicular al plano X-Z.



Fig. 9-17. Ejemplo de aplicación N° 3.
 Armadura bidimensional.
 $E = 30000 \text{ Klb/pg}^2$.
 Las áreas de cada barra se dan junto a ellas. Las fuerzas se dan en Klb.

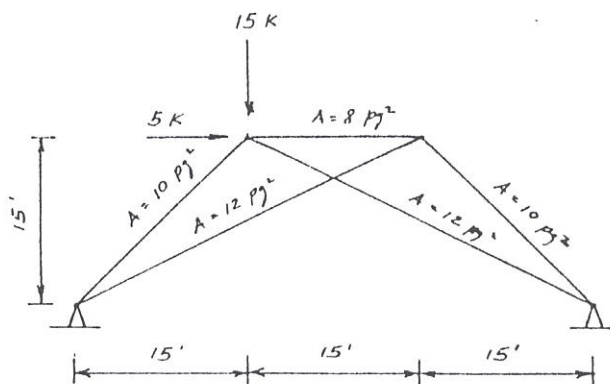
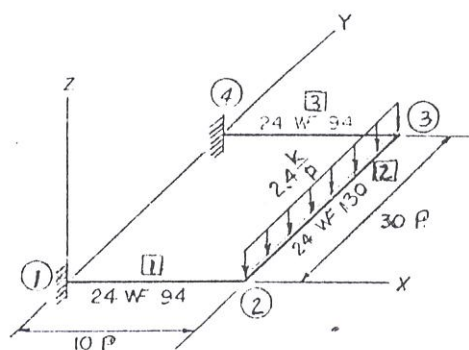


Fig. 9-18. Ejemplo de aplicación N° 4.
 Parrilla. Cada miembro es posicionado de manera que su eje y es paralelo al plano $X-Y$.
 $E = 30000 \text{ Klb/pg}^2$,
 $G = 12000 \text{ Klb/pg}^2$.



ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS

PROYECTO PRUFA DEL PROGRAMA
DESCRIPCION CERCHA ESPACIAL
FECHA NOV 4/75
POR R.N.
RAMS

DATOS GENERALES

6 MIEMBROS * 5 NUDOS * 1 COND. DE CARGA

DATOS DE NUDOS

NUDO NO.	COORDENADAS			RESTRICCIONES					
	X (P)	Y (P)	Z (P)	TRASL. X Y Z	ROTAC. X Y Z				
1	32.00	0.00	0.00	0 0 0	1 1 1				
2	0.00	0.00	16.00	1 1 1	1 1 1				
3	16.00	12.00	16.00	0 0 0	1 1 1				
4	0.00	12.00	0.00	1 1 1	1 1 1				
5	0.00	12.00	16.00	1 1 1	1 1 1				

DATOS DE MIEMBROS

MIEMBRO NO. TIPO	LADO J K	MOM. DE INERCIA		CTE.		AREA	LONG.	MODULOS		ROTACION F G TIPO ANG.
		X-X (PG1)	Y-Y (PG4)	Y-Y (PG4)	TRQS. (PG4)			(LB/PG2)	(Y/Z)(GRS)	
1 1	4 1	1.00	1.00	1.00	1.00	10.00	0.00	30E+3	12E+3	1 0 0
2 1	2 1	1.00	1.00	1.00	1.00	12.00	0.00	30E+3	12E+3	0 0 0
3 1	3 1	1.00	1.00	1.00	1.00	9.00	0.00	30E+3	12E+3	0 0 0
4 1	4 3	1.00	1.00	1.00	1.00	6.00	0.00	30E+3	12E+3	0 0 0
5 1	5 3	1.00	1.00	1.00	1.00	6.00	0.00	30E+3	12E+3	0 0 0
6 1	2 3	1.00	1.00	1.00	1.00	6.00	0.00	30E+3	12E+3	0 0 0

CONDICION DE CARGA NO. 1

PROP. 6-15, PAC. 292, COMP. MATH. OF STR

DATOS DE CARGA EN NUDOS - CONDICION NO. 1

NUDO NO.	FUERZA-X (KIPS)	FUERZA-Y (KIPS)	FUERZA-Z (KIPS)	MOMENTO-X (KIP-P)	MOMENTO-Y (KIP-P)	MOMENTO-Z (KIP-P)
1	0.00	-120.00	60.00	0.00	0.00	0.00

RESULTADOS COND. DE CARGA NO. 1

Fig. 9-19.- Análisis de Cercha Espacial de figura 9-15

DEFLEXIONES Y ROTACIONES

NUDO NO.	DEFL. X (PG)	DEFL. Y (PG)	DEFL. Z (PG)	ROTAC. X (RAD)	ROTAC. Y (RAD)	ROTAC. Z (RAD)
1	-4.5732E-01	-1.9057E+00	-1.5934E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
2	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
3	2.1333E-01	-4.5963E-01	-4.1447E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
4	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
5	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

ACCIONES EN EXTREMOS DE LOS MIEMBROS

MEMBRO NO.	FUERTAS EN LADO J (KIPS)			MOMENTOS EN LADO J (KIPS-PIE)			FUERTAS EN LADO K (KIPS)			MOMENTOS EN LADO K (KIPS-PIE)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-199.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	199.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	283.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-283.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	-106.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	106.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	94.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-94.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	-200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	83.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-83.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fig. 9-19.- (Cont.)

TABLA 7-1 (Cont.)



ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS

=====

PROYECTO PUURA DEL PROGRAMA

DESCRIPCION ESTRUCTURA ESPACIAL

FECHA NOV 4/85

POR R.N.

RANS

=====

DATOS GENERALES

3 MIEMBROS * 4 NUDOS * 1 COND. DE CARGA

DATOS DE NUDOS

NUDO NO.	COORDENADAS			RESTRICCIONES					
	X (P)	Y (P)	Z (P)	TRSL. X Y Z	ROTAC. X Y Z				
1	0.00	0.00	0.00	1 1 1	1 1 1				
2	24.00	0.00	0.00	1 1 1	1 1 1				
3	12.00	0.00	-24.00	1 1 1	1 1 1				
4	12.00	20.00	9.00	0 0 0	0 0 0				

DATOS DE MIEMBROS

MIEMBRO NO.	TIPO	LADO J K	MOM. DE INERCIA		CTE. Y-Y	AREA - LONG.		MODULOS E G	ROTACION TIPO ANG. (K/PG2) (Y/Z) (GRS)
			X-X (PG4)	Y-Y (PG4)		PG2	PG4		
1	0	1	3000.00	223.00	4.87	29.50	25.00	30E+3	12E+3 0 0.0
2	0	2	3000.00	223.00	4.87	29.50	25.00	30E+3	12E+3 0 0.0
3	0	3	3000.00	223.00	4.87	29.50	25.00	30E+3	12E+3 0 0.0

CONDICION DE CARGA NO. 1

=====

PROR. 6-2, PAG. 287, COMP. METH. OF STRUC. ANAL.

=====

DATOS DE CARGA EN NUDOS - CONDICION NO. 1

NUDO NO.	FUERZA-X (KIPS)	FUERZA-Y (KIPS)	FUERZA-Z (KIPS)	MOMENTO-X (KIP-P)	MOMENTO-Y (KIP-P)	MOMENTO-Z (KIP-P)
4	0.00	-150.00	-100.00	0.00	0.00	0.00

Fig. 9-20.- Análisis de Estructura Espacial de figura 9-16

RESULTADOS COND. DE CARGA NO. 1

DEFLXIONES Y ROTACIONES

NUMO NO.	DEFL.X (PG)	DEFL.Y (PG)	DEFL.Z (PG)	ROTAC.X (RAD)	ROTAC.Y (RAD)	ROTAC.Z (RAD)
1	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
2	0.0000E+00	0.0000E+00	-2.5695E-01	-3.2214E-03	3.2119E-03	0.0000E+00
3	0.0000E+00	0.0000E+00	-2.5695E-01	3.2214E-03	3.2119E-03	0.0000E+00
4	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

ACCIONES EN EXTREMOS DE LOS MIEMBROS

MEMBRO NO.	FUERZAS EN LADO J (KIPS)			MOMENTOS EN LADO J (KIPS-PIE)			FUERZAS EN LADO K (KIPS)			MOMENTOS EN LADO K (KIPS-PIE)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.00	36.00	0.00	0.00	0.00	360.00	0.00	-36.00	0.00	-0.14	0.00	0.00
2	0.00	36.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	36.00	0.00	0.00	0.00	-0.14
3	0.00	36.00	0.00	-0.14	0.00	360.00	0.00	-36.00	0.00	0.14	0.00	0.00

TABLA 9-2. (Cont.)

Fig. 9-20.- (Cont.)

ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS

PROYECTO PRUEBA DEL PROGRAMA
 DESCRIPCIÓN CERCHA PLANA (PROB. 5-13)
 FECHA NOV 5/88
 POR R.N.
 RANS

DATOS GENERALES

5 MIEMBROS * 4 NUDOS * 1 COND. DE CARGA

DATOS DE NUDOS

NUDO NO.	COORDENADAS			RESTRICCIONES			ROTAC.		
	X (P)	Y (P)	Z (P)	X Y Z	Y Y Z	Z Y Z	X Y Z	Y Y Z	Z Y Z
1	15.00	15.00	0.00	0	0	0	1	1	1
2	30.00	15.00	0.00	0	0	0	1	1	1
3	0.00	0.00	0.00	1	1	1	1	1	1
4	45.00	0.00	0.00	1	1	1	1	1	1

DATOS DE MIEMBROS

MIEMBRO NO. TIPO J K	MOM. DE INERCIA			CTE. TORS. (PG4)	AREA (PG2)	LONG. (P)	MODULOS		ROTACION TIPO ANG.
	X-X (PG4)	Y-Y (PG4)	Z-Z (PG4)				E (LB/PG2)	G (Y/Z)(GRS)	
1 0 3 1	1.00	1.00	1.00	1.00	10.00	0.00	30E+3	12E+3	1 0.0
2 0 2 4	1.00	1.00	1.00	1.00	10.00	0.00	30E+3	12E+3	1 0.0
3 0 3 2	1.00	1.00	1.00	1.00	12.00	0.00	30E+3	12E+3	1 0.0
4 0 1 4	1.00	1.00	1.00	1.00	12.00	0.00	30E+3	12E+3	1 0.0
5 0 1 2	1.00	1.00	1.00	1.00	9.00	0.00	30E+3	12E+3	0 0.0

CONDICION DE CARGA NO. 1

PROB. 5-13, PAG. 213, COMP. METH. OF STR. ANAL.

DATOS DE CARGA EN NUDOS - CONDICION NO. 1

NUDO NO.	FUERZA-X (KIPS)	FUERZA-Y (KIPS)	FUERZA-Z (KIPS)	MOMENTO-X (KIP-P)	MOMENTO-Y (KIP-P)	MOMENTO-Z (KIP-P)
1	5.00	-15.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fig. 9-21.- Análisis de Cercha Plana de figura 9-17

RESULTADOS COND. DE CARGA NO. 1

DEFLEXIONES Y ROTACIONES

MEMB. NO.	DEFL. X (IN)	DEFL. Y (IN)	DEFL. Z (IN)	ROTAC. X (RAD)	ROTAC. Y (RAD)	ROTAC. Z (RAD)
1	5.0738E-03	-2.1054E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
2	2.6338E-03	7.9191E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
3	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
4	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

ACCIONES EN EXTREMOS DE LOS MIEMBROS

MEMB. NO.	FUERZAS EN LADO J			MOMENTOS EN LADO J			FUERZAS EN LADO K			MOMENTOS EN LADO K		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	13.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-13.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	-2.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	12.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-12.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3.25	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-3.25	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01

Fig. 9-21.- (Cont.)

TABLA 9-3.- (Cont.)

PROYECTO	PRUEBA DEL PROGRAMA
DESCRIPCION	PAPRILLA
FECHA	NOV 4/85
POB	R.N.
	RANS

DATOS GENERALES

3 MIFIBROS * 4 NUDOS * 1 COND. DE CARGA

DATA DE NUDO

ORDEN	COORDENADAS	RESTRICCIONES		
		X (P)	Y (P)	Z (P)
1	0.00	0.00	1	1
2	10.00	0.00	0	0
3	10.00	30.00	0	0
4	0.00	30.00	0.00	1

DATA OF MIEMBROS

NÚMERO NO. TIPO	LADO J K	MON. DE X-X (PG4)	CTF. Y-Y (PG4)	AREA (PG2)	LONG. (P)	MODULOS E (K/PG2)	ROTACION TIPO ANG. (Y/Z)GRS					
- 1	0	1	2	2650.00	108.00	5.23	27.70	10.00	30F+3	12E+3	0	90.0
3	0	2	3	4920.00	412.00	8.67	39.30	30.00	30F+3	12E+3	1	90.0
3	0	4	3	2650.00	108.00	5.23	27.70	10.00	30F+3	12E+3	0	90.0

CONDICION DE CARGA NO. 1

1995. Proj. 6-22, July 29th. C.R. Webb. 10:21:47 AM

ADATOS DE CARGA EN MIEMBROS - CONDICION NO. 1

MBRO. NR.	CARGA PUNTUAL-KIP DIST.-KIP/P	DISTRIBUCION ORIGEN (P)	FIN (P)	ANG. PLANO DE (GRS) CARGA
2	2.40	0.00	30.00	0.00 0

Fig. 9-22.- Análisis de Parrilla de figura 9-18



RESULTADOS COND. DE CARGA NO. 1
=====

DEFLEXIONES Y ROTACIONES

NUDO NO.	DEFLEX. X (IN)	DEFLEX. Y (IN)	DEFLEX. Z (IN)	ROTAC. X (RAD)	ROTAC. Y (RAD)	ROTAC. Z (RAD)
1	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
2	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
3	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
4	0.0000E+00	-2.3774E-02	-5.0729E-02	-1.9880E-04	0.0000E+00	0.0000E+00

ACCIONES EN EXTREMOS DE LOS MIEMBROS

MEMBRO NO.	FUERZAS EN LADO J			MOMENTOS EN LADO J			FUERZAS EN LADO K			MOMENTOS EN LADO K		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	109.98	0.31	0.06	0.00	-1.04	-0.92	-109.98	-0.31	-0.06	0.00	-0.56	6.89
2	107.98	0.31	-0.06	0.00	1.04	0.92	-109.98	-0.31	0.06	0.00	0.56	6.89
3	-33.68	1.00	0.00	0.00	0.00	17.48	33.68	-1.00	0.00	0.00	0.00	7.54

TABLA 9-4 - (cont.)

Fig. 9-22.- (Cont.)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Considerando que los ejemplos de aplicación presentados en el capítulo 9 son casos resueltos, cuyas respuestas se proporcionan en las referencias bibliográficas y, por otra parte, que la estructura presentada en el mismo capítulo al explicar las instrucciones para usar el programa ha sido analizada manualmente, habiéndose determinado que, en todos los casos se han obtenido resultados coincidentes con los proporcionados por el programa,, se puede concluir que éste puede ser aplicado con confianza para el análisis del tipo de estructuras para el cual fue diseñado.

Es importante observar que para estructuras que presenten un muy elevado número de incógnitas, aunque el procedimiento de análisis y el programa funcionen correctamente, alguna desviación en los resultados

podría darse debido a que la computadora opera con un finito número de cifras significativas. Como primera recomendación para ampliar este trabajo, se sugiere hacer un estudio, mediante métodos numéricos para establecer el grado de precisión de los resultados de análisis de estructuras muy complejas.

Otras recomendaciones respecto a mejoras y ampliaciones del programa, que podrían ser consideradas por algún estudiante para un proyecto de graduación en este mismo campo, se enumeran a continuación.

1. Ampliar la subrutina que calcula la matriz de rigidez de los miembros, de manera que puedan también ser procesados elementos estructurales con perfiles asimétricos, en particular ángulos "L" y canales "U".
2. Ampliar las subrutinas que calculan las acciones producidas en los extremos de los miembros por efecto de las cargas externas en ellos aplicadas, incluyendo distribuciones no uniformes de carga.
3. Modificar el sistema de ingreso de datos de tal forma que sea posible cambiar el número de nudos cargados sin necesidad de reingresar los datos de todos los nudos y miembros de la estructura.

4. Elaborar un programa que, usando los valores de las acciones finales en los extremos de los miembros y que quedan almacenados en el archivo AD03, efectúe el análisis de esfuerzos y deformaciones de cada elemento estructural para determinar si cumple con las condiciones de diseño establecidas por normas específicas, como por ejemplo las del AISC (American Institute of Steel Construction).

5. El programa elaborado ha sido denominado E.T. ya que está orientado al análisis de estructuras tridimensionales. Aunque también puede resolver estructuras (o armaduras) planas y aún vigas continuas, al hacerlo utiliza una excesiva cantidad de memoria ya que presupone seis grados de libertad en cada nudo. De aquí que se recomienda elaborar un programa basado en E.T pero orientado a analizar estructuras bidimensionales (E.B.).

6. Finalmente, como mejora al procedimiento de ingreso de datos, se pueden combinar los programas elaborados en Watcom Basic con rutinas en Cobol, por ejemplo, para hacer el ingreso no accedendo a archivos, sino con "ventanas" por pantalla. De esta manera se disminuye la posibilidad de que se produzcan errores al ingresar los datos.

APENDICES

APENDICE A

CONJUNTO DE PROGRAMAS ET

A.1. PROGRAMA ET

Listado del programa en lenguaje EXEC que controla la ejecución de los programas en Basic y la manipulación de los archivos del sistema.

&TRACE OFF

CLRSRN

WBAS ET100 (RUN

XEDIT AD02 FILE

WBAS ET200 (RUN

XEDIT AD03 FILE

WBAS ET300 (RUN

XEDIT AD03 FILE

&EXIT



A.2. PROGRAMA ET100

Listado del programa que genera el archivo para ingreso de los datos generales de la estructura.

```

10      ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
20      DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
30
40      PROGRAMA PARA CALCULAR ESTRUCTURAS EN TRES DIMENSIONES
50
60      TESIS DE GRADU
70      RICARDO NARANJO SUAREZ
80
90      GLAYACIL-ECLACER
100     1986
110     =====
120     NUMERE      ET100                                FECHA FEB 24/86
130     =====
140
150 OPEN  2,"ADO2",OUTPUT
160
170 CALL ENCABEZADO
180
190 Z = 0
200 F1= "
210 DATA *
220 DATA *
230 DATA *
235 DATA *
240
250 PRINT 2,TAB (20) *
260 PRINT 2
270 FOR I=1 TO 4
280 READ A$
290 PRINT 2, USING F1,A$
300 PRINT 2
310 NEXT I
320 PRINT 2
330 PRINT 2
340
350 PRINT 2,TAB (15) *
360 PRINT 2
370 PRINT 2,TAB (15) *COND-
380 PRINT 2,TAB (15) * NC-
390 PRINT 2,TAB (15) *
400 FOR I=1 TO 9
410 PRINT 2,TAB (16) 1 TAB (30) * CCC * TAB (49) * 0000 *
420 NEXT I
430 PRINT 2
440 PRINT 2
450 PRINT 2,TAB (10) *NCTA
460 PRINT 2,TAB (10) *
470 PRINT 2
480
490 CLOSE 2
500
510 STOP
520
5300 ----- E N C A B E Z A D O -----
5400
5500 PROC ENCABEZADO
5600 PRINT 2
5700 PRINT 2,TAB (27) "ANALISIS DE ESTRUCTURAS"
5800 PRINT 2
5900 PRINT 2,TAB (12) "=====

```

1. NUMERO DE MIEMBROS 0000
 2. NUMERO DE NUDOS 000
 3. NUMERO DE CONDICIONES DE CARGA 0
 4. NUMERO DE APLICOS 000

DATOS GENERALES

DATOS DE LAS CONDICIONES DE CARGA

CANT. DE NUDOS CARGADOS	CANT. DE CARGAS EN MIEMBROS
COND-	
NC-	



SOLAMENTE LLENE LOS CAMPOS CORRESPONDIENTES
 AL NUMERO DE COND. DE CARGA INDICADO.

```
10070 PRINT 2,TAB (12) 'PROYECIC
10080 PRINT 2,TAB (12) 'DESCRIPCION
10090 PRINT 2,TAB (12) 'FECHA
10100 PRINT 2,TAB (12) 'PCR
10110 PRINT 2,TAB (12) '=====  
10120 PRINT 2
10130 PRINT 2
10140 ENDFRCC
```


A.3. PROGRAMA ET200

Listado del programa que crea el archivo general para ingreso de datos de los miembros y de las cargas y que, a la vez, prepara la tabla en blanco para la salida de los resultados.

```

10      ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
20      DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
30
40      PROGRAMA PARA CALCULAR ESTRUCTURAS EN TRES DIMENSIONES
50
60      TESIS DE GRADO
70      RICARDO NAKANJU SUAREZ
80
90      GLAYACIL-ECUADOR
100     1986
110     =====
120     PROGRAMA E1200                                FECHA FEB 23/8
130     =====
140
150 OPEN 2,"AC02",INPUT
160 OPEN 3,"(F 132)AD03",OUTPUT
165 OPEN 4,"(F 180)AD04",OUTPUT
170
180 INPUT 2,REC =4,USING * POS(25)                    *,PRG$
190 INPUT 2,REC =5,USING * POS(25)                    *,DES$
200 INPUT 2,REC =6,USING * POS(25)                    *,FECHA$
210 INPUT 2,REC =7,USING * POS(25)                    *,PCR$
220
230 INPUT 2,REC =13,USING * POS(57)                    *,M
240 INPUT 2,REC =15,USING * POS(57)                    *,NJ
250 INPUT 2,REC =17,USING * POS(57)                    *,NL
255 INPUT 2,REC =19,USING * POS(57)                    *,NNK
260
270 CALL FORMATS
280 CALL ENCABEZADO
290
300 L=0
310 CALL DATOS NUCCS
320   FOR I=1 TO NJ
330     PRINT 3,USING F DN$,I,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z
340     NEXT I
350 CALL DATOS MIEMBROS
360   FOR I=1 TO M
370     PRINT 3,USING F CM$,I,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z
380     NEXT I
390
400 RNM=25
410 FOR J=1 TO NL
420   PRINT 3
430   PRINT 3
440   PRINT 3,TAB (45) *                                CONDICION DE CARGA NO. * J
450   PRINT 3,TAB (45) *                                =====
460   PRINT 3,TAB (45) *                                (COMMENT.)*
470   PRINT 3,TAB (45) *                                =====
480   RNM = RNM + 1
490   INPUT 2,REC =RNM,USING * POS(31)                POS(50)    *,CNUD,CMEM
500 IF CNUD=0 THEN 550
510   CALL CARGA NUCCS
520   FOR I=1 TO CNUD
530     PRINT 3,USING F CN$,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z
540     NEXT I
550 IF CMEM=0 THEN 600
560   CALL CARGA MIEMBROS
570   FOR I=1 TO CMEM
580     PRINT 3,USING F CM$,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z,Z

```

```

590      NEXT I
600      PRINT 3
610      PRINT 3
620      PRINT 3,TAB (52) 'RESULTADOS COND. DE CARGA NO.' J
630      PRINT 3,TAB (52) '=====
640      CALL DEFLEXIONES
650      FOR I=1 TO NJ
660      PRINT 3,USING F DEF$,I
670      NEXT I
680      CALL ACCIONES
690      FOR I=1 TO M
700      PRINT 3,USING F ACC$,I
710      NEXT I
715      CALL REACCIONES
716      FOR I=1 TO NNR
717      PRINT 3,USING F RC$,2
718      NEXT I
720 NEXT J
730
735 FOR IMB=1 TO M
736 PRINT 4
737 NEXT IMB
738
739 CLCSE 2
740 CLCSE 3
750 CLCSE 4
760
770 STOP
780
5000 =====
5010 S U B R U T I N A S
5020 =====
5030
5040 ----- R E T U L O S -----
10000
10010
10020 PRGC ENCARREZALL
10030 PRINT 3
10040 PRINT 3
10050 PRINT 3,TAB (55) 'ANALISIS DE ESTRUCTURAS'
10060 PRINT 3
10070 PRINT 3,TAB (40) '=====
10080 PRINT 3,TAB (40) 'PROYECTO      ' PROJ
10090 PRINT 3,TAB (40) 'DESCRIPCION    ' DES$
10100 PRINT 3,TAB (40) 'FECHA          ' FECHA$
10110 PRINT 3,TAB (40) 'PCR            ' PCR$ TAB (88) 'PANS'
10120 PRINT 3,TAB (40) '=====
10130 PRINT 3
10140 PRINT 3
10150 PRINT 3,TAB (59) 'DATOS GENERALES'
10160 PRINT 3
10170 PRINT 3,USING F DG$,M,'MIEMBROS',NJ,'NUDOS',NL,'COND. DE CARGA'
10180 ENDPGCC
10190
10200
10210
10220 PRGC DATOS NUDOS
10230 PRINT 3
10240 PRINT 3
10250 PRINT 3,TAB (60) 'DATOS DE NUDOS'

```

```

10260 PRINT 3,TAB (39) "-----" *
10270      8 "-----"
10280 PRINT 3,TAB (39) "NUDG          COORDENADAS          RESTRICCION" *
10285      8 "ES          "
10290 PRINT 3,TAB (39) "NC.          X          Y          Z          TRASL.          R" *
10300      8 "CTAC.          "
10310 PRINT 3,TAB (39) "          (M)          (M)          (M)          X Y Z          X" *
10320      8 "Y Z          "
10330 PRINT 3,TAB (39) "-----" *
10340      8 "-----"
10350 ENCFRCC
10360
10370
10380
10390 PRGC DATOS MIEMBROS
10400 PRINT 3
10410 PRINT 3
10420 PRINT 3,TAB (58) "DATOS DE MIEMBROS"
10430 PRINT 3,TAB (27) RPT$("-","60)
10440 PRINT 3,TAB (27) "MIEMBRO LADO MCM. DE INERCIA CTE. ARE" *
10450      8 "A MOEULOS ROTACION LONG."
10460 PRINT 3,TAB (27) "NC. TIPC A B X-X Y-Y TGRS." *
10470      8 "E G TIPC ANG."
10480 PRINT 3,TAB (27) "          (CM4) (CM4) (CM4) (CM2" *
10490      8 "          (K/CM2) (O/1) (GRS) (P)"
10500 PRINT 3,TAB (27) RPT$("-","60)
10510 ENCFRCC
10520
10530
10540
10550 PRGC CARGA MIEMBROS
10560 PRINT 3
10570 PRINT 3
10580 PRINT 3,TAB (45) "DATOS DE CARGA EN MIEMBROS - CONDICION NO. " J
10590 PRINT 3,TAB (42) "-----"
10600 PRINT 3,TAB (42) "MBRG. CARGA DISTRIBUCION ANG. PLANG"
10610 PRINT 3,TAB (42) "NR. PUNTAL-KIP ORIGEN FIN DE"
10620 PRINT 3,TAB (42) "DIST.-TON/M (M) (M) (GRS) CARGA"
10630 PRINT 3,TAB (42) "-----"
10640 ENCFRCC
10650
10660
10670
10680 PRGC CARGA NUCCS
10690 PRINT 3
10700 PRINT 3
10710 PRINT 3,TAB (51) "DATOS DE CARGA EN NUCCS - CONDICION NO. " J
10720 PRINT 3,TAB (32) RPT$("-","65)
10730 PRINT 3,TAB (32) "NUDG FUERZA-X FUERZA-Y FUERZA-Z MOME" *
10740      8 "ATC-X MOMENTC-Y MOMENTC-Z"
10750 PRINT 3,TAB (32) "NO. (TCNS) (TONS) (TCNS) (TG" *
10760      8 "N-M) (TCN-M) (TON-M)"
10770 PRINT 3,TAB (32) RPT$("-","65)
10780 ENCFRCC
10790
10800
10810
10820 PRGC DEFLEXIONES
10830 PRINT 3
10840 PRINT 3

```



```

10850 PRINT 3,TAB (42) 'D E F L E X I C N E S   Y   R O T A C I O N E S'
10870 PRINT 3,TAB (30) RPT$( '- ',70)
10880 PRINT 3,TAB (30) 'NUDO   DEFL-X       DEFL-Y       DEFL-Z       ROTAC.° + &
10890      & 'X       ROTAC-Y       ROTAC-Z °
10900 PRINT 3,TAB (30) ' NO.   (CM)       (CM)       (CM)       (RAD)° + &
10910      & '       (RAD)       (RAD) °
10920 PRINT 3,TAB (30) RPT$( '- ',70)
10930 ENDPRGC
10940
10950
10960
10970 PRGC ACCIONES
10980 PRINT 3
10990 PRINT 3
11000 PRINT 3,TAB (49) 'ACCIONES EN EXTREMOS DE LCS MIEMBROS'
11020 PRINT 3,TAB (3) RPT$( '- ',128)
11030 PRINT 3,TAB (3) 'MBRO.   FUERZAS EN LADO A       MOMENTO° +
11040 & 'S EN LADO A       FUERZAS EN LADO B       MOMENTOS EN ° +
11050 & 'LADO B °
11055 PRINT 3,TAB (3) ' NO.   ----- (TUNS) ----- (TUN° +
11056 & 'TS-MT.) ----- (TUNS) ----- (TUNS-MT)° +
11057 & '.) ----- °
11060 PRINT 3,TAB (3) '       X       Y       Z       X       Y ° +
11070 & ' Y       Z       X       Y       Z       X       Y ° +
11080 & '       Z °
11090 PRINT 3,TAB (3) RPT$( '- ',128)
11100 ENDPRGC
11110
11120
11130
11140 PRGC REACCIONES
11150 PRINT 3
11160 PRINT 3
11170 PRINT 3,TAB (58) 'R E A C C I O N E S'
11180 PRINT 3,TAB (32) RPT$( '- ',69)
11190 PRINT 3,TAB (32) 'NUDO FUERZA-X   FUERZA-Y   FUERZA-Z   MGME° + &
11200      & 'NTO-X   MOMENTO-Y   MOMENTO-Z°
11210 PRINT 3,TAB (32) ' NO.   (KIPS)   (KIPS)   (KIPS)   (KI° + &
11220      & 'P-P)   (KIP-F)   (KIP-P) °
11230 PRINT 3,TAB (32) RPT$( '- ',69)
11240 ENDPRGC
11250
11260
11270
13000 ----- F O R M A T O S -----
13010
13020 PRGC FORMATOS
13030 IMPRESION DE DATOS GENERALES
13040 F C$=RPT$( ' ',42) + ' * * *
13050 DATOS DE NUDOS
13060 F C$=RPT$( ' ',36) + ' ' + RPT$( ' - ' ,3) + RPT$( ' ' ,2
13070 DATOS DE MIEMBROS
13080 F C$= '
13090      & '
13100      F C$=RPT$( ' ',26) + F C$
13110 CARGA EN MIEMBROS
13120 F C$=RPT$( ' ',42) + ' - - - - -
13130 CARGA EN NUDOS
13140 F C$=RPT$( ' ',32) + ' ' + RPT$( ' - ' ,6)
13150 DEFLEXIONES Y ROTACIONES DE NUDOS

```

13160 F CEF\$=RPI\$(' ',29) + ' ' + RPI\$(' - . ' ,6)
 13170 ACCIONES EN MIEMBROS
 13180 F ACC\$= ' ' + RPT\$(' - ' ,12)
 13185 * REACCIONES
 13186 F RC\$=RPI\$(' ',29) + ' ' + RPT\$(' - . ' ,6)
 13190
 13200 ENDPRCC
 13210
 13220
 13230



A.4. PROGRAMA ET300

Listado del programa que efectúa el proceso general de cálculo de la estructura en base a los datos ingresados, y que genera los resultados del análisis.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES

TESIS DE GRADO
RICARDO NARANJO SUAREZ

GLAYACUIL-ECLADCK
1986

=====

PROGRAMA ET300

FECHA FEB 23/86

=====

```

00. COMENTARIO EN PANTALLA
    PRINT "  INICIALIZACION..."
01. APERTURA DE ARCHIVOS
    OPEN 2,"ADC2",INPUT
    OPEN 3,"(F 132)ADC3",INPUT
    OPEN 4,"(F 180)ADC4",INPUT
02. LECTURA DE DATOS GENERALES
    INPUT 2,REC =13,USING " PCS(57)      ",NMB
    INPUT 2,REC =15,USING " PCS(57)      ",AND
    INPUT 2,REC =17,USING " PCS(57)      ",NCG
03. DIMENSIONAMIENTO DE ARREGLOS
    OPTION BASE 1
    031. ARREGLOS ENTEROS
        DIM DESP (AND,6),REST (6)
        DIM U (12),IC (12)
    032. ARREGLOS REALES
        DIM X(AND),Y(AND),Z(AND),CL(12,1)
        DIM T(12,12),TT(12,12),T9(12,12)
        DIM K(12,12),KG(12,12)
        DIM CGS(6),ACC(NMB,12)
        DIM FM(12,1),FMG(12,1),M(12,1)
04. LECTURA DE FORMATS
    CALL FFORMATS
    PRINT "  CK..."

```

1. GENERACION DE LA MATRIZ DE DESPLAZAMIENTOS D

```

1040 10. COMENTARIO EN PANTALLA
1050 PRINT '1. MATRIZ DE DESPLAZAMIENTOS...'
1060 11. INICIALIZACION DE VARIABLES
1070 N1= C
1080 N2= C
1090 REG= 22
1100 12. LAZO PARA PROCESAMIENTO DE DATOS DE NUDOS
1110 FOR I=1 TO NND
1120 121. LECTURA DE DATOS
1130 REG = REG + 1
1140 INPUT 3,REC =REG,USING F DN1,J,X0,YC,Z0,MAT REST
1150 122. ASIGNACION DE VALORES A ARREGLOS DE COORDENADAS
1160 X(IJ)=X0*1
1170 Y(IJ)=YC*1
1180 Z(IJ)=Z0*1
1190 123. ASIGNACION DE SUBINDICES DE DESPLAZAMIENTO
1200 FOR L=1 TO 6
1210 IF REST (L) C THEN 1250
1220 N1=N1+1
1230 DESP (J,L)=N1
1240 GOTO 1270
1250 N2=N2-1
1260 DESP (J,L)=N2
1270 NEXT L
1280 NEXT I
1290 -----
1300 PRINT ' CK.'
1310
1320
1330
2000 -----
2010 2. GENERACION DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ .S
2020 -----
2030
2040 20. COMENTARIO DE PANTALLA
2050 PRINT '2. MATRIZ DE RIGIDEZ'
2060 21. ASIGNACION DE VALORES A VARIABLES
2080 MUC=1
2090 EG=2100
2100 GG=840
2110 23. PROCESAMIENTO DE DATOS DE MIEMBROS
2120 REG = REG + 8
2130 FOR IJK=1 TO NMB
2140 231. LECTURA DE DATOS
2150 REG = REG + 1
2160 INPUT 3,REC =REG,USING F DM1,IM,IP,A,B,IZ,IY,JX,AT,E,G,YZ,F1
2170 232. ASIGNACION DE VALORES DE 'E' Y 'G' ASUMIDOS (ACERC)
2180 IF E=C THEN E=EG

```



```

2190      IF G=0 THEN G=GG
2200 233. ASIGNACION DE NUMEROS DE DESPLAZAMIENTO A ARREGLO 'D'
2210      FOR L=1 TO 6
2220      D(L)=DESP(A,L)
2230      D(L+6)=DESP(E,L)
2240      NEXT L
2250 234. CALCULO DE ANCHO DE MEDIA BANDA DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ
2260      MAT ID = DICX(D)
2270      FOR L=1 TO 11
2280      IF D(ID(L+1)) < D THEN 2300
2290      NEXT L
2300      AMB=D(ID(1))-D(ID(11))
2310      IF AMB >= 0 THEN MLC=AMB
2320 235. CALCULO DE LONG. Y COSENO DIRECTORES
2330      LM=SQR((X(B)-X(A))2+(Y(B)-Y(A))2+(Z(B)-Z(A))2)
2340      LMO=LM/12
2350      CX=(X(B)-X(A))/LM
2360      CY=(Y(B)-Y(A))/LM
2370      CZ=(Z(B)-Z(A))/LM
2380      PRINT 3,REC=REC,USING " PLS(1G1) " " ,LMO
2390 236. ALMACENAMIENTO EN ARCP4VG DE DATOS DEL MIEMBRO
2400      PRINT 4,REC=1JK,USING F AM$,IM,IM,IZ,LY,JX,AT,E,G,YZ,FI,LM,&
2410      & CX,CY,CZ,MAT D
2420      NEXT 1JK
2430 24. DIMENSIONAMIENTO DEL VECTOR 'A' PARA ALMACENAR LA MATRIZ DE RIGIDEZ
2440      MM=MLC+1
2450      NS=MLC*MM/2
2460      N=N1
2470      NM=N*MM-NS
2480      NELM=NM+N1-N2
2490      DIM A(NELM)
2500      MAT A = ZER
2510 25. LAZC PARA CALCULAR Y ALMACENAR ELEMENTOS DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ
2520      FOR IMB=1 TO NMB
2530      PRINT " MIEMBRO NO. " IMB
2540      INPUT 4,REC=IMB,USING F AM$,IM,IM,IZ,LY,JX,AT,E,G,YZ,FI,LM,&
2550      & CX,CY,CZ,MAT D
2560      CALL TRANSFORM
2570      CALL MATRIZ
2580      CALL CLASIF
2590      NEXT IMB
2600      -----
2610      PRINT " ...OK. MATRIZ DE RIGIDEZ"
2620
2630
2640
3000
3061

```

3. FACTORIZACION DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ

```

3002
3004
3005 30. COMENTARIO EN PANTALLA
3006 PRINT '3. FACTORIZANDO LA MATRIZ DE RIGIDEZ' IB=0
3120 31. FACTORIZACION DE S POR COLUMNAS
3130 FOR J=1 TO N
3135 311. ELEMENTOS DE LA DIAGONAL PRINCIPAL
3136 3111. CALCULO DEL SUBINDICE DE 'A' PARA EL ELEMENTO G(J,J)
3140 IF J-MOD=C THEN 3180
3150 IN=J-MOD
3160 L=IN+(J-IN)*MOD+NS
3170 GOTG 3240
3180 IN=1
3190 L=IN+(J-1)*J/2
3235 3112. SUMATORIA DE ELEMENTOS G(J,K)**2
3240 S1=0
3250 J1=J-1
3260 J2=J+1
3270 IF J1=0 THEN 3330
3280 FOR K=IN TO J1
3290 T1=A(L)
3300 S1=S1+T1^2
3310 L=L+1
3320 NEXT K
3325 3113. CALCULO DE ELEMENTO G(J,J)
3330 T1=A(L)
3340 IF T1-S1<0 THEN 3557
3350 T1=(T1-S1)/C-5
3360 A(L)=T1
3365 312. ELEMENTOS DE CADA COLUMNA BAJO LA DIAGONAL
3370 IF J-N=0 THEN 3550
3371 3121. SUBINDICE DEL ULTIMO ELEMENTO DE LA COLUMNA
3372 IF J-N+MOD=C THEN 3375
3373 M5=N
3374 GOTG 3380
3375 M5=J+MOD
3380 FOR I=J2 TO M5
3390 SM=0
3395 3122. CALCULO DEL SUBINDICE DE 'A' PARA EL ELEMENTO G(I,J)
3400 IF I-MOD=C THEN 3440
3410 IN=I-MOD
3420 LL=IN+(I-IN)*MOD+NS
3430 GOTG 3460
3440 IN=1
3450 LL=IN+(I-1)*I/2
3455 3123. SUMATORIA DE PRODUCTOS G(I,K)*G(J,K)
3460 IF J1=0 THEN 3530
3470 IF IN-J1<0 THEN 3530

```

```

3480         FOR K=1N TO J1
3490         LM=L+K-J
3500         SM=SM+A(LL)*A(LM)
3510         LL=LL+1
3520         NEXT K
3525     3124. CALCULO DE ELEMENTO G(I,J)
3530         A(LL)=(A(LL)-SM)/A(L)
3540         NEXT I
3550     NEXT J
3555     GO TO 4000
3556 32. COMENTARIO DE ERRORES
3557 PRINT 'LA MATRIZ DE RIGIDEZ NO ES FACTORIZABLE.'
3558 STOP
3561
3562
3563 -----
4000     4. GENERACION DE MATRIZ DE CARGA EN NUCCS LIBRES  CN
4010 -----
4020
4030
4040 40. COMENTARIO EN PANTALLA
4050 PRINT '4. MATRIZ DE CARGA EN NUCCS'
4060 41. INICIALIZACION DE VARIABLES
4070     RNL = 25
4075     CARGA = 1
4080     REG = REG + 6
4100 42. LECTURA DE DATOS DE LA CONDICION DE CARGA
4110     RNL = RNL + 1
4120     INPUT 2,REG =RNL,USING ' PCS(31)      PGS(50)      ',CNUD,CMEM
4130 43. ANALISIS DE CARGA EN NUCCS
4140     IF CNUD=0 THEN 4280
4150     REG = REG + 7
4160     FOR ICN=1 TO CNUD
4170     431. LECTURA DE DATOS
4180         REG = REG + 1
4190         INPUT 3,REG =REG,USING ' CN1,J,MAT CGS
4200     432. PROCESAMIENTO DE DATOS
4210         FOR L=1 TO 6
4220             IF DESP (J,L) =0 THEN 4260
4230             IF L 3 THEN CGS(L)=CGS(L)+100
4240             IO=DESP (J,L)*NM
4250             A(IC)=A(IC)+CGS(L)
4260         NEXT L
4270     NEXT ICN
4280 44. ANALISIS DE CARGA EN MIEMBROS
4290     IF CMEM=0 THEN 5000
4300     REG = REG + 8
4310     441. INICIALIZACION DE MATRIZ DE ACCIONES

```

```

4320      MAT ACC = ZER
4330 442. LECTURA DE DATOS
4340      FOR ICM=1 TO CMEP
4350      REG= REG + 1
4360      INPUT 3,REC =REG,USING F CM1,IM,W,X1,X2,ALPHA,PLANO
4370 443. CALCULO DE REACCIONES EN LOS EXTREMOS
4380      IF X2-X1=0.05 THEN W=W/1
4390      XX1=X1*1
4400      XX2=X2*1
4410      COSA=FN COSG(ALPHA)
4420      SINA=FN SING(ALPHA)
4430      INPUT 4,REC =IM,USING " POS(6) FCS(73) " ,TM,LM
4440      IF TM= 0 THEN CALL EMPCTRADO
4450      IF IM 0 THEN CALL ARTICULADO
4460 444. ASIGNACION DE REACCIONES A ARREGLO ACC
4470      ACC(IM,1)=ACC(IM,1)+FIA
4480      ACC(IM,7)=ACC(IM,7)+FIE
4490      IF PLANO=1 THEN 4550
4500      ACC(IM,2)=ACC(IM,2)+FCA
4510      ACC(IM,6)=ACC(IM,6)+MFA
4520      ACC(IM,8)=ACC(IM,8)+FCB
4530      ACC(IM,12)=ACC(IM,12)+MFB
4540      GOTO 4590
4550      ACC(IM,3)=ACC(IM,3)+FCA
4560      ACC(IM,5)=ACC(IM,5)+MFA
4570      ACC(IM,9)=ACC(IM,9)+FCB
4580      ACC(IM,11)=ACC(IM,11)+MFB
4590      NEXT ICM
4600 445. CARGA EQUIVALENTE EN NUDOS
4610 4451. LECTURA DE DATOS DEL MIEMBRO CARGADO
4620      FOR LLL=1 TO NME
4630      PRINT " MIEMBRO NO. " LLL
4640      INPUT 4,REC =LLL,USING F AM1,IM,TM,IZ,IY,JX,AT,E,G,
4650      & YZ,F1,LM,CX,CY,CZ,MAT C
4660 4452. TRANSFORMACION DE REACCIONES A COORD. GENERALES
4670      CALL TRANSFORM
4680      MAT IT = TRN (T)
4690      FOR L=1 TO 12
4700      FM(L,1)=ACC(IM,L)
4710      NEXT L
4720      MAT FMG = IT * FM
4730 4453. SUPERPOSICION DE ACCIONES EN VECTOR DE CARGA
4740      FOR L=1 TO 12
4750      IF C (L) =C THEN 4780
4760      IO=D (L)+NM
4770      A(10)=A(IO)-FMG(L,1)
4780      NEXT L
4790      NEXT LLL

```


4800
4810
4820
5000
5010
5020
5025
5030
5040
5050
5110
5120
5130
5135
5136
5140
5145
5150
5160
5170
5180
5190
5200
5210
5220
5230
5235
5240
5250
5260
5270
5280
5290
5300
5305
5310
5320
5330
5340
5350
5360
5370
5380
5385
5390
5395
5400
5410

5. CALCULO DE LAS TRASLACIONES Y ROTACIONES DE LOS NUDOS

```

50. COMENTARIO EN PANTALLA
PRINT #5. CALCULANDO DEFLEXIONES Y ROTACIONES DE NUDOS.
51. RESOLUCION DEL SISTEMA POR EL METODO DE CHOLESKY
NR=10+1
NE=NM+1
FOR K=1 TO NR
511. SUSTITUCION DIRECTA
5111. CALCULO DEL ELEMENTO F1
A(NB)=A(NB)/A(1)
5112. PARAMETROS PARA CALCULAR F2,F3,...FN
FOR I=2 TO N
IF I-MOD=C THEN 5210
IN=I-MM
KS=IN*MLC+NS
MS=MUD
GOTO 5240
IN=C
MS=I-1
KS=MS*I/2
5113. SUMATORIA DE TERMINOS CONOCIDOS DE LA ECUAC.
SM=0
FOR J=1 TO MS
JR=J+IN
L=JR+KS
JR=JR+NE-1
SM=SM+A(L)*A(JR)
NEXT J
5114. ELEMENTO F1 (I=2,3,...N)
ID=I+KS
A(JR+1)=(A(JR+1)-SM)/A(ID)
NEXT I
NB=NB+N
NEXT K
512. SUSTITUCION INVERSA (CALCULO DE DESPLAZAMIENTOS)
NE=NM+N
FOR K=1 TO NR
5121. ELEMENTO N-ESIMO
A(NB)=A(NB)/A(NM)
5122. PARAMETROS PARA CALCULAR DESP. D(N-1),...D2,D1
FOR II=2 TO N
I=N-II+1

```



```

5420      IF I-MUD = 0 THEN 5450
5430      ID=I+(1-MM)*MUD*NS
5440      GO TO 5460
5450      ID=I*(1-1)*I/2
5460      IF 1-N*MM = 0 THEN 5490
5470      M5=1I-1
5480      GO TO 5500
5490      M5=MUD
5495  5123. SUMATORIA DE LOS TERMINOS CONOCIDOS DE LA ECUAC.
5500      SM=C
5510      FOR J=1 TO M5
5520      JR=I+J
5530      IF JR-MUD = 0 THEN 5560
5540      L=1+(JR-MM)*MUD*NS
5550      GO TO 5570
5560      L=1+(JR-1)*JR/2
5570      JR=NB-N+JR
5580      SM=SM+A(L)*A(JR)
5590      NEXT J
5595  5124. DESPLAZAMIENTO CI (i=N-1,N-2,...,1)
5600      JR=NB-N+I
5610      A(JR)=(A(JR)-SM)/A(ID)
5620      NEXT I
5630      NB=NB+N
5640      NEXT K
5810  52. ASIGNACION DE RESULTADOS A MATRIZ CGS E IMPRESION
5820      REG = REG + 11
5830      FOR I=1 TO AND
5840      PRINT " NUDO NO. " I
5850      MAT CGS = ZER
5860      FOR J=1 TO 6
5870      IF DESP (I,J) = 0 THEN 5900
5880      I9=NM+DESP (I,J)
5890      CGS(IJ)=A(I9)
5900      NEXT J
5910      REG = REG + 1
5920      PRINT J,REG =REG,USING F DEF$,1,MAT CGS
5925      PRINT USING F DEF$,I,MAT CGS
5930      NEXT I
5940
5950
5960
6000 -----
6010  6. ACCIONES FINALES EN EXTREMOS DE MIEMBROS Y REACCIONES EN APCYS
6020 -----
6021
6030  60. COMENTARIO EN PANTALLA
6040      PRINT "6. CALCULANDO ACCIONES EN EXTREMOS DE LOS MIEMBROS"

```

```

6050 61. LECTURA DE DATOS
6060 REG = REG + 8
6070 FOR IJK=1 TO NMD
6080 PRINT " MIEMBRO NO. " IJK
6090 INPUT 4, REC = IJK, USING F AM$, IM, IM, IZ, IY, JX, AT, E, G, YZ, FI, LM, &
6100 & CX, CY, CZ, MAT D
6110 62. CALCULO DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN COORDENADAS LOCALES
6130 CALL TRANSFORM
6149 MAT FMG = ZER
6150 FOR L=1 TO 12
6151 IF D (L) = C THEN 6155
6152 I9=NM+D (L)
6153 FMG(L,1)=A(I9)
6155 NEXT L
6156 MAT DL = T * FMG
6240 64. ACCIONES DE EMPUTRAMIENTO
6241 CALL MATRIZ
6242 MAT FM= K * DL
6310 65. CALCULO DE ACCIONES FINALES
6311 FOR L=1 TO 3
6312 M(L,1)=FM(L,1)+ACC(IM,L)
6313 M(L+3,1)=(FM(L+3,1)+ACC(IM,L+3))/100
6314 M(L+6,1)=FM(L+6,1)+ACC(IM,L+6)
6315 M(L+9,1)=(FM(L+9,1)+ACC(IM,L+9))/100
6316 NEXT L
6440 66. IMPRESION DE ACCIONES FINALES EN COORD. LOCALES
6450 REG = REG + 1
6460 PRINT 3, REC = REG, USING F ACC$, IM, MAT M
6465 PRINT USING F ACC$, IM, MAT M
6485 67. ACCIONES FINALES EN COORDENADAS GENERALES
6486 MAT II = TRN(T)
6487 MAT FMG = II * M
6488 68. ASIGNACION DE ACCIONES EN APOYOS RESTRING. A ARREGLO A
6489 FOR L=1 TO 12
6490 IF D (L) = C THEN 6493
6491 I9=NM+N1-D (L)
6492 A(I9)=FMG(L,1)
6493 NEXT L
6495 NEXT IJK
6499 69. ASIGNACION E IMPRESION DE REACCIONES EN APOYOS RESTRING.
6500 REG = REG + 7
6501 FOR IND=1 TO NND
6502 FOR L=1 TO 6
6503 IF DESP (IND,L) C THEN 6506
6504 NEXT L
6505 GOTO 6514
6506 MAT CGS = ZER
6507 FOR L=1 TO 6

```




```

6508     IF DESP (IND,L) =0 THEN 6511
6509     I9=NM+N-DESP (IND,L)
6510     CGS(L)=A(I9)
6511     NEXT L
6512     REG = REG + 1
6513     PRINT 3,REG =REG,LSING F AC3,IND,MAT CGS
6514     NEXT IND
6599     PRINT '...OK. CONDICION DE CARGA NO. * CARGA
6600
6610
6620
8000  -----
8010                      8. INSTRUCCIONES FINALES
8020  -----
8030
8031  81. VERIFICACION SI HAY OTRA CONDICION DE CARGA
8032      CARGA = CARGA + 1 PRINT CARGA= CARGA
8033      IF CARGA NCG THEN 8040
8034      FOR L=NM+N+1 TO NLM
8035          ALL=C
8036      NEXT L
8037      GO TO 4080
8040  82. CIERRE DE ARCHIVOS
8050      CLCSE 2
8060      CLCSE 3
8070      CLCSE 4
8080  83. COMENTARIOS DE ERRORES
8090      GOTO 8160
8100      PRINT 'ERROR EN INGRESO DE DATOS.'
8110      GOTO 8160
8120      PRINT 'ANCHO DE BANDA. MUD=' MUD ', MAX_=' N-1
8130      GOTO 8160
8140      PRINT 'INSUF. CAPACIDAD PARA ALMACENAR MATRIZ DE RIGIDEZ.'
8150      GOTO 8160
8160      STOP
8170
8180
8190
8200
8210
10000  =====
10010                      S U B R U T I N A S
10020  =====
10030
10040
10050
11000  DEF FN SING(X)
11010      X = X*PI/180

```

[illegible]

```

15030      WU=W*CGSA
15040      FIA=W*SINA*(LM-XX1)/LM
15050      FIB=W*SINA-FIA
15060      GGTG 15100
15065      * FUERZAS AXIALES - CARGA PUNTUAL
15070      WU=W*CGSA
15080      FIB=W*SINA*C*(XX1-XX2)/(2*LM)
15090      FIA=W*SINA*C-FIB
15095      * MOMENTOS FLECTORES
15100      C=LM-XX1/2-XX2/2
15110      TS1=WU/(24*LM)
15120      TS2=24*D 3/LM-6*XX2*C 2/LM+3*C 3/LM
15130      TS3=4*C*C-24*D*C
15140      MFA=-TS1*(TS2+TS3)
15150      TS3=2*C*C-48*D*C+24*D*LM
15160      MFB=-TS1*(TS2+TS3)
15165      * FUERZAS CORTANTES
15170      TS1=TS1*6/LM
15180      TS2=12*C*D-8*D 3/LM+2*XX2*C*C/LM-L 3/LM-C*C
15190      FCA=TS1+TS2
15200      FCB=WU-FCA
15210      ENCPRLC
15220
15230
15240
16000      PRCC ARTICULADO
16005      * MOMENTOS FLECTORES
16010      MFA=C
16020      MFB=C
16024      * FUERZAS AXIALES - CARGA PUNTUAL
16025      XA=XX1
16026      XB=XX2
16030      C=XB-XA
16040      IF ABS(C)-D.G5 0 THEN 16090
16050      WU=W*CGSA
16060      FIA=W*SINA*(LM-XA)/LM
16070      FIB=W*SINA-FIB
16080      GGTG 16120
16085      * FUERZAS AXIALES - CARGA DISTRIBUIDA
16090      FIB=W*SINA*(XA-XB)*C/(2*LM)
16100      FIA=W*SINA*C-FIB
16110      WU=W*CGSA
16120      D=LM-.5*(XA+XB)
16125      * FUERZAS CORTANTES
16130      FCA=WU*D/LM
16140      FCB=WU-FCA
16150      ENCPRCC
16160

```



```

18090      C2=2*E*I2/LM
18100      C3=3*C1/LM
18110      C4=3*C2/LM
18120      C5=2*C3/LM
18130      C6=2*C4/LM
18140      C7=C*IX/LM
18150      C8=E*AT/LM
18155      * ELEMENTOS PARA MIEMBROS ARTICULADOS
18160      K(1,1)=C8
18170      K(1,7)=-C8
18180      K(7,7)=C8
18190      IF TM 0 THEN 18430
18195      * ELEMENTOS PARA MIEMBROS EMPETRADOS
18200      K(2,2)=C6
18210      K(3,3)=C5
18220      K(4,4)=C7
18230      K(5,5)=2*C1
18240      K(6,6)=2*C2
18250      K(8,8)=C6
18260      K(9,9)=C5
18270      K(10,10)=C7
18280      K(11,11)=2*C1
18290      K(12,12)=2*C2
18300      K(2,6)=C4
18310      K(2,8)=-C6
18320      K(2,12)=C4
18330      K(3,5)=-C3
18340      K(3,9)=-C5
18350      K(3,11)=-C3
18360      K(4,10)=-C7
18370      K(5,9)=C3
18380      K(5,11)=C1
18390      K(6,8)=-C4
18400      K(6,12)=C2
18410      K(8,12)=-C4
18420      K(9,11)=C3
18425      * MATRIZ DE RIGIDEZ EN COORDENADAS LOCALES
18430      FOR J=2 TO 12
18440      JL=J-1
18450      FOR I=1 TO JL
18460      K(J,I)=K(I,J)
18470      NEXT I
18480      NEXT J
18485      * MATRIZ DE RIGIDEZ EN COORDENADAS GENERALES
18530      MAT TS = K * I
18605      MAT IT = TRANS
18610      MAT KG = IT * TS
18650      ENCFRCC

```

```

16170
16180
17000 PRCC TRANSFORM
17001 PRINT *          MATRIZ DE TRANSFORMACION*
17005 * INICIALIZACION DE VARIABLES
17010 MAT 1 = ZER
17020 T(1,1)=CX
17025 T(1,2)=CY
17030 T(1,3)=CZ
17210 SN=FN SING(FI)
17220 CS=FN COSG(FI)
17240 IF YZ=0 THEN 17360
17245 * TRANSFORMACION Z-Y-X
17250 TZ=SQRT(CX 2+CY 2)
17290 T(2,1)=(-CX*CZ*SN-CY*CS)/TZ
17300 T(2,2)=(-CY*(CZ*SN+CX*CS))/TZ
17310 T(2,3)=TZ*SN
17320 T(3,1)=(-CX*CZ*CS+CY*SN)/TZ
17330 T(3,2)=(-CY*CZ*CS-CX*SN)/TZ
17340 T(3,3)=TZ*CS
17350 GOTO 17450
17355 * TRANSFORMACION Y-Z-X
17360 TY=SQRT(CX 2+CZ 2)
17390 T(2,1)=(-CX*CY*CS-CZ*SN)/TY
17400 T(2,2)=TY*CS
17410 T(2,3)=(-CY*CZ*CS+CX*SN)/TY
17420 T(3,1)=(CX*CY*SN-CZ*CS)/TY
17430 T(3,2)=-TY*SN
17440 T(3,3)=(CY*CZ*SN+CX*CS)/TY
17445 * MATRIZ DE TRANSFORMACION
17450 FOR K=3 TO 9 STEP 3
17460 FOR I=1 TO 3
17470 FOR J=1 TO 3
17480 IK=1+K
17490 JK=J+K
17500 T(IK,JK)=T(I,J)
17510 NEXT J
17520 NEXT I
17530 NEXT K
17540 ENDFRCC
17550
17560
17570
18000 PRCC MATRIZ
18001 PRINT *          MATRIZ DE RIGIDEZ*
18020 * INICIALIZACION DE VARIABLES
18050 MAT K = ZER
18080 C1=2*E*1Y/LM

```



```
18660
18670
18680
19000 PRCC CLASIF          ALMACENANDO ELEMENTOS EN LA MATRIZ DE RIGIDEZ*
19020   PRINT *
19050   FOR L=1 TO 12
19060     I=D (L)
19070     FOR K=1 TO 12
19080       J=D (K)
19090       IF I J THEN 19140
19100       IF I 0 OR J 0 THEN 19140
19110       LL=J+(I-MM)*MUD+NS
19120       IF I =MUD THEN LL=J+(I-1)*1/2
19130       A(LL)=A(LL)+KG(I,L,K)
19140     NEXT K
19150   NEXT L
19170 ENDFRCC
```

BIBLIOGRAFIA

1. BEAUFAIT, ROWAN, HOADLEY y HACKETT, Computer Methods of Structural Analysis, Prentice-Hall, N.J., 1970.
2. CRIGGER, GRAHAM, HAY y MC PHEE, Watcom Basic User's Guide for the IBM 370 with VM/SP CMS, Watcom Publications, Waterloo, Ontario, Canada, 1983.
3. GRAHAM, MC PHEE y WELCH, Watcom Basic: Primer and reference manual, Editado por los autores, Waterloo, Ontario, Canadá, 1983.
4. IBM Virtual Machine/System Product: CMS User's Guide, IBM Corporation, USA, 1982.
5. IBM Virtual Machine/System Product: Exec 2 Reference, IBM Corporation, USA, 1982.

6. IBM Virtual Machine/System Product: Systems product Editor Command and Macro Reference, IBM Corporation USA, 1982.
7. Manual of Steel Construction, 7th. edition, American Institute of Steel Construction, N.Y., 1973.
8. ROJAS y NACATO, Técnica de Flujogramas, Editado por los autores, Quito, 1980.
9. ROSCULET MIRCEA, Analiza Matematica, Editura Didatica si Pedagogica, Bucarest, 1974.
10. SINGER FERDINAND, Resistencia de materiales, Harper & Row Latinoamericana, México, 1971.
11. YUAN-YU HSIEN, Teoría elemental de estructuras, Editorial Prentice-Hall Internacional/Edit. Dossat S.A., Madrid, 1973.