

Transformación de vectores de fuerzas de barra en coordenadas locales a vectores de fuerzas en coordenadas globales. Operación realizada mediante la ecuación: $F_b = A_b^T \cdot F_b^*$

Barra # 1: $\theta = 90^\circ$

$$F_{b1}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 1500 \\ 1500 \\ 0 \\ 1500 \\ -1500 \end{bmatrix} \quad F_{b1} = A(90^\circ)^T \times F_{b1}^* \Rightarrow F_{b1} = \begin{bmatrix} -1500 \\ 0 \\ 1500 \\ -1500 \\ 0 \\ -1500 \end{bmatrix}$$

Barra # 2: $\theta = 5.33216^\circ$

$$F_{b2}^* = \begin{bmatrix} 350 \\ -2652 \\ -6661 \\ 350 \\ -2652 \\ 6661 \end{bmatrix} \quad F_{b2} = A(5.33216^\circ)^T \times F_{b2}^* \Rightarrow F_{b2} = \begin{bmatrix} 595 \\ -2608 \\ -6661 \\ 595 \\ -2608 \\ 6661 \end{bmatrix}$$

Barra # 3: $\theta = -5.33216^\circ$

$$F_{b3}^* = \begin{bmatrix} -350 \\ 2621 \\ 6579 \\ -350 \\ 2621 \\ -6579 \end{bmatrix} \quad F_{b3} = A(-5.33216^\circ)^T \times F_{b3}^* \Rightarrow F_{b3} = \begin{bmatrix} -105 \\ 2642 \\ 6579 \\ -105 \\ 2642 \\ -6579 \end{bmatrix}$$

Barra # 4: $\theta = 90^\circ$

$$F_{b4}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 1200 \\ 1200 \\ 0 \\ 1200 \\ -1200 \end{bmatrix} \quad F_{b4} = A(90^\circ)^T \times F_{b4}^* \Rightarrow F_{b4} = \begin{bmatrix} -1200 \\ 0 \\ 1200 \\ -1200 \\ 0 \\ -1200 \end{bmatrix}$$

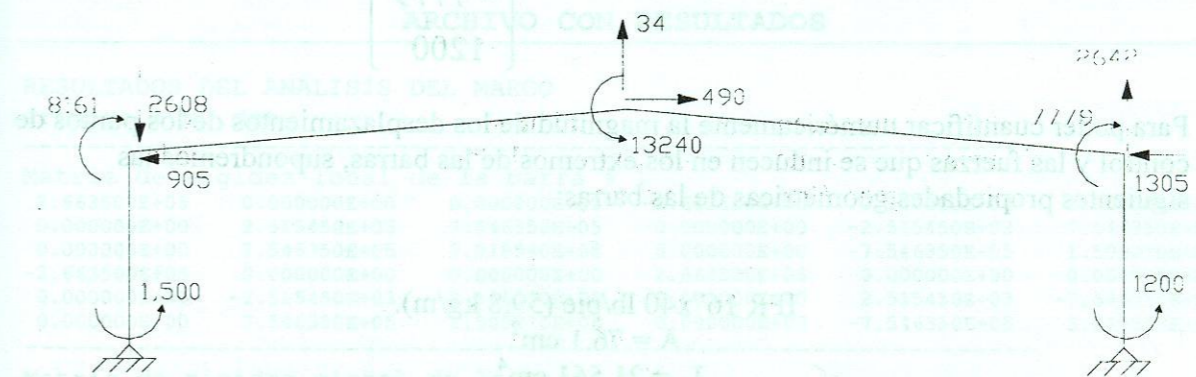
Y los valores numéricos de cada una de las tres diferentes matrices de transformación, son:

$$A(90^\circ) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A(5.33216^\circ) = \begin{bmatrix} 0.996 & 0.093 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.093 & 0.996 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.996 & 0.093 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.093 & 0.996 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

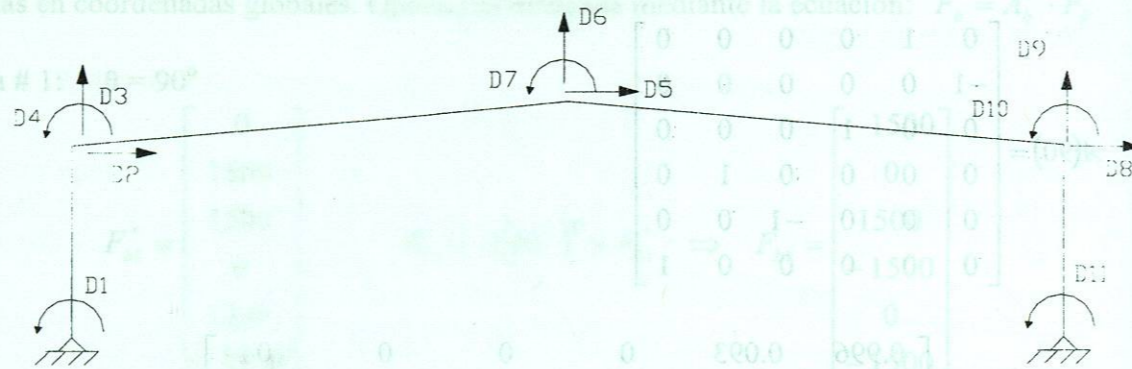
$$A(-5.33216^\circ) = \begin{bmatrix} 0.996 & -0.093 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.093 & 0.996 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.996 & -0.093 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.093 & 0.996 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ahora, podemos calcular la resultante de fuerzas ficticias en cada punto de control, partiendo de los vectores de fuerza en coordenadas globales.



Estado 1.

Análisis del estado 2



Grados de Libertad del Estado 2 "La Estructura Liberada"

El vector de fuerzas actuantes en el estado 2, se calcula como el valor negativo del vector de fuerzas ficticias del estado 1.

$$F_u = -F_{ficticias} = \begin{Bmatrix} 1500 \\ -905 \\ -2608 \\ -8161 \\ 490 \\ 34 \\ 13240 \\ -1305 \\ 2642 \\ -7779 \\ 1200 \end{Bmatrix}$$

Para poder cuantificar numéricamente la magnitud de los desplazamientos de los puntos de control y las fuerzas que se inducen en los extremos de las barras, supondremos las siguientes propiedades geométricas de las barras:

IPR 16"x40 lb/pie (59.8 kg/m).
 $A = 76.1 \text{ cm}^2$
 $I_{xx} = 21,561 \text{ cm}^4$

Análisis utilizando el programa MARCO1.EXE:

ARCHIVO DE DATOS

```
//
// El archivo contiene la información necesaria para elaborar el
// modelo matemático del marco de un claro y dos aguas utilizado
// en clase para demostrar método general con marcos NO ortogonales
// 4 de mayo 2000

5<- numero de nudos que forman la estructura
1 0 0 0 0 1
2 0 600 1 1 1
3 1500 740 1 1 1
4 3000 600 1 1 1
5 3000 0 0 0 1

// CONECTIVIDAD DE LAS BARRAS
4 <- numero de barras que forman la armadura
1 1 2 2100000 76.1 21561
2 2 3 2100000 76.1 21561
3 3 4 2100000 76.1 21561
4 5 4 2100000 76.1 21561

// Fuerzas actuantes en "puntos de control"
// NUDO Fx Fy Mz
1 0 0 -150000
2 905 2608 816100
3 -490 -34 -1324000
4 1305 -2642 777900
5 0 0 -120000
FIN
// FIN DEL ARCHIVO
```

ARCHIVO CON RESULTADOS

RESULTADOS DEL ANALISIS DEL MARCO

archivo : m2.dat

Matriz de rigidez local de la barra # 1

2.663500E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	-2.663500E+05	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	2.515450E+03	7.546350E+05	0.000000E+00	-2.515450E+03	7.546350E+05
0.000000E+00	7.546350E+05	3.018540E+08	0.000000E+00	-7.546350E+05	1.509270E+08
-2.663500E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	2.663500E+05	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	-2.515450E+03	-7.546350E+05	0.000000E+00	2.515450E+03	-7.546350E+05
0.000000E+00	7.546350E+05	1.509270E+08	0.000000E+00	-7.546350E+05	3.018540E+08

Matriz de rigidez global de la barra # 1

2.515450E+03	0.000000E+00	-7.546350E+05	-2.515450E+03	0.000000E+00	-7.546350E+05
0.000000E+00	2.663500E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	-2.663500E+05	0.000000E+00
-7.546350E+05	0.000000E+00	3.018540E+08	7.546350E+05	0.000000E+00	1.509270E+08
-2.515450E+03	0.000000E+00	7.546350E+05	2.515450E+03	0.000000E+00	7.546350E+05
0.000000E+00	-2.663500E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	2.663500E+05	0.000000E+00
-7.546350E+05	0.000000E+00	1.509270E+08	7.546350E+05	0.000000E+00	3.018540E+08

Matriz de rigidez local de la barra # 2

1.060790E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	-1.060790E+05	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	1.589079E+02	1.196989E+05	0.000000E+00	-1.589079E+02	1.196989E+05
0.000000E+00	1.196989E+05	1.202191E+08	0.000000E+00	-1.196989E+05	6.010956E+07
-1.060790E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	1.060790E+05	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	-1.589079E+02	-1.196989E+05	0.000000E+00	1.589079E+02	-1.196989E+05
0.000000E+00	1.196989E+05	6.010956E+07	0.000000E+00	-1.196989E+05	1.202191E+08

Matriz de rigidez global de la barra # 2

1.051643E+05	9.800499E+03	-1.112355E+04	-1.051643E+05	-9.800499E+03	-1.112355E+04
9.800499E+03	1.073621E+03	1.191809E+05	-9.800499E+03	-1.073621E+03	1.191809E+05
-1.112355E+04	1.191809E+05	1.202191E+08	1.112355E+04	-1.191809E+05	6.010956E+07
-1.051643E+05	-9.800499E+03	1.112355E+04	1.051643E+05	9.800499E+03	1.112355E+04
-9.800499E+03	-1.073621E+03	-1.191809E+05	9.800499E+03	1.073621E+03	-1.191809E+05
-1.112355E+04	1.191809E+05	6.010956E+07	1.112355E+04	-1.191809E+05	1.202191E+08

Matriz de rigidez local de la barra # 3

1.060790E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	-1.060790E+05	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	1.589079E+02	1.196989E+05	0.000000E+00	-1.589079E+02	1.196989E+05
0.000000E+00	1.196989E+05	1.202191E+08	0.000000E+00	-1.196989E+05	6.010956E+07
-1.060790E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	1.060790E+05	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	-1.589079E+02	-1.196989E+05	0.000000E+00	1.589079E+02	-1.196989E+05
0.000000E+00	1.196989E+05	6.010956E+07	0.000000E+00	-1.196989E+05	1.202191E+08

Matriz de rigidez global de la barra # 3

1.051643E+05	-9.800499E+03	1.112355E+04	-1.051643E+05	9.800499E+03	1.112355E+04
-9.800499E+03	1.073621E+03	1.191809E+05	9.800499E+03	-1.073621E+03	1.191809E+05
1.112355E+04	1.191809E+05	1.202191E+08	-1.112355E+04	-1.191809E+05	6.010956E+07
-1.051643E+05	9.800499E+03	-1.112355E+04	1.051643E+05	-9.800499E+03	-1.112355E+04
9.800499E+03	-1.073621E+03	-1.191809E+05	-9.800499E+03	1.073621E+03	-1.191809E+05
1.112355E+04	1.191809E+05	6.010956E+07	-1.112355E+04	-1.191809E+05	1.202191E+08

Matriz de rigidez local de la barra # 4

2.663500E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	-2.663500E+05	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	2.515450E+03	7.546350E+05	0.000000E+00	-2.515450E+03	7.546350E+05
0.000000E+00	7.546350E+05	3.018540E+08	0.000000E+00	-7.546350E+05	1.509270E+08
-2.663500E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	2.663500E+05	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	-2.515450E+03	-7.546350E+05	0.000000E+00	2.515450E+03	-7.546350E+05
0.000000E+00	7.546350E+05	1.509270E+08	0.000000E+00	-7.546350E+05	3.018540E+08

Matriz de rigidez global de la barra # 4

2.515450E+03	0.000000E+00	-7.546350E+05	-2.515450E+03	0.000000E+00	-7.546350E+05
0.000000E+00	2.663500E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	-2.663500E+05	0.000000E+00
-7.546350E+05	0.000000E+00	3.018540E+08	7.546350E+05	0.000000E+00	1.509270E+08
-2.515450E+03	0.000000E+00	7.546350E+05	2.515450E+03	0.000000E+00	7.546350E+05
0.000000E+00	-2.663500E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	2.663500E+05	0.000000E+00
-7.546350E+05	0.000000E+00	1.509270E+08	7.546350E+05	0.000000E+00	3.018540E+08

Matriz K11

3.018540E+08	7.546350E+05	0.000000E+00	1.509270E+08	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
7.546350E+05	1.076797E+05	9.800499E+03	7.435114E+05	-1.051643E+05	-9.800499E+03
1.112355E+04	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	9.800499E+03	2.674236E+05	1.191809E+05	-9.800499E+03	-1.073621E+03
1.191809E+05	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
1.509270E+08	7.435114E+05	1.191809E+05	4.220731E+08	1.112355E+04	-1.191809E+05
6.010956E+07	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	-1.051643E+05	-9.800499E+03	1.112355E+04	2.103285E+05	0.000000E+00
2.224710E+04	-1.051643E+05	9.800499E+03	1.112355E+04	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	-9.800499E+03	-1.073621E+03	-1.191809E+05	0.000000E+00	2.147242E+03
0.000000E+00	9.800499E+03	-1.073621E+03	1.191809E+05	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	-1.112355E+04	1.191809E+05	6.010956E+07	2.224710E+04	0.000000E+00
2.404382E+08	-1.112355E+04	-1.191809E+05	6.010956E+07	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	-1.051643E+05	9.800499E+03
1.112355E+04	1.076797E+05	-9.800499E+03	7.435114E+05	7.546350E+05	0.000000E+00
0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	9.800499E+03	-1.073621E+03
1.191809E+05	-9.800499E+03	2.674236E+05	-1.191809E+05	0.000000E+00	0.000000E+00

0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	-1.112355E+04	1.191809E+05
6.010956E+07	7.435114E+05	-1.191809E+05	4.220731E+08	1.509270E+08	0.000000E+00
0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	7.546350E+05	0.000000E+00	1.509270E+08	3.018540E+08	0.000000E+00

Vector de desplazamientos Du

# GL	MAGNITUD
1	5.260779E-05
2	-1.283513E+00
3	1.093348E-02
4	5.318489E-03
5	-1.266617E+00
6	-1.753384E-01
7	-8.159031E-03
8	-1.247733E+00
9	-1.118879E-02
10	5.247693E-03
11	9.794288E-05

VECTORES DE FUERZA INDUCIDOS EN ESTADO II

barra # 1

Vector de desplazamientos en coord. locales

0.000000E+00	0.000000E+00	5.260779E-05	1.093348E-02	1.283513E+00	5.318489E-03
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Vector de desplazamientos en coord. globales

0.000000E+00	0.000000E+00	5.260779E-05	-1.283513E+00	1.093348E-02	5.318489E-03
--------------	--------------	--------------	---------------	--------------	--------------

Vector de fuerza en coord. locales de la barra

-2.912133E+03	8.246061E+02	-1.500000E+05	2.912133E+03	-8.246061E+02	6.447637E+05
---------------	--------------	---------------	--------------	---------------	--------------

barra # 2

Vector de desplazamientos en coord. locales

-1.276942E+00	1.301623E-01	5.318489E-03	-1.277431E+00	-5.687360E-02	-8.159031E-03
---------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------

Vector de desplazamientos en coord. globales

-1.283513E+00	1.093348E-02	5.318489E-03	-1.266617E+00	-1.753384E-01	-8.159031E-03
---------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------

Vector de fuerza en coord. locales de la barra

5.178303E+01	-3.102882E+02	1.713363E+05	-5.178303E+01	3.102882E+02	-6.387915E+05
--------------	---------------	--------------	---------------	--------------	---------------

barra # 3

Vector de desplazamientos en coord. locales

-1.244842E+00	-2.922857E-01	-8.159031E-03	-1.241294E+00	-1.270915E-01	5.247693E-03
---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	--------------

Vector de desplazamientos en coord. globales

-1.266617E+00	-1.753384E-01	-8.159031E-03	-1.247733E+00	-1.118879E-02	5.247693E-03
---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	--------------

Vector de fuerza en coord. locales de la barra

-3.764111E+02	-3.747346E+02	-6.852085E+05	3.764111E+02	3.747346E+02	1.206637E+05
---------------	---------------	---------------	--------------	--------------	--------------

barra # 4

Vector de desplazamientos en coord. locales

0.000000E+00	0.000000E+00	9.794288E-05	-1.118879E-02	1.247733E+00	5.247693E-03
--------------	--------------	--------------	---------------	--------------	--------------

Vector de desplazamientos en coord. globales

0.000000E+00	0.000000E+00	9.794288E-05	-1.247733E+00	-1.118879E-02	5.247693E-03
--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	--------------

Vector de fuerza en coord. locales de la barra

2.980133E+03	9.953939E+02	-1.200000E+05	-2.980133E+03	-8.953939E+02	6.572363E+05
--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	--------------

Observar que las unidades utilizadas en este ejercicio son:

para fuerza -> kg

para longitud -> cm

Se recomienda al lector realizar las siguientes actividades:

- Dibujar la curva elástica del marco.
- Verificar el cálculo de una de las cuatro matrices de rigidez de barra en coordenadas globales.
- Dibujar los diagramas de momentos flexionantes, fuerzas cortantes y fuerzas axiales.

Nota: el programa MARCO1.EXE etiqueta a los grados de libertad en el mismo orden que se muestra en el croquis de Grados de Libertad.

4.3.4 OBSERVACIONES ACERCA DE LA SISTEMATIZACIÓN Y MECANIZACIÓN DEL PROCESO DE ANÁLISIS.

- 1) Antes de mostrar al lector la manera más general de transformar las componentes de los vectores de fuerza y desplazamiento de cada barra, quisimos mostrarle el *Método Alterno Equivalente*, con la finalidad didáctica de permitirle observar gráficamente, las diferentes formas que adquiere una estructura cuando alguno de sus puntos de control sufre un desplazamiento.

Y esa es la principal razón para justificar la ruta seguida en la presentación del *Método General de Rigideces*, para el caso hipotético de estructuras en el espacio bidimensional.

Otra buena razón, es que en los diferentes libros, artículos de revistas y congresos, relativos al análisis estructural o ingeniería sísmica, se encontrará el lector con referencias al método de análisis denominado por nosotros como el *Método Alterno Simplificado*. Con esta idea en mente, y, buscando facilitarle la comprensión de dichas publicaciones, fue que presentamos con tanta amplitud dicho método de análisis.

- 2) Después del camino recorrido hasta aquí, resultan perfectamente entendibles las razones prácticas que impidieron que el *Método General de Rigideces* fuera utilizado con todo su poder de análisis desde los tiempos en que fue desarrollado teóricamente (fines del siglo XIX y en las primeras décadas del siglo XX). Afortunadamente, nos ha tocado vivir esta época, en la cual las *limitaciones tecnológicas* de hace casi un siglo, ya no nos atan, siendo así posible, el analizar cualquier estructura formada por barras, sin necesidad de incluir en nuestro estudio hipótesis de dudosa validez, utilizando la teoría matemática a todo su potencial.

En el capítulo 5 eliminaremos la última atadura del *Método General*: eliminaremos la restricción artificial del espacio bidimensional.

- 3) Una vez eliminadas las limitaciones prácticas de cálculo, gracias a las computadoras, queda abierta la puerta hacia un nuevo escenario, en el cual los ingenieros civiles podrán intentar la implementación de *modelos Reológicos* más realistas, eliminando las imprecisiones introducidas voluntariamente, al suponer que los materiales tienen un

comportamiento elástico-lineal. También podrán implementar modelos que incluyan el efecto de desplazamientos NO pequeños, con todas sus consecuencias.

- 4) Como es sabido, el problema de la ingeniería sísmica se ha atacado con éxito gracias a la utilización de *modelos reológicos* que permiten modelar el *comportamiento elasto-plástico* o modelos que incluyen el efecto de *degradación de rigidez* y de *resistencia* de los materiales. El ingeniero civil promedio debería tener acceso práctico a programas de computadora que permitan realizar análisis de estructuras con modelos reológicos diferentes al del resorte de Hooke.

4.4. SIMPLIFICACIONES Y APROXIMACIONES DEL MÉTODO GENERAL DE RIGIDECES.

4.4.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

La teoría manejada en este curso fue establecida por diversos investigadores desde el siglo XIX, aunque debido al gran trabajo numérico involucrado en el análisis de estructuras no triviales, no pudo ser utilizado en la práctica de la ingeniería hasta la época en que surgieron las computadoras y en que estas estuvieron al alcance de los ingenieros civiles (a partir de la década de los 60's del siglo XX).

Es así que los ingenieros de fines del siglo XIX y principios del XX, hasta los 60's, se vieron forzados a realizar aproximaciones y simplificaciones a la teoría físico-matemática para el análisis de estructuras. Recordemos que de por sí la teoría se ve obligada a aceptar aproximaciones tales como: comportamiento elástico lineal de los materiales y la hipótesis de desplazamientos pequeños.

Estas simplificaciones obligadas por las limitaciones en las herramientas de cálculo disponibles en su época, dio origen a diversos métodos de análisis. Métodos que hicieron simplificaciones leves hasta simplificaciones burdas. Ejemplo de los primeros es el "método de deflexión-pendiente" y de los segundos podemos mencionar a el "método del Portal".

En el año de 1932, Hardy Cross introdujo su método simplificado de análisis al cual denominó "Método de Distribución de Momentos". Comúnmente se conoce a este método con el nombre corto de "Método de Cross" en recuerdo a su creador.

Como demostraremos en el siguiente artículo, su método es en esencia una simplificación del método general de rigideces. Una diferencia notable entre el método general y este método particular consiste en que Cross eludió la formación de la matriz de rigidez K_{11u} y su posterior solución a través del método de eliminación Gaussiana.

Desde el punto de vista matemático, Cross utiliza un método de solución análogo al método conocido en el campo del álgebra de matrices como método de Gauss-Seidel. Gracias a esta estrategia de solución, se reduce considerablemente el trabajo numérico necesario para resolver una estructura común y en esto estriba el gran éxito que tuvo dentro de la práctica profesional desde su aparición en la década de los 30's.

Aunque las condiciones tecnológicas han cambiado radicalmente respecto al año de 1932, sigue siendo importante dentro de la formación de un ingeniero civil el conocimiento de este método de análisis, debido a que gran cantidad de trabajos que se realizaron y publicaron en fechas posteriores en diversos campos de la ingeniería utilizan las ideas de Cross. Debido a esta situación, es conveniente que un ingeniero sea capaz de entender este método para así poder aprovechar estos trabajos que son fuente de información válida en nuestra época.

4.4.2. MÉTODO DE CROSS O DE DISTRIBUCIÓN DE MOMENTOS

Cuando aplicamos el método general de rigideces, formamos un sistema de ecuaciones lineales simultáneas representadas mediante el álgebra de matrices. Este sistema lo resolvemos a través de un método matricial tal como el de Eliminación Gaussiana, obteniendo así la magnitud de todos los desplazamientos de los puntos de control en una sola operación matemática.

Cross propone en su método que en lugar de obtener el valor numérico de todos los desplazamientos en una sola operación matemática, obtengamos gradualmente esos valores numéricos. Para lograr esto propone que, partiendo de la estructura en su **estado 1** en la que introducimos fuerzas restrictoras artificiales, liberemos gradualmente los diferentes grados de libertad hasta que las fuerzas introducidas artificialmente desaparezcan.

El proceso de liberación de grados de libertad es como sigue: Libera completamente el primero de los grados de libertad, estando el resto completamente restringidos y calcula las fuerzas que se inducen en todas las barras que se unen en el punto de control en que se liberó el grado de libertad. Se repite este proceso para el segundo hasta el n-esimo grado de libertad. Cuando se libera el segundo grado de libertad, se tiene que restringir completamente el primero. Esto equivale a inmovilizar el primer grado de libertad en la posición en que quedó después de su liberación.

Al terminar el ciclo completo (para los n grados de libertad) las fuerzas restrictoras artificiales probablemente habrán disminuido de magnitud. El ingeniero deberá verificar si la magnitud de la mayor de estas fuerzas es menor que un cierto límite de error, de ser así, las fuerzas internas calculadas son razonablemente cercanas a las que se obtendrían del cálculo a través del uso del método general de rigideces.

En caso de ser mayor al límite de error, deberá repetirse el proceso de liberación gradual de los n grados de libertad hasta que la fuerza restrictora mayor sea menor al límite de error aceptable.

El proceso planteado en los párrafos anteriores se comprende mejor a través de ejemplos numéricos. Enseguida se presenta el método de Cross con su justificación matemática.

Hipótesis simplificatorias propuestas por Cross

Adicionalmente a las hipótesis simplificatorias introducidas en el método general de rigideces, Cross introduce las siguientes:

- 1.- No hay deformaciones axiales en las barras. Lo cual es una aproximación que para ciertas estructuras, es razonable y permite eliminar varios grados de libertad.
- 2.- No hay desplazamientos horizontales ni verticales en los puntos de control. En parte es consecuencia de la primer hipótesis.
- 3.- Los puntos de control solo pueden girar. En la primer versión del método que veremos, solo pueden existir los giros en los puntos de control.