

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO.

***DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA
EL ANÁLISIS ESTÁTICO DE PÓRTICOS PLANOS CON VIGAS
ACARTELADAS EN AMBIENTE DE TRABAJO CAD.***

Presentado ante la ilustre Universidad
Central de Venezuela

Por la bachiller:

Vargas G., María Alejandra.

Para optar al título de Ingeniero Civil.

Caracas, Mayo de 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO.

***DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA
EL ANÁLISIS ESTÁTICO DE PÓRTICOS PLANOS CON VIGAS
ACARTELADAS EN AMBIENTE DE TRABAJO CAD.***

Tutor: Prof. José Manuel Velázquez

Presentado ante la ilustre Universidad
Central de Venezuela

Por la bachiller:

Vargas G., María Alejandra.

Para optar al título de Ingeniero Civil.

Caracas, Mayo de 2008

ACTA

El día jueves 05 de junio de 2008 se reunió el jurado formado por los profesores:

José Manuel Velásquez
Emilio Ochoa
Miguel Otero

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: "DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS ESTÁTICO DE PÓRTICOS PLANOS CON VIGAS ACARTELADAS EN AMBIENTE DE TRABAJO CAD".

Presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al título de INGENIERO CIVIL.

Una vez oída la defensa oral que la Bachiller hizo de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió la siguiente calificación:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Número	Letras
Br. María Alejandra Vargas G	<u>19</u>	<u>diecinueve</u>

RECOMENDACIONES:

FIRMAS DEL JURADO

[Firma] [Firma] [Firma]

Caracas, 05 de junio de 2008.

*A mi padre
A quien le debo la vida y todo lo que soy,
quien nunca me ha dejado sola
y me ha mantenido firme en este largo camino
Donde sea que estés sé que estás orgulloso de mí,
te amo!*

AGRADECIMIENTOS

A *José Manuel Velázquez*, por haberme dado la oportunidad de trabajar con él y salir triunfante de esta etapa.

A *Dios*, mi creador y transformador, el ingeniero de mi vida. Sé que estoy en Tus brazos.

A mi *madre*, por ser mi apoyo, mi luz y mi gran amiga. Gracias por entenderme siempre.

A mis *sobrinos*, por ser quienes me impulsan a dar un buen ejemplo y ser mejor.

A la familia *Santaromita De Abreu*, por haberme acogido en su casa y hacerme parte de ellos.

Especialmente a *Denise Santaromita* por ser la mejor de las amigas, hermana y cotutora honorífica de esta tesis. Te quiero mucho Gorda! Gracias por ayudarme a culminar mi grado.

A *Keily*, la mejor compañera de tesis que podría pedir.

A los profesores *Henry Blanco* y *María Eugenia Korody*, por ser mis guías y apoyo a lo largo de la carrera, más que profesores amigos. En especial a los profesores *Víctor León* y *Germán Lozano*, quienes me brindaron la oportunidad de crecer profesionalmente bajo su tutela.

A *Anna Casella*, *Luis Reigadas*, *Leonardo Betancourt* y *Daniel Toro* por su apoyo incondicional durante el desarrollo de esta tesis.

A *Dimas Salazar* e *Irina Bello*, parte del logro de esta tesis se las debo a ustedes.

Al *DIOC*, donde me enseñaron a programar, mi segundo hogar.

A *Luis Emilio Navarro*, por sacarme todos los días de mi capullo. Te quiero mucho

Por último a todos aquellos que compartieron un aula de clases conmigo, ya fuera como compañeros o como alumnos, porque cada uno de ustedes aportó algo en mi crecimiento como persona e ingeniero.

Vargas G., María A.

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS
ESTÁTICO DE PÓRTICOS PLANOS CON VIGAS ACARTELADAS EN AMBIENTE
DE TRABAJO CAD.**

Tutor: Prof. José Manuel Velázquez

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil, Año 2008. N° pág 91

Palabras clave: *pórticos planos, vigas acarteladas, análisis matricial, rigidez, MavaCad.*

RESUMEN

En este trabajo de grado, se logró desarrollar un algoritmo en ambiente de trabajo CAD programado bajo lenguaje Delphi, que permite realizar el análisis estático de *pórticos planos* con *vigas acarteladas* por medio del *análisis matricial*, cuya formulación teórica está fundamentada en método de los desplazamientos o de las *rigideces*, que se desarrolla por medio de la superposición de los modos de desplazamiento del sistema estructural, esto por el cálculo de los grados de libertad y la matriz de *rigidez* del sistema.

Con el desarrollo e implementación de *MavaCad*, se logró analizar estructuralmente pórticos planos con vigas acarteladas ante situaciones específicas de carga y dimensiones geométricas de los elemento, de modo que puede estimarse el comportamiento del pórtico bajo solicitaciones nodales y comparar los resultados con otros programas de análisis basados en otros métodos de cálculo. En base a esto, se logró establecer que la presencia de cartelas en los pórticos además de aumentar la *rigidez* de la estructura, favorecen en la disminución de los desplazamientos.

INDICE

Resumen	vi
Indice	viii
Lista de tablas	xi
Lista de figuras	xii
Lista de ecuaciones	xiv
I. Introducción	1
II. Fundamentos de la investigación.....	3
II.1 Antecedentes	3
II.2 Planteamiento del problema	5
II.3 Objetivo General.....	6
II.4 Objetivos Específicos	6
II.5 Alcances y Limitaciones	7
II.6 Aportes	8
III. Pórticos planos con elementos de sección variable	9
III.1 Definición.....	9
III.2 Miembros de directriz recta.....	10
III.3 Vigas acarteladas	10
III.3.1 Tipos de cartelas	11
III.4 Rigidez de un miembro de directriz recta.....	14
III.4.1 Método de cálculo	14
III.4.2 Matriz de rigidez de un elemento en pórtico plano.....	19
IV. Fundamentos del análisis estático	1

IV.1	Inicios del análisis estructural	1
IV.2	Métodos de análisis estático.....	3
IV.3	Análisis matricial de estructuras	4
IV.3.1	Método de los desplazamientos	4
V.	Lenguajes de programación	15
V.1	Programación de autocad.....	15
V.1.1	Aplicaciones en VBA	16
V.2	Delphi como lenguaje de programación externo.....	18
V.3	SAP2000. Programa comercial de análisis estructural.....	20
VI.	Caracterización del pórtico	22
VI.1	Características de los materiales	23
VI.2	Solicitaciones del pórtico	24
VI.3	Sección transversal típica de los elementos	24
VI.3.1	Dimensionado y tipo de cartelas.....	25
VII.	Algoritmo del programa.....	26
VII.1	Selección del lenguaje de programación.....	26
VII.2	Macro diagrama de flujo.....	27
VIII.	Resultados	48
VIII.1	Planteamiento de problemas tipo	48
VIII.1.1	Problema Tipo 1.....	49
VIII.1.2	Problema tipo 2 – Cartela recta.....	50
VIII.1.3	Problema Tipo 3 – Cartela prismática	51
VIII.2	Implementación de MavaCad v1.0	52
VIII.2.1	Matriz de rigidez estructural	52
VIII.2.2	Desplazamientos nodales	56
VIII.3	Resultados arrojados por SAP2000	60

VIII.3.1	Desplazamientos nodales	60
VIII.4	Cálculo del error.....	62
IX.	Análisis de resultados	63
IX.1	Análisis de las rigideces de pórtico.....	63
IX.2	Análisis de las deformaciones	65
X.	Conclusiones	66
XI.	Recomendaciones	67
XII.	Referencias Bibliográficas.....	68
	Libros	68
	Medios electrónicos	69
	Tesis	70
XIII.	Anexos.....	71
XIII.1	Método estático equivalente.....	71
XIII.1.1	Verificación de la deriva	72
XIII.2	El método de elemento finito. Conceptos Generales.....	73
XIII.3	Procedimientos de métodos numéricos utilizados en el desarrollo del algoritmo	77
XIII.3.1	Método de Gauss Jordan.....	77
XIII.3.2	Regla de Simpson compuesta	77
	Problema Tipo 01 – SAP2000.....	78
	Problema Tipo 02 – SAP2000.....	84
	Problema Tipo 03 – SAP2000.....	90
XIV.	Manual de usuario: MavaCad v2.0.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla IV-1. Compatibilidad entre GDL locales y globales.....	9
Tabla IV-2. Vector de direcciones para cada elemento	11
Tabla IV-3. Matriz de rigidez estructural, en base a las matrices de cada elemento	11
Tabla IV-4. Vector de cargas aplicadas en los nodos	12
Tabla VIII-1. Deformaciones Prob 01 sin rigidez - MavaCad.....	56
Tabla VIII-2. Deformaciones Prob 01 con rigidez - MavaCad.....	57
Tabla VIII-3. Deformaciones Prob 02 - MavaCad.....	58
Tabla VIII-4. Deformaciones Prob 03 - MavaCad.....	59
Tabla VIII-5. Desplazamientos Prob 1 - SAP2000.....	60
Tabla VIII-6. Desplazamientos Prob 2 - SAP2000.....	60
Tabla VIII-7. Desplazamientos Prob 3 - SAP2000.....	61
Tabla VIII-8.. Error para el Prob 01 - sin rigidez	62
Tabla VIII-9. Error para el Prob 02	62
Tabla VIII-10. Error para el Prob 03	62
Tabla IX-1. Determinante de la matriz de rigidez estructural.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura III-1. Dimensiones de cartela recta.....	12
Figura III-2. Dimensiones de cartela prismática	13
Figura III-3. Miembro de directriz recta	14
Figura III-4. Barra rectilínea con una orientación cualquiera	19
Figura IV-1. Coordenadas locales en un miembro rectilíneo	8
Figura IV-2. Pórtico plano simple	9
Figura IV-3. Ejemplo de pórtico.....	10
Figura V-1. Estructura general de una aplicación orientada a objetos.....	15
Figura V-2. Editor de VBA.....	16
Figura V-3. Editor de Delphi.....	18
Figura V-4. Barra de herramientas Standard de la Paleta VCL.....	19
Figura V-5. Barra de herramientas Additional de la Paleta VCL.....	19
Figura VIII-1. Pórtico Generalizado	48
Figura VIII-2. Grados de libertad globales de la estructura	48
Figura VIII-3. Problema Tipo 1 - Sección constante	49
Figura VIII-4. Problema Tipo 2 - Cartela recta.....	50
Figura VIII-5. Problema Tipo 3 - Cartela prismática	51
Figura VIII-6. K global. Prob 01a- MavaCad.....	52
Figura VIII-7. K global. Prob 01b- MavaCad.....	53

Figura VIII-8. K global. Prob 02- MavaCad.....	54
Figura VIII-9. K global. Prob 3 - MavaCad	55
Figura VIII-10. Deformaciones en nodos libres. Prob 01 sin rigidez –MavaCad	56
Figura VIII-11.. Deformaciones en nodos libres. Prob 01 con rigidez –MavaCad	57
Figura VIII-12. Deformaciones en nodos libres. Prob 02 – MavaCad	58
Figura VIII-13. Deformaciones en nodos libres. Prob 03 – MavaCad	59
Figura IX-1. Determinante de la matriz de rigidez estructural ($\det(k) \cdot 10^{-30}$)	64

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación III-1. Relación entre las áreas en una viga acartelada.....	10
Ecuación III-2. Rigideces en los miembros de directriz recta	16
Ecuación III-3. Rigideces adicionales en caso de problemas de flexión.....	17
Ecuación III-4. Rigidez local de elemento "viga"	20
Ecuación III-5. Matriz de rigidez local para columnas	20
Ecuación IV-1. Ecuación fundamental de análisis matricial.....	4
Ecuación IV-2. Ecuación local con cargas nodales equivalentes	6
Ecuación IV-3. Matriz de rotación de barra	7
Ecuación IV-4. Ecuación fundamental modificada	8
Ecuación IV-5. Grados de libertad de la estructura	9
Ecuación VI-1. Módulo de Young.....	23
Ecuación VI-2. Módulo de Cortadura	23

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años ha existido la inquietud de estudiar el comportamiento de elementos de sección variable, algunos han logrado mediante modelos matemáticos desarrollar métodos que pueden predecir su comportamiento ante diferentes combinaciones de solicitaciones. Sin embargo, el cálculo de este tipo de estructuras se hace muy laborioso; de allí que se diseñen programas para facilitar su análisis.

La línea de investigación de la cual forma parte este trabajo, es desarrollada a nivel de pregrado en gran parte por el Prof. José Manuel Velázquez, quien ha orientado trabajos que se orientan al estudio de la influencia de las vigas acarteladas en pórticos planos. Dentro de los métodos empleados en esta línea de investigación destacan el cálculo de rigideces por medio del método de las rotaciones, el método de los desplazamientos y viga conjugada.

El algoritmo desarrollado en este trabajo de investigación, analiza básicamente pórticos planos con vigas acarteladas de sección rectangular del tipo recta y prismática, debido a que tiene fines estrictamente educativos, por lo que algunos factores no fueron considerados. Las solicitaciones aplicadas al pórtico son estrictamente nodales, ya que en este caso se busca predecir el comportamiento del pórtico bajo cargas horizontales.

El cálculo de las rigideces de los miembros fue realizado mediante el método de la viga conjugada y el análisis estático del pórtico se realizó a través del método de los desplazamientos, también conocido como método de las rigideces.

Este trabajo está dividido en cinco (05) secciones de estudio: la primera correspondiente a los fundamentos de la investigación, donde se desarrolla el planteamiento del problema y antecedentes que justifican la investigación; la segunda el marco teórico, desarrollado en tres (03) capítulos que comprenden toda la teoría necesaria para el desarrollo y análisis de los pórticos a estudiar en esta investigación; la tercera el marco metodológico, comprendido en dos (02) capítulos, donde se especifica la metodología a emplear; la cuarta resultados y análisis, y finalmente las conclusiones del mismo.

Los resultados de los desplazamientos arrojados por el programa *MavaCad v1.0* se ajustan en gran medida a los calculados por medio de la aplicación del SAP2000, lo que permite concluir que el programa desarrollado realiza eficientemente el análisis estructural de pórticos planos con vigas acarteladas.

II. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

II.1 ANTECEDENTES

La formación académica y profesional del estudiante de pregrado en ingeniería civil, comprende el estudio de estructuras aporticadas con elementos de geometría regular y sección constante, las cuales son necesarias para describir el comportamiento de cada uno de sus efectos bajo la acción de determinadas solicitaciones. En adición a este tipo de estructuras, se emplean elementos de sección variable para incrementar la rigidez en los nodos, de los cuales se estudiará el comportamiento de pórticos planos con vigas acarteladas.

Estudios previos realizados en esta área han sido realizados dentro de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la UCV.

Entre los que se encuentran los siguientes temas de tesis:

- Reiley, J. y Estévez, J. “Estudio de la influencia de las vigas acarteladas en pórticos planos de concreto armado”. Año 2006.
- Ziegler, R. y Espinoza, G. “Influencia de las vigas acarteladas en pórticos para galpones con perfiles laminados de acero”. Año 2005

Ambos trabajos de investigación se basaron en el método de las rotaciones para sus estudios y cálculos. Sus resultados arrojaron valores que permiten hacer recomendaciones a la hora de realizar el diseño de vigas acarteladas.

A nivel internacional destacan los trabajos de:

- Archundia, H. “*Mecanismos de resistencia y deformación cortante de trabes acarteladas de concreto reforzado*”. Año 2004.
- Archundia, H. “*Comportamiento a cortante de trabes acarteladas de concreto reforzado ante carga estática*”. Año 2004.

En estos trabajos se analizan resultados experimentales del ensayo de vigas acarteladas, cuyos resultados demostraron que las cartelas modifican la falla frágil por cortante típica de los elementos de sección constante; así como la influencia de parámetros estructurales importantes, tales como resistencia, capacidad de deformación, rigidez, índice de daño entre otros incrementa el acartelamiento. Además se compararon dos métodos analíticos simples que permiten estimar las deflexiones esperadas.

- Picón, R. “*El método de los desplazamientos discontinuos en los problemas elásticos estáticos planos*”. Año 1980. El autor plantea una formulación indirecta de un método de contorno que emplea, como solución fundamental, el campo de tensiones y desplazamientos provocado por un desplazamiento discontinuo constante sobre un segmento finito, el cual es aplicado a diferentes casos de problemas elásticos estáticos planos.

II.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ingeniería es el arte de aplicar los conocimientos científicos a la invención, perfeccionamiento o utilización de la técnica en todas sus determinaciones para resolver problemas. De allí la búsqueda de la implementación de rutinas computarizadas que sistematicen, mejoren, faciliten y aceleren los cálculos de las estructuras a analizar. Comercialmente se pueden encontrar programas que realicen cálculos estructurales para evaluar su comportamiento mecánico en función de un conjunto de solicitaciones donde el estudio e influencia de apoyos parcialmente rígidos y de elementos de sección variables resulta complicado, como lo es el análisis estructural en presencia de elementos acartelados.

El presente trabajo propone un programa de computación que permita realizar el análisis estático de este tipo de estructuras.

II.3 OBJETIVO GENERAL

Proponer un programa en ambiente de trabajo CAD para el análisis estático de pórticos planos con vigas acarteladas de geometría regular simétrica en todos los planos, elaboradas en Concreto Armado.

II.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Establecer los rangos y dimensiones de trabajo de las variables.
2. Diseñar el diagrama de flujo correspondiente al algoritmo.
3. Desarrollar el programa a partir del diagrama de flujo.
4. Validar el programa mediante la implementación de problemas particulares que permitan establecer el comportamiento de los pórticos.
5. Comparar los valores arrojados por el programa con los resultantes en los comúnmente utilizados.
6. Elaborar el manual de uso del programa.

II.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

Los alcances esperados con la realización de este tema de tesis son:

1. Desarrollar un programa que permita analizar el posible comportamiento estático de una estructura de pórticos planos con vigas acarteladas, en concreto armado.
2. Comparar el comportamiento de un pórtico plano con vigas acarteladas con uno de sección constante de iguales dimensiones, analizando el segundo implementando un programa de computación externo.
3. Establecer los valores límites sobre los que va a trabajar el programa en resistencia del concreto y acero, dimensiones del pórtico, luces, columnas, vigas y cartelas, altura de entrepiso, cantidad de niveles y geometría de las cartelas.

Entre las limitaciones para la realización del programa de análisis estático de pórticos planos con vigas acarteladas, se tienen:

1. La geometría de los elementos a estudiar, los cuales fueron limitados sólo a geometrías simples conocidas, prismáticas.
2. La lista de materiales que se utilizarán como base de datos del programa; los cuales se tomarán en principio los convencionales de uso comercial a nivel nacional.
3. Las solicitaciones a las que será sometido el pórtico de estudio.

II.6 APORTES

Ampliar el conocimiento en lo que se refiere al comportamiento de estructuras de pórticos planos con vigas acarteladas por medio del análisis estático.

Emplear un programa que permita realizar el análisis estructural de forma sencilla y amigable.

Abrir las posibilidades de la incursión de futuras tesis en el ámbito del estudio general de estructuras, así como el estudio de elementos de sección variable.

III. PÓRTICOS PLANOS CON ELEMENTOS DE SECCIÓN VARIABLE

III.1 DEFINICIÓN

Un pórtico es un sistema estructural constituido por juntas y elementos o miembros, llamados vigas y columnas, de tal modo que los miembros sólo se conectan por medio de las juntas. Ahora bien, un pórtico plano es aquel que está definido únicamente en dos direcciones, con miembros esbeltos no triangulados. En este tipo de estructuras las deformaciones por flexión son mucho más importantes que las axiales y las resultantes por corte, “sin embargo estas contribuciones deben incluirse en el estudio del pórtico si existe alguna duda de su importancia relativa”. (ARIAS ALBAN, G. 1984)

Las juntas del pórtico son considerados cuerpos rígidos de dimensiones muy pequeñas que pueden trasladarse y rotar en el plano, pero que no tienen la capacidad de deformarse. Otra definición típica de juntas de pórtico es que son los puntos donde se intersectan los ejes de los miembros.

Los elementos o miembros son barras de directriz recta cuyas dimensiones de sección transversal son menores a su longitud. Se consideran juntas del elemento a aquellas secciones del miembro por medio de las cuales puede ser conectada a las juntas de la estructura; así un elemento puede tener juntas libres, lo que quiere decir que no se conectan a juntas de la estructura.

III.2 MIEMBROS DE DIRECTRIZ RECTA

Los miembros a estudiar son prismáticos, es decir son cuerpos de sección plana cuyo centro de gravedad describe una curva plana llamada directriz o eje. La sección puede ir cambiando su forma y dimensiones a lo largo del eje de modo continuo, pero conservando siempre el plano perpendicular al mismo, y manteniendo uno de sus ejes principales de inercia en el plano de la directriz. Si el eje de la barra es rectilíneo, entonces se tiene un miembro de directriz recta.

Es importante resaltar que se cumplen las hipótesis significativas de la resistencia de materiales, como lo son:

- Ley de conservación de las secciones planas
- Independencia de acción de las fibras longitudinales
- Linealidad en el material, soportada por la Ley de Hooke
- Linealidad Geométrica
- Proporcionalidad.

III.3 VIGAS ACARTELADAS

Son miembros de directriz recta, que tienen como particularidad una variación de su sección transversal, de forma tal que el valor de un área cualquiera es directamente proporcional al área de referencia.

$$A_i = \alpha \cdot A_o$$

Ecuación III-1. Relación entre las áreas en una viga acartelada

Algunos autores definen las cartelas como el aumento del canto o peralte de las vigas en sus apoyos. Suelen emplearse en estructuras de concreto de dimensiones importantes, ya que proporcionan algunas ventajas sobre las vigas de sección constante, tales como:

- Aumento de la rigidez lateral
- Reducir el peso de la estructura
- Reducir la altura de entrepiso
- Disminuir la cantidad de concreto empleado, al disminuir la altura de la viga.
- Facilitar la ubicación de diversas instalaciones (paso de ductos y tuberías).

Su principal desventaja es al momento del encofrado, ya que es mucho más laborioso que el de las vigas de sección constante.

III.3.1 Tipos de cartelas

Las cartelas se clasifican de acuerdo a sus relaciones geométricas, englobándose en tres grupos:

1. Cartelas rectas
2. Cartelas prismáticas
3. Cartelas parabólicas

En lo que se refiere a este trabajo de investigación se tratarán dos tipos de cartelas, las rectas y las prismáticas.

III.3.1.1 Cartelas rectas

Las cartelas rectas son aquellas cuya área transversal varía de forma proporcional a la pendiente de la recta que describe, tiene una inclinación con respecto a los planos horizontal y vertical, como se muestra en la figura.

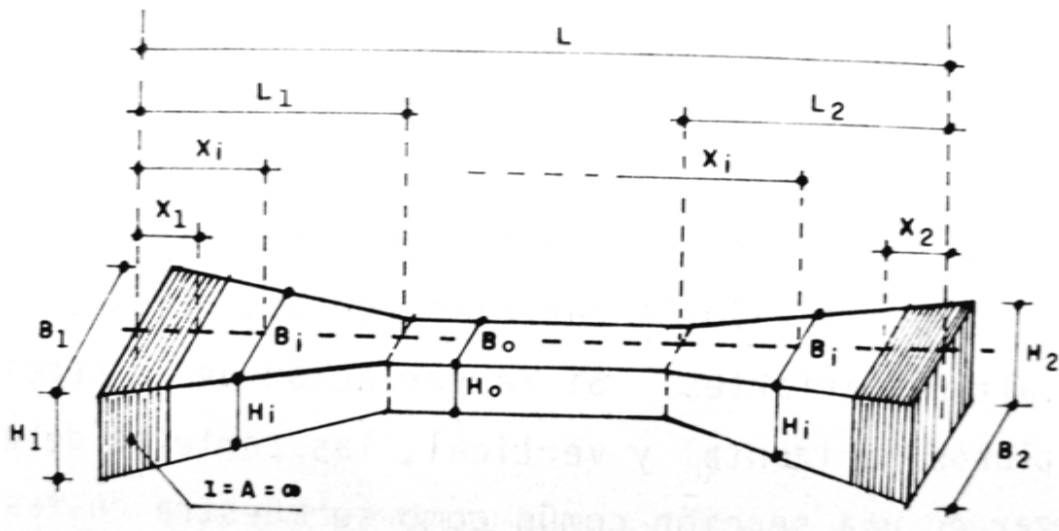


Figura III-1. Dimensiones de cartela recta

III.3.1.2 Cartelas prismáticas

Las cartelas prismáticas son aquellas que forman un paralelepípedo en el nodo, es decir la sección longitudinal de la cartela es un rectángulo, ya que se mantiene el prisma original de la sección de referencia, con diferentes medidas. Es decir el área transversal se mantiene constante en la cartela.

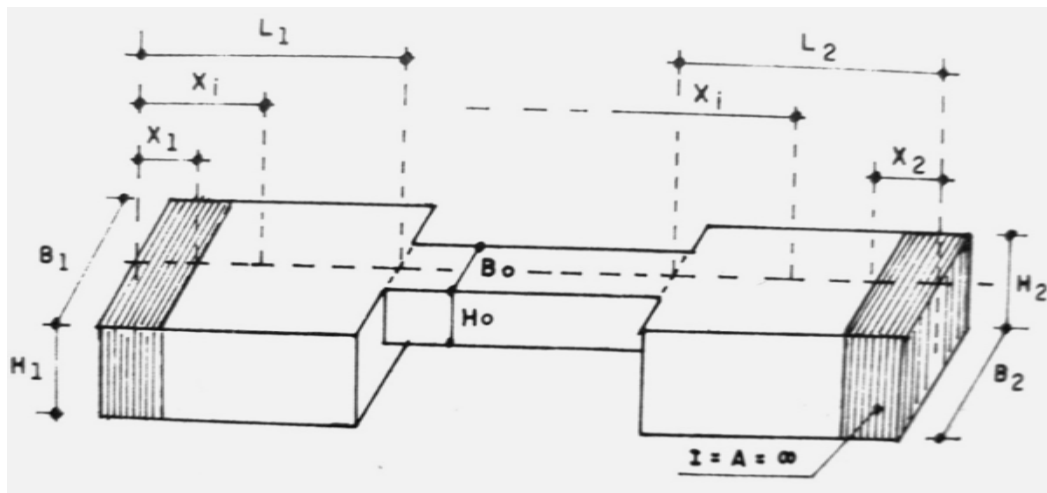


Figura III-2. Dimensiones de cartela prismática

III.4 RIGIDEZ DE UN MIEMBRO DE DIRECTRIZ RECTA

La rigidez de un elemento es la relación que existe entre las fuerzas que sobre éste actúan y las deformaciones que resultan de la aplicación de las mismas, por esto puede decirse que existen infinitas rigideces o tantas como relaciones fuerza/deformación existan.

III.4.1 Método de cálculo

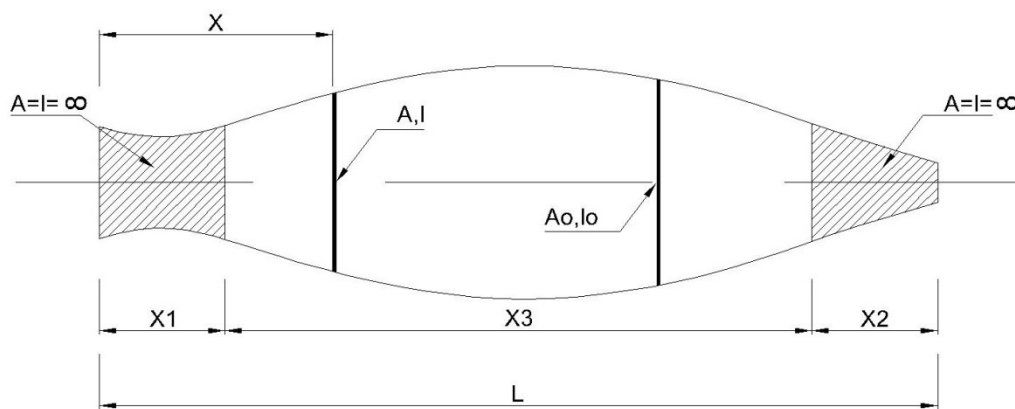


Figura III-3. Miembro de directriz recta

Donde:

- E : módulo de elasticidad longitudinal
- G : módulo de elasticidad transversal
- A_o : área de la sección transversal de referencia
- I_o : momento de inercia de sección transversal de referencia
- A : área de una sección transversal cualquiera
- α : función de variabilidad de A_o

I	: momento de inercia de una sección transversal cualquiera
β	: función de la variabilidad de lo
f	: factor forma, que depende de la distribución de los esfuerzos cortantes
L	: longitud total del miembro
X1, X2	: longitudes de los segmentos rígidos
Z	: abscisa adimensional, que es la relación entre X y L
k1,k2	: rigideces a flexión
a	: constante de barra
ρ	: rigidez a carga axial

$$Z_1 = \frac{X_1}{L}$$

$$Z_2 = \frac{X_2}{L}$$

$$Z_3 = \frac{X_3}{L} = 1 - (Z_1 + Z_2)$$

$$Y_1 = \frac{L_1}{L}$$

$$Y_2 = \frac{L_2}{L}$$

$$U_1 = \frac{H_1}{H_0}$$

$$U_2 = \frac{H_2}{H_0}$$

$$V_1 = \frac{B_1}{B_0}$$

$$V_2 = \frac{B_2}{B_0}$$

Según el método de la viga conjugada, las rigideces quedan expresadas:

$$K_1 = \frac{EI_0}{L} \frac{C_1}{D} \quad K_2 = \frac{EI_0}{L} \frac{C_2}{D} \quad a = \frac{EI_0}{L} \frac{C_3}{D} \quad \rho = \frac{EA_0}{L} \frac{I}{C_4}$$

Ecuación III-2. Rigideces en los miembros de directriz recta

En las que:

$$C_1 = \int_{z_1}^{1-z_2} \frac{Z^2}{\beta} dz + FC_4$$

$$C_2 = \int_{z_1}^{1-z_2} \frac{(1-Z)^2}{\beta} dz + FC_4$$

$$C_3 = \int_{z_1}^{1-z_2} \frac{Z(1-Z)}{\beta} dz - FC_4$$

$$C_4 = \int_{z_1}^{1-z_2} \frac{1}{\alpha} dz$$

$$F = \frac{EI_0}{GA_0} \frac{f}{L^2}$$

$$D = C_1 C_2 - C_3^2$$

En los problemas de flexión se definen, además:

$$b_1 = \frac{K_1 + a}{L} \quad b_2 = \frac{K_2 + a}{L}$$

$$t = \frac{b_1 + b_2}{L}$$

Ecuación III-3. Rigideces adicionales en caso de problemas de flexión

Donde:

- b_1 : rigidez recíproca del extremo izquierdo,
- b_2 : rigidez recíproca del extremo derecho y
- t : rigidez al corte respectivamente.

III.4.1.1 Factores de variación α y β

Los factores de variación de A y de I , vienen dados por las siguientes relaciones:

$$\alpha_i = V_i \cdot U_i$$

$$\beta_i = V_i \cdot U_i^3$$

Donde los valores de V_i y U_i dependen del tipo de cartela.

III.4.1.1.1 Cartelas rectas

Para valores de Z_i en el intervalo $[Z_1, Y_1]$

$$U_i = 1 - (U_1 - 1) \cdot \left(\frac{Z_i}{Y_1} \right)$$

$$V_i = 1 - (V_1 - 1) \cdot \left(\frac{Z_i}{Y_1} \right)$$

Y para valores de Z_i en el intervalo $[1 - Y_2, 1 - Z_2]$

$$U_i = U_2 - (U_2 - 1) \cdot \frac{(1 - Z_i)}{Y_2}$$

$$V_i = V_2 - (V_2 - 1) \cdot \frac{(1 - Z_i)}{Y_2}$$

III.4.1.1.2 Cartelas Prismáticas

Para valores de Z_i en el intervalo $[Z_1, Y_1]$

$$U_i = U_1$$

$$V_i = V_1$$

Y para valores de Z_i en el intervalo $[1 - Y_2, 1 - Z_2]$

$$U_i = U_2$$

$$V_i = V_2$$

III.4.2 Matriz de rigidez de un elemento en pórtico plano

La matriz de rigidez de un elemento tiene tantas columnas como deformaciones sean consideradas. Cada columna representa el vector de cargas cuando la deformación asociada es unitaria y las demás son nulas, esto se debe a la característica de simetría de la matriz de rigidez del elemento.

En el caso de los pórticos planos se corresponden tres desplazamientos por cada nodo del elemento, dos traslaciones y una rotación en el plano.

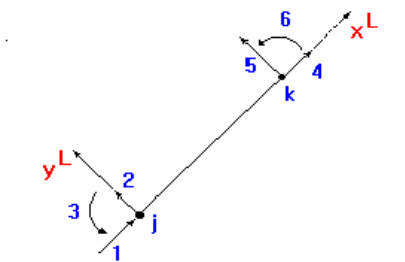


Figura III-4. Barra rectilínea con una orientación cualquiera

La matriz de rigidez se obtiene aplicando el método de las superposiciones, esto es, asignar desplazamientos unitarios de a uno por vez, mientras los demás se mantienen nulos. De allí se tiene la matriz de rigidez para una viga de sección variable:

$$K_{viga} = \begin{bmatrix} k_1 & a & b_1 & -b_1 & 0 & 0 \\ a & k_2 & b_2 & -b_2 & 0 & 0 \\ b_1 & b_2 & t & -t & 0 & 0 \\ -b_1 & -b_2 & -t & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho & -\rho \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\rho & \rho \end{bmatrix}$$

Ecuación III-4. Rigidez local de elemento "viga"

Esto para el caso de las vigas del pórtico.

Ahora bien, en el caso de las columnas, como son de sección constante y todas sus propiedades son conocidas, la matriz de rigidez para las columnas viene expresada por:

$$K_{colum} = \frac{E}{L} \cdot \begin{bmatrix} A_o & 0 & 0 & -A_o & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot I_o}{L^2} & \frac{6 \cdot I_o}{L} & 0 & -\frac{12 \cdot I_o}{L^2} & -\frac{6 \cdot I_o}{L} \\ 0 & \frac{6 \cdot I_o}{L} & 4 \cdot I_o & 0 & -\frac{6 \cdot I_o}{L} & 2 \cdot I_o \\ -A_o & 0 & 0 & A_o & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12 \cdot I_o}{L^2} & -\frac{6 \cdot I_o}{L} & 0 & \frac{12 \cdot I_o}{L^2} & -\frac{6 \cdot I_o}{L} \\ 0 & \frac{6 \cdot I_o}{L} & 2 \cdot I_o & 0 & -\frac{6 \cdot I_o}{L} & 4 \cdot I_o \end{bmatrix}$$

Ecuación III-5. Matriz de rigidez local para columnas

Estas matrices están asociadas a las coordenadas locales de cada barra, para luego condensarlas en la *matriz de rigidez del pórtico*, la cual se obtiene a partir del método de análisis matricial.

IV. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO

El análisis estructural es la parte de la mecánica que estudia las estructuras, consiste en la determinación de las tensiones y deformaciones a que quedan sometidas por la acción de agentes externos, como la carga gravitatoria, fuerzas sísmicas, eólicas, variaciones térmicas, entre otras.

Las estructuras se componen de una o más piezas ligadas entre sí y al medio exterior de modo de formar un conjunto estable, específicamente, un conjunto capaz de recibir cargas externas, resistirlas internamente y transmitirlas a sus apoyos, donde esas fuerzas externas encontrarán su sistema estático equivalente. Las piezas que componen una estructura poseen tres dimensiones (ancho, alto y largo), que se involucran en los cálculos por medio del área de la sección transversal, el momento de inercia, los módulos de elasticidad y por ende la rigidez del mismo.

IV.1 INICIOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

A mediados del siglo XIX se inicia el desarrollo de una verdadera Teoría de Estructuras, esto debido a la serie de publicaciones realizadas en Francia por Bertot, Clapeyron y Bresse, a ellos se sumaron posteriormente Winkler, Maxwell, Cremona, Betti, Mohr, Menabrea, Castigliano y Müller-Breslau. De todas estas publicaciones nacen:

- El teorema de los tres momentos
- El teorema de las deformaciones recíprocas

- El teorema de Maxwell
- El diagrama Maxwell-Cremona
- El teorema recíproco de Maxwell-Betti
- El Círculo de Mohr
- Los teoremas de Castigliano
- El teorema de Müller-Breslau

Y algunos otros teoremas. En 1930 Hardy Cross publicó el Método de Distribución de Momentos, con el cual podría decirse que revolucionó el análisis de estructuras de marcos continuos de concreto armado y puede considerarse uno de los mayores aportes al análisis de estructuras indeterminadas. Este método evade la resolución de múltiples sistemas de ecuaciones presentados en los métodos de Mohr y Maxwell. Ahora bien, esta “popularidad” disminuyó con la disponibilidad de las computadoras, con las que la resolución de sistemas de ecuaciones ya no es un problema.

En la década de los 50, Tumer, Clough, Martin y Topp presentan lo que puede llamarse como el inicio de la aplicación de métodos matriciales de la rigidez a estructuras, y posteriormente desarrollaron los métodos de elementos finitos, que han permitido el análisis sistemático de numerosas estructuras, y la obtención de tensiones y deformaciones en sistemas complejos como por ejemplo las presas de concreto.

IV.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS ESTÁTICO

De acuerdo la normativa venezolana en COVENIN 1756:2001 Capítulo 9, para el Análisis estático de estructuras se plantea:

1. Método Estático Equivalente: para determinar los efectos traslacionales.
2. Método de la Torsión estática Equivalente: con el cual se determinan los efectos torsionales.
3. Procedimiento de Análisis Estático Inelástico: éste se utiliza en conjunto con el método Estático Equivalente, para estructuras irregulares que no cumplan con la norma sismorresistente.

De igual manera, dicha norma especifica que los métodos listados anteriormente pueden sustituirse por otros más refinados, como lo es el Análisis Matricial de Estructuras por medio del Método de los Desplazamientos o el Método de las Fuerzas.

IV.3 ANÁLISIS MATRICIAL DE ESTRUCTURAS

Este método se basa en la formulación matricial de la teoría lineal de estructuras de barras. El empleo de la notación matricial permite utilizar métodos de cálculo en forma compacta, precisa y completamente general, y además proporciona un sistema apropiado de análisis de estructuras y determina una base para el desarrollo de programas computarizados.

Los métodos matriciales se caracterizan por el gran número de cálculos sistemáticos.

IV.3.1 Método de los desplazamientos

También conocido como el método de la Rigidez, ya que se basa en el cálculo de la matriz de rigidez y la expresión de las cargas generalizadas de la estructura, de la forma:

$$Q = \tilde{K} \cdot q$$

Ecuación IV-1. Ecuación fundamental de análisis matricial

Donde:

- K: matriz de rigidez
- q: vector de desplazamientos
- Q: vector de cargas generalizadas

Este método consiste en la superposición de los estados de desplazamiento elemental, por lo que se satisface la compatibilidad entre las coordenadas **q** y **p**,

que definen la deformación que sufren los elementos, en todas las etapas del proceso de cálculo.

Es importante la determinación del número de grados de libertad, así como los conceptos de determinación e indeterminación cinemática.

Para solucionar un problema estructural por el método de los desplazamientos se consideran las siguientes etapas:

1. Identificación estructural
2. Cálculo de la matriz de rigidez de barra y del vector de cargas nodales equivalentes
3. Cálculo de la matriz de rigidez y vector de cargas global de la estructura
4. Introducción de las condiciones de borde
5. Solución del sistema de ecuaciones

IV.3.1.1 Identificación estructural

Consiste en definir por medio de números y datos cada uno de los elementos que conforman la estructura. Esto se hace por medio de la definición de un sistema de ejes globales para la estructura, donde las coordenadas de cada nodo están referidas a dicho sistema. Así mismo se identifica para cada elemento sus correspondientes nodos inicial y final, donde cada barra tiene asociado un sistema de coordenadas locales al cual se refieren todas las dimensiones y características de la barra, también sus propiedades de sección transversal y material. Además de indicar las restricciones de cada nodo y la descripción de las cargas aplicadas.

IV.3.1.2 Cálculo de la matriz de rigidez de barra y del vector de cargas nodales equivalentes

Una vez calculada la matriz de rigidez de cada elemento ([Véase Cap II](#)) se le asigna a cada elemento su correspondiente vector de cargas nodales. Este vector se forma de la puesta en evidencia del principio de superposición, validado por suponer que el sistema es lineal. De allí a que las cargas equivalentes en los nodos sean el negativo de las reacciones de empotramiento de la barra.

$$q = \underset{\sim}{K} \cdot d + q_{equiv}$$

Ecuación IV-2. Ecuación local con cargas nodales equivalentes

Donde:

- K: matriz de rigidez del elemento
- d: vector de desplazamientos nodales
- q_{equiv} : vector de cargas nodales equivalentes
- q: vector de fuerzas en el extremo de la barra

Estas matrices están expresadas en las coordenadas locales de la barra, por lo que se hace necesario llevarlas a las coordenadas globales para así ensamblar la matriz de rigidez del sistema. Para ello se crea una matriz de rotación de barra, que en el caso de los pórticos planos viene expresada de la siguiente forma:

$$RT = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{seno}(\theta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{seno}(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\theta) & \text{seno}(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{seno}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación IV-3. Matriz de rotación de barra

De forma al reescribir la ecuación en coordenadas globales, queda:

$$Q = RT^T \cdot K \cdot d + RT^T \cdot q_{equiv}$$

Ecuación IV-4. Ecuación fundamental modificada

Donde:

- K: matriz de rigidez del elemento
- d: vector de desplazamientos nodales
- q_{equiv} : vector de cargas nodales equivalentes
- RT^T : matriz de rotación de barra
- Q: vector de fuerzas en el extremo de la barra en coordenadas globales

Para los casos particulares, donde las barras no posean rotación, no es necesario hacer esta conversión, ya que se multiplicaría por la matriz identidad.

IV.3.1.3 Cálculo de la matriz de rigidez y vector de cargas global de la estructura

A continuación se presenta la figura de una barra rectilínea con sus correspondientes grados de libertad (GDL) por nodo.

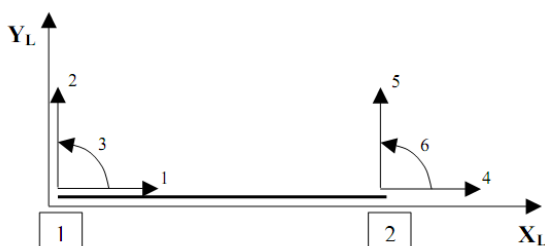


Figura IV-1. Coordenadas locales en un miembro rectilíneo

A partir de allí se construyen lo que podremos llamar *matrices de compatibilidad de nodos*.

Elemento de pórtico plano	GDL Locales del elemento					
	Nodo inicial del elemento			Nodo final del elemento		
GDL Globales	1 _L	2 _L	3 _L	4 _L	5 _L	6 _L
Viga	1	2	3	4	5	6
Columna	2	-1	3	5	-4	6
Columna empotrada	0	0	0	2	-1	3

Tabla IV-1. Compatibilidad entre GDL locales y globales

La cantidad de GDL globales de un pórtico plano, viene dado por la expresión:

$$GDL = (N_{\text{nodos}} - N_{\text{empotramientos}}) \cdot 3$$

Ecuación IV-5. Grados de libertad de la estructura

Por cada nodo libre se tienen tres (03) grados de libertad. La matriz de rigidez de la estructura es una matriz cuadrada y simétrica de dimensión $(3 \cdot N_{\text{libres}})$.

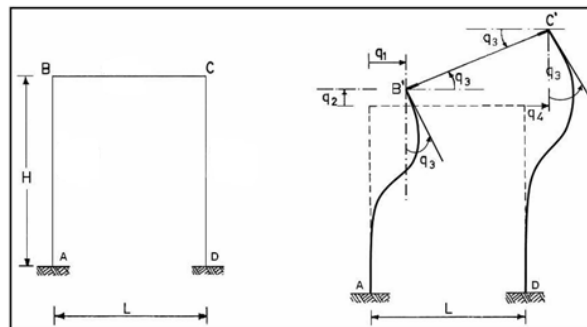


Figura IV-2. Pórtico plano simple

Entonces suponiendo un pórtico de dos vanos y un nivel, se tiene:

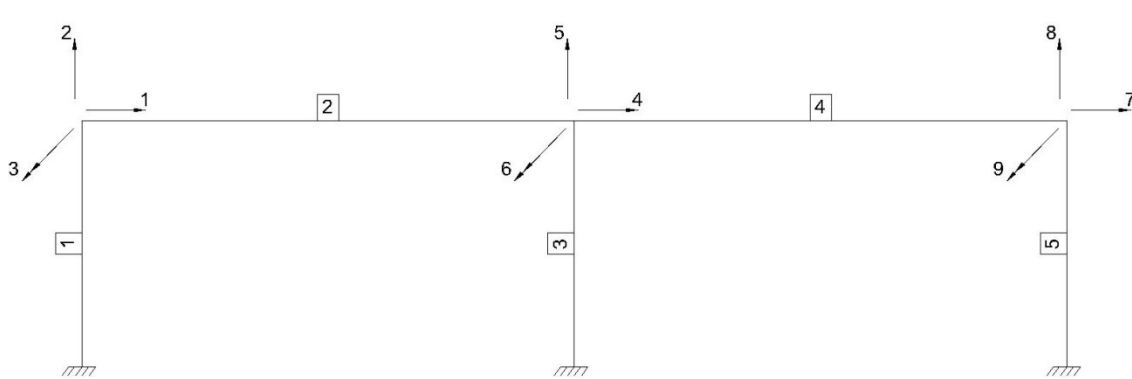


Figura IV-3. Ejemplo de pórtico

- 6 nodos
- 3 nodos libres
- 9 GDL
- 3 columnas empotradas
- 2 vigas
- La matriz de rigidez de cada elemento es de (6x6).
- Los elementos tienen las mismas características, es decir las columnas son iguales entre sí, así mismo las vigas.

		Nodo inicial del elemento			Nodo final del elemento		
		1 _L	2 _L	3 _L	4 _L	5 _L	6 _L
1	Columna	0	0	0	2	-1	3
2	Viga	1	2	3	4	5	6
3	Columna	0	0	0	5	-4	6
4	Viga	4	5	6	7	8	9
5	Columna	0	0	0	8	-7	9

Tabla IV-2. Vector de direcciones para cada elemento

La matriz de rigidez de la estructura sería:

KV ₁₁ +KC ₅₅	KV ₁₂ -KC ₄₅	KV ₁₃ -KC ₅₆	KV ₁₄	KV ₁₅	KV ₁₆	0	0	0
	KV ₂₂ +KC ₄₄	KV ₂₃ +KC ₄₆	...	...	...	0	0	0
		KV ₃₃ +KC ₆₆	...	...	...	0	0	0
			KV ₁₁ + KV ₃₃ +KC ₅₅	...	...	...	...	...
				KV ₂₂ + KV ₅₅ +KC ₄₄	...	...	...	...
					KV ₃₃ + KV ₆₆ + KC ₆₆	...	...	...
						KV ₄₄ +KC ₅₅	...	...
							KV ₅₅ +KC ₄₄	...
								KV ₆₆ +KC ₆₆

Tabla IV-3. Matriz de rigidez estructural, en base a las matrices de cada elemento

El vector de cargas globales resultante sería:

Carga aplicada	Nodo
Fx	2
Fy	
Mz	
Fx	4
Fy	
Mz	
Fx	6
Fy	
Mz	

Tabla IV-4. Vector de cargas aplicadas en los nodos

IV.3.1.4 Introducción de las condiciones de borde

Un sistema de ecuaciones correspondiente a una estructura completa antes de aplicar las condiciones de contorno es *indeterminado*, pues la matriz de rigidez es singular. La razón de esta singularidad es el resultado de no haber considerado las vinculaciones o apoyos de la estructura con el exterior. Al introducir las condiciones de vínculo desaparece la indeterminación (o singularidad de la matriz de rigidez), siempre que el número de vínculos sea por lo menos el mínimo necesario para eliminar los movimientos de cuerpo rígido de la estructura.

El conocimiento de determinados corrimientos nodales, disminuye el número de incógnitas, tornándose innecesarias las ecuaciones correspondientes a estos corrimientos.

En el caso de los pórticos planos los únicos nodos vinculados son aquellos que representan el empotramiento a tierra, que de acuerdo al llenado del vector de cargas y de rigidez, no se toman en cuenta.

IV.3.1.5 Solución del sistema de ecuaciones

Al haber introducido las condiciones de borde del sistema, se puede hacer la resolución del sistema de ecuaciones por cualquier método numérico conocido, entre los que se tienen:

- Gauss Jordan
- Cholesky
- Crout
- Gauss Seidel, etc.

El vector resultante de este sistema de ecuaciones es el vector de desplazamientos globales de los nodos del pórtico.

V. LENGUAJES DE PROGRAMACION

V.1 PROGRAMACION DE AUTOCAD

Básicamente la programación de sistemas CAD con *Visual Basic for Application* (VBA) consiste en una programación orientada a objetos y conducida por eventos. El usuario realiza acciones sobre dichos objetos. De acuerdo al objeto y la acción que se trate se ejecutará la rutina asociada. Las aplicaciones contienen una colección de bloques de instrucciones a los que se denomina procedimientos agrupables en módulos, de la siguiente forma:

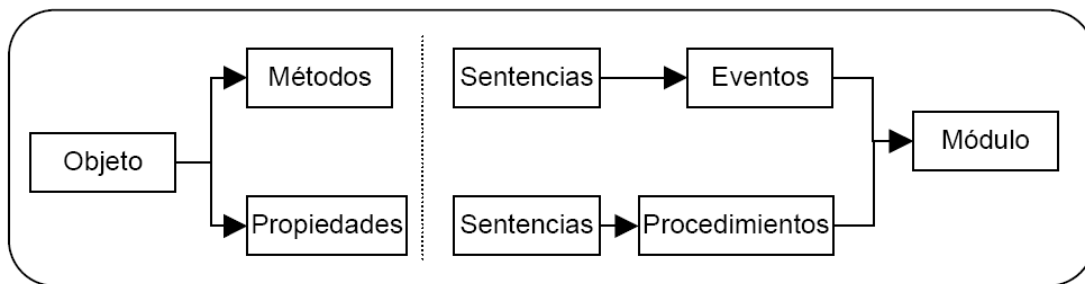


Figura V-1. Estructura general de una aplicación orientada a objetos

Las aplicaciones VBA se realizan mediante el editor VBA que se encuentra en el menú Herramientas, Macro, Editor Visual Basic. Mediante el atajo Alt+F11 se puede ir del editor VBA a Autocad y viceversa.

V.1.1 Aplicaciones en VBA

Están compuestas de módulos, pudiendo tener varios de cada uno de los tres tipos posibles. Dichos módulos contienen el código de la aplicación, formado por declaraciones de variables u objetos, procedimientos y eventos (sólo en formularios o en el objeto ThisDrawing). El objeto ThisDrawing es el documento de Autocad asociado con el proyecto, que puede llevar código como cualquier otro módulo, declaraciones, eventos y procedimientos.

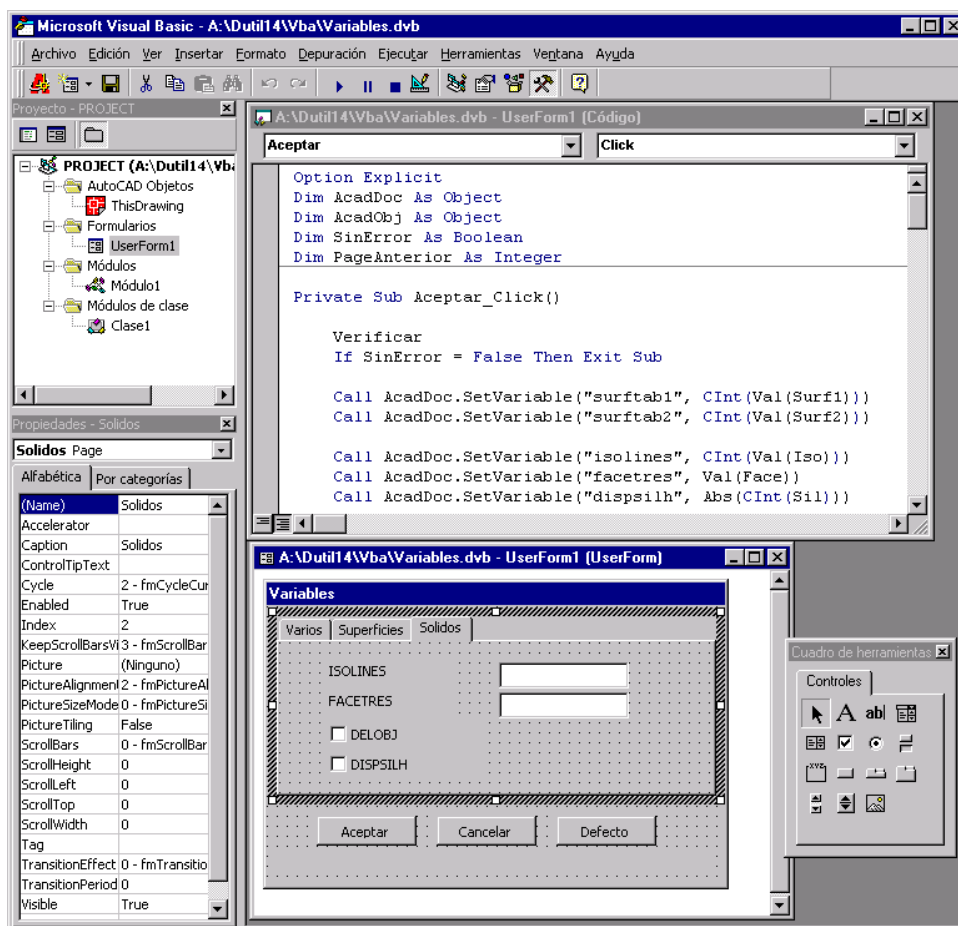


Figura V-2. Editor de VBA

Módulo de Formulario: Sirve de interfaz con el usuario. Contiene objetos gráficos denominados controles (botones, cuadros de texto, listas, etc.) mediante los que se puede mostrar e introducir información. Además también posee código: definiciones de variables, de procedimientos y de eventos. Los eventos se autoejecutan al detectarse acciones sobre los controles como por ejemplo, al hacer clic sobre un botón.

Módulo estándar: Contiene código únicamente: definiciones de variables y procedimientos. Estas definiciones son públicas, mientras que las definiciones de un modulo formulario son privadas para ese módulo.

Módulo clase: Se emplea únicamente para crear nuevos tipos objetos con sus propiedades y sus métodos. VBA emplea este tipo de módulos para definir los objetos que son propios de Autocad y que no existen en Visual Basic.

La programación en VBA está guiada por eventos. Lo que quiere decir que son los propios objetos y controles, junto con las intervenciones del usuario los que dirigen la ejecución.

VBA dispone de los tipos de datos habituales (enteros, reales, boléanos, strings,..) y además de toda una serie de tipos de datos específicos llamados tipos de objetos que permiten definir variables para contener elementos como entidades de dibujo, objetos gráficos de formulario (cuadros de texto, botones..), objetos HTML, OLE, etc.

V.2 DELPHI COMO LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN EXTERNO

Delphi es una potente herramienta de desarrollo de programas que permite la creación de aplicaciones para las diferentes versiones de Windows. Las aplicaciones pueden colocarse de forma muy sencilla en la pantalla según el principio de módulos.

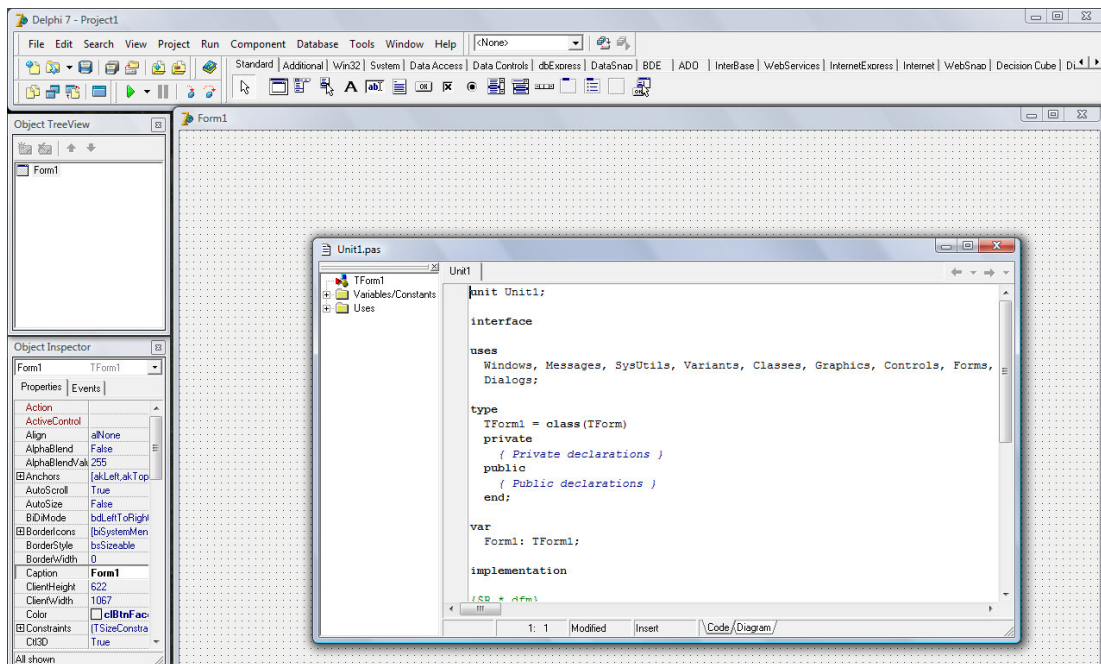


Figura V-3. Editor de Delphi

Para ello se dispone de una paleta dotada de una gran variedad de componentes, algo así como los bloques de construcción de cada programa. Esta paleta es denominada por Borland VCL (Visual Component Library), o biblioteca de componentes visuales y tiene un aspecto similar a Visual Basic, sólo que cada componente está separado, de acuerdo a su uso, en pestañas.



Figura V-4. Barra de herramientas Standard de la Paleta VCL



Figura V-5. Barra de herramientas Additional de la Paleta VCL

La programación es totalmente independiente de las particularidades de Windows, tales como manejadores, punteros y funciones del *Application Programming Interface* de Windows (API). La programación se realiza con los cómodos componentes de Delphi y no con las complejas llamadas al sistema de Windows, lo que simplifica enormemente la programación bajo Windows. Esto, no quiere decir que Delphi no lo permita, existen casos particulares donde es necesario y no se puede hacer de otra manera.

Delphi dispone del Object Pascal, un lenguaje de programación muy poderoso que está sin dudas a la altura del C++ y que incluso lo supera en algunos aspectos. Este lenguaje surge a partir del desarrollo del Borland Pascal 7.0, un lenguaje que ocupa un lugar muy importante en la programación de ordenadores personales.

Las aplicaciones terminadas quedan disponibles como archivos ejecutables (.EXE) que pueden utilizarse solos y sin bibliotecas adicionales.

Consecuentemente la velocidad con la que pueden ejecutarse los programas creados es muy alta. Excepcionalmente, si se incluyen llamadas a *Visual Basic Extention* (VBX), o *Dinamic Linking Library* (DLL), éstas se deben incluir junto

con el ejecutable. También es necesario incluir el *Borland Database Engine* (BDE) en las aplicaciones de bases de datos.

Delphi es una "Two-Way-Tool", es decir, una herramienta de dos direcciones, porque permite crear el desarrollo de programas de dos formas: una de forma visual en la pantalla, por medio de las funciones de Drag & Drop (Arrastrar y colocar) y la otra a través de la programación convencional, escribiendo el código. Ambas técnicas pueden utilizarse de forma alternativa o simultánea.

V.3 SAP2000. PROGRAMA COMERCIAL DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Software Development Kit for Application Programming Interface (SAP2000 API Module) es un programa con diversas características que permite simplificar la mayoría de los proyectos complejos. Es el software líder en ingeniería estructural.

Se pueden analizar cualquier tipo de estructuras con este programa, e incluso diseñar elemento por elemento de manera precisa con los reglamentos más conocidos (ACI En EU, RCDF en México, EUROCODIGO en Europa, etc.).

El SAP2000 se basa en el método de elemento finito para el cálculo de esfuerzos y deformaciones de un sistema estructural, además para el caso del concreto como material estructural se soporta en el modelo de histéresis de Takeda.

Este tipo de cálculo indica que el material se toma como discontinuo, y permite un cálculo más preciso. Ahora bien, en el caso de cálculo de vigas acarteladas,

el SAP2000 toma la cartela como un elemento adicional a la estructura y no como parte de la viga propiamente dicha.

VI. CARACTERIZACIÓN DEL PÓRTICO

Para realizar el diseño del programa, es necesario establecer rangos en los que se para la realización de los estudios sobre las medidas más comunes, así como el tipo de material y dimensionamientos más utilizados. Todo esto, restringe el análisis a pórticos planos compuestos por elementos viga-columna, sin incluir arriostramientos, muros estructurales, entre otros.

Se seleccionaron pórticos con un máximo de siete (07) niveles, restricción únicamente aplicada al programa, con una altura de entrepisos establecida en los siguientes valores fijos:

2,80	3,50
3,00	3,60
3,20	4,00
3,40	Otros
[metros]	

Aunque con la opción “*Otros*”, se pueden añadir otras alturas de entrepiso.

En cuanto a la cantidad de ejes, se estableció:

1. Cantidad máxima de ejes: diez (10) ejes
2. Con longitudes variables entre ejes del pórtico.

Las cantidades de ejes y niveles, se restringieron por el tipo de variable empleado en el programa. Aunque existe la posibilidad con modificaciones en el código de dejarse como datos libres.

VI.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Las estructuras a analizar son de concreto armado, donde se tiene que:

$$E = 14\sqrt{f'c}$$

Ecuación VI-1. Módulo de Young

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Ecuación VI-2. Módulo de Cortadura

Donde:

- E: módulo de Young
- G: módulo de cortadura
- $f'c$: resistencia del concreto en kg/cm^2 .
- ν : módulo de Poisson. Que para el concreto se encuentra entre los 0,15 y 0,20.

Los datos introducidos por el usuario serán los módulos de Young y de Poisson, para así calcular los módulos de elasticidad. Necesarios para el cálculo de las rigideces de los miembros. Generalmente se utilizan:

$$E = 200000 \text{ T/m}^2$$

$$\nu = 0,15$$

VI.2 SOLICITACIONES DEL PÓRTICO

Se toman en cuenta solamente cargas puntuales aplicadas en los nodos, esto se debe a que otro tipo de cargas implica el cálculo de los vectores de cargas equivalentes, que no se contemplaron a la hora de la realización del programa.

Fundamentalmente la idea de este programa es verificar el efecto de las cargas horizontales.

VI.3 SECCIÓN TRANSVERSAL TÍPICA DE LOS ELEMENTOS

La sección transversal típica (secciones rectangulares) viene a dar las siguientes constantes:

$$A_o = b \cdot h$$

$$I_o = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$f = 1,2$$

Donde:

- A_o : área de la sección transversal típica
- I_o : inercia de la sección transversal típica
- f : factor forma, en el caso de secciones rectangulares
- b : ancho
- h : alto

No hay restricciones con respecto a las dimensiones de las secciones transversales de los elementos.

VI.3.1 Dimensionado y tipo de cartelas

Las cartelas serán prismáticas o rectas.

Donde la altura de la cartela debe ser superior a la de la viga pero no mayor a $1/6$ de la altura de entrepiso.

La longitud de la cartela no debe exceder a $0,35L$, donde L es la longitud de la viga (Ziegler,2005). Si la cartela no posee longitud entonces se estudiará como una viga de sección constante.

VII. ALGORITMO DEL PROGRAMA

VII.1 SELECCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

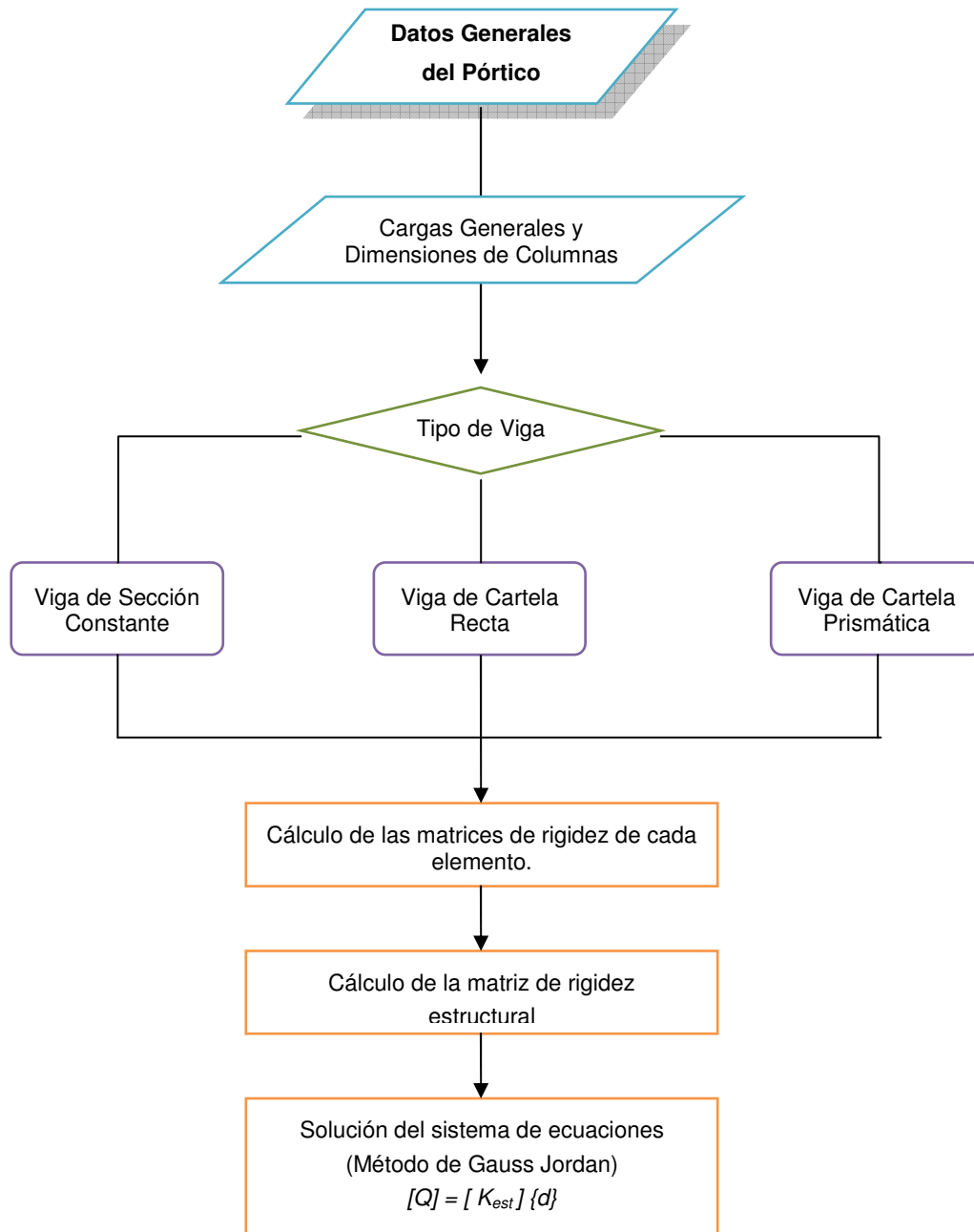
El programa desarrollado para el análisis estático de pórticos planos acartelados, se encuentra en Delphi como lenguaje de programación pero se maneja en ambiente

CAD.

La selección del Delphi como lenguaje de programación, se fundamentó en la versatilidad del mismo para trabajar con librerías externas que permiten hacer enlaces con otros programas y aplicaciones. Adicionalmente ofrece ventajas dentro de la calidad del entorno del desarrollo visual, la velocidad del compilador frente a la eficiencia del código y la facilidad del lenguaje de programación.

A pesar que originalmente se planteó como lenguaje de programación el VBA, debido a que es un lenguaje de muy fácil manejo, ante las características antes expuestas, Delphi presentaba una mejor alternativa, incluyendo que el mismo es parte del programa de la asignatura *Programación*, dictada como materia obligatoria en el ciclo básico de la Facultad de Ingeniería, a diferencia del VBA que no se encuentra dentro del mismo.

VII.2MACRO DIAGRAMA DE FLUJO



VIII. RESULTADOS

VIII.1 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMAS TIPO

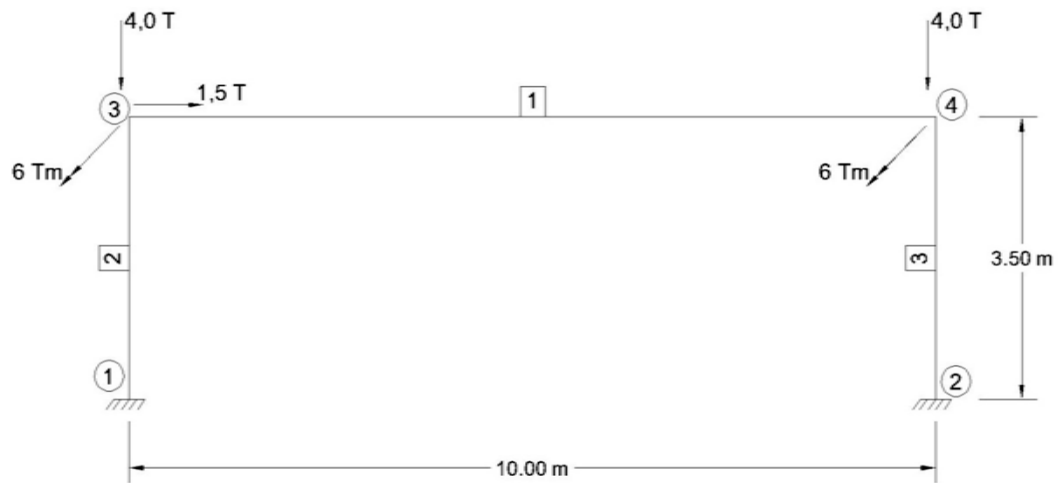


Figura VIII-1. Pórtico Generalizado



Figura VIII-2. Grados de libertad globales de la estructura

VIII.1.1 Problema Tipo 1

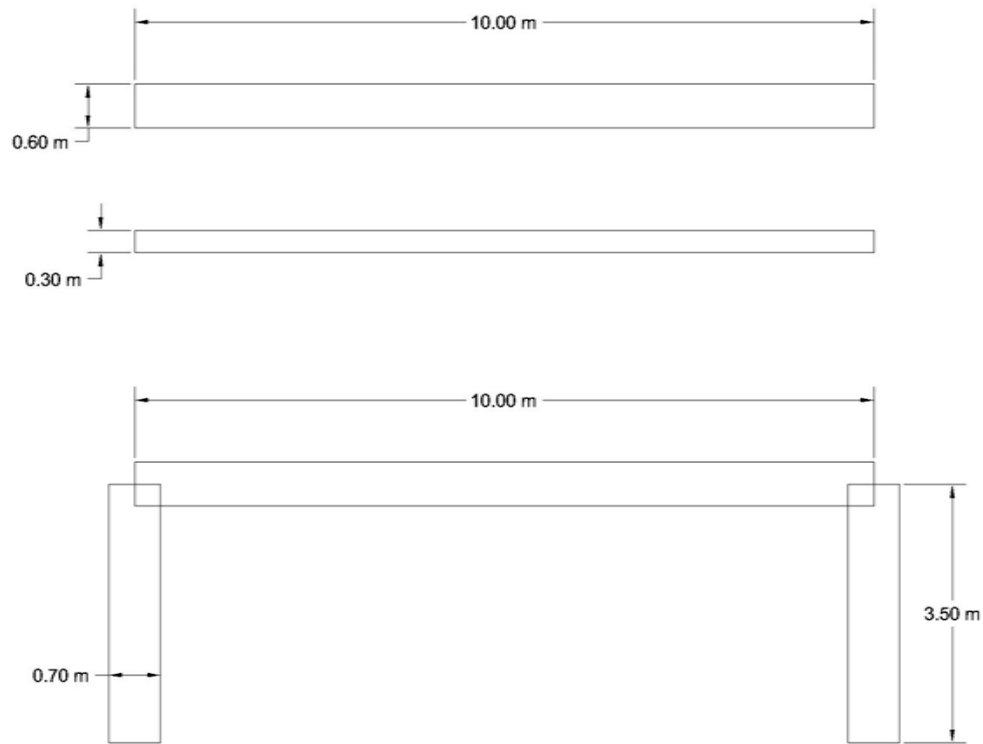


Figura VIII-3. Problema Tipo 1 - Sección constante

Este problema se analizó en dos estados:

1. Sin longitud de sección rígida
2. Con longitud de sección rígida

VIII.1.2 Problema tipo 2 – Cartela recta

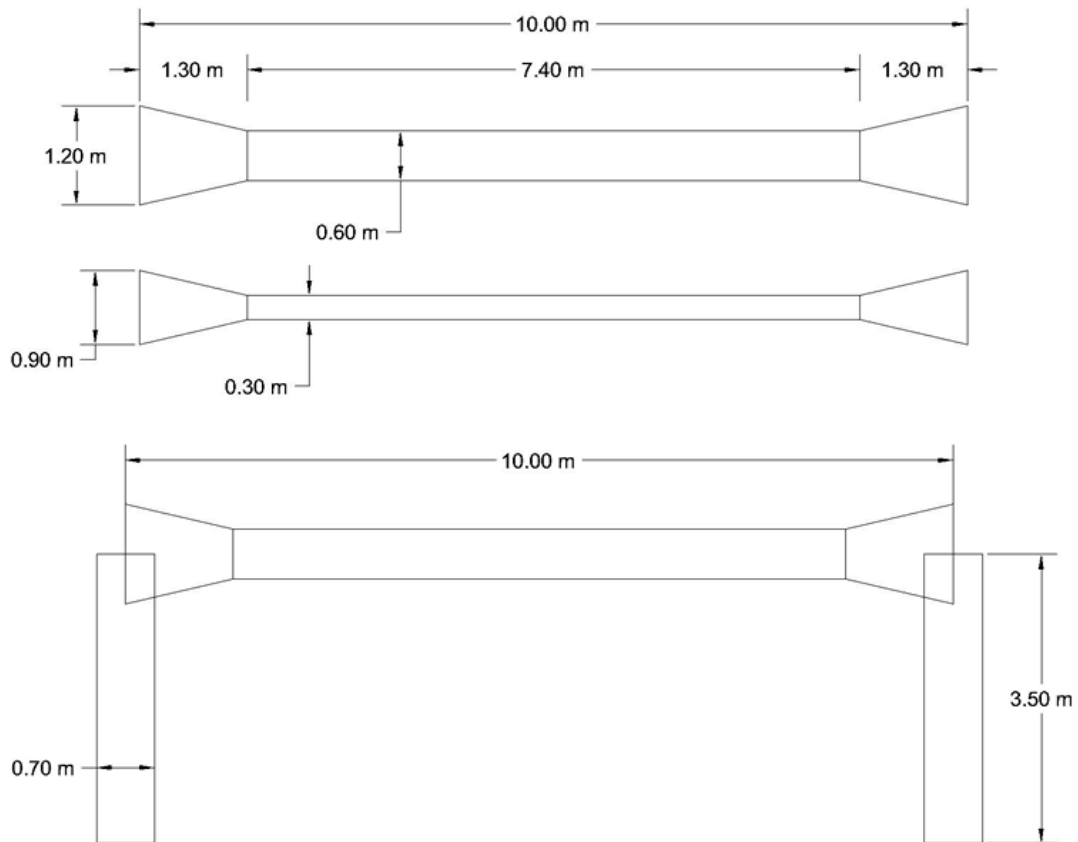


Figura VIII-4. Problema Tipo 2 - Cartela recta

VIII.1.3 Problema Tipo 3 – Cartela prismática

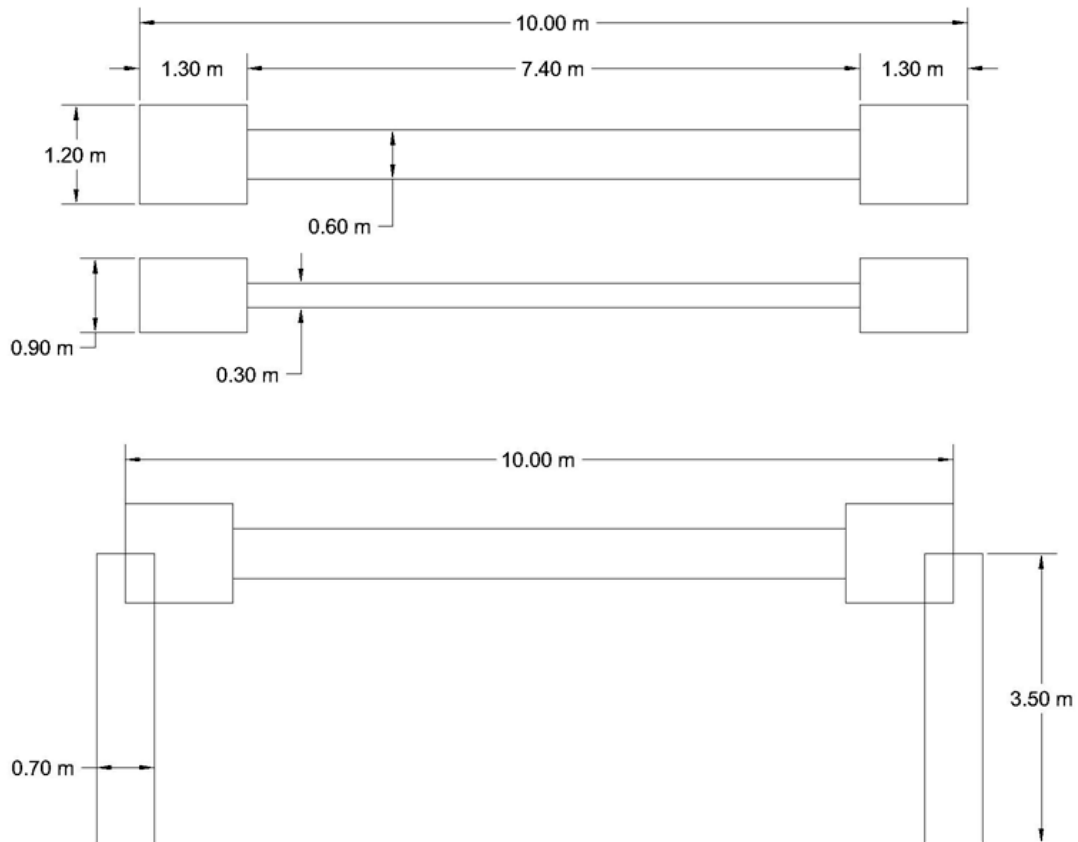


Figura VIII-5. Problema Tipo 3 - Cartela prismática

VIII.2 IMPLEMENTACIÓN DE MAVACAD V1.0

VIII.2.1 Matriz de rigidez estructural

VIII.2.1.1 Problema 01 – sin segmento rígido

	A	B	C	D	E	F
1	Matriz de Rigidez del Pórtico					
2	28092.2057	2128.1241	-41015.5180	-641.6248	0.0000	0.0000
3	2128.1241	364288.1241	641.6248	-641.6248	0.0000	0.0000
4	-41015.5180	641.6248	97328.3250	-128.3250	0.0000	0.0000
5	-641.6248	-641.6248	-128.3250	23932.4066	0.0000	-41657.1429
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	361080	-1080.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	-41657.1429	-1080.0	98280.0000
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						

Figura VIII-6. K global. Prob 01a- MavaCad

28092.21	2128.1241	-41015.5	-641.625	0	0
2128.124	364288.1241	641.6248	-641.625	0	0
-41015.5	641.6248	97328.33	-128.325	0	0
-641.625	-641.6248	-128.325	23932.41	0	-41657.1
0	0	0	0	361080	-1080
0	0	0	-41657.1	-1080	98280

(Ton/m)

VIII.2.1.2 Problema 01 – con segmento rígido (X=1m)

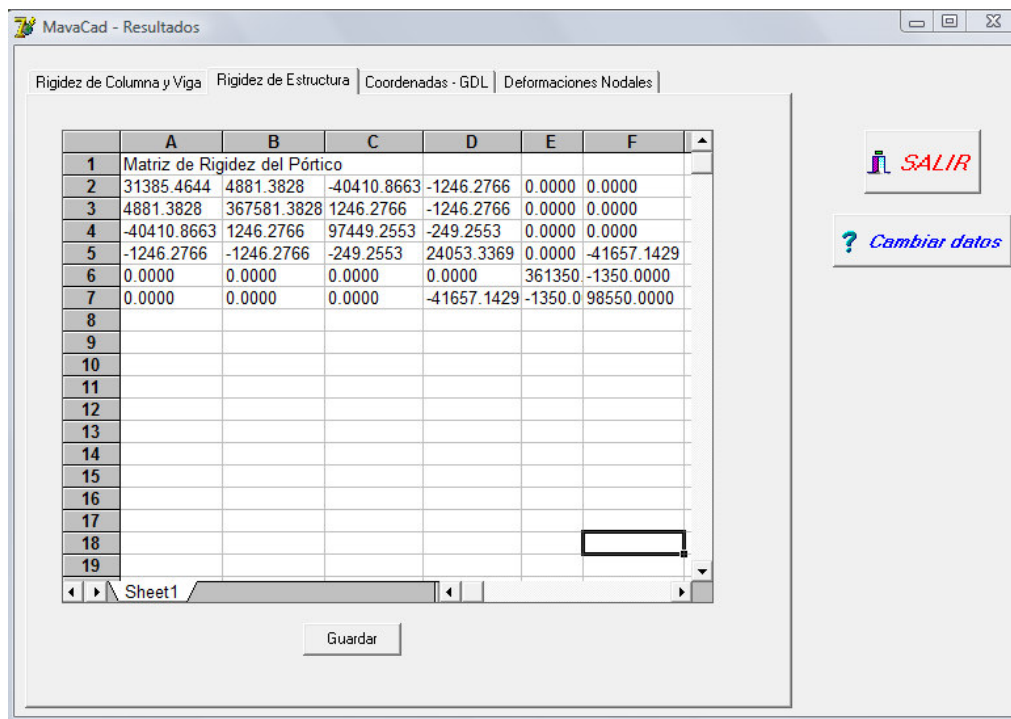


Figura VIII-7. K global. Prob 01b- MavaCad

31385.46	4881.383	-40410.9	-1246.28	0	0
4881.383	367581.4	1246.277	-1246.28	0	0
-40410.9	1246.277	97449.26	-249.255	0	0
-1246.28	-1246.28	-249.255	24053.34	0	-41657.1
0	0	0	0	361350	-1350
0	0	0	-41657.1	-1350	98550

(Ton/m)

VIII.2.1.3 Problema 02

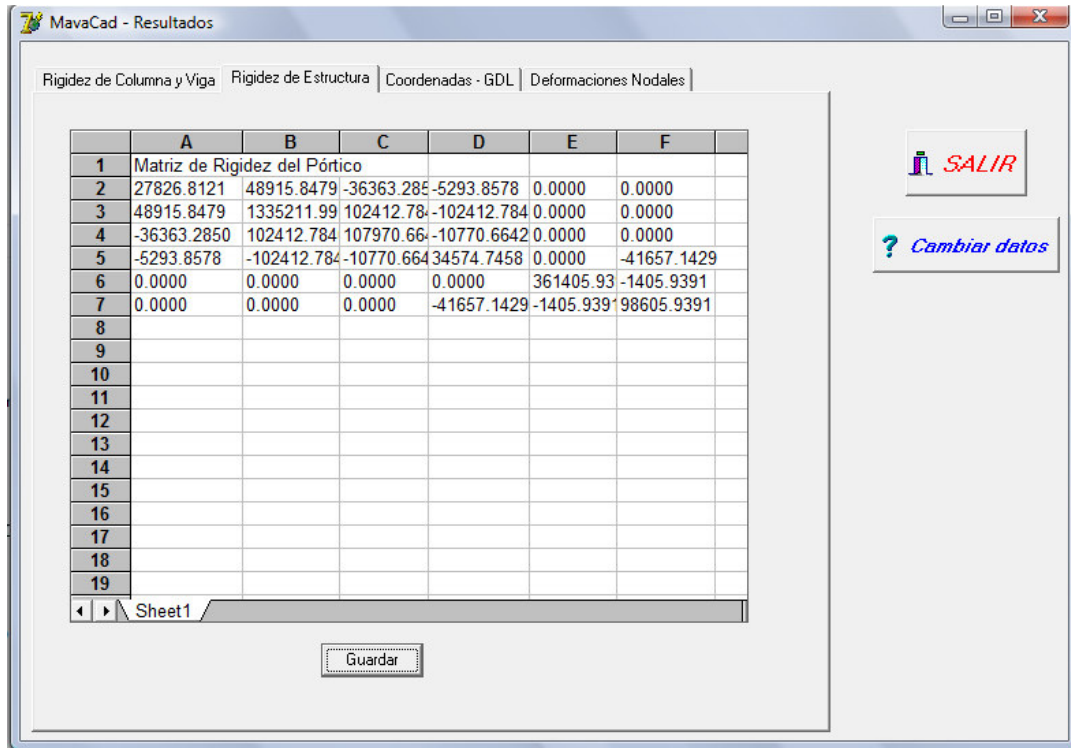


Figura VIII-8. K global. Prob 02- MavaCad

27826.81	48915.85	-36363.3	-5293.86	0	0
48915.85	1335212	102412.8	-102413	0	0
-36363.3	102412.8	107970.7	-10770.7	0	0
-5293.86	-102413	-10770.7	34574.75	0	-41657.1
0	0	0	0	361405.9	-1405.94
0	0	0	-41657.1	-1405.94	98605.94

(Ton/m)

VIII.2.1.4 Problema 03

	A	B	C	D	E	F
1	Matriz de Rigidez del Pórtico					
2	77268.5754	367825.3814	471.8447	-42128.9875	0.0000	0.0000
3	367825.3814	7996682.2461	800450.7628	-800450.7628	0.0000	0.0000
4	471.8447	800450.7628	181457.9750	-84257.9750	0.0000	0.0000
5	-42128.9875	-800450.7628	-84257.9750	108062.0567	0.0000	-41657.1429
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	368100.0000	-8100.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	-41657.1429	-8100.0000	105300.0000
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						

Figura VIII-9. K global. Prob 3 - MavaCad

77268.58	367825.4	471.8447	-42129	0	0
367825.4	7996682	800450.8	-800451	0	0
471.8447	800450.8	181458	-84258	0	0
-42129	-800451	-84258	108062.1	0	-41657.1
0	0	0	0	368100	-8100
0	0	0	-41657.1	-8100	105300

(Ton/m)

VIII.2.2 Desplazamientos nodales

VIII.2.2.1 Problema 01 – sin segmento rígido

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nodo		Fuerzas Generales		Deformaciones			
2	1		1.5000		3.20283753498046E-0004			
3			-4.0000		-1.42413755962214E-0005			
4	2		6.0000		1.95744909943484E-0004			
5			0.0000		4.59380668549947E-0004			
6			-4.0000		-1.01172040195473E-0005			
7			6.0000		2.54924687064115E-0004			
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								

Figura VIII-10. Deformaciones en nodos libres. Prob 01 sin rigidez –MavaCad

Nodo	Deformaciones (m)
3	4.045406E-04
	-1.296228E-05
	2.328039E-04
4	4.492949E-04
	-1.032601E-05
	2.513756E-04

Tabla VIII-1. Deformaciones Prob 01 sin rigidez - MavaCad

VIII.2.2.2 Problema 01 – con segmento rígido

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nodo		Fuerzas Generales		Deformaciones			
2	1		1.5000		3.20283753498046E-0004			
3			-4.0000		-1.42413755962214E-0005			
4	2		6.0000		1.95744909943484E-0004			
5			0.0000		4.59380668549947E-0004			
6			-4.0000		-1.01172040195473E-0005			
7			6.0000		2.54924687064115E-0004			
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								

Figura VIII-11.. Deformaciones en nodos libres. Prob 01 con rigidez –MavaCad

Nodo	Deformaciones (m)
3	3.202838E-04
	-1.424138E-05
	1.957449E-04
4	4.593807E-04
	-1.011720E-05
	2.549247E-04

Tabla VIII-2. Deformaciones Prob 01 con rigidez - MavaCad

VIII.2.2.3 Problema 02

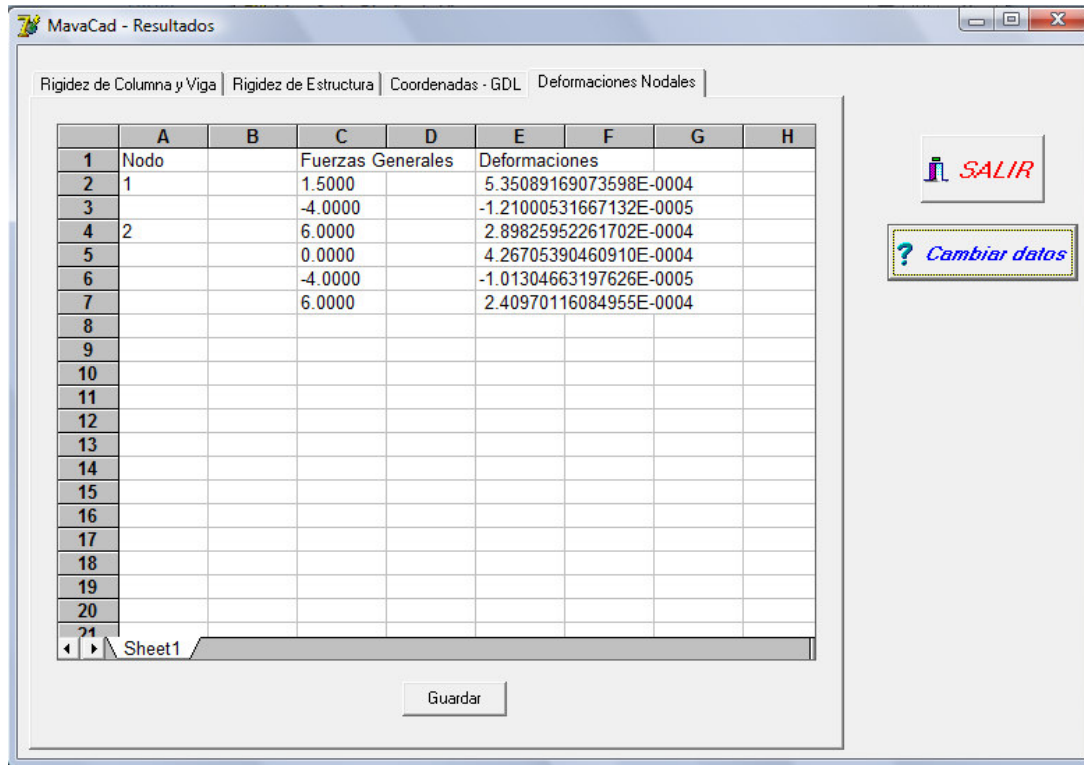


Figura VIII-12. Deformaciones en nodos libres. Prob 02 – MavaCad

Nodo	Deformaciones (m)
3	5.350892E-04
	-1.210005E-05
	2.898260E-04
4	4.267054E-04
	-1.013047E-05
	2.409701E-04

Tabla VIII-3. Deformaciones Prob 02 - MavaCad

VIII.2.2.4 Problema 03

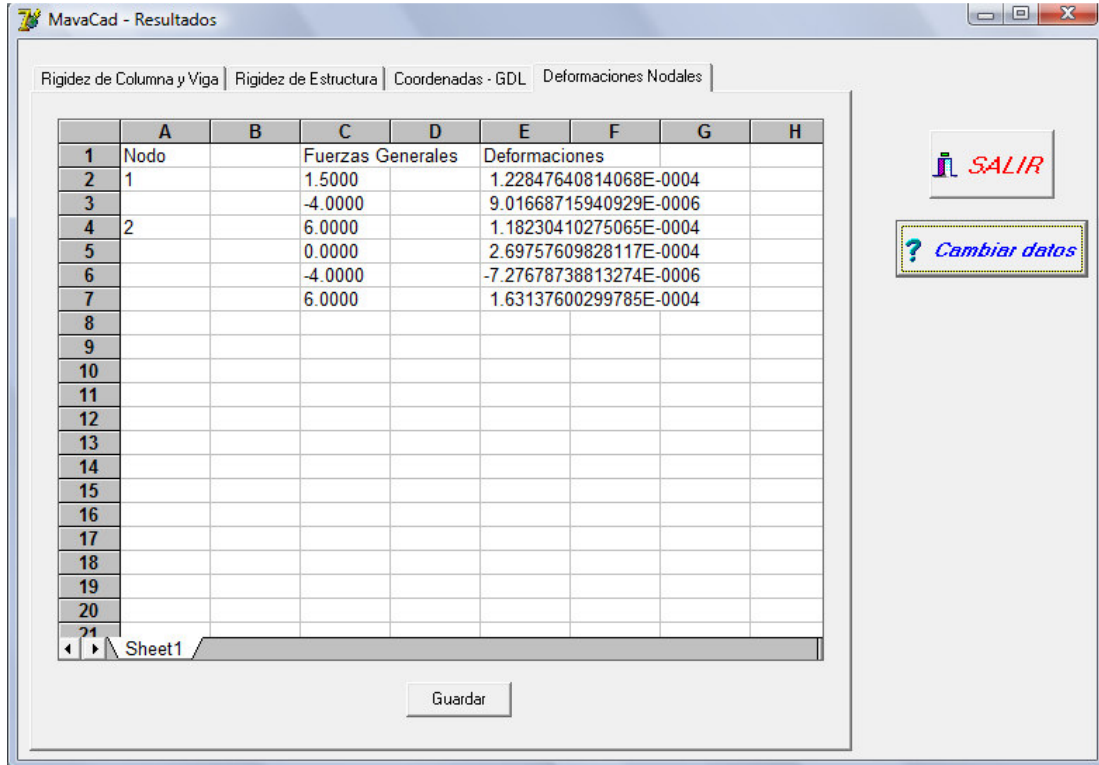


Figura VIII-13. Deformaciones en nodos libres. Prob 03 – MavaCad

Nodo	Deformaciones (m)
3	1.228476E-04
	9.016687E-06
	1.182304E-04
4	2.697576E-04
	-7.276787E-06
	1.631376E-04

Tabla VIII-4. Deformaciones Prob 03 - MavaCad

VIII.3 RESULTADOS ARROJADOS POR SAP2000

VIII.3.1 Desplazamientos nodales

VIII.3.1.1 Problema 01 – sin segmento rígido

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	m	m	m	Radians	Radians	Radians
1	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
3	DEAD	LinStatic	-0.000321	0	-0.000012	0	-0.000218	0
4	DEAD	LinStatic	-0.000341	0	-0.00001	0	-0.000226	0

Tabla VIII-5. Desplazamientos Prob 1 - SAP2000

VIII.3.1.2 Problema 02

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	m	m	m	Radians	Radians	Radians
1	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
3	DEAD	LinStatic	-0.000227	0	-0.000012	0	-0.000164	0
4	DEAD	LinStatic	-0.000244	0	-0.000009874	0	-0.000171	0
5	DEAD	LinStatic	-0.000225	0	0.000189	0	-0.000134	0
6	DEAD	LinStatic	-0.00024	0	-0.000218	0	-0.000139	0

Tabla VIII-6. Desplazamientos Prob 2 - SAP2000

VIII.3.1.3 Problema 03

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	m	m	m	Radians	Radians	Radians
1	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
2	DEAD	LinStatic	0	0	0	0	0	0
3	DEAD	LinStatic	-0.000212	0	-0.000012	0	-0.000156	0
4	DEAD	LinStatic	-0.000229	0	-0.000009806	0	-0.000162	0
5	DEAD	LinStatic	-0.00021	0	0.000183	0	-0.000147	0
6	DEAD	LinStatic	-0.000225	0	-0.000212	0	-0.000151	0

Tabla VIII-7. Desplazamientos Prob 3 - SAP2000

Nota. Los resultados completos arrojados por el SAP2000 se encuentran en los anexos.

VIII.4 CÁLCULO DEL ERROR

PROB 1 - SIN RIGIDEZ		
MavaCad	SAP2000	Error (%)
0.000404541	-0.000321	0.072554055
-1.29623E-05	-0.000012	-9.62285E-05
0.000232804	0.000218	0.001480389
0.000449295	-0.000341	0.079029492
-1.0326E-05	-0.000001	-3.26006E-05
0.000251376	0.000226	0.002537557
Promedio (%)		0.03

Tabla VIII-8.. Error para el Prob 01 - sin rigidez

PROB 2		
MavaCad	SAP2000	Error (%)
0.000535089	-0.000227	0.076208917
-1.21001E-05	-0.000012	-1.00053E-05
0.000289826	0.000164	0.012582595
0.000426705	-0.00024	0.066670539
-1.01305E-05	-0.000218	0.020786953
0.00024097	0.000139	0.010197012
Promedio (%)		0.03

Tabla VIII-9. Error para el Prob 02

PROB 3		
MavaCad	SAP2000	Error (%)
0.000122848	-0.000212	0.03348476
9.01669E-06	-0.000012	0.002101669
0.00011823	0.000156	-0.00377696
0.000269758	-0.000225	0.04947576
-7.27679E-06	-0.000212	0.020472321
0.000163138	0.000151	0.00121376
Promedio (%)		0.02

Tabla VIII-10. Error para el Prob 03

Error promedio: 0,02667%

IX. ANÁLISIS DE RESULTADOS

IX.1 ANÁLISIS DE LAS RIGIDECES DE PÓRTICO

Las matrices de rigidez calculadas en *MavaCad v1.0*, nos muestran el cambio en cuanto a la rigidez en los nodos para cada caso.

En el caso de la viga de sección constante los elementos de la matriz de rigidez son en magnitud mucho menores a los que presentan cartelas, e inclusive al caso de sección constante con longitud de sección rígida en el nodo.

Esto se puede apreciar de mejor forma calculando el determinante de la matriz, donde:

	det(k)*10⁻³⁰
Prob 01 - sin rigidez	0.084581263
Prob 01 - con rigidez	0.117224369
Problema 02	0.393724303
Problema 03	15.26109443

Tabla IX-1. Determinante de la matriz de rigidez estructural

Se observa que en el tercer caso, viga con cartela prismática, el determinante supera en mucho al valor arrojado por los otros modelos. Esto se debe a que el área de la cartela se mantiene constante en toda su longitud. Lo que implica un mayor volumen de concreto en el tramo, por esto no suelen utilizarse con tanta frecuencia, ya que esto elevaría los costos de construcción de la estructura.

A continuación se presenta un gráfico con los valores de las matrices de rigidez de los casos 1a, 1b y 2.

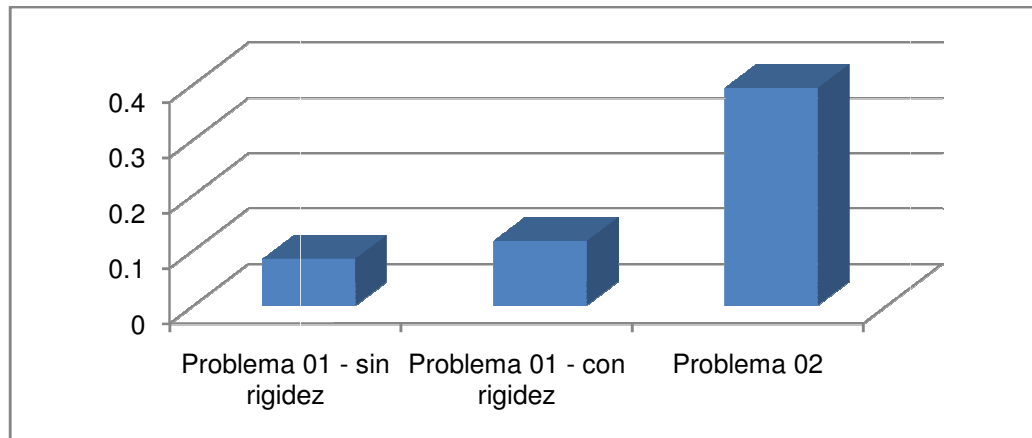


Figura IX-1. Determinante de la matriz de rigidez estructural ($\det(k) \cdot 10^{-30}$)

Se muestra cómo el pórtico con cartelas rectas muestra un aumento significativo en la rigidez del pórtico, este tipo de cartelas suelen implementarse con mayor frecuencia ya que el volumen de concreto empleado es mucho menor que en el caso de cartelas prismáticas.

También puede observarse que la variación de rigidez en el caso de la aplicación de rigidez en el nodo no es de gran importancia. Por lo que no “compite” con las vigas acarteladas en cuestión de aumento de rigidez de pórtico.

Estas matrices pudieron compararse por medio del cálculo del determinante, por ser todas cuadradas, simétricas, de igual dimensión y poseer la misma composición de submatrices.

IX.2 ANÁLISIS DE LAS DEFORMACIONES

El error calculado para cada uno de los casos está por debajo del 10% lo que indica que el programa calcula las deformaciones de forma óptima.

Ahora bien, al observar las deformaciones correspondientes al SAP2000 y compararlas con las de *MavaCad v1.0*, se encuentran diferencias en cuanto a los signos de las deformaciones, esto debido a la metodología en cuanto a la escogencia del sistema de coordenadas, que en el caso de *MavaCad* se trabaja en el plano XY, donde la X positiva es hacia la derecha, la Y positiva es hacia arriba y la Z positiva va saliendo del papel. Mientras que el SAP2000 trabaja en el plano XZ, donde las direcciones de X y Z coinciden con las de X y Y del programa, mientras que el tercer vector director se dirige en forma contraria al de *MavaCad*, es decir, entra al papel.

De allí que a la hora de calcular el error, se modificarán los signos de los valores arrojados por el SAP2000.

Así mismo en los problemas con cartelas sólo se tomo en cuenta el desplazamiento del nodo correspondiente, ya que el SAP2000 no toma la viga acartela como una sola entidad, si no que la divide en la sección variable y la constante, quedando en definitiva para el caso del pórtico planteado, un sistema de 5 elementos con 12GDL.

X. CONCLUSIONES

Se logró desarrollar un programa que permitiera el análisis estático de un pórtico plano con vigas acarteladas, con las características descritas. Los valores correspondientes a las deformaciones pudieron verificarse al compararlos con los valores arrojados por el SAP2000, ya que el error promedio registrado es de 0,02667%.

Además el programa muestra la matriz de rigidez del sistema, lo que permite hacer comparaciones entre sistemas de iguales dimensiones y características en presencia de diferentes tipos de cartelas, o en la ausencia de las mismas.

El programa *MavaCad* no considera otras variables como son los efectos de temperatura, el acero de refuerzo e incluso el recubrimiento del material, ya que su influencia no es apreciable.

XI. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos y a los análisis realizados, se propone la realización de un programa más amplio, que contemple la posibilidad de diferenciar los niveles, ya que en el caso de *MavaCad* todos los niveles poseen las mismas características.

Además de agregar la posibilidad de cargar datos previamente estudiados.

También se propone incluir los efectos por temperatura y solicitaciones a lo largo del elemento, establecer la posibilidad de diseño de cartelas diferentes en una misma viga, es decir, el elemento es asimétrico en el eje z local.

XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIBROS

AGUILAR, R. Año 1995. “Análisis Matricial de Estructuras”. Editorial ESPE. 2da Edición. 611 p. Quito, Ecuador.

ARIAS A, G. Año 1984. “Análisis Sísmico Estático de Edificios con Aplicación a Microcomputadores”. Ediciones Vega S.R.L. Edición preliminar. 275 p. Caracas, Venezuela.

ARNAL, E. y D'AMICO, F. Año 2005. “Aplicaciones del Computador a la Ingeniería”. Impresiones Venegraf. 1ra Edición. 291 p. Caracas, Venezuela.

BROWN, D. Año 1984. “An Introduction to the Finite Element Method Using Basic Programs”. Editorial Blackie & son Ltd. 1ra Edición. 188 p. Londres, Inglaterra.

BURDEN, R. y FAIRES, J. Año 1996. “Análisis Numérico”. Editorial Iberoamérica. 2da Edición. 808 p. México D.F, México.

LAMAR, S y FORTOUL, C. Año 2007. “Análisis Estático de Estructuras”. Ediciones Citeci. 1ra Edición. 665 p. Caracas, Venezuela.

McMANUS, J. Año 1999. “Bases de Datos con Visual Basic 6”. Editorial Prentice Hall Iberia S.R.L. 1ra Edición. 768 p. Madrid, España.

TAJADURA, J. y otros. Año 1999. "Programación con Autocad". Editorial McGraw Hill. 1ra Edición. 563 p. Madrid, España.

TAMAYO, M. Año 1999. "El proceso de la investigación científica". Editorial Limusa S.A. 3ra Edición. 231p. México D.F, México.

MEDIOS ELECTRÓNICOS

CARNICERO, A. Año 2006. "Apuntes". Contenido en línea. Página web: <http://www.iit.upcomillas.es/~carnicero> [Consulta 23/03/2008].

FRIAS V, E. Año 2004. "El método de los elementos finitos" Contenido en línea. Pagina web: http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1214104-114808/06Efv06de23.pdf [Consulta 16/02/2006].

GOMEZ, J. Año 2001. "Modulo I. Introducción - Análisis estructural." Contenido en línea. Página web: <http://lorenzoasuservicio.50megs.com/facu/modulo1/modulo1.htm#bolita>. [Consulta 16/02/2006].

JARAMILLO J, J. Año 2006. "Ingeniería estructural I. Una introducción a las estructuras" Contenido en línea. Página web: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/index.html> [Consulta 16/02/2007].

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Estados Unidos Mexicanos. Año 2004. “Proyecto de puentes y estructuras”. Contenido en línea. Pagina web: <http://normas.imt.mx/NORMATIVA/e%20PRY/a%20Carreteras/06%20Puentes%20y%20Estr/01%20Nuevos%20Puentes/M-PRY-CAR-6-01-008-04.pdf> [Consulta 26/04/2008].

Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ingeniería. Año 2006. “Análisis matricial de estructuras por El método de la rigidez”. Contenido en línea. Pagina web: http://ing.unne.edu.ar/pub/e3_cap4.pdf. [Consulta 14/03/08].

TESIS

REILEY, J y ESTEVEZ, J. Año 2006. “Estudio de la Influencia de Vigas Acarteladas en Pórticos Planos de Concreto Armado”. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

ZIEGLER, R y ESPINOZA, G. Año 2005. “Influencia de las Vigas Acarteladas en Pórticos para Galpones”. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

XIII. ANEXOS

XIII.1 MÉTODO ESTÁTICO EQUIVALENTE

Este método tradicional para evaluar la magnitud de la denominada fuerza de sismo consiste en reemplazar el efecto del sismo en una edificación por un conjunto de fuerzas horizontales equivalentes (F_x), aplicadas en los niveles de los pisos del edificio, que equilibran el «cortante de base», V_s . Aunque este método de análisis se restringe a edificaciones regulares de menos de 20 niveles o 60 m de altura desde la base o a 18 m de altura y seis niveles para estructuras irregulares, aún es usable para la mayoría de los casos.

El cortante de base V_o se evalúa

$$V_o = \mu \cdot A_d \cdot W$$

El valor de A_d representa la ordenada del espectro de diseño definida en el artículo 7.2, para un período específico, μ es el mayor de los valores dados por las ecuaciones 9.2 y 9.3 de la Norma COVENIN 1753. y W representa el peso total de la edificación por encima del nivel de base.

La fuerzas laterales F_i , representan las fuerzas laterales de diseño aplicadas en cada nivel, para cada una de las direcciones de análisis (regularmente x e y ;) obtenidas a partir de la distribución vertical de la fuerza cortante basal. Esto viene dado de acuerdo a la ecuación 9.8 de la Norma COVENIN 1756.

XIII.1.1 Verificación de la deriva

La norma exige además que los desplazamientos horizontales en cada piso de la edificación se encuentren por debajo de ciertos valores límites con el fin de que no haya daños excesivos en los elementos no estructurales de ella. Estos valores límites se ven reflejados en la norma COVENIN 1756 (Tabla 10.1, Cap 10, Art. 10.2) y varían dependiendo del tipo de estructura a analizar.

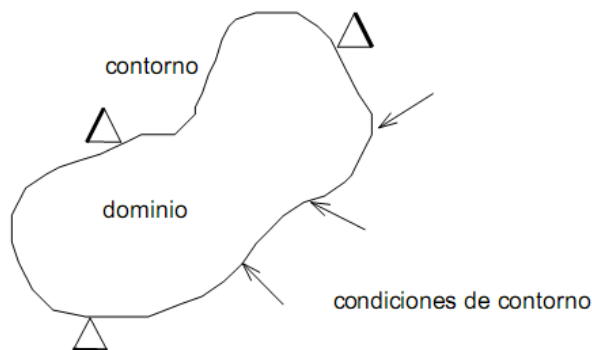
XIII.2 EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO. CONCEPTOS GENERALES.

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

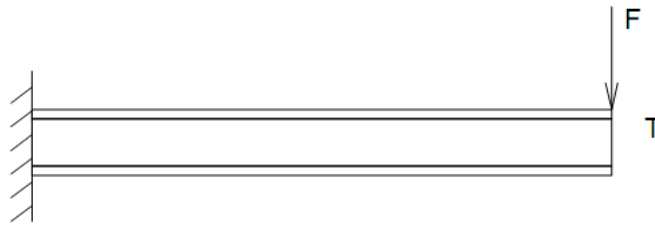
1. Dominio. Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
2. Condiciones de contorno. Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor, entre otros.
3. Incógnitas. Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas, etc.



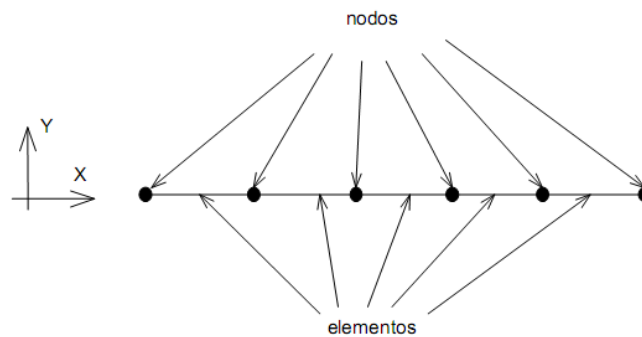
El método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide. Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema.

En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos podemos calcular el resto de incógnitas que nos interesen: tensiones, deformaciones, etc. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo.

Por ejemplo si el sistema a estudiar es una viga en voladizo con una carga puntual en el extremo y una distribución de temperaturas tal y como muestra la figura:



el discretizado del dominio puede ser:



Los grados de libertad de cada nodo serán:

1. Desplazamiento en dirección x
2. Desplazamiento en dirección y
3. Giro según z
4. Temperatura

El sistema, debido a las condiciones de contorno: empotramiento, fuerza puntual y temperatura, evoluciona hasta un estado final. En este estado final, conocidos los valores de los grados de libertad de los nodos del sistema podemos determinar cualquier otra incógnita deseada: tensiones, deformaciones, etc.

También sería posible obtener la evolución temporal de cualquiera de los grados de libertad. Planteando la ecuación diferencial que rige el comportamiento del continuo para el elemento, se llega a fórmulas que relacionan el comportamiento en el interior del mismo con el valor que tomen los grados de libertad nodales. Este paso se realiza por medio de unas funciones llamadas de interpolación, ya que éstas ‘interpolan’ el valor de la variable nodal dentro del elemento.

El problema se formula en forma matricial debido a la facilidad de manipulación de las matrices mediante ordenador. Conocidas las matrices que definen el comportamiento del elemento (en el caso estructural serán las llamadas matrices de rigidez, amortiguamiento y masa, aunque esta terminología ha sido aceptada en otros campos de conocimiento) se ensamblan y se forma un conjunto de ecuaciones algebraicas, lineales o no, que resolviéndolas nos proporcionan los valores de los grados de libertad en los nodos del sistema.

XIII.3 PROCEDIMIENTOS DE MÉTODOS NUMÉRICOS UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DEL ALGORITMO

XIII.3.1 Método de Gauss Jordan

Es el método más comúnmente utilizado para la solución de sistemas de ecuaciones, transformando la matriz de coeficientes en una matriz triangular superior. Reduciendo el sistema en uno equivalente cuya matriz de coeficientes es la identidad.

XIII.3.2 Regla de Simpson compuesta

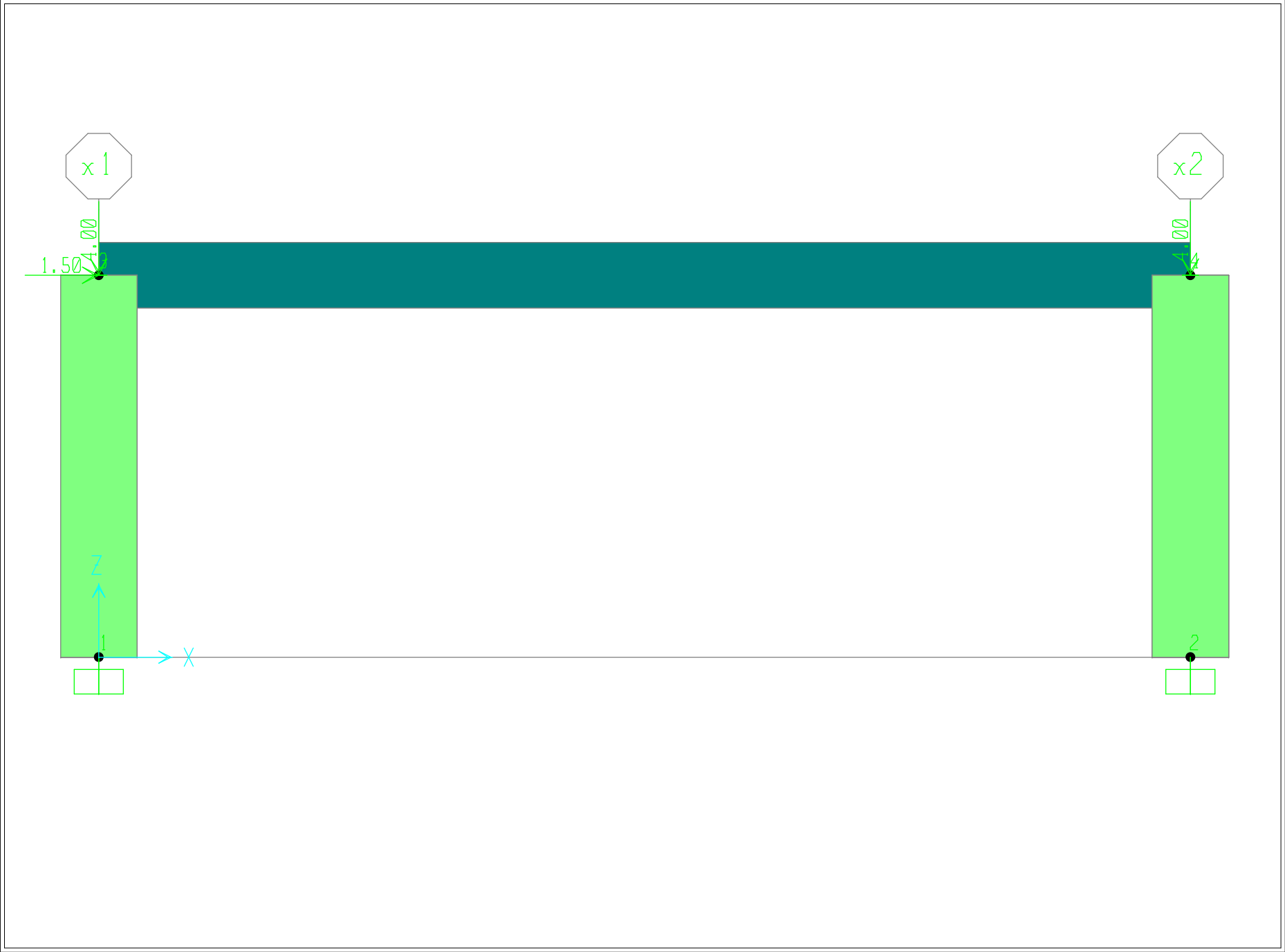
Es un proceso iterativo empleado para el cálculo de integrales definidas, se basa en el procedimiento de la regla trapezoidal con algunas modificaciones. Aproxima la integral de una función f , continua en un intervalo $[a, b]$, mediante la fórmula:

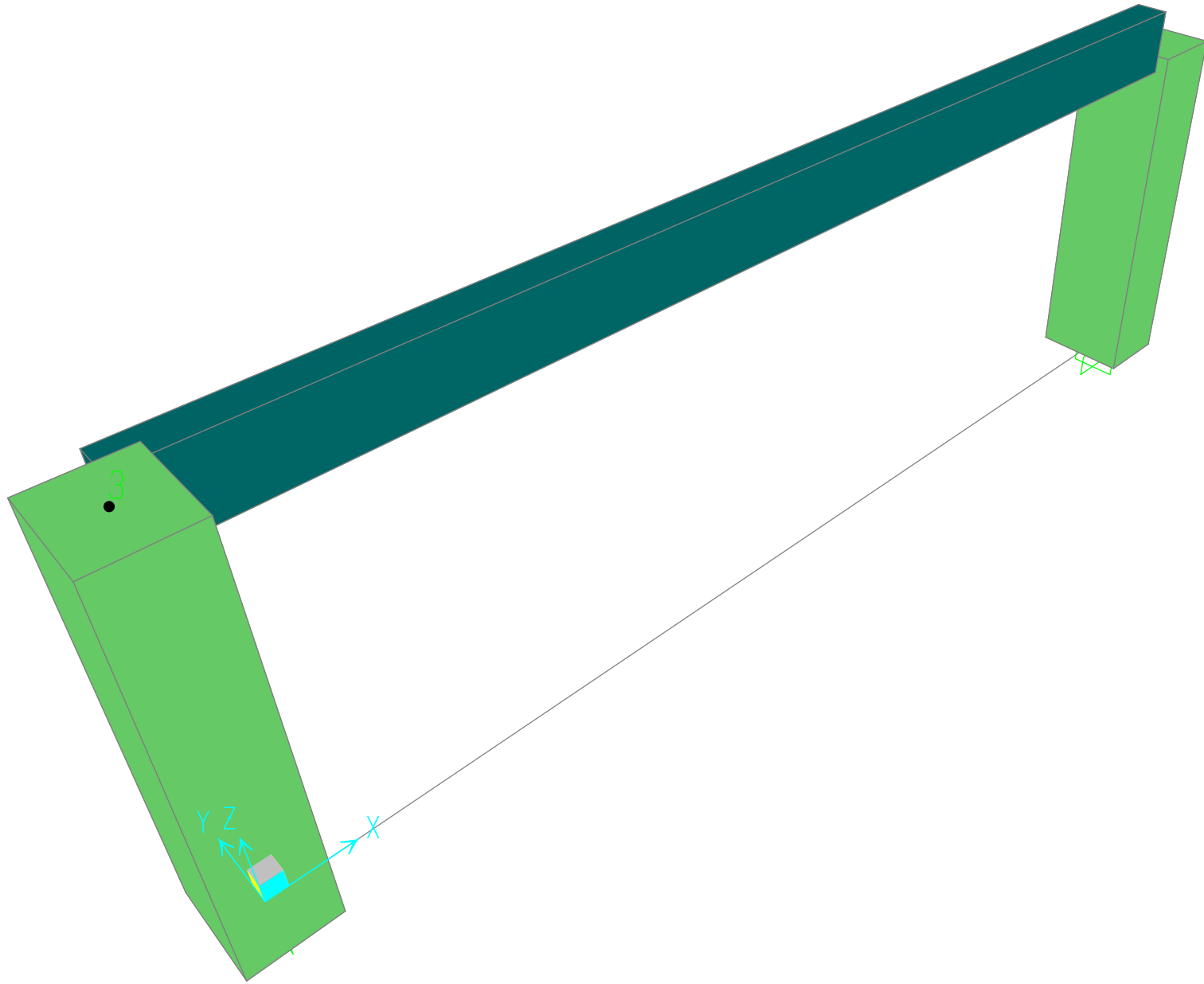
$$\mathcal{I}_{\text{simp}}^h(f)_a^b = \frac{h}{3} \left[f(a) + 4 \sum_{j=1}^n f(x_{2j-1}) + 2 \sum_{j=1}^{n-1} f(x_{2j}) + f(b) \right]$$

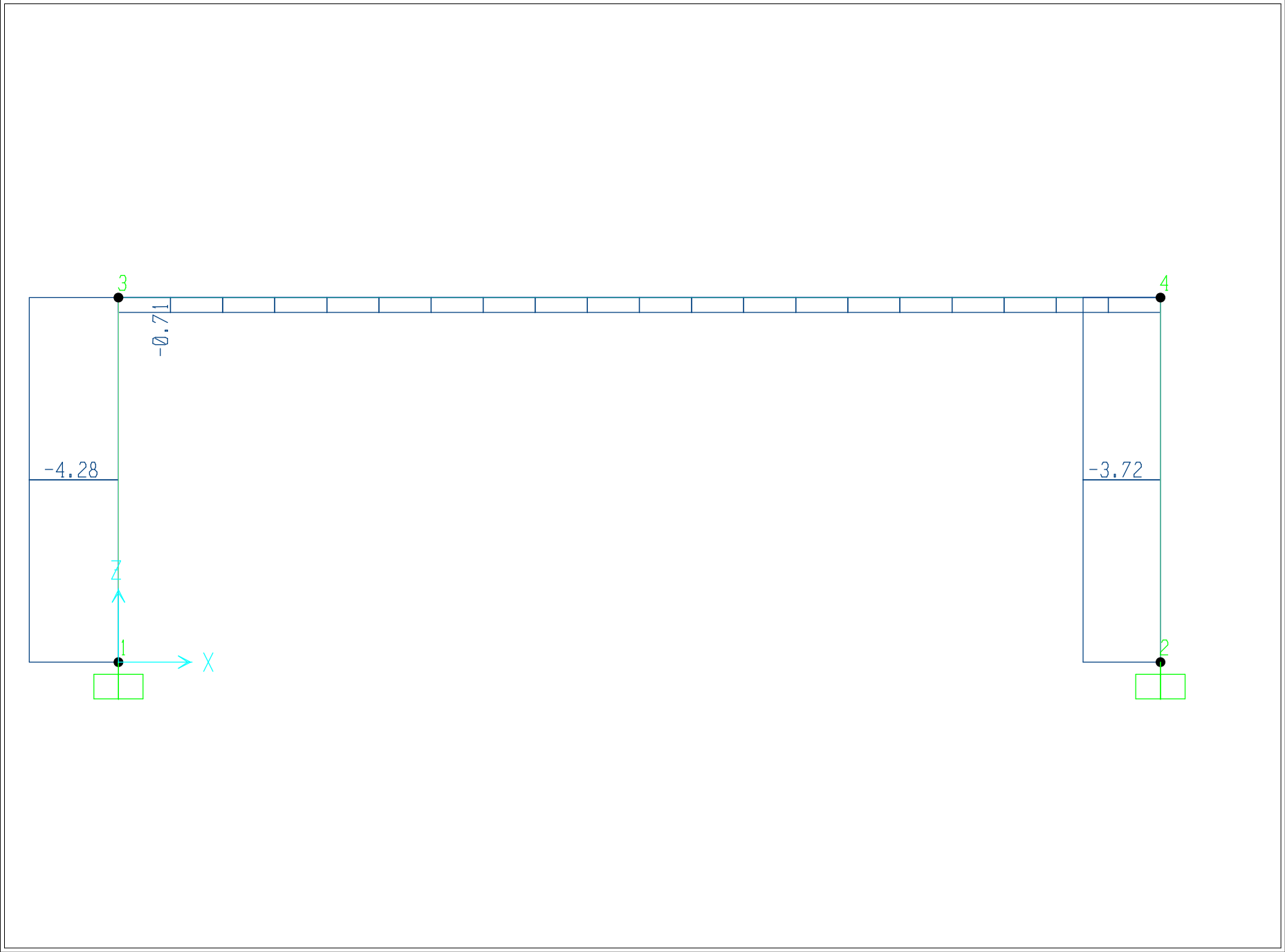
Básicamente este procedimiento resulta de integrar sobre el intervalo $[a,b]$ el polinomio de Lagrange de segundo grado.

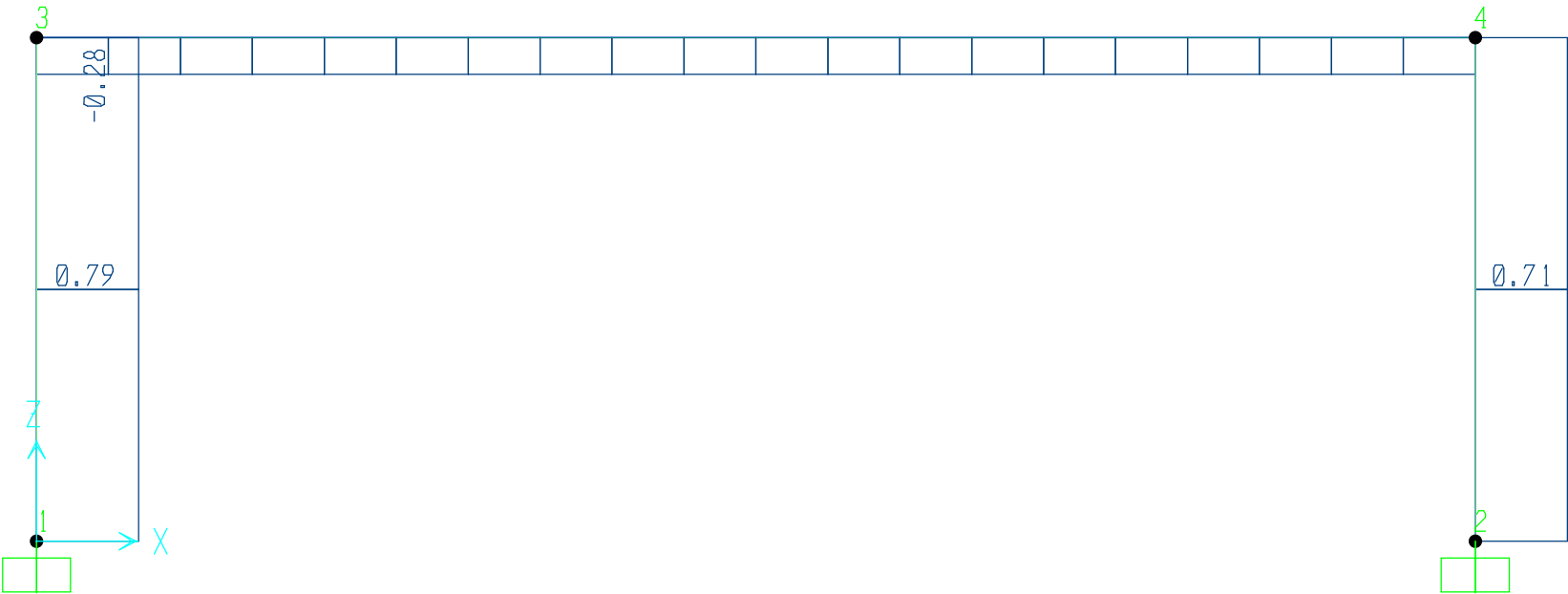
Donde
$$h := \frac{b-a}{2n} = \frac{\delta}{2}$$

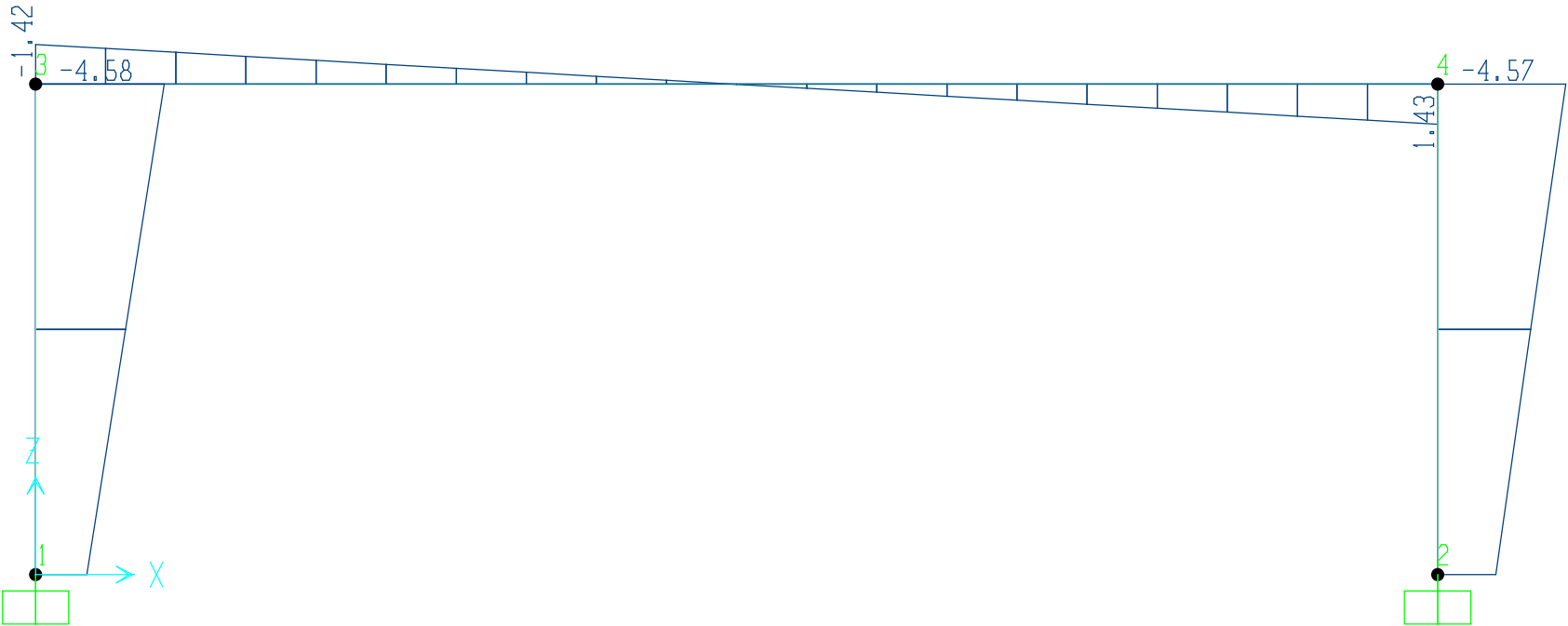
PROBLEMA TIPO 01 – SAP2000



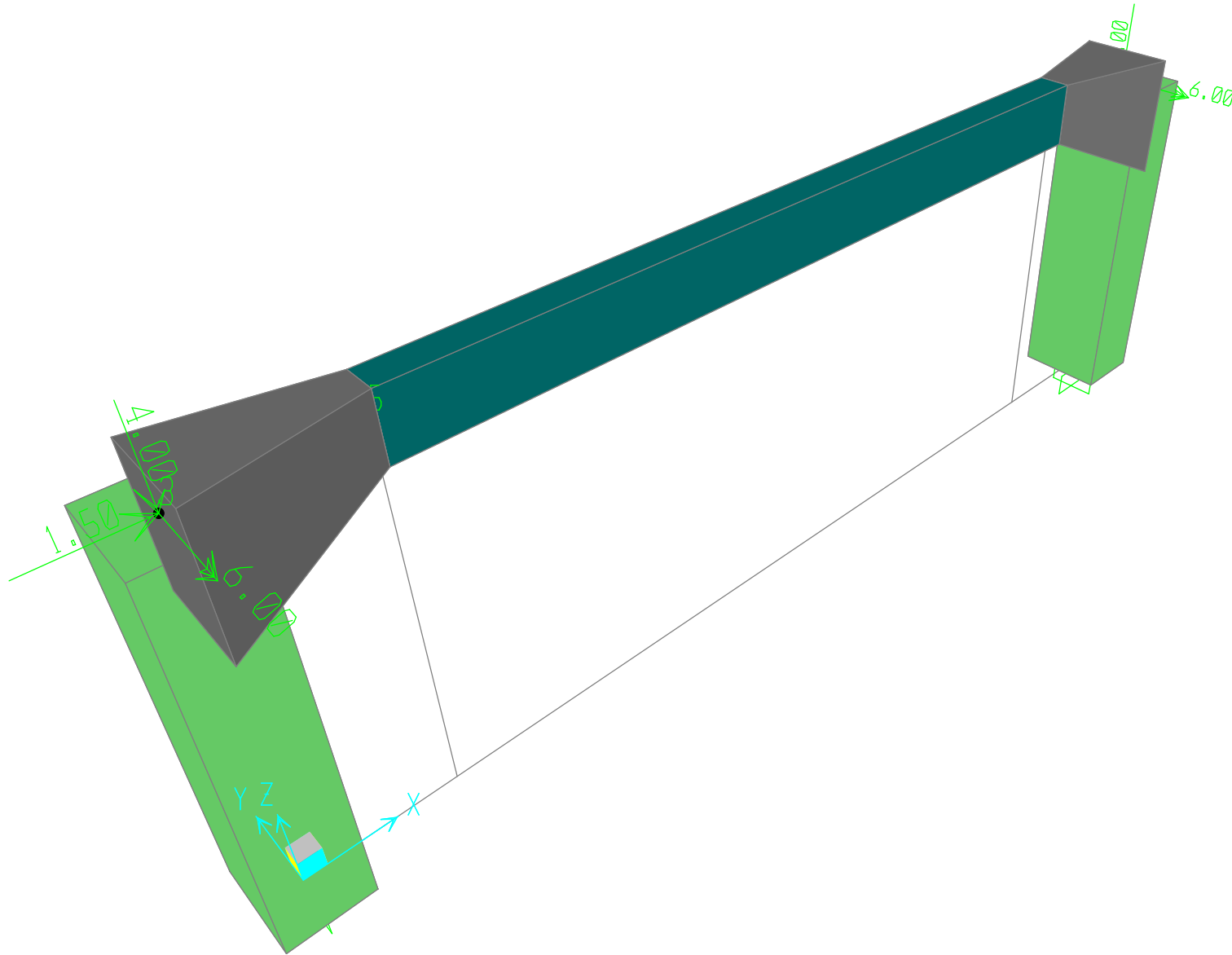


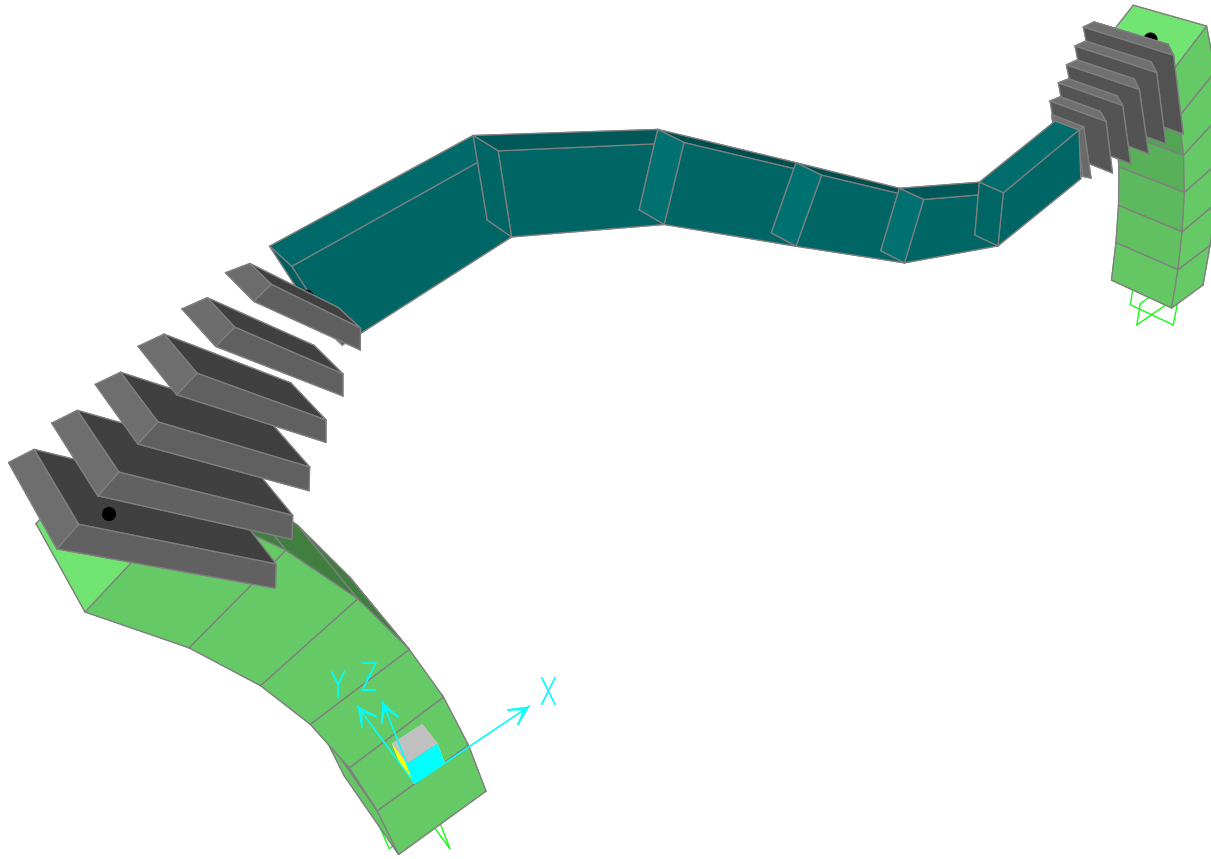


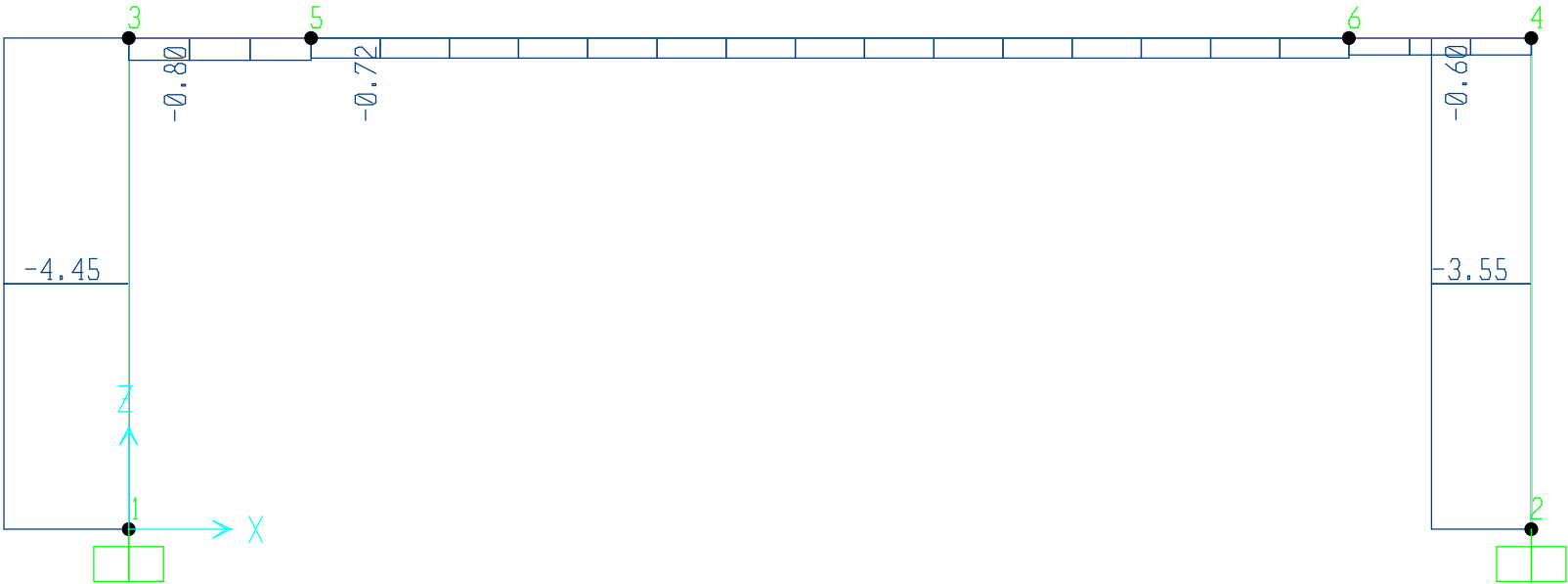


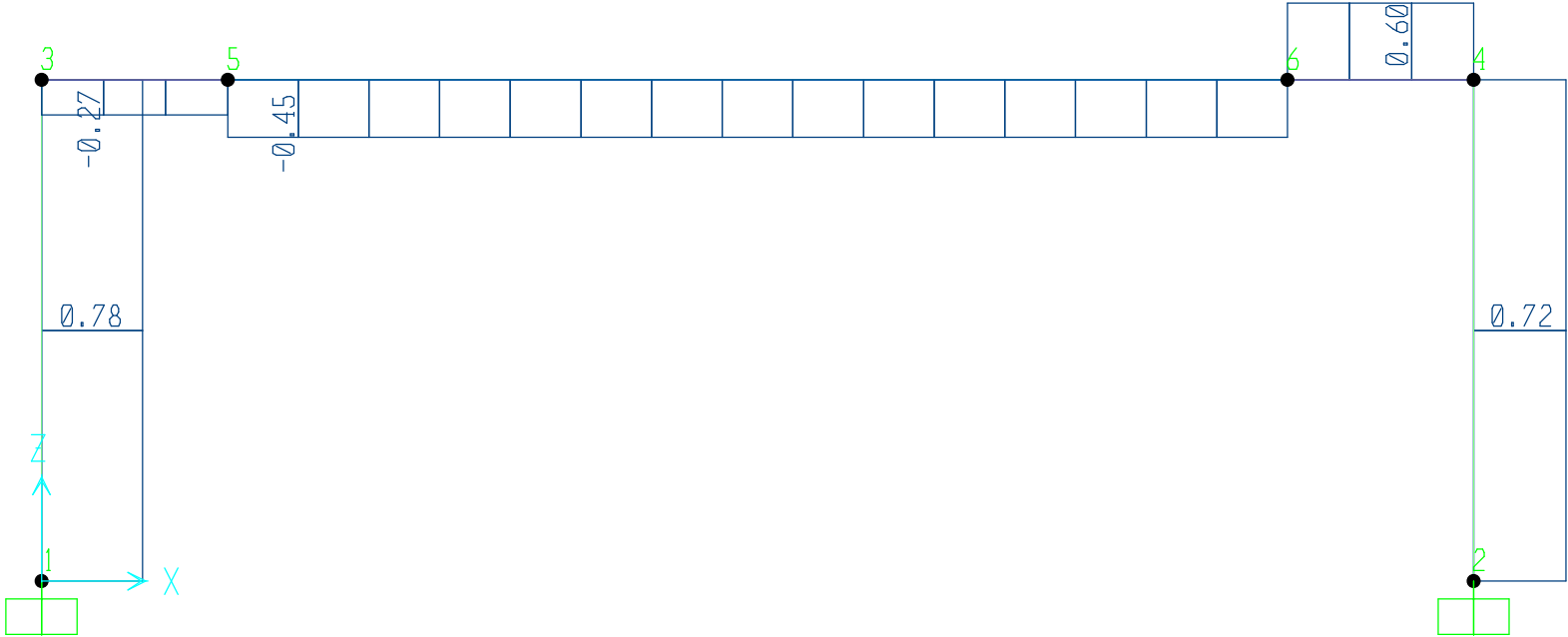


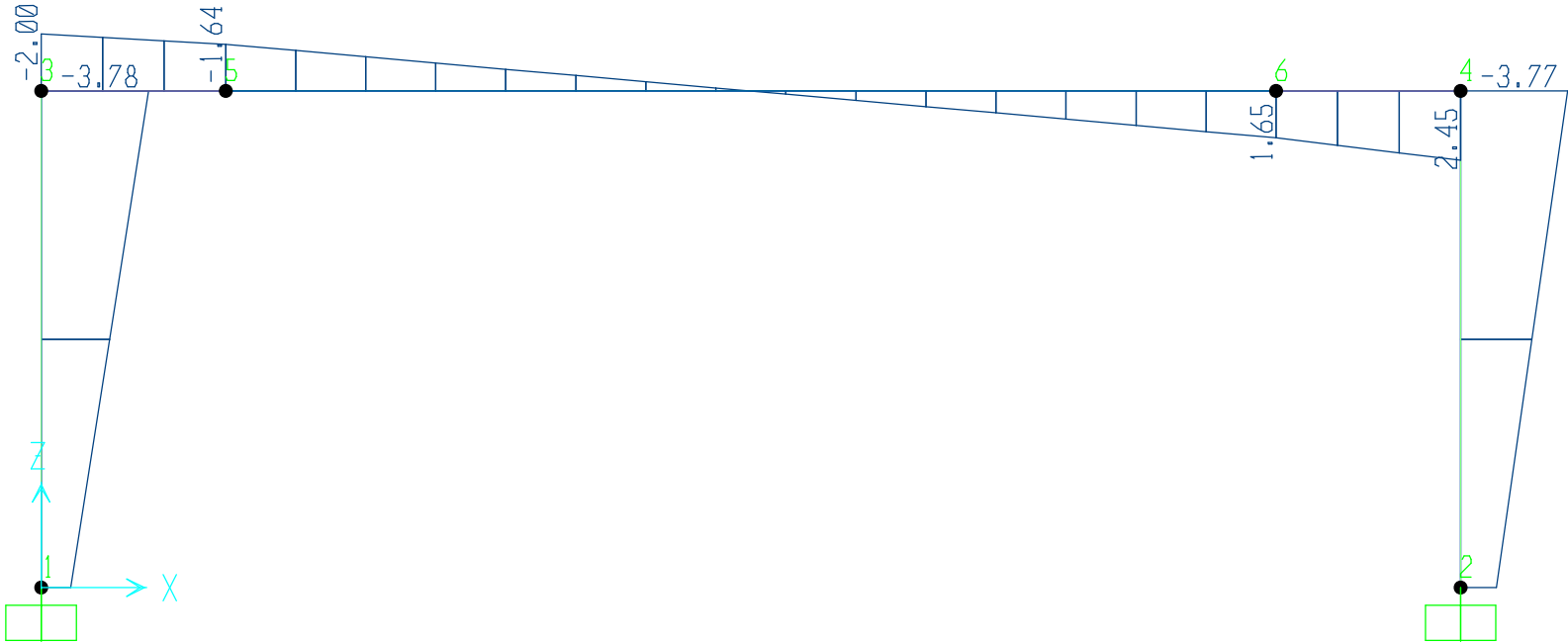
PROBLEMA TIPO 02 – SAP2000



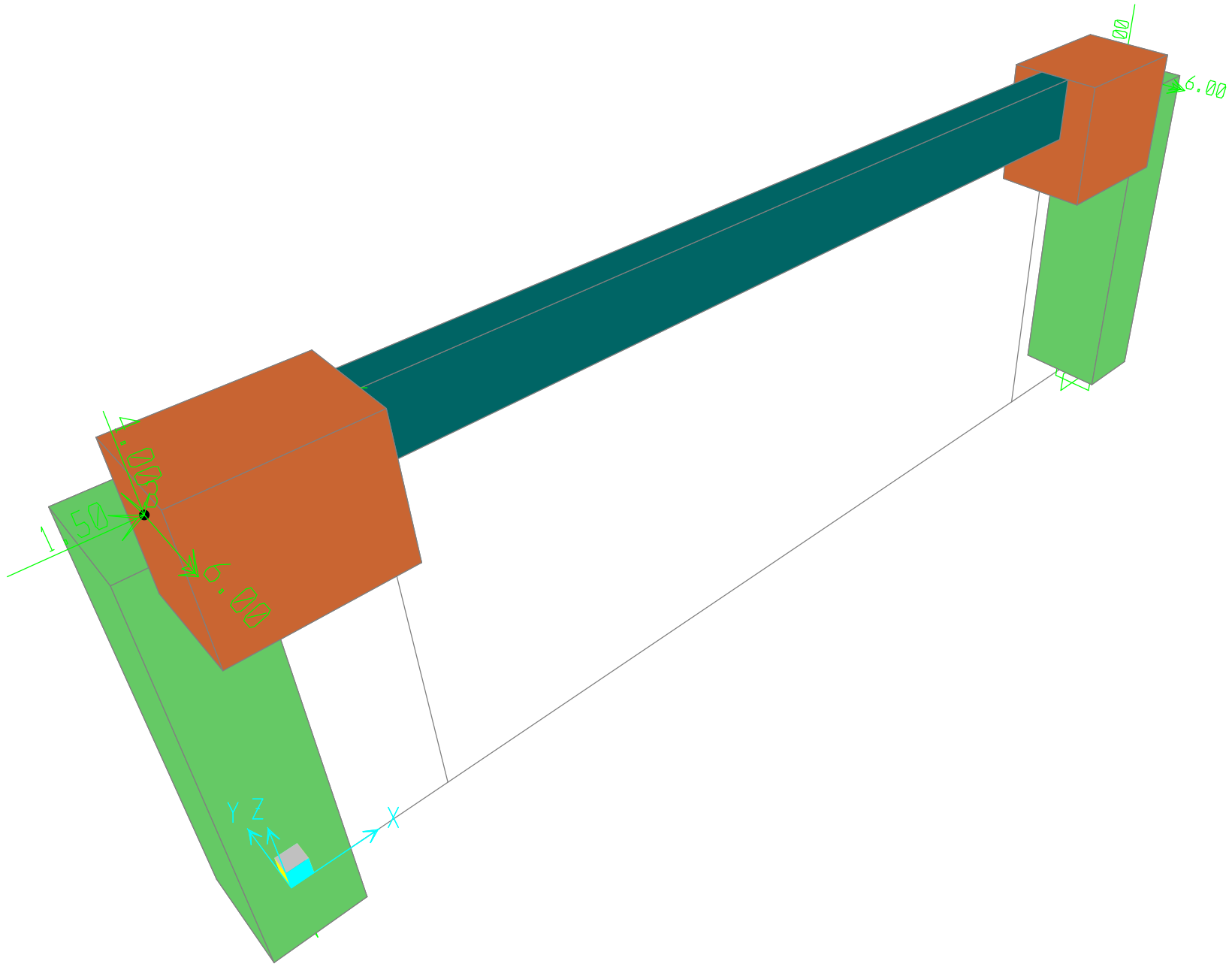


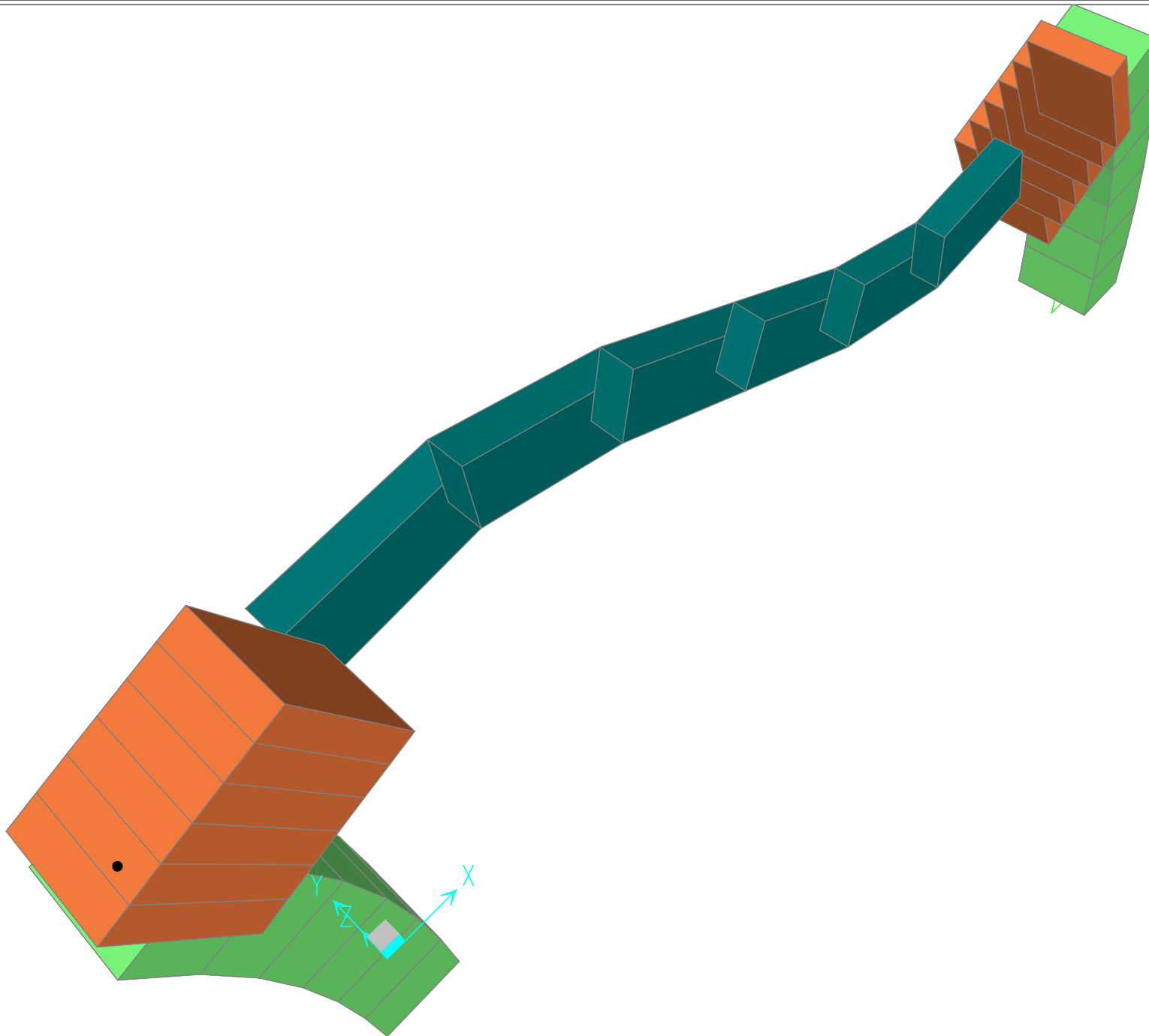


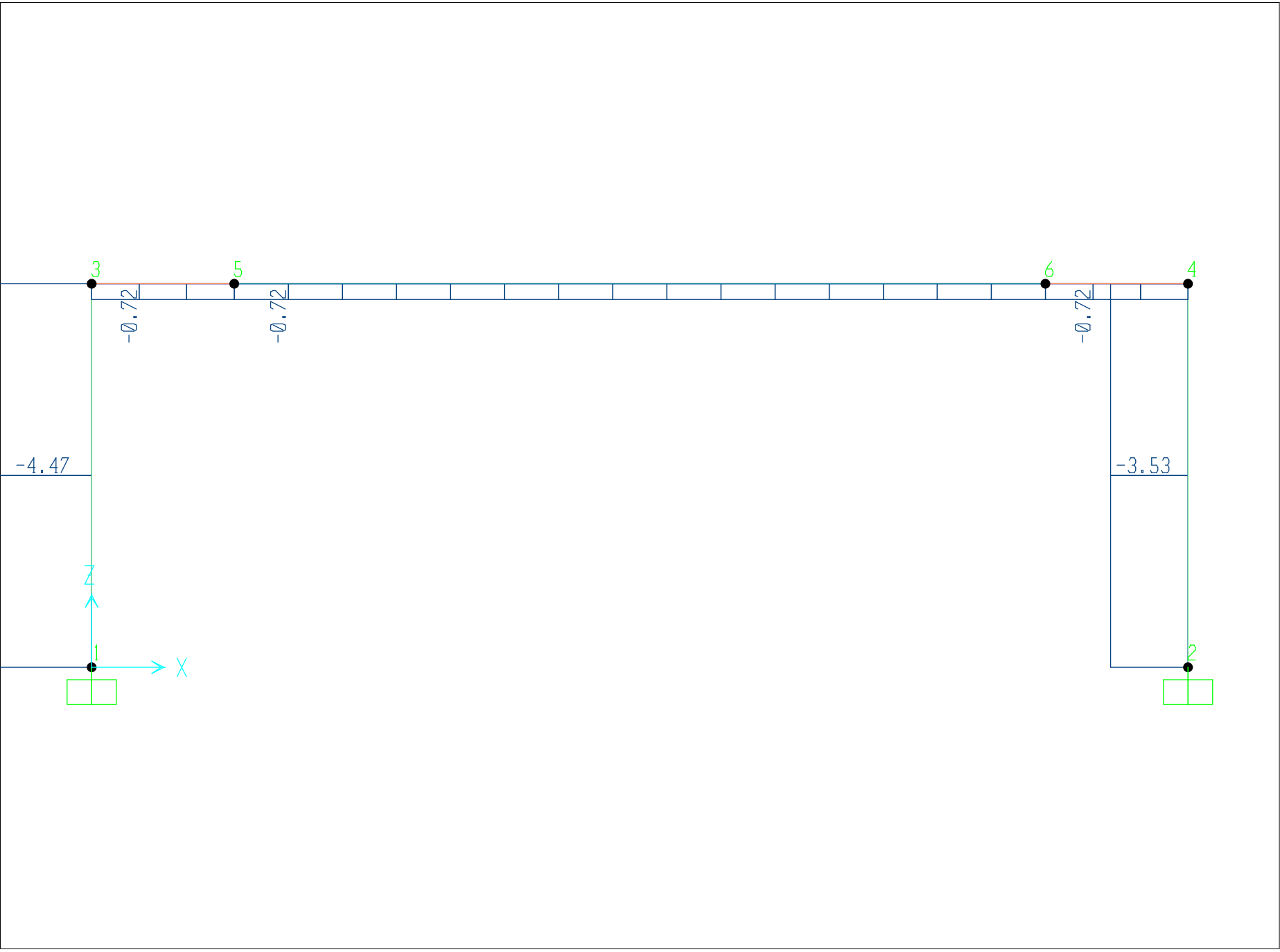


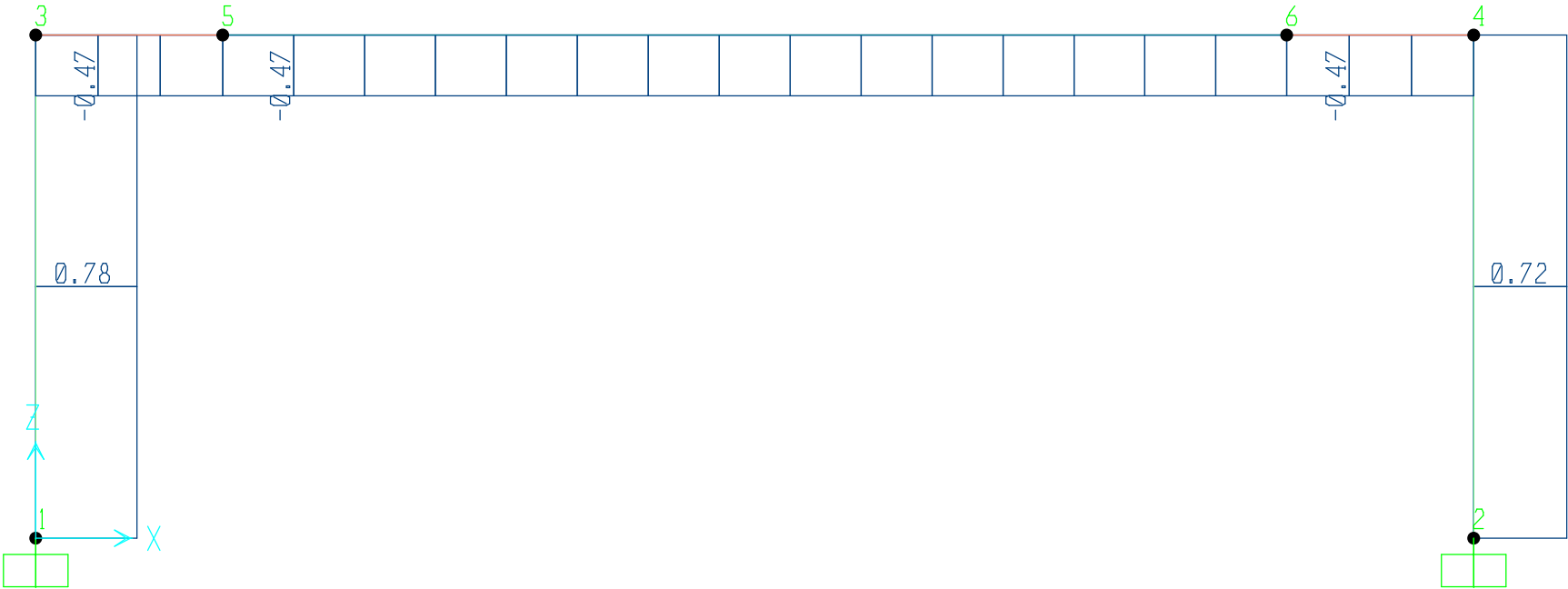


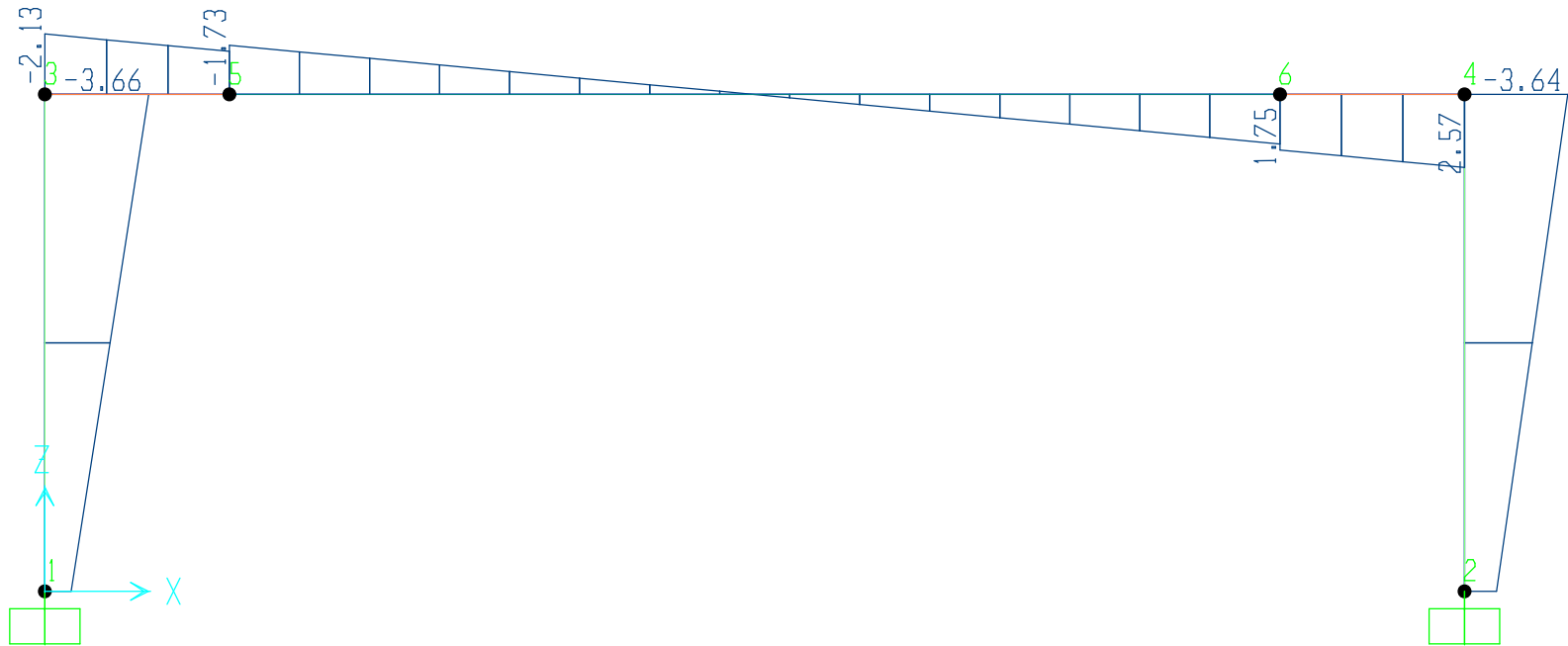
PROBLEMA TIPO 03 – SAP2000











MANUAL DE USUARIO: MavaCad V2.0

TABLA DE CONTENIDOS

I.	Introducción	2
II.	Instalación del programa	3
II.1	Registro del OCX	3
II.2	Instalación en el AutoCad	4
III.	Presentación del programa	8
IV.	Datos de entrada.....	9
IV.1	Datos del pórtico	9
IV.2	Diseño de Columnas.....	11
IV.3	Diseño de Vigas.....	12
V.	Resultados	16

I. INTRODUCCIÓN

MavaCad v2.0 es un programa diseñado para el análisis estático de pórticos planos con vigas acarteladas en concreto armado.

El análisis se calcula por medio del método de los desplazamientos, donde las matrices de rigidez de cada elemento se calculan por medio del método de la viga conjugada, aplicando ciertas integrales para cada elemento de la matriz y así ensamblar la matriz de rigidez global de la estructura.

Para disminuir el ancho de banda de la matriz de rigidez global la numeración de los nodos de la estructuras se realizó de forma tal que la distancia entre nodos cercanos fuera la máxima, lo que implica que la distancia entre los nodos consecutivos va a ser la longitud del vano correspondiente.

II. INSTALACIÓN DEL PROGRAMA

Para instalar el programa copie la carpeta con el nombre *MavaCad v2.0* en el disco duro principal de su computadora. Esta carpeta contiene dos subcarpetas, que tienen por nombre OCX y CAD.

II.1 REGISTRO DEL OCX

1. En la carpeta OCX, arrastre con el *mouse* el archivo *MavaCad.ocx* sobre el archivo “*regsvr32.exe*”. En el caso de estar trabajando en Windows Vista, asegúrese de estar como Administrador de Equipo y que el Control de cuentas de usuario (UAC) esté desactivado. Con este procedimiento el archivo queda registrado en la máquina.

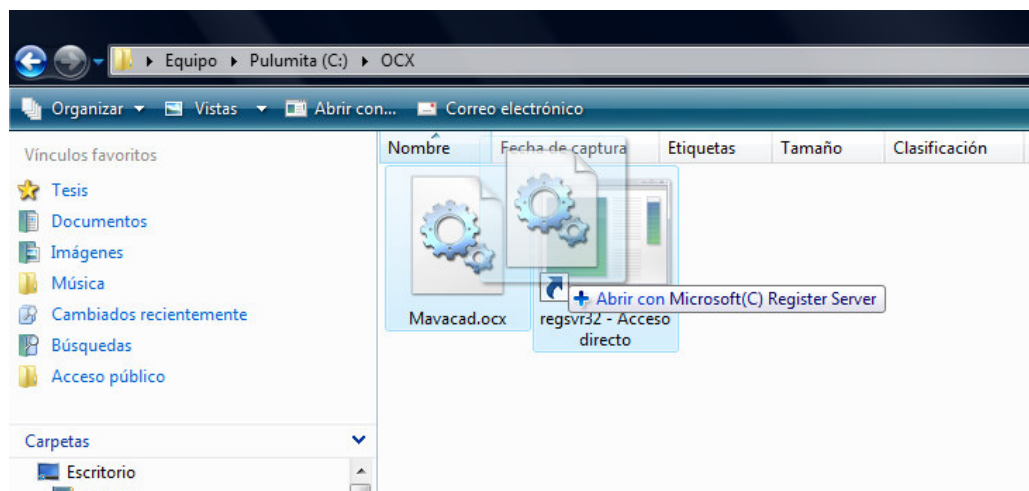


Figura 1. Registro del OCX

II.2 INSTALACIÓN EN EL AUTOCAD

1. Abra el AutoCad.
2. En el menú herramientas seleccione la opción “cargar aplicación”. Se va a desplegar una ventana de apertura de archivos, busque en la carpeta CAD el archivo *Accont17.arx*

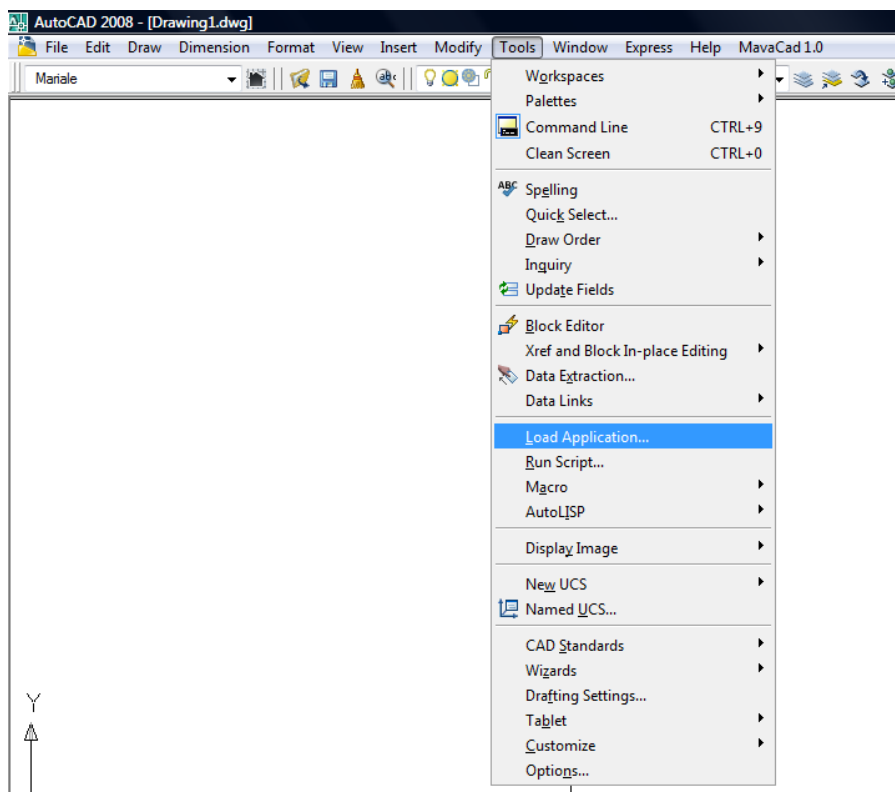


Figura 2. Cargando la aplicación

3. A continuación en el menú herramientas seleccione Personalizar ► Interface.

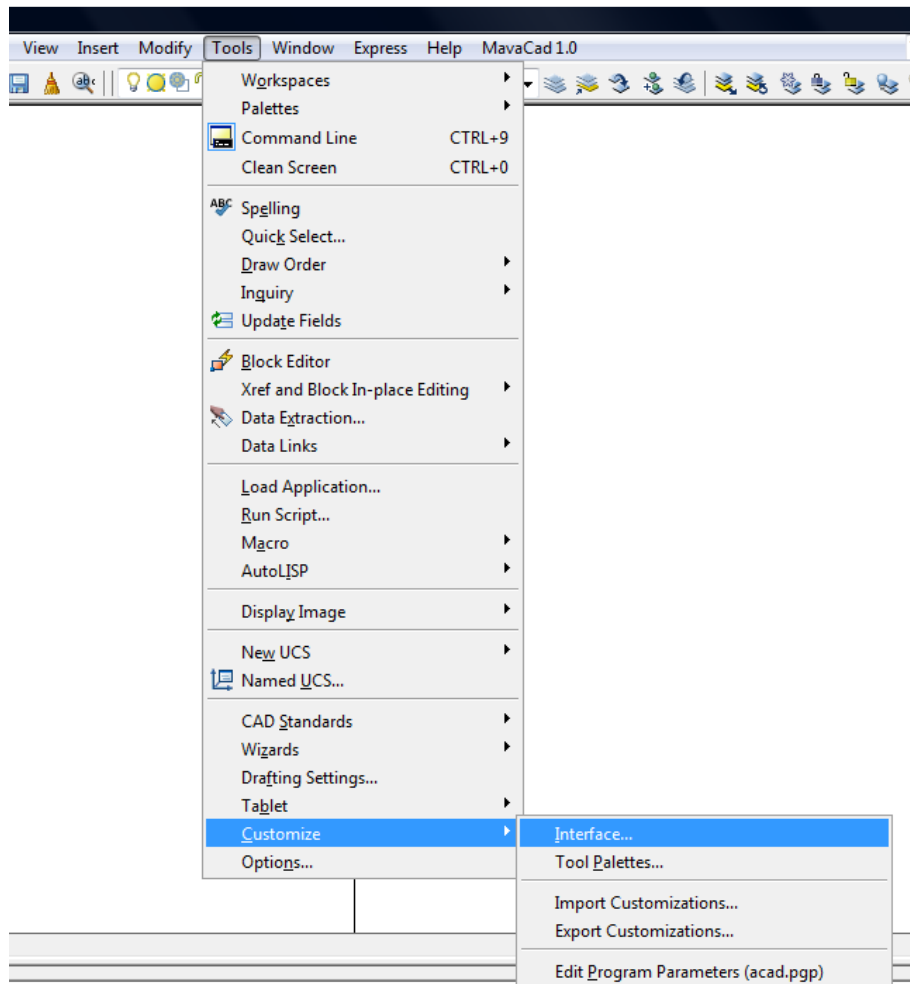


Figura 3. Instalando la barra de herramientas MavaCad - Paso 1

4. Se abrirá la siguiente ventana. Haga click en el icono

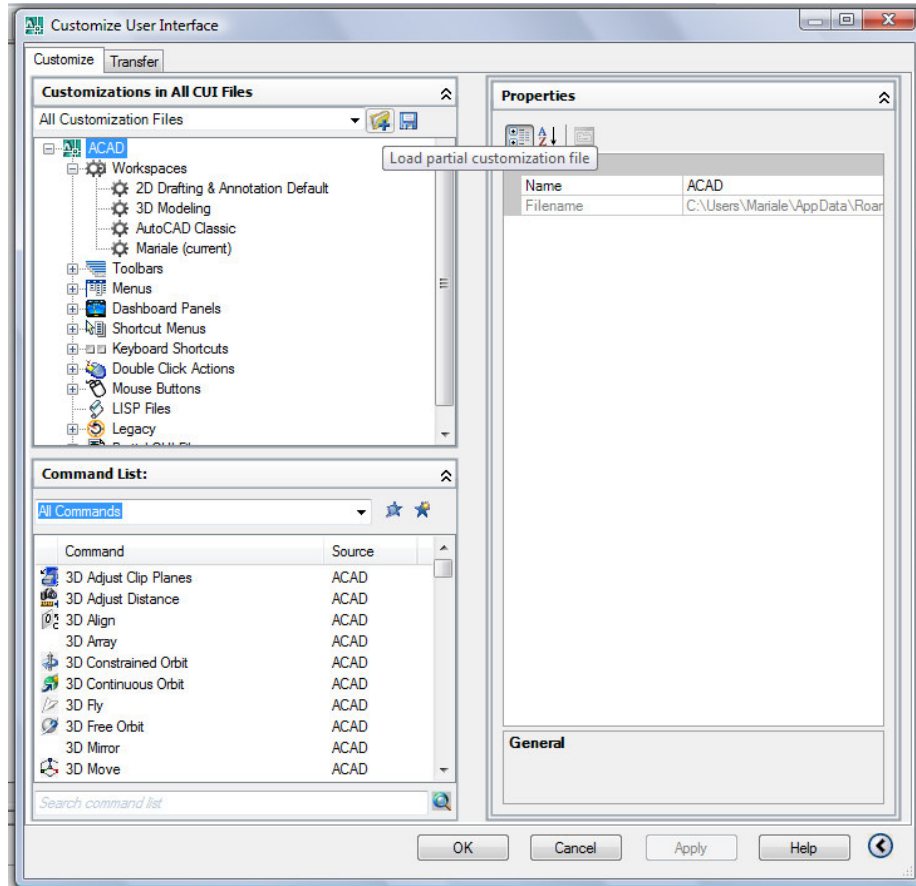


Figura 4. Personalizar la interfaz del usuario

5. En la ventana “Abrir”, seleccione el archivo *MavaCad.cui* y presione el botón *Abrir*.

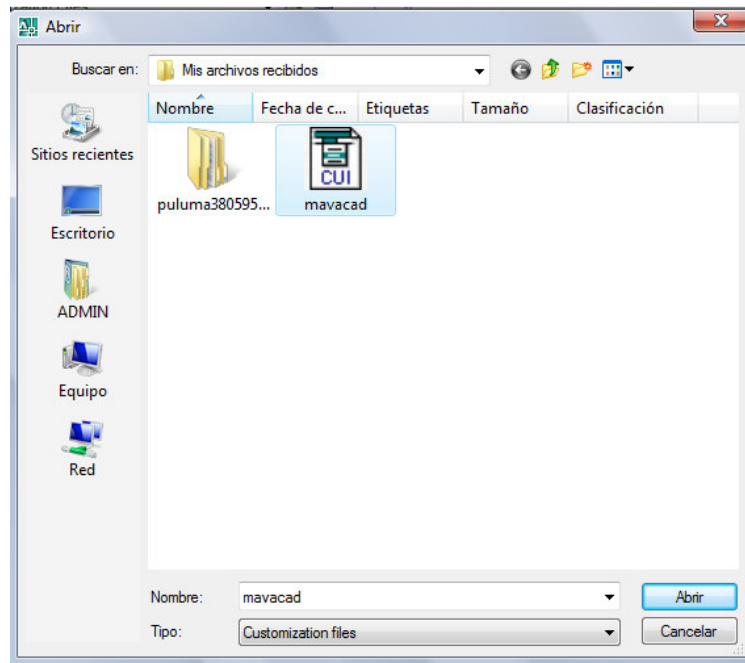


Figura 5. Instalando la barra de herramientas MavaCad - Paso 2

6. Luego presione OK en la ventana para personalizar la interfaz del usuario.
7. A continuación en la barra de menú, aparecerá el menú *MavaCad*

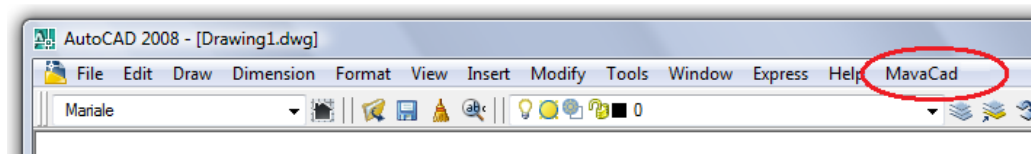


Figura 6. Menú MavaCad

III. PRESENTACIÓN DEL PROGRAMA

En el menú *MavaCad* está la opción de activar la barra de herramientas correspondiente al programa.

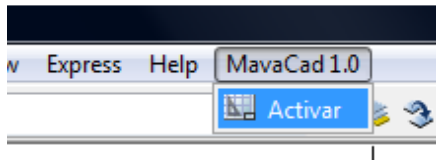


Figura 7. Activación de la barra de herramientas

Al seleccionarla se abre una herramienta al costado izquierdo de la ventana del Autocad, donde se visualizan los botones correspondientes al programa.

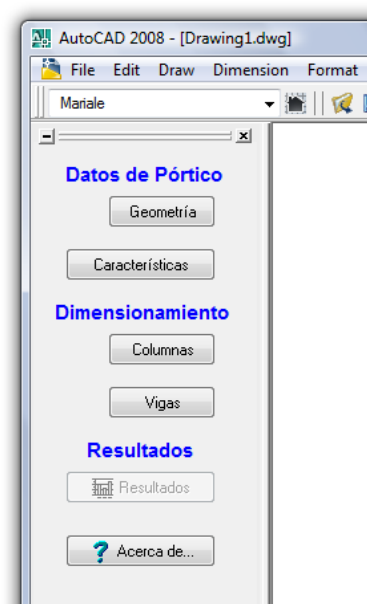


Figura 8. Barra de herramientas MavaCad

IV. DATOS DE ENTRADA

IV.1 DATOS DEL PÓRTICO

Los datos correspondientes a la estructura del pórtico se presentan en dos pestañas, una con la geometría y otra con las características. La unidad decimal para los números a introducir en el programa viene expresada con *comas*, las unidades están en metros y toneladas.

IV.1.1 Geometría del pórtico

En esta ventana se especifican la cantidad de niveles, el número de ejes y la altura de entrepiso. Con esto se tienen la cantidad de nodos presentes y los grados de libertad que posee la estructura.

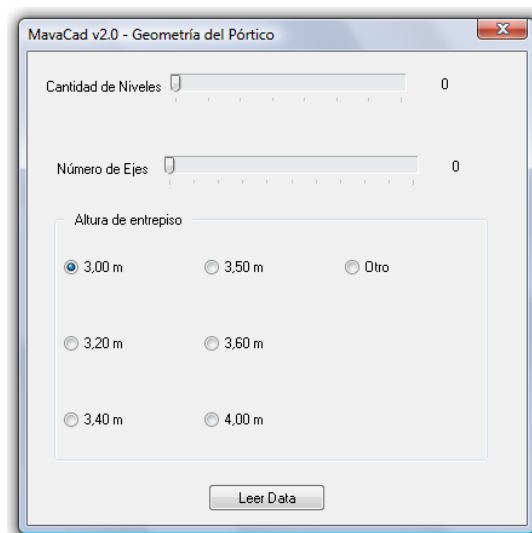


Figura 9. Geometría

IV.1.2 Características del pórtico

En esta ventana se asignan las propiedades del material como son el módulo de Young (E), expresado en Ton/m² y el módulo de Poisson (ν).

También se presenta un cuadro donde se introducen los valores correspondientes a las solicitaciones existentes por nodo, en Ton.

MavaCad v2.0 - Características del Pórtico

Propiedades del Material

ν E (ton/m²)

Nodo	Fx (Ton)	Fy (Ton)	Mz (Ton)
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0

Leer Data

Figura 10. Características

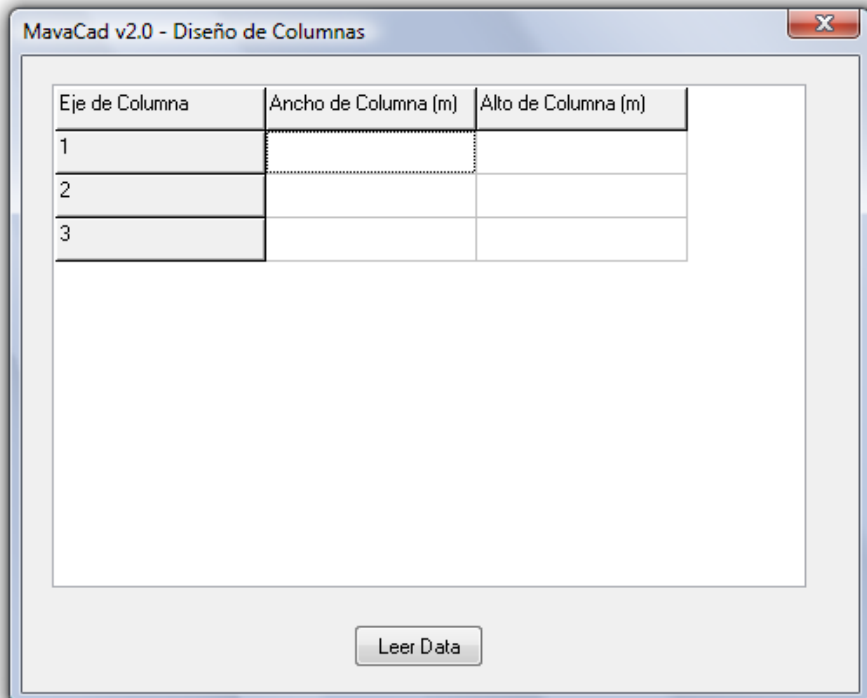
Haga click en *Leer Data* en cada una de las ventanas, para procesar los datos introducidos.

IV.2 DISEÑO DE COLUMNAS

Las columnas pueden diferenciarse por ejes, lo que implica que las dimensiones de área transversal de columna pueden variar entre un eje y otro.

Al igual que en las ventanas anteriores los decimales se expresan con *comas* y las unidades están en metros.

Haga click en *Leer Data* para almacenar la información suministrada.



Eje de Columna	Ancho de Columna (m)	Alto de Columna (m)
1		
2		
3		

Leer Data

Figura 11. Diseño de columnas

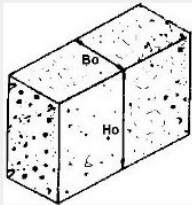
IV.3 DISEÑO DE VIGAS

La siguiente ventana presenta el diseño de las vigas, ya sean de sección constante, de cartela recta o prismática. Lo que permite que las vigas puedan ser diferentes en todos sus aspectos en el mismo nivel, ya que se pueden hacer combinaciones de tamaños y tipos de vigas.

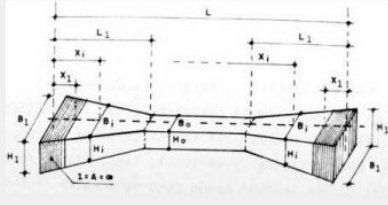
MavaCad v2.0 - Diseño de Vigas

Tipos de Vigas

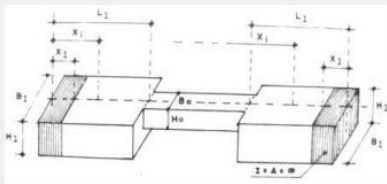
Tipo 1 - Sección Constante



Tipo 2 - Cartela Recta



Tipo 3 - Cartela Prismática



Vano	Tipo Viga	L (m)	Ho (m)	Bo (m)	X=L Rígido (m)	L Cartela (m)	H Cartela (m)	B Cartela (m)
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0

Leer Data

Figura 12. Diseño de Vigas

Se ilustra por medio de 3 figuras el número correspondiente al *Tipo de viga*, dato solicitado en el cuadro inferior de la ventana.

Asignándolos de la siguiente forma:

1. Viga de sección constante
2. Cartela Recta
3. Cartela Prismática

Dependiendo del tipo de viga se rellenan los datos solicitados en el cuadro inferior, correspondiente a cada viga de vano en nivel típico.

IV.3.1 Viga de sección constante

Vano	Tipo Viga	L (m)	Ho (m)	Bo (m)	X=L Rígido (m)
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0

Figura 13. Datos - Viga Sección Contante (Tipo 1)

Tipo Viga: 1

L (m): longitud total de la viga en metros.

Ho (m): altura total de la viga en metros.

Bo (m): ancho total de la viga en metros.

X (m): longitud del segmento rígido de la viga en metros.

IV.3.2 Cartela Recta

Vano	Tipo Viga	L (m)	Ho (m)	Bo (m)	X=L Rígido (m)	L Cartela (m)	H Cartela (m)	B Cartela (m)
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 14. Datos - Viga Cartela Recta (Tipo 2)

Tipo Viga: 2

L (m): longitud total de la viga en metros.

Ho (m): altura total de la viga en metros.

Bo (m): ancho total de la viga en metros.

X (m): longitud del segmento rígido de la viga en metros.

L Cartela (m): longitud de la cartela en metros.

H Cartela (m): altura de la cartela en metros.

B Cartela (m): ancho de la cartela en metros.

IV.3.3 Cartela Prismática

Vano	Tipo Viga	L (m)	Ho (m)	Bo (m)	X=L Rígido (m)	L Cartela (m)	H Cartela (m)	B Cartela (m)
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 15. Datos - Viga Cartela Prismática (Tipo 3)

Tipo Viga: 3

L (m): longitud total de la viga en metros.

Ho (m): altura total de la viga en metros.

Bo (m): ancho total de la viga en metros.

X (m): longitud del segmento rígido de la viga en metros.

L Cartela (m): longitud de la cartela en metros.

H Cartela (m): altura de la cartela en metros.

B Cartela (m): ancho de la cartela en metros.

V. RESULTADOS

El programa muestra los siguientes resultados:

1. Matriz de rigidez global de la estructura [Ton/m]
2. Coordenadas de los nodos en metros, donde el nodo 1 siempre se encuentra en el origen.
3. Grados de libertad de cada nodo
4. Grados de libertad de cada elemento
5. Vector de cargas generalizadas en toneladas.
6. Desplazamientos nodales en metros y radianes.
7. Vector de cargas internas para cada elemento en toneladas.
8. Vector de desplazamientos para cada elemento en metros y radianes.

Los resultados se muestran en tablas de Excel, que pueden guardarse en dicho formato agregando al nombre asignado la extensión “.xls” para el Office 2003 o “.xlsx” en el caso de Office 2007.