

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



**ANÁLISIS NO LINEAL POR SECUENCIA DE  
CONSTRUCCIÓN**

*Excelencia que trasciende*

**DELVALLE**  
GRUPO EDUCATIVO

**Hugo Roberto Nájera Castillo**

Guatemala  
2009

# **ANÁLISIS NO LINEAL POR SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN**

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

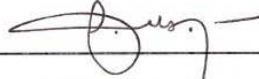
**ANÁLISIS NO LINEAL POR SECUENCIA DE  
CONSTRUCCIÓN**

Trabajo de investigación presentado por Hugo Roberto  
Nájera Castillo para optar al grado académico de  
Maestría en Ingeniería Estructural

Guatemala  
2009

Vo. Bo. :

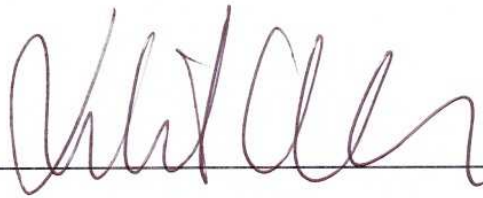
(f)



A. Ing. Fredy Fernando Conlledo Ligorria

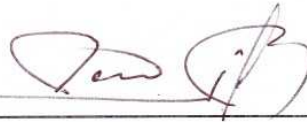
Tribunal Examinador:

(f)



B. Ing. Roberto Godo

(f)



C. Ing. Jose Carlos Gil

Fecha de aprobación: Guatemala 27 de Mayo de 2009

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página No.
LISTA DE CUADROS .....	vi
LISTA DE GRÁFICOS .....	vii
RESUMEN .....	viii
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. ANÁLISIS NO LINEAL	
A. Principios generales de análisis no lineal .....	2
B. Tipos de análisis no lineal	
1. No linealidad del material. ....	2
2. No linealidad de elementos puntuales .....	2
3. No linealidad geométrica en todos los elementos ...	2
4. Push-over .....	2
5. Secuencia de construcción .....	3
C. Construcción Secuencial Estática No Lineal en ETABS .....	4
D. Procedimiento general de secuencia de construcción .....	5
E. Control de iteraciones estáticas no lineales .....	7
III. ANÁLISIS NO LINEAL POR SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN	
A. Efectos de análisis no lineal en estructuras diversas	
1. Irregularidad en planta .....	8
2. Irregularidad en elevación .....	12
3. Voladizos .....	17
IV. EJEMPLO PROYECTO EDIFICIO EL DIAMANTE	
A. Geometría del edificio .....	23
B. Modelación en el programa .....	25
C. Comparación de resultados carga muerta vrs. Carga muerta secuencial .....	27
V. Conclusiones y recomendaciones .....	31
VI. Bibliografía .....	36

## LISTA DE CUADROS

Cuadro No.	Pagina No.
Cuadro No. 1 Comparación de resultados de momentos por irregularidad en planta. En este cuadro se compara un modelo analizado considerando la secuencia de construcción y otro de manera tradicional para el caso descrito. ....	12
Cuadro No. 2 Comparación de momentos por irregularidad en elevación. En este cuadro se compara un modelo analizado considerando la secuencia de construcción y otro de manera tradicional para el caso descrito. ....	16
Cuadro No. 3 Comparación de resultados de momentos por voladizos. En este cuadro se compara un modelo analizado considerando la secuencia de construcción y otro de manera tradicional para el caso descrito. ....	22

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura No. 1 Planta del edificio (Irregular en planta) .....	8
Figura No. 2 Modelo en 3 dimensiones de edificio (Irregular en planta).....	9
Figura No. 3 Deformada eje "2" (Irregular en planta) .....	10
Figura No. 4 Diagrama edificio completo sin secuencia de construcción (Irregular en planta) .....	11
Figura No. 5 Diagrama al soltar el primer nivel (Irregular en planta) .....	11
Figura No. 6 Diagramas al finalizar la construcción de analizando piso por piso (Irregular en planta) .....	11
Figura No. 7 Planta del Edificio (Irregular en Elevación) .....	12
Figura No. 8 Modelo en 3 dimensiones de edificio a analizar. (Irregular en elevación) .....	13
Figura No. 9 Eje 2 con columna eliminada en primer nivel (Irregular en elevación).....	13
Figura No. 10 Deformada eje "2" carga muerta (Irregular en elevación).....	14
Figura No. 11 Deformada eje "2" carga muerta secuencial (Irregular en elevación).....	14
Figura No. 12 Diagrama edificio completo sin secuencia de construcción (Irregular en elevación) .....	15
Figura No. 13 Diagrama al soltar el primer nivel (Irregular en elevación).....	15
Figura No. 14 Diagrama al finalizar la construcción analizando piso por piso (Irregular en elevación).....	16
Figura No. 15 Planta del edificio (con voladizos).....	17
Figura No. 16 Modelo en 3 dimensiones de edificio a analizar (con voladizos). .....	18
Figura No. 17 Deformada en eje 2 con secuencia de construcción ejemplo 3 (con voladizos).....	19
Figura No. 18 Diagrama edificio completo sin secuencia de construcción (con voladizos).....	20
Figura No. 19 Diagrama al soltar el primer nivel (con voladizos) .....	21
Figura No. 20 Diagrama al finalizar la construcción analizando piso por piso (con voladizos) .....	21
Figura No. 21 Planta edificio "el diamante" .....	23
Figura No. 22 Elevación edificio el diamante en eje "D" .....	24
Figura No. 23 Elevación edificio el diamante en eje "E" .....	24
Figura No. 24 Modelo en 3 dimensiones edificio "El Diamante" .....	25
Figura No. 25 Formulario inicial de geometría. ....	25
Figura No. 26 Formulario de caso de secuencia de construcción.....	26
Figura No. 27 Resultados eje "C" sin secuencia de construcción .....	27
Figura No. 28 Resultados eje "C" con secuencia de construcción .....	28
Figura No. 29 Resultados eje "E" sin secuencia de construcción .....	28
Figura No. 30 Resultados eje "E" con secuencia de construcción .....	29
Figura No. 31 Resultados eje "G" sin secuencia de construcción .....	29
Figura No. 32 Resultados eje "G" con secuencia de construcción .....	30

## RESUMEN

El presente trabajo es un ejemplo de los efectos reales, pero usualmente no tomados en cuenta en el análisis estructural normal. Se trata principalmente de los efectos de la no linealidad en los esfuerzos resultantes debido al proceso constructivo, ya que la estructura no se hace de una pieza, sino poco a poco, usualmente nivel por nivel.

El análisis no lineal por secuencia de construcción hace variar los esfuerzos en los elementos en porcentajes significativos que pueden invalidar los resultados del análisis si esto no es tomado en cuenta. Los efectos pueden ser imperceptibles o significativos de acuerdo a la geometría de la edificación y es una de las razones por las que tradicionalmente se ha evitado todo tipo de asimetrías y/o formas complejas. En este trabajo se comparan los resultados de análisis para tres situaciones específicas: Irregularidad en planta, irregularidad en elevación y una geometría con voladizos de diferentes tamaños. En estos tres casos los resultados nos confirman que el efecto es suficientemente grande para concluir que es un tema que debe ser considerado.

## I. INTRODUCCIÓN

La práctica del cálculo estructural se ha modificado significativamente durante las últimas décadas, la utilización de programas de computación y el desarrollo de computadoras cada vez más rápidas y poderosas ha influido en la forma de analizar un proyecto, en la cantidad de análisis que pueden realizarse y por lo tanto en el resultado final del diseño estructural. En Guatemala se ha mantenido una buena práctica de Ingeniería, principalmente por la capacidad de los ingenieros estructurales que han desarrollado este trabajo y también por las limitaciones mantenidas en los trabajos de construcción, es decir que en general se evitan las irregularidades en planta, en elevación, voladizos muy grandes, etc. Esta práctica es justificable debido a la incertidumbre que se tiene en cuanto al comportamiento real de los sistemas utilizados, debido a las limitaciones de análisis y las simplificaciones de los modelos matemáticos con respecto a la realidad. Una de estas incertidumbres está relacionada con la dificultad de analizar la diferencia de comportamiento debida a los cambios en los esfuerzos de cada elemento. En general le llamamos no linealidad, a las diferencias en el comportamiento resistente de un material o elemento cuando éste no se puede modelar por medio de una sola ecuación.

Una de los efectos de la no linealidad se da por la secuencia de construcción, la cual tiene que ver con el hecho de que las edificaciones no se colocan completas a resistir los esfuerzos sino que son colocadas por fases, piso por piso en un edificio, o bien existen elementos que se colocan como una última fase (cables, columnas metálicas, etc.). Este efecto puede incidir significativamente en los esfuerzos que se generan por el peso propio de las edificaciones, de tal manera que pueden existir diferencias del orden de 1.5 veces comparando los resultados realizados de la forma tradicional con los resultados analizando la secuencia de construcción.

En la actualidad se tienen disponibles herramientas para tomar en cuenta estos efectos, por lo que en este trabajo se presentan ejemplos de los efectos mencionados utilizando un software adecuado (ETABS) y un procedimiento para considerar la secuencia de construcción en el análisis y diseño estructural.

## II. ANÁLISIS NO LINEAL

### A. *Principios generales de análisis no lineal*

Los análisis estáticos no lineales han sido problemas muy difíciles de realizar con los métodos tradicionales, debido a la complicación matemática que supone el cambio de propiedades durante la realización de un análisis y son una función disponible en muy pocos programas de diseño estructural. Dentro de estos análisis “no lineales”, se pueden mencionar el análisis por secuencia de construcción, el análisis “pushover” para edificaciones ya construidas, análisis de cables, etc. En general llamamos análisis no lineal cuando consideramos los cambios en las propiedades de los elementos, sin seguir una sola fórmula o ecuación lineal, o cuando deseamos analizar más allá de la zona elástica (lineal) de los materiales. Este trabajo no entrará en los detalles matemáticos del análisis no lineal sino en la forma de analizarlo dentro de programas de cálculo existentes y en la interpretación de los resultados.

### B. *Tipos de análisis no lineal*

En un análisis no lineal pueden considerarse diferentes tipos de comportamientos no lineales como los siguientes:

**1. No linealidad del material:** Los materiales utilizados en la construcción tienen comportamientos casi lineales en un rango de esfuerzos conocidos (límite elástico) y pueden variar significativamente su comportamiento al salir de este rango. Si analizamos lo que sucede con estos materiales al salir del rango elástico, tenemos un análisis “no lineal”.

**2. No linealidad de elementos puntuales:** Se puede tener un comportamiento no lineal en puntos específicos. Sería el caso si utilizáramos dispositivos disipadores de energía como amortiguadores, aislamiento en base tipo fricción, puntos de anclaje de cables solo a tensión, topes solo a compresión, etc. En estos casos el comportamiento no lineal es exclusivo del punto en el que se asignan.

**3. No linealidad geométrica en todos los elementos:** Se puede considerar efectos P-delta, además de grandes desplazamientos debido a la geometría de la edificación, buscando el equilibrio en la configuración deformada y permitiendo grandes rotaciones y desplazamientos.

**4. Push-over:** En cualquier ubicación a lo largo de cualquier elemento es posible considerar articulaciones plásticas que tengan un comportamiento no

lineal. Podemos tener puntos que no resistan más después de llegar a un número establecido de momento, torsión, fuerza axial y/o cortante y que por lo tanto se conviertan en ese momento en articulaciones plásticas. Se pueden hacer también mezclas de fuerza axial y momentos en ambos sentidos, para ver la fluencia del elemento basado en la interacción de estas fuerzas. En el programa ETABS, las propiedades de las articulaciones estándar están basadas en ATC-40 y FEMA 273

**5. Secuencia de construcción** Consiste en analizar la edificación con múltiples etapas constructivas. Por ejemplo, el hecho de que un edificio se coloca piso por piso y no en su totalidad completamente, puede cambiar los esfuerzos inducidos en los elementos entre la primera etapa y la etapa final. Este caso se ejemplificará con varios casos en este trabajo.

Realizar cualquier análisis no lineal, toma tiempo y paciencia y debemos tomar especial atención a algunas consideraciones importantes:

Cada problema no lineal es diferente. Es posible que se necesite una cierta cantidad de tiempo para aprender la mejor forma de acercarse a cada problema nuevo.

Se debe empezar gradualmente. Asegurarse de que el desempeño del modelo es el esperado bajo las cargas estáticas y el análisis modal, en lugar de empezar colocando articulaciones y elementos no lineales en todas partes, debemos agregarlas gradualmente, iniciando con las áreas donde se espera una mayor no linealidad. Se inicia con modelos que no hagan perder el esfuerzo en elementos principales ya que es posible modificar los elementos no lineales posteriormente.

Se deben desarrollar los primeros análisis sin tomar en cuenta no linealidades geométricas. Hay que agregar los efectos P-delta y grandes deformaciones probablemente mucho después. Es mejor iniciar con desplazamientos modestos y números limitados de pasos. Al principio la meta debe ser realizar el análisis rápidamente para así poder ganar experiencia con el modelo. Conforme se va creciendo en la confianza con un tipo particular de modelo, se puede ir más allá y considerar comportamientos no lineales más extremos.

Matemáticamente, el análisis estático no lineal no siempre garantiza una sola solución. Efectos inerciales en análisis dinámico y en el mundo real limitan el camino que una estructura seguirá. Pero esto no es cierto para análisis estático, particularmente en casos inestables donde se pierde la rigidez debido a no linealidades geométricas o del material.

Pequeños cambios en las propiedades o en la carga pueden causar grandes cambios en la respuesta no lineal. Por esta razón, es extremadamente

importante que se consideren diferentes casos de carga y que se hagan estudios del efecto de la variación de la respuesta de la estructura.

El análisis estático no lineal, puede consistir de cualquier cantidad de casos. Cada caso de análisis estático no lineal puede tener diferente distribución de la carga sobre la estructura. Por ejemplo, un caso típico de análisis no lineal puede consistir de tres casos básicos. El primero podría aplicar la carga por gravedad a la estructura, la segunda podría aplicar una carga lateral y una tercera podría tener alguna otra distribución de carga lateral sobre la estructura (usualmente sismo "X" y sismo "Y").

Un caso de análisis estático no lineal puede iniciar de condiciones iniciales completamente en cero o bien, puede iniciar a partir de los resultados de un análisis previo. En el ejemplo mencionado anteriormente, la gravedad podría iniciar de cero y las otras dos podrían iniciar de los resultados finales del análisis por gravedad (ya que al momento de tener un sismo la gravedad ya ha actuado previamente).

Cada análisis puede también consistir de múltiples etapas constructivas. Por ejemplo, podría usarse en un análisis de cargas gravitacionales en el que las cargas fuesen colocadas piso por piso y este análisis en particular es el que se analizará con más detalle en el presente trabajo.

Los casos de análisis no lineal en el programa a utilizar (ETABS) son completamente independientes entre sí. En particular, cualquier análisis P-delta realizado para análisis lineal y análisis dinámico, no tiene efecto sobre los casos de análisis estático no-lineal. La única interacción es que los modos de vibración lineales pueden ser usados para cargar un caso de análisis estático no lineal.

Los casos de análisis estático no lineal pueden y deben ser usados para diseño. Generalmente no tiene sentido combinar análisis lineales con no lineales, así que los casos no lineales deben incluir todas las cargas, con la escala apropiada para combinarse y utilizarse para el diseño.

### ***C. Construcción Secuencial Estática No Lineal dentro del programa ETABS***

Para analizar construcción incremental (o secuencial), la estructura se modela como una serie de etapas. Cada etapa se representa por un grupo de objetos (puntos, líneas y áreas) llamado un grupo activo. Se puede cambiar los grupos activos (etapas) dentro de un caso estático no lineal y/o entre casos estáticos no lineales consecutivos. En el caso más común de secuencia de construcción, cada grupo activo subsiguiente incluirá el grupo activo previo más algunos objetos adicionales. De cualquier forma también es posible quitar objetos de una etapa a la siguiente.

Cada cambio en una etapa se analiza separadamente. Si se consideran etapas múltiples dentro de un solo caso estático no lineal, se efectúan múltiples análisis dentro de ese caso y los resultados de todos estos análisis están disponibles como un solo caso. Cuando se cambian etapas dentro de un solo caso, todos los elementos agregados están sujetos al mismo patrón de carga.

Cuando se analiza el cambio en la estructura de una etapa a la otra, el programa busca objetos que estén presentes en un grupo activo pero no en el otro.

Para objetos agregados:

- Los objetos inician desde un estado inicial, sin esfuerzo.
- Su rigidez y masa se agregan inmediatamente a la estructura.
- El patrón de carga especificado para el caso se aplica a los objetos agregados durante el transcurso del análisis.

Para objetos removidos:

- Su rigidez y masa se quitan inmediatamente de la estructura.
- Todas las fuerzas transportadas por los objetos removidos son transferidas inmediatamente a los puntos que los une al resto de la estructura.
- Esta carga transferida es luego removida gradualmente de la estructura durante el transcurso del análisis.

Para objetos presentes en ambas etapas:

- Los objetos continúan desde su estado en la etapa anterior
- El patrón de carga especificado para el caso puede opcionalmente ser aplicado a los objetos conservados.

Si un objeto es removido y luego agregado nuevamente en una etapa posterior, empieza nuevamente en su estado inicial, sin esfuerzo.

#### ***D. Procedimiento de análisis***

Antes de definir los casos estáticos no lineales, se deben definir tantos grupos como sea necesario para representar las varias etapas de la

construcción. Cada grupo activo debe contener *todos* los objetos que estarán presentes en la estructura en esa etapa.

Para cada caso estático no lineal, se ajustan los datos para los grupos activos (etapas) en la porción “Estructura Activa” del formulario “Datos de Caso Estático No Lineal” de la siguiente forma:

1. En la casilla desplegable denominada “Grupo Activo” seleccione el nombre de grupo que representa la primera etapa de la estructura para este caso estático no lineal. Haga clic en el botón Modificar.
2. Para agregar otra etapa a este caso, seleccione el nombre de grupo en la casilla desplegable Grupo Activo y haga clic en el botón Agregar. Esto agrega otra etapa al final de la lista.
3. Para insertar una nueva etapa antes de una etapa existente en la lista, haga clic en la etapa existente de la lista, luego seleccione el nuevo nombre de grupo en la casilla desplegable Grupo Activo y haga clic en el botón Insertar.
4. Para cambiar el nombre de grupo activo para una etapa existente, haga clic en la etapa existente en la lista, luego seleccione el nuevo nombre de grupo en la casilla desplegable Grupo Activo y haga clic en el botón Modificar.
5. Para borrar una etapa existente, haga clic en la etapa existente en la lista, luego haga clic en el botón Borrar.

Finalmente, debe seleccionar si el caso de carga especificado para este caso se aplica a toda la estructura o solamente a los elementos agregados. Fije esto utilizando la casilla de verificación llamada “Cargas se Aplican Solamente a Elementos Agregados”:

Esta casilla usualmente debería estar activa si hay un cambio en la estructura, hay más de una etapa para este caso, o este caso inicia desde un caso previo y el primer grupo activo para este caso es diferente del último grupo activo del caso previo

Esta casilla no debería estar activa si no hay un cambio en la estructura, si solamente hay una etapa para este caso, o si este caso no empieza desde un caso previo o el grupo activo para este caso es el mismo que el último grupo activo del caso previo

Siempre que hay un cambio en la estructura, el patrón de carga para el caso estático no lineal debe ser aplicado utilizando control de fuerza, no control de desplazamiento.

Por defecto, se considera una sola etapa para cada caso utilizando toda la estructura, como se indica por el nombre de grupo por defecto "TODOS".

#### ***E. Control de iteraciones estáticas no lineales***

El equilibrio estático se verifica al final de cada paso en un análisis estático no lineal. La carga no balanceada se calcula como la diferencia entre las cargas aplicadas externamente y las fuerzas internas en los elementos. Si la relación de la magnitud de la carga no balanceada a la magnitud de la carga aplicada excede la tolerancia de iteración, la carga no balanceada se aplica a la estructura en una segunda iteración para ese paso. Estas iteraciones continúan hasta que las fuerzas no balanceadas satisfacen la tolerancia de iteración o se alcanza el máximo de iteraciones/pasos. En el último caso, el tamaño del paso se reduce a la mitad y la carga se aplica nuevamente desde el principio del paso.

Si es necesario, el tamaño del paso se reduce a la mitad continuamente hasta que finalmente se alcanza el equilibrio. Cada reducción del tamaño del paso cuenta como un paso nulo. Para el siguiente paso después de la convergencia, el programa duplica repetidamente el tamaño del paso hasta que encuentra el tamaño más grande que convergerá o hasta que ocurre un evento.

La iteración se activa primariamente por propiedades de enlace no lineal y por no linealidad geométrica, especialmente para análisis de grandes-desplazamientos. Usualmente no se requiere iteración por no linealidad del material en las articulaciones de marco por la estrategia utilizada de evento-a-evento. En el caso de los análisis de secuencia de construcción no es necesario definir el número de iteraciones ni pasos nulos, por lo cual no se hará más referencia a este tema en este trabajo.

### III. NÁLISIS NO LINEAL POR SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN

#### *Efectos de análisis no lineal en estructuras diversas*

El efecto de análisis no lineal no es de la misma magnitud en todas las edificaciones. Existen características propias de la edificación que pueden magnificar los efectos relacionados con las propiedades no lineales mencionadas anteriormente. En el caso específico de análisis no lineal por secuencia de construcción los casos principales donde observamos efectos significativos son:

- Irregularidad en planta
- Irregularidad en elevación
- Voladizos significativos

#### **A. Efectos de “no linealidad” por secuencia de construcción por Irregularidad en Planta**

Para estudiar este efecto, se hará un modelo con una planta sencilla pero significativamente irregular y de gran altura, para apreciar mejor los efectos.

La planta a utilizar es la que se ve en la figura No. 1 y se trabajarán 25 pisos para tener una mayor claridad sobre el efecto inducido (figura No. 2).

Figura No. 1 PLANTA DEL EDIFICIO (Irregular en planta)

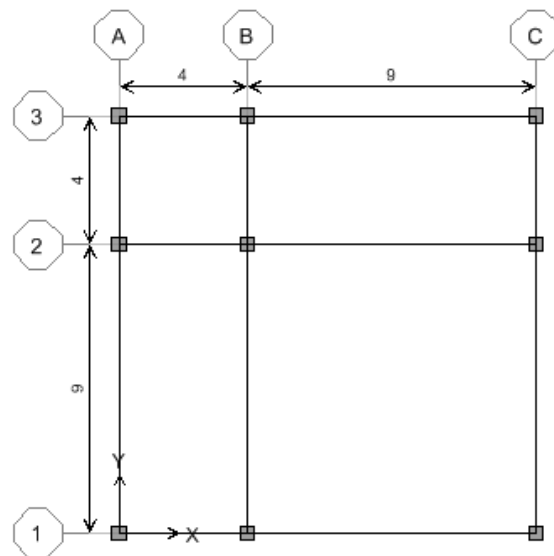
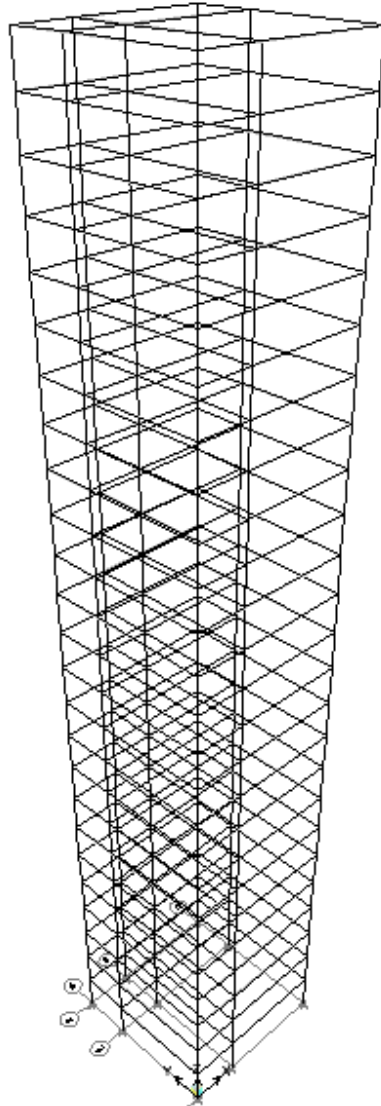
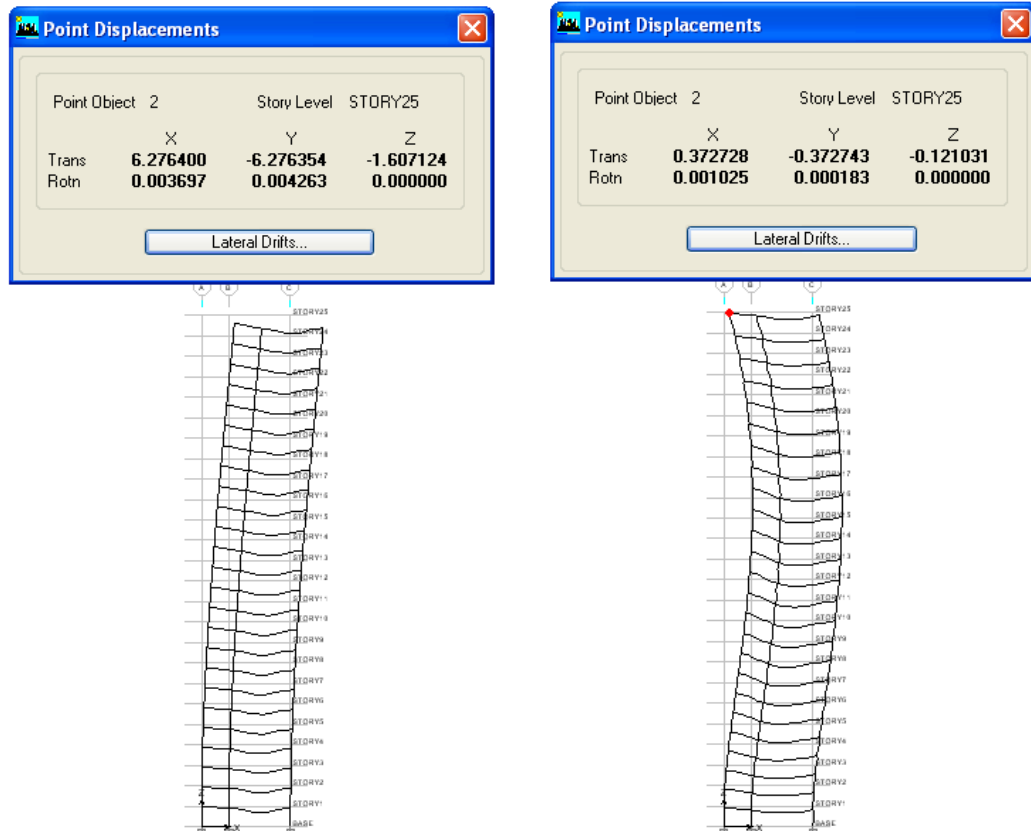


Figura No. 2. Modelo en 3 dimensiones de edificio (Irregular en planta).



Con el modelo descrito, se hizo un análisis tradicional del modelo completo y luego otro análisis colocando un nivel adicional en cada fase. Para facilidad del análisis, se realizó un análisis solamente con la carga muerta del modelo, con el fin de poder comparar resultados sin estar afectados a cualquier carga extraña a la geometría del edificio. Esto nos ofrece resultados diferentes, tanto en esfuerzos como en deformación del edificio, los cuales se muestran a continuación:

Figura No. 3. DEFORMADA EJE 2 (Irregular en planta)



Como puede notarse no solamente el resultado final sino la forma completa de la deformación por carga muerta es diferente.

La razón de esta diferencia significativa es que cada nivel que se funde y suelta, genera una deformación, que al colocar los pisos subsiguientes no retorna linealmente.

En las siguientes gráficas se analiza el comportamiento del momento flexionante que se genera en los elementos del primer nivel, comparando el análisis del edificio completo con el momento en que se desencofra el primer nivel y el estado final analizando la construcción por etapas. Como podrá notar el momento flexionante en la columna es mucho mayor en el caso de la carga secuencial que en el caso del análisis tradicional. Esto se explica considerando el efecto de la carga axial que no existe sobre las columnas al soltar el primer nivel, este momento flexionante va disminuyendo conforme se funden los pisos superiores, pero nunca llega al valor teórico de análisis considerando el edificio en su totalidad.

Figura 4. DIAGRAMA EDIFICIO COMPLETO SIN SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN (Irregular en planta)

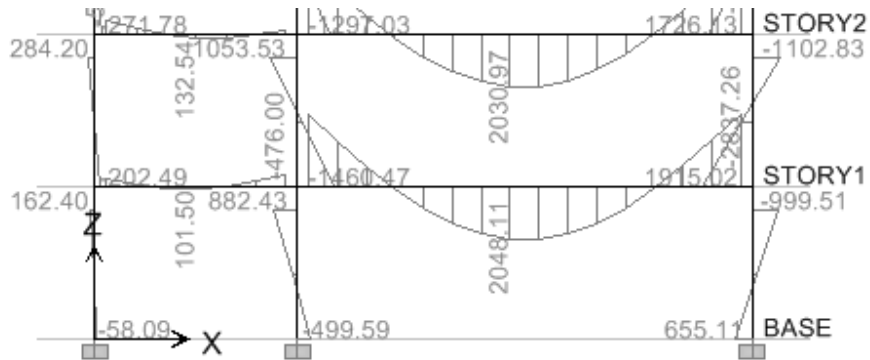


Figura No. 5 DIAGRAMA AL SOLTAR EL PRIMER NIVEL (Irregular en planta)

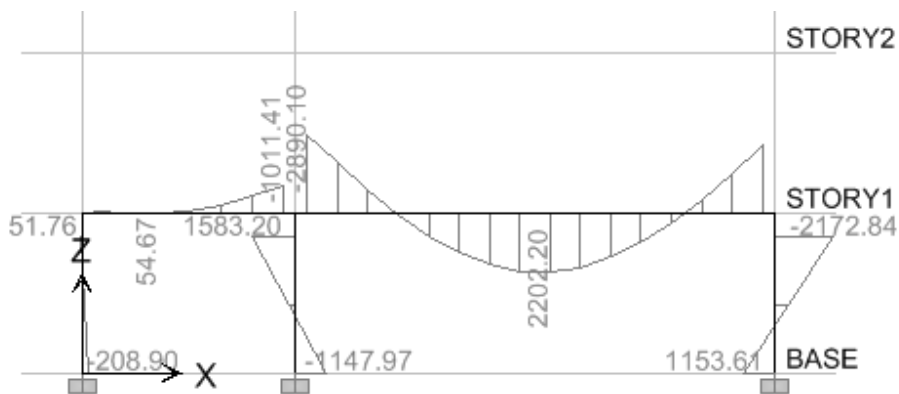
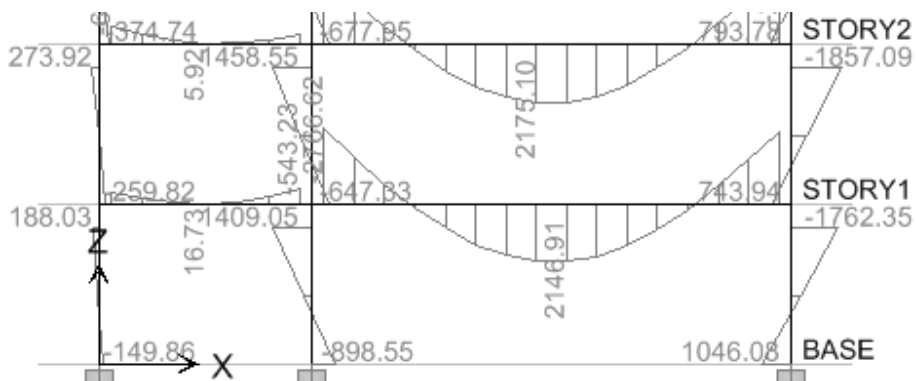


Figura No. 6 DIAGRAMA AL FINALIZAR LA CONSTRUCCIÓN ANALIZANDO PISO POR PISO (Irregular en planta)



CUADRO NO. 1

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MOMENTOS POR IRREGULARIDAD EN PLANTA

ELEMENTO	A	B	C	Diferencia
Columna izq base	58.09	208.90	149.86	+ 157%
Columna central base	499.59	1,147.97	898.55	+ 80%
Columna der base	655.11	1,153.61	1,046.08	+ 59%
Max negativo central	1,460.47	2,890.10	2,760.62	+ 89%
Max negativo lateral	2,837.26	2,172.84	2,505.00	- 11.7%
Max positivo	2,048.11	2,202.20	2,146.91	- 4.8%

A = Análisis tradicional edificio completo.

B = Análisis en el momento de construir y liberar solamente el primer nivel.

C = Análisis al completar el edificio, considerando el efecto de la secuencia de construcción.

**B. Efectos de “No linealidad” por secuencia de construcción por irregularidad en elevación**

Para estudiar este efecto, se hará un modelo con una planta sencilla de poca altura, pero en la cual se elimina una de las columnas del primer nivel, sin quitarlas de los niveles superiores, para apreciar mejor los efectos.

La planta a utilizar es la que se ve en la figura No. 7 y se trabajarán 4 pisos (figura No. 8).

Figura No. 7 PLANTA DEL EDIFICIO (Irregular en elevación)

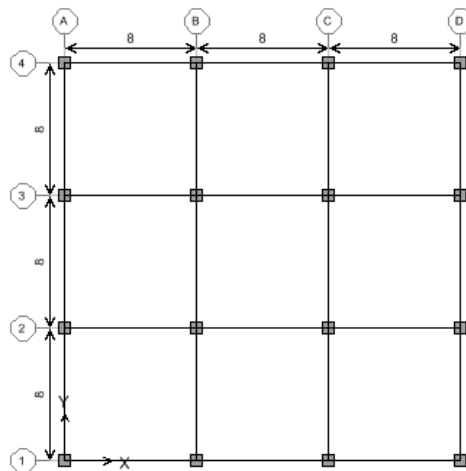
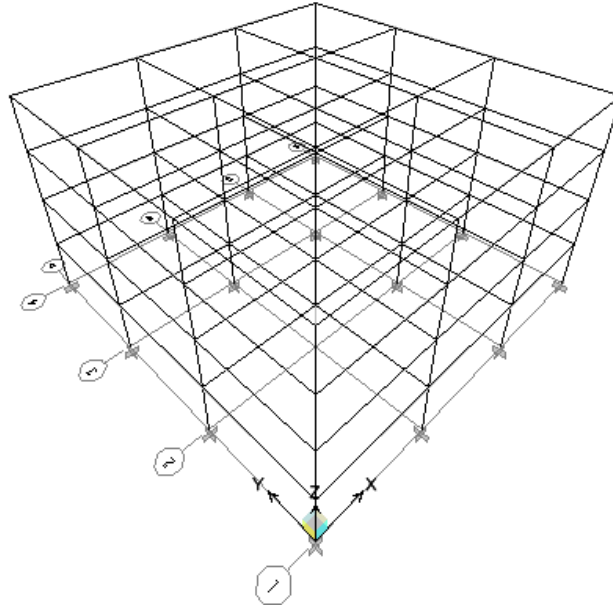


Figura No. 8. Modelo en 3 dimensiones de edificio a analizar. (Irregular en elevación)



Con el modelo descrito, se hizo un análisis tradicional del modelo completo y luego otro análisis colocando un nivel adicional en cada fase. Para facilidad del análisis, se realizó un análisis solamente con la carga muerta del modelo, con el fin de poder comparar resultados sin estar afectados a cualquier carga extraña a la geometría del edificio. Esto nos ofrece resultados diferentes tanto en esfuerzos como en deformación del edificio, los cuales se muestran a continuación. Enfocándonos principalmente en el eje "2" que es al que se le eliminó una columna en el primer nivel, como se muestra en la figura No. 8.

Figura No. 9. Eje 2 con columna eliminada en primer nivel (Irregular en elevación).

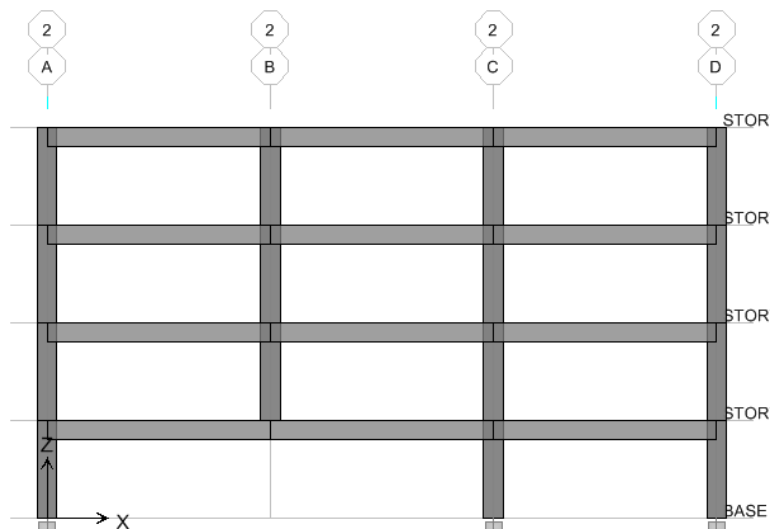


Figura No. 10 DEFORMADA EJE 2 CARGA MUERTA (Irregular en elevación).

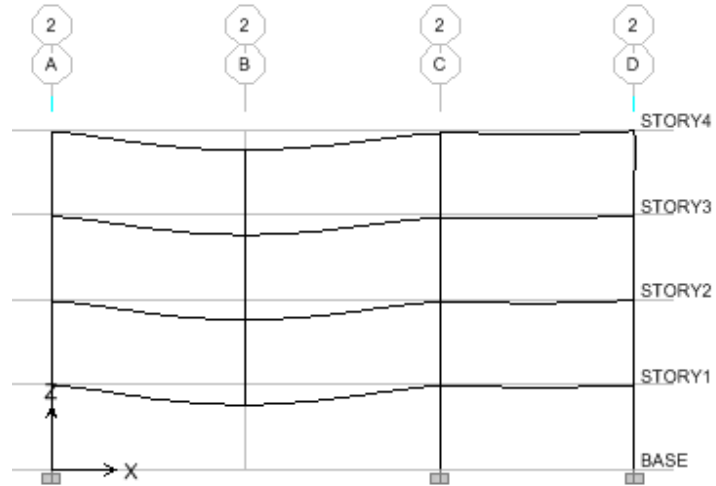
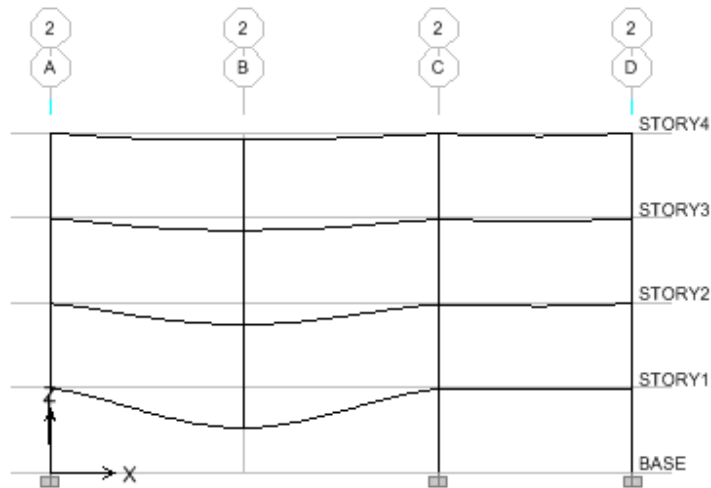


Figura no. 11 DEFORMADA EJE "2" CARGA MUERTA SECUENCIAL (Irregular en elevación).



Como puede notarse existe una diferencia significativa en los casos presentados, siendo que en la carga muerta las vigas de los pisos 2, 3 y 4 "ayudan" a la del primer nivel, mientras que en el caso en el que se toma en cuenta la secuencia de construcción, la carga puntual ejercida en el eje "B" sobre la viga del primer nivel encuentra una viga ya deformada.

Al igual que en el caso anterior, la razón de esta diferencia significativa es que cada nivel que se funde y suelta, genera una deformación, que al colocar los pisos subsiguientes no retorna linealmente, sino que depende de cada geometría y de la magnitud de las cargas. En este caso, la deformación crece con cada piso adicional en lugar de disminuir.

En las siguientes gráficas se analiza el comportamiento del momento flexionante que se genera en los elementos del primer nivel, comparando el análisis del edificio completo con el momento en que se desencofra el primer nivel y el estado final analizando la construcción por etapas.

### DIAGRAMAS DE MOMENTOS

Figura 12. DIAGRAMA EDIFICIO COMPLETO SIN SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN (Irregular en elevación)

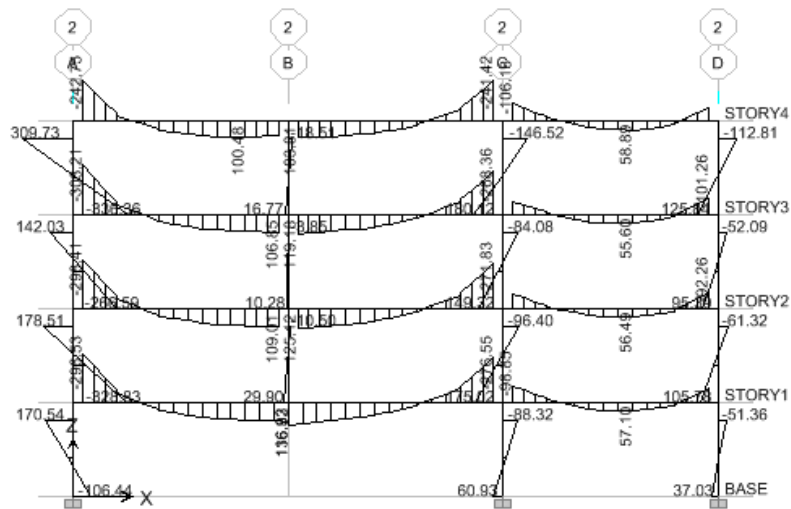


Figura No. 13 DIAGRAMA AL SOLTAR EL PRIMER NIVEL (Irregular en elevación).

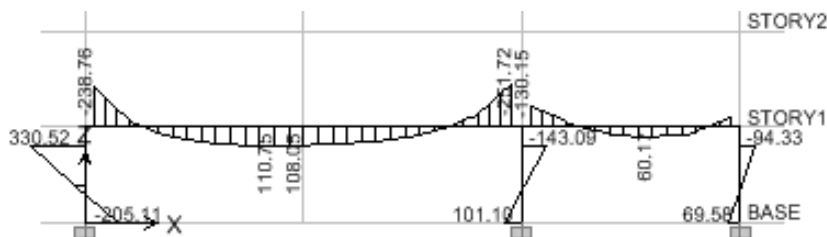
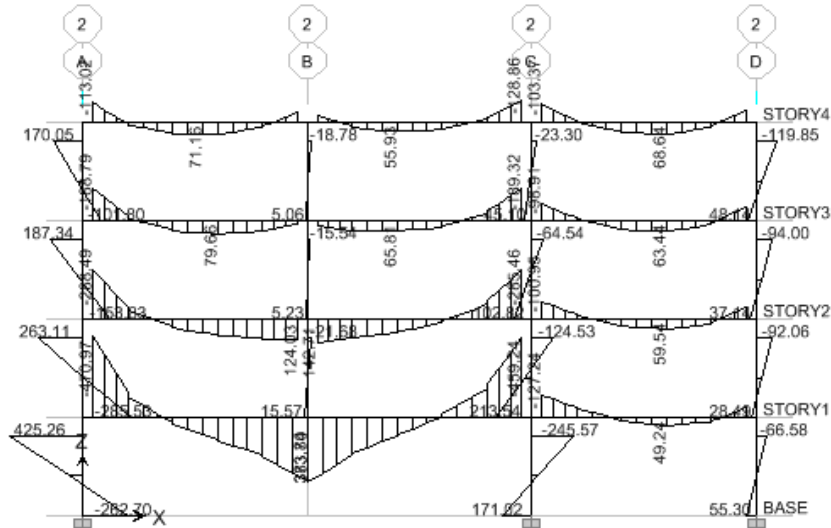


Figura No. 14 DIAGRAMA AL FINALIZAR LA CONSTRUCCIÓN ANALIZANDO PISO POR PISO (Irregular en elevación)



CUADRO NO 2  
COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MOMENTOS

ELEMENTO	A	B	C	Diferencia
final				
Max neg izq	-296.50	-238.76	-410.97	+ 38.6%
Max positivo	136.80	110.75	383.80	+180.5%
Max neg der	-276.55	-251.72	-459.24	+66%
Columna izq	170.54	330.52	425.26	+149.3%
Columna der	- 88.32	-143.09	-245.57	+178%

A = Análisis tradicional edificio completo.

B = Análisis en el momento de construir y liberar solamente el primer nivel.

C = Análisis al completar el edificio, considerando el efecto de la secuencia de construcción.

Como puede observarse las diferencias en esta comparación en especial, las diferencias entre uno y otro análisis son tan significativas que si no se tomasen en cuenta seguramente tendríamos una estructura que fallaría. Usualmente en campo este caso es poco probable ya que se toman medidas como el apuntalamiento de la estructura para que la realidad tenga un mayor parecido con el análisis tradicional.

**C. Efectos de “no linealidad” por secuencia de construcción en voladizos significativos.**

Para estudiar este efecto, se hará un modelo con una planta sencilla una luz central de 10m y voladizos a ambos lados de 6m.

La planta a utilizar es la que se ve en la figura No. 1 y se trabajarán 6 pisos para verificar el problema.

Figura No. 15 PLANTA DEL EDIFICIO (con voladizos)

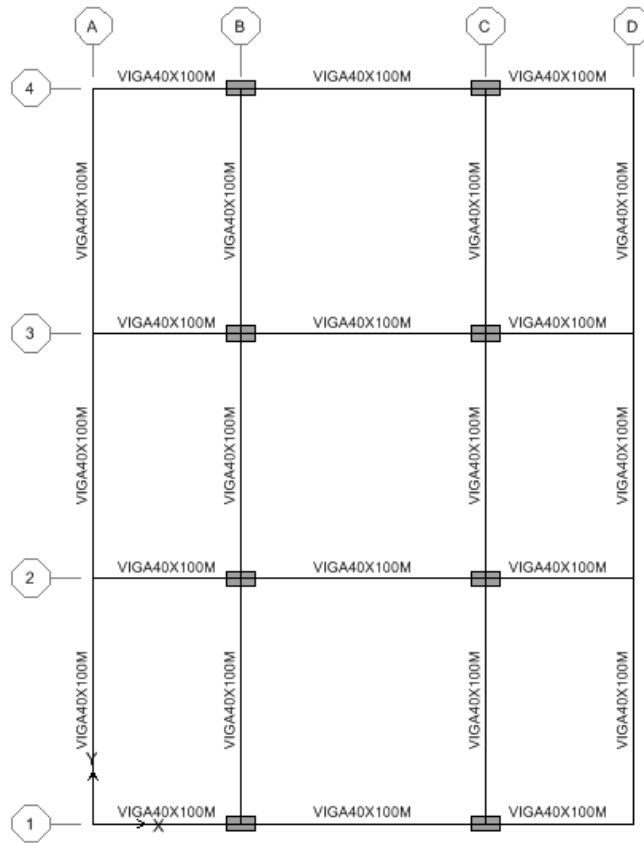
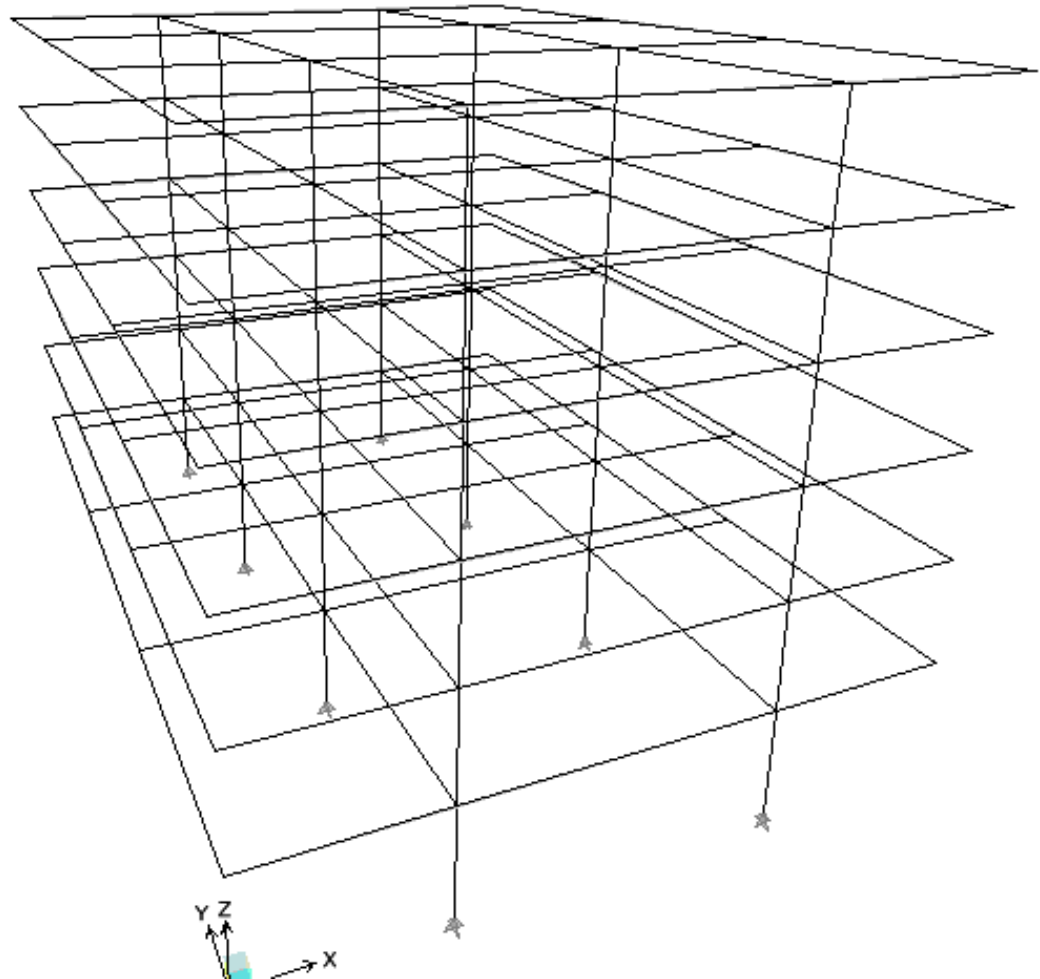


Figura No. 16. Modelo en 3 dimensiones de edificio a analizar (con voladizos).



Con el modelo descrito, se hizo un análisis tradicional del modelo completo y luego otro análisis colocando un nivel adicional en cada fase. Para facilidad del análisis, se realizó un análisis solamente con la carga muerta del modelo, con el fin de poder comparar resultados sin estar afectados a cualquier carga extraña a la geometría del edificio. Esto nos ofrece resultados diferentes tanto en esfuerzos como en deformación del edificio, los cuales se muestran a continuación:

Figura No 17. Deformada en Eje 2 sin secuencia de construcción ejemplo 3 (con voladizos).

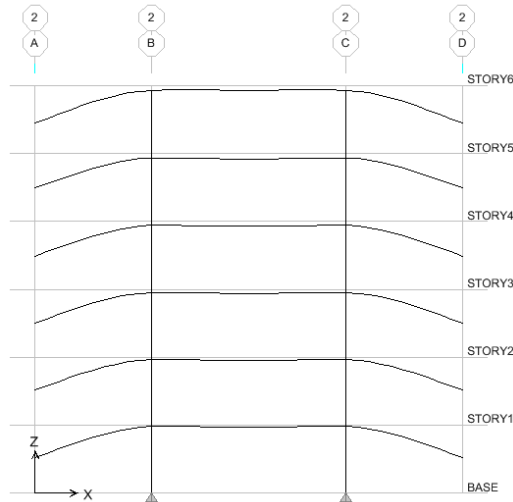
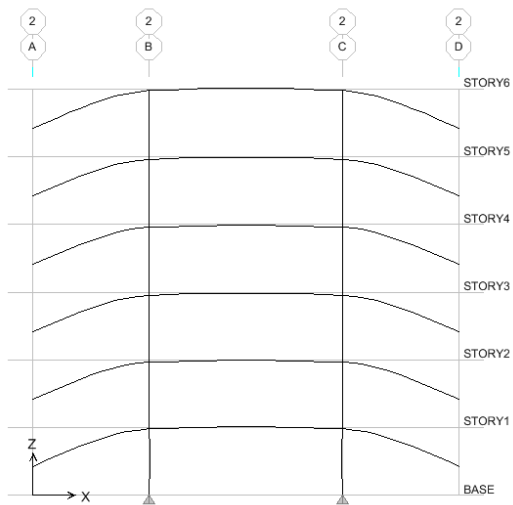


Figura No 17. Deformada en Eje 2 con secuencia de construcción ejemplo 3 (con voladizos).



Como puede notarse estos modelos no son muy diferentes. La deformación de los voladizos es muy similar en ambos casos, sin embargo vemos una ligera diferencia en deformación en las columnas del primer nivel, así que nos concentraremos en el efecto que se está teniendo en dichas columnas.

La razón de esta diferencia es que cada nivel que se funde y suelta, genera una deformación, que al colocar los pisos subsiguientes no retorna linealmente. Al igual que en el primer modelo mostrado, la carga axial que aun no tiene la columna representa una situación diferente de empotramiento para la viga al momento de fundir el primer nivel comparado con la configuración final.

En las siguientes graficas se analiza el comportamiento del momento flexionante que se genera en los elementos del primer nivel, comparando el análisis del edificio completo con el momento en que se desencofra el primer nivel y el estado final analizando la construcción por etapas. Como podrá notar el momento flexionante en la columna es mucho mayor en el caso de la carga secuencial que en el caso del análisis tradicional.

### DIAGRAMAS DE MOMENTOS

Figura 18. DIAGRAMA EDIFICIO COMPLETO SIN SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN (con voladizos).

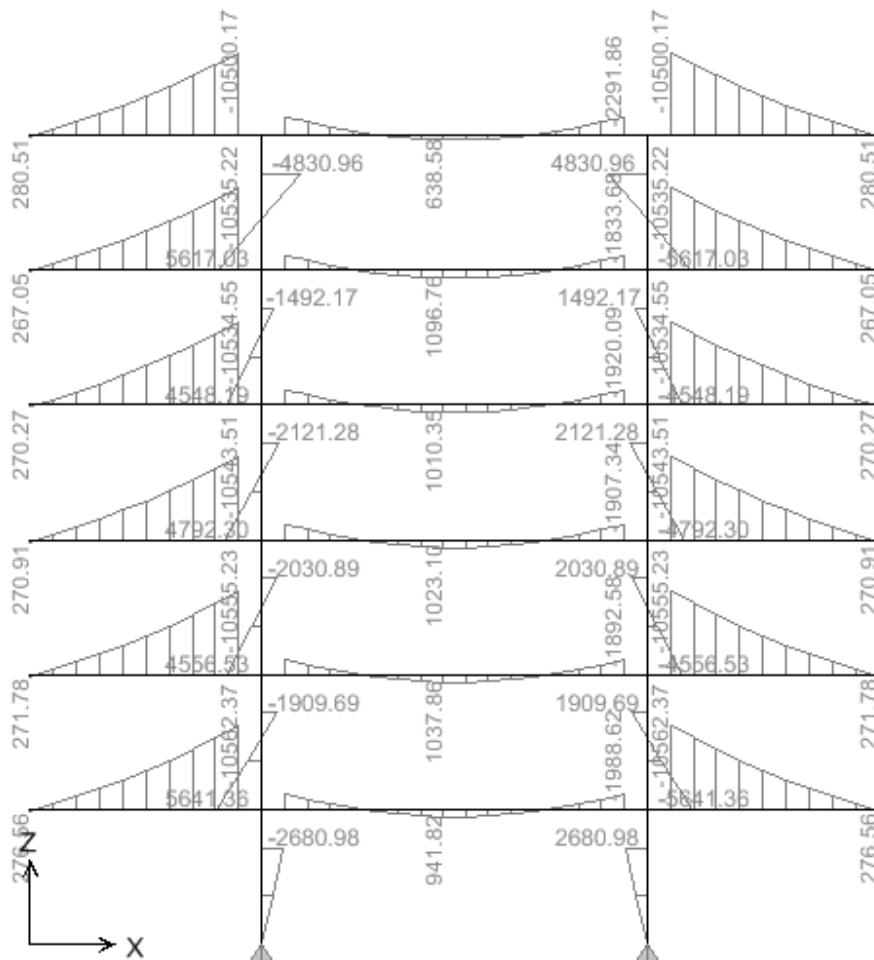


Figura No. 19 DIAGRAMA AL SOLTAR EL PRIMER NIVEL (con voladizos).

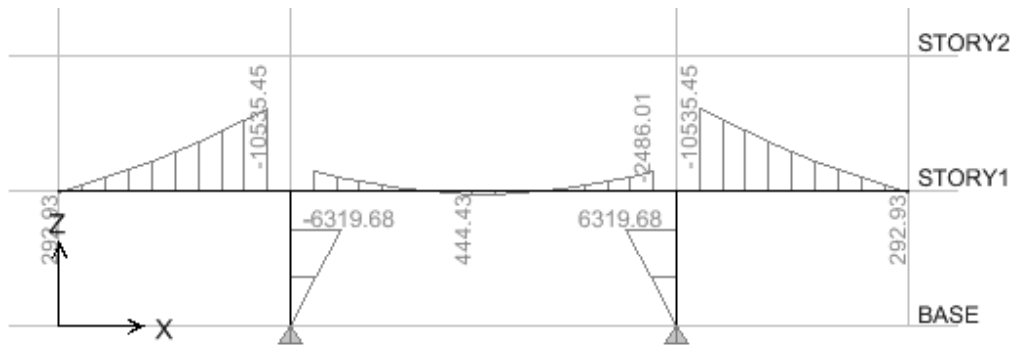
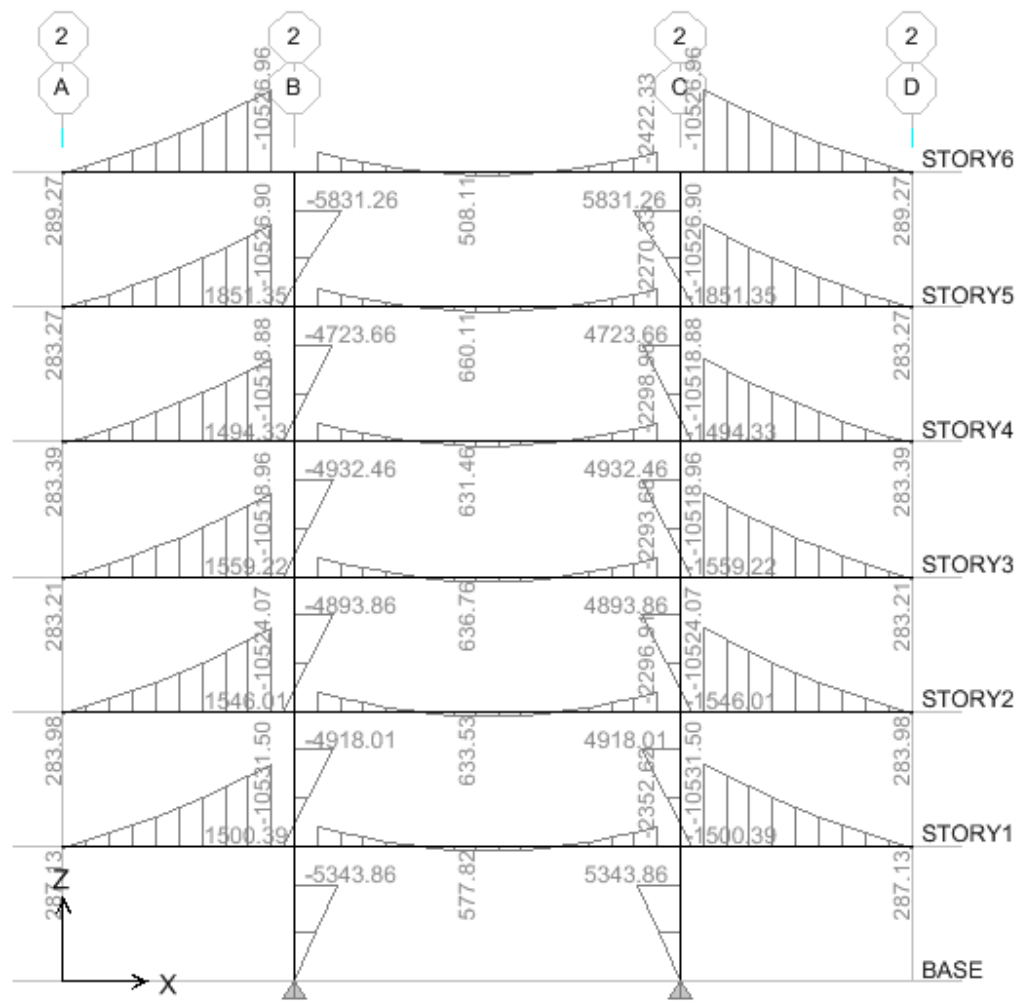


Figura No. 20 DIAGRAMA AL FINALIZAR LA CONSTRUCCIÓN ANALIZANDO PISO POR PISO (con voladizos).



CUADRO NO. 3  
COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MOMENTOS

ELEMENTO	A	B	C	Diferencia
Columna base	-2680.98	-6,319.68	-5343.86	+ 99%
Columna arriba	-4,830.96	--	-5,831.26	+ 21%

A = Análisis tradicional edificio completo.

B = Análisis en el momento de construir y liberar solamente el primer nivel.

C = Análisis al completar el edificio, considerando el efecto de la secuencia de construcción.

#### IV. EJEMPLO PROYECTO EDIFICIO FICTICIO EL DIAMANTE

Para mostrar cómo se realiza un análisis de este tipo dentro del programa ETABS, se realizará un análisis con un modelo ficticio al que llamaremos “El Diamante”. Tratando de incluir los casos ejemplificados arriba en el análisis a realizar.

##### A. Geometría del edificio

El edificio será de 4 plantas, con voladizos crecientes en cada nivel y se eliminará una de las columnas interiores, en el eje “E”

Figura No. 21 Planta edificio “el diamante”

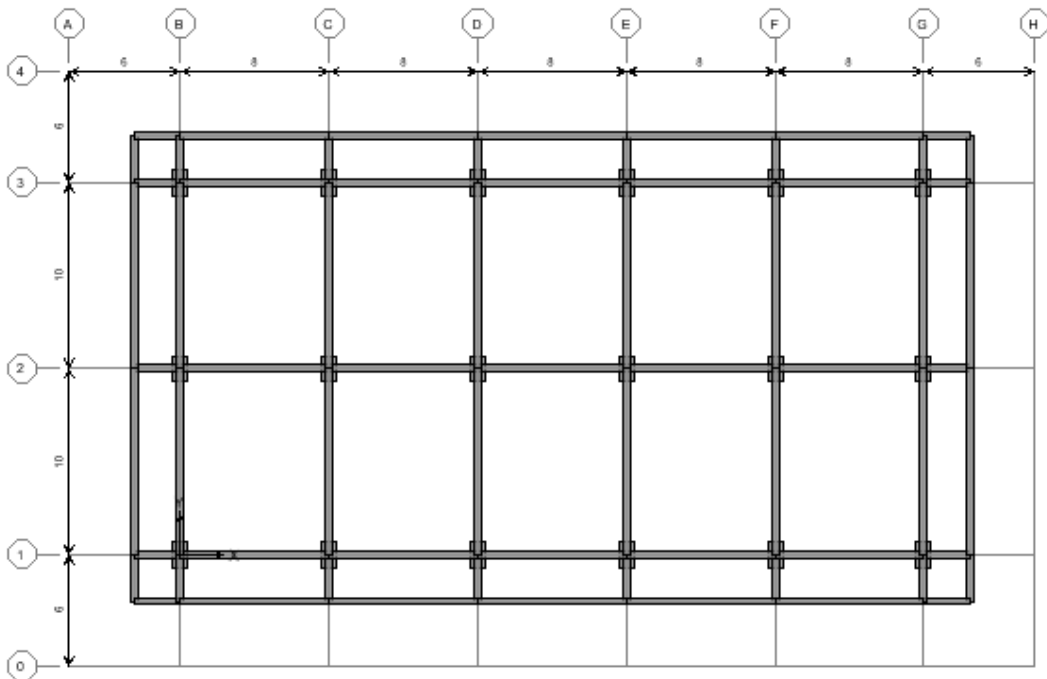


Figura No. 22 elevación edificio el diamante en eje "D"

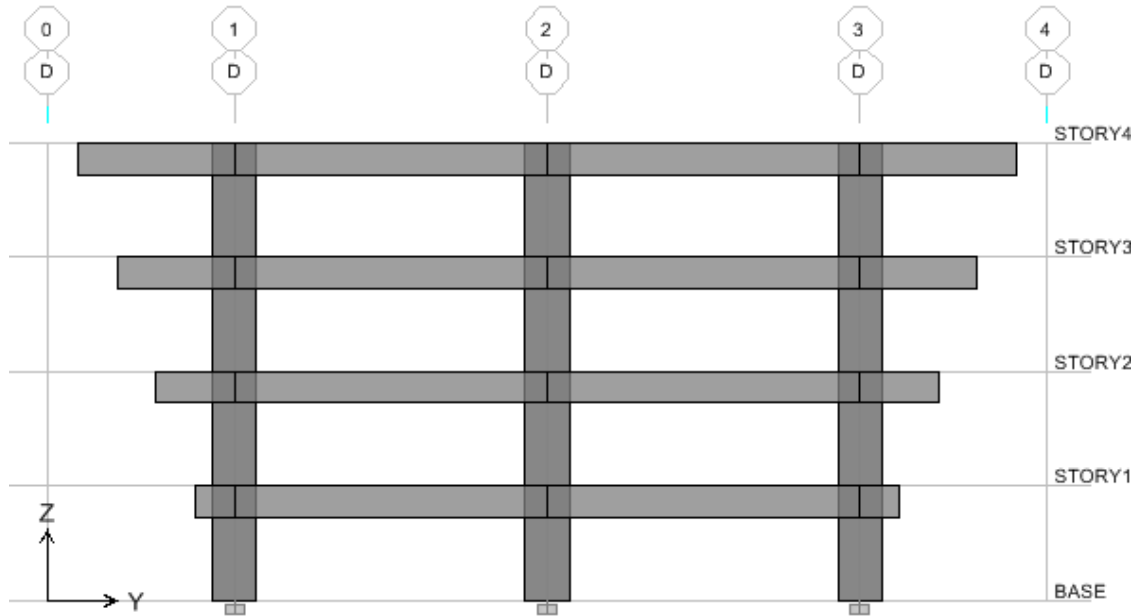


Fig. No. 23 Elevación edificio el diamante en eje E

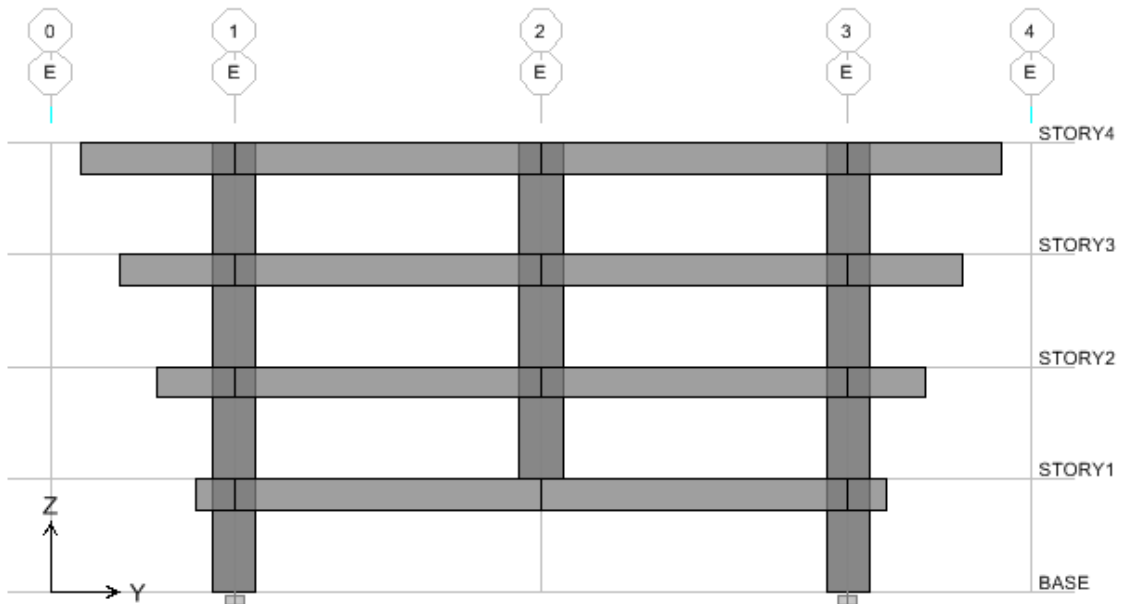
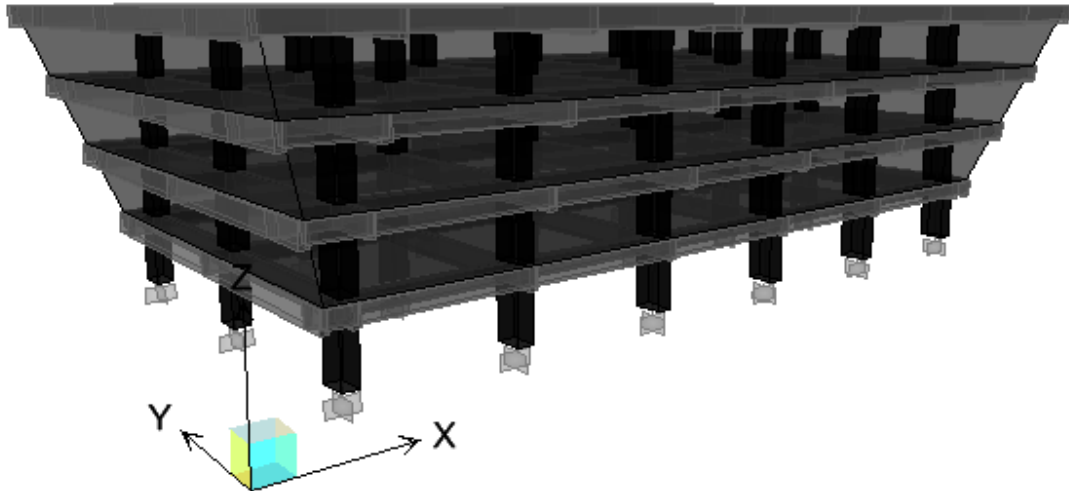


Figura No. 24 Modelo en 3 dimensiones edificio “El Diamante”



*B. Modelación en el programa*

La modelación dentro del programa “ETABS” se realiza de la siguiente manera:

1. Se ingresa en el menú file/new model, que nos lleva al formulario de geometría, donde se ingresan todos los valores mostrados anteriormente. Se puede iniciar con una plantilla de marcos en dos direcciones o bien con solamente una retícula para dibujar.

Figura No. 25. Formulario inicial de geometría.

The image shows a software dialog box titled "Building Plan Grid System and Story Data Definition". It is divided into several sections:

- Grid Dimensions (Plan):** Contains radio buttons for "Uniform Grid Spacing" (selected) and "Custom Grid Spacing". Under "Uniform Grid Spacing", there are input fields for "Number Lines in X Direction" (4), "Number Lines in Y Direction" (4), "Spacing in X Direction" (6), and "Spacing in Y Direction" (6). There are also "Grid Labels..." and "Edit Grid..." buttons.
- Story Dimensions:** Contains radio buttons for "Simple Story Data" (selected) and "Custom Story Data". Under "Simple Story Data", there are input fields for "Number of Stories" (4), "Typical Story Height" (3), and "Bottom Story Height" (3). There is an "Edit Story Data..." button.
- Units:** A dropdown menu showing "Kgf-m".
- Add Structural Objects:** A row of seven icons representing different structural systems: "Steel Deck", "Staggered Truss", "Flat Slab", "Flat Slab with Perimeter Beams", "Waffle Slab", "Two Way or Ribbed Slab", and "Grid Only".

At the bottom of the dialog are "OK" and "Cancel" buttons.

2. Dentro del programa necesitamos definir y asignar las propiedades de cada elemento. En este caso definiremos las siguientes:
  - a. Columnas de 0.80 x 1.40m
  - b. Vigas sobre ejes letra de 0.40 x 1.00 m
  - c. Vigas sobre ejes numero de 0.40 x 0.80m
  - d. Losa plana de 0.15m de espesor
  
3. Definir la carga muerta secuencial. Para esto se ingresa en el menú Define/Add sequential construction case, y se accesa el siguiente formulario:

Figura No. 26. Formulario de caso de secuencia de construcción.

The dialog box 'Auto Construction Sequence Case' includes the following sections:

- Case Selection:** Radio buttons for 'None' and 'Construction Sequence Case'. A text field contains 'DEAD-SQ'. A checkbox 'Replace Dead Type Cases with this Case in all Default Design Combos' is unchecked.
- Active Structure:** Radio buttons for 'Auto Create Active Structure' (selected) and 'User Specified Active Structure'.
- Geometric Nonlinearity Effects:** A dropdown menu set to 'None'.
- Auto Create Active Structure:** 'Create Construction Sequence every' set to '1' Stories. An 'Exclude Group' dropdown is empty. A checkbox 'Loads Apply to Added Elements Only' is unchecked.
- Load Pattern:** A table with columns 'Load' and 'Scale Factor'.
 

Load	Scale Factor
DEAD	1.
DEAD	1.

 Buttons: Add, Modify, Delete.
- User Specified Active Structure:** A table with columns 'Stage' and 'Active Group'. Buttons: Add, Modify, Insert, Delete.

Buttons at the bottom: OK, Cancel.

Este formulario debe ser llenado con los parámetros correspondientes y puede ser configurado para que se analice a cada nivel, de a dos en dos o los niveles que se desee por cada paso. También pueden retirarse piezas en algunas de las etapas. En el caso a analizar se considerarán de piso en piso, por lo que basta con colocar esta información en la casilla de secuencia auto-creativa. Es importante desactivar los efectos de no linealidad geométrica ingresando "none" en la casilla correspondiente.



Figura No. 28 Resultados eje "C" con secuencia de construcción

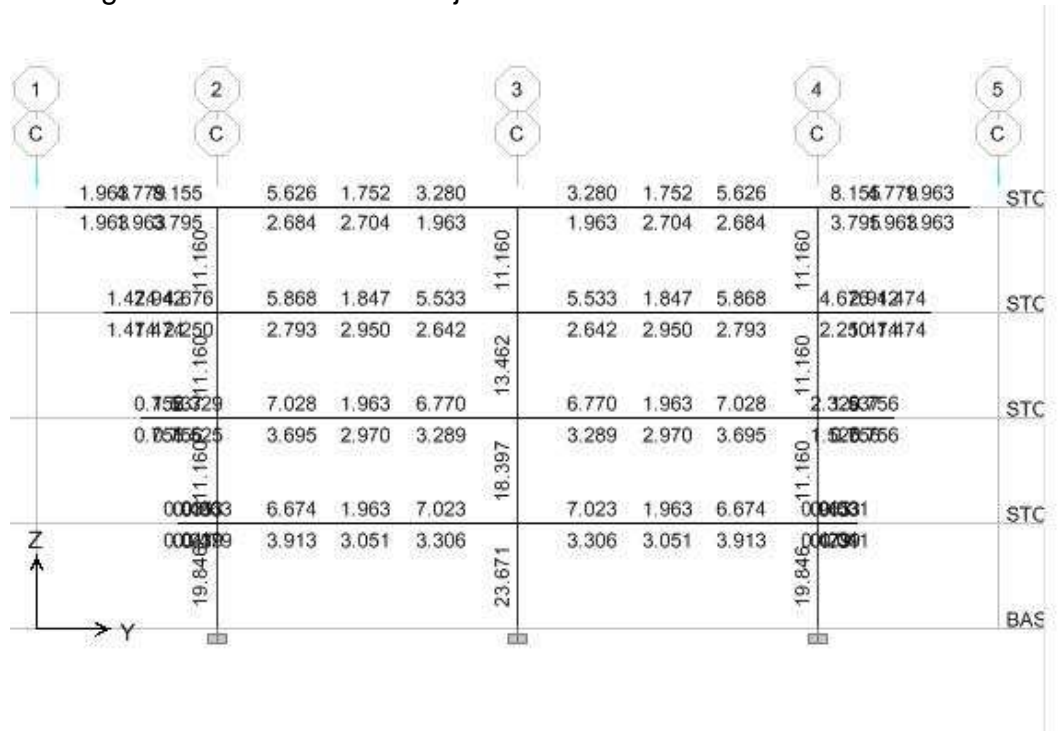


Figura No. 29 Resultados eje "E" sin secuencia de construcción

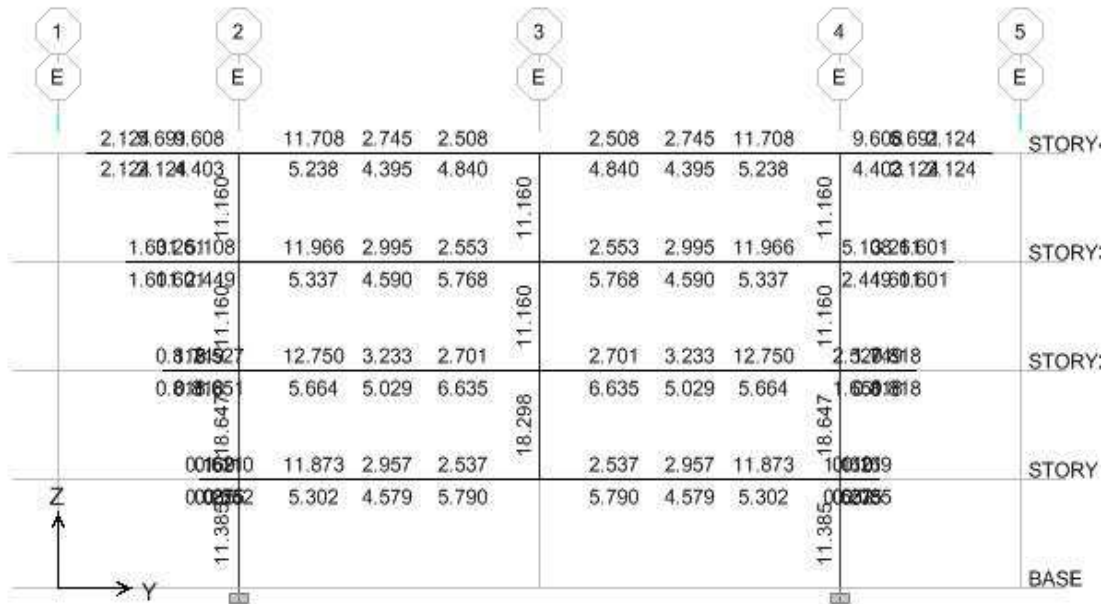


Figura No. 30 Resultados eje "E" con secuencia de construcción

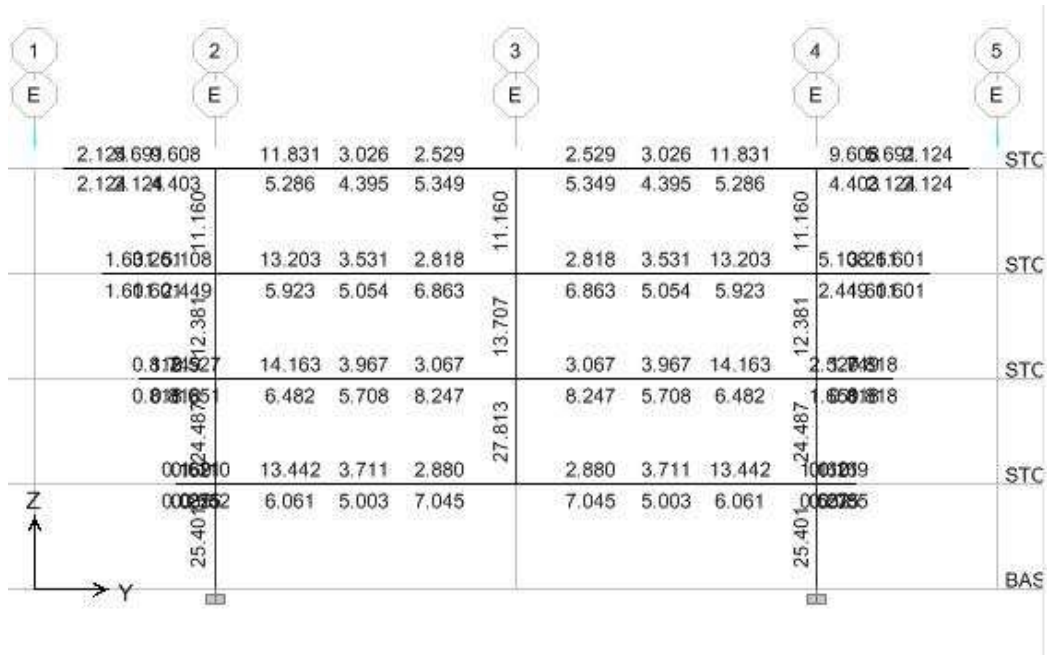


Figura No. 31 Resultados eje "G" sin secuencia de construcción

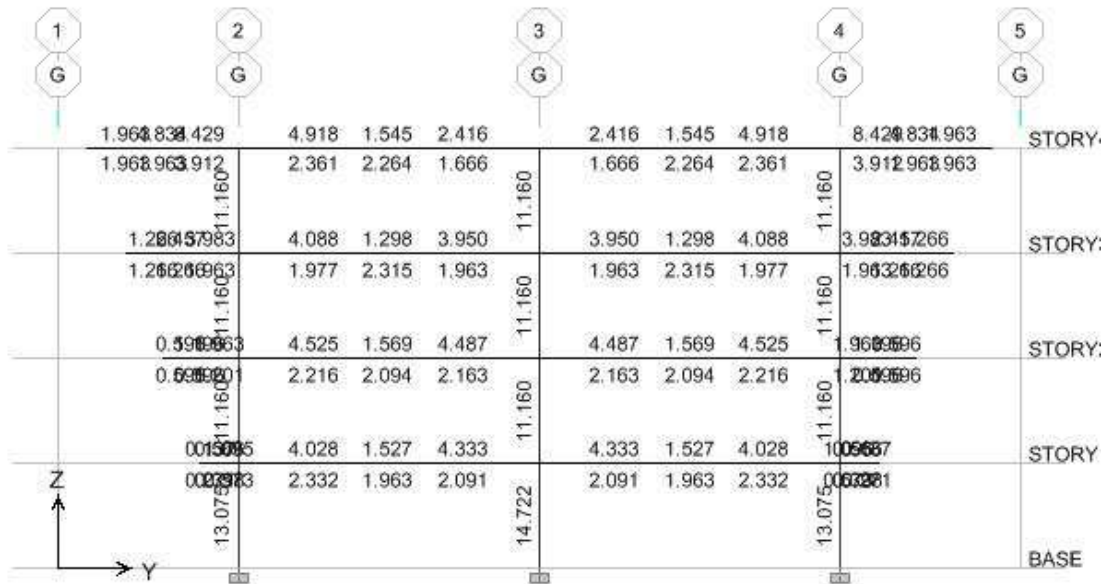
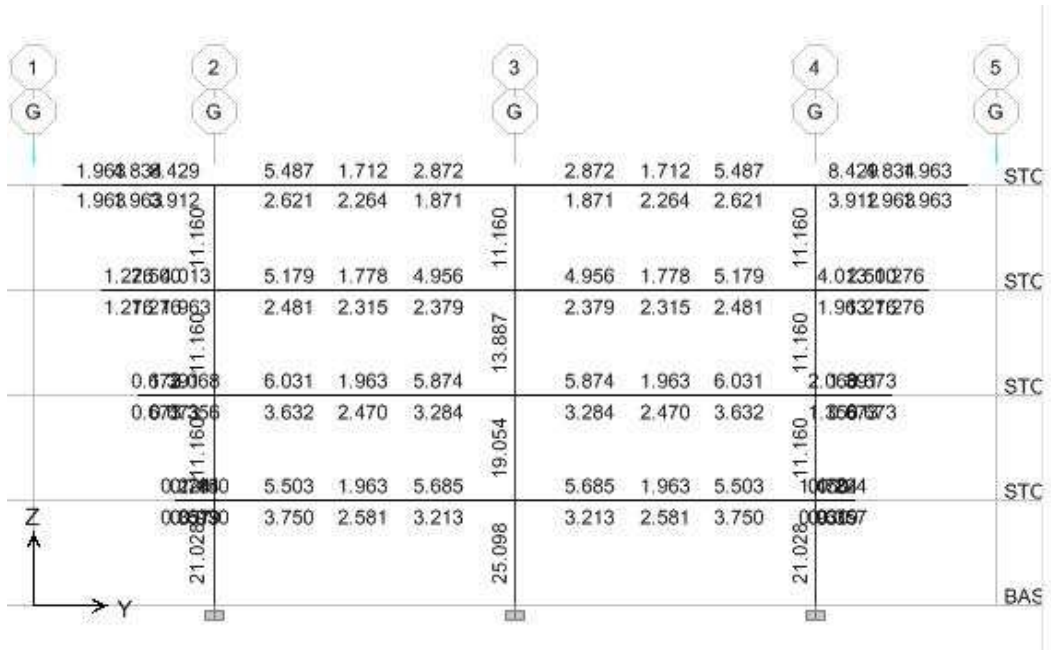


Figura No. 32 Resultados eje "G" con secuencia de construcción



## V CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

- La geometría de las edificaciones tiene una relación directa con el comportamiento y la distribución de los esfuerzos internos en los elementos, no solamente para cargas accidentales.
- Las asimetrías en planta y/o en elevación generan diferencias significativas en la distribución de los esfuerzos de carga muerta que podrían invalidar un análisis tradicional.
- Se recomienda apuntalar los voladizos durante la etapa constructiva para minimizar los efectos negativos en los momentos flexionantes de las columnas que los sostienen.
- Se recomienda realizar un análisis de secuencia de construcción en todos los casos en que se tengan las irregularidades geométricas discutidas en este trabajo.

## VI BIBLIOGRAFÍA

AGIES, 2000, *"Normas recomendadas de Seguridad Estructural"*.

ACI 318S-05, 2005, *"Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario"*, producido por el comité 318 Capitulo Costa Rica.

Computers & Structures Inc., 2005, *"Manual de Programa ETABS v9"*.

Computers & Structures, Inc., 2005, *"CSI Analysis Reference Manual"*.

Park y Paulay, 1980, *"Estructuras de Concreto Reforzado"*, Editorial Limusa S.A., México.

McCORMAC, JACK C., 2001, *"Design of reinforced concrete" 5a. Ed*

NEWMARK, N. M., Julio 1959 , *"A method of Computation for Structural Dynamics"*, Proceedings, ASCE, Journal of the Engineering Mechanics Division.

Wilson, Edward L., 1999, *"Análisis Tridimensional Estático y Dinámico de Estructuras"*