



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería.

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado.

**DESARROLLO DE PROGRAMA DE ANÁLISIS NO LINEAL
PASO A PASO DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD
EMPLEANDO MATLAB**

Para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

Presenta:

ING. MARCOS ALFREDO LEÓN PORQUILLO

Asesor de Tesis:

M. I. GUILLERMO MUÑOZ CORDERO

Puebla, Pue.

Junio 2016



BUAP

OFICIO SIEP No. 4265/2015

Ing. Marcos Alfredo León Porquillo
Maestría en Ingeniería Opción terminal Estructuras
Presente.

El suscrito M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de tema de tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado **“Desarrollo de programa de análisis no lineal paso a paso de sistemas de un grado de libertad empleando MATLAB”**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, opción terminal estructuras. Asignándose como Asesor de Tesis al M.I. Guillermo Muñoz Cordero.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“Pensar bien para vivir mejor”

Puebla, Pue., a 11 de diciembre de 2015

M.I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO

Director de la Facultad de Ingeniería

C.c.p. M.I. Guillermo Muñoz Cordero. Asesor de Tesis.

C.c.p. Archivo.

GJS*JLM*dsm.



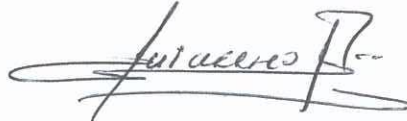
M. en I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de
Ingeniería de la B.U.A.P.

El que suscribe M. I. Guillermo Muñoz Cordero, asesor del tema de tesis denominado "**Desarrollo de programa de análisis no lineal paso a paso de sistemas de un grado de libertad empleando MATLAB**", presentado por el C. Marcos Alfredo León Porquillo, estudiante de la maestría en ingeniería estructural y en atención al oficio SIEP No. 4265/2015 de fecha 11 de Diciembre de 2015, me permito informar a usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, la metodología y redacción de la tesis, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Lo que hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

ATENTAMENTE

Puebla, Pue. A 01 de Junio del 2016



M. I. Guillermo Muñoz Cordero
Asesor

C.c. p. Exámenes profesionales
Interesado
Archivo
G.M.C.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	001
INTRODUCCIÓN	003
CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS Y FUNDAMENTOS DE PROGRAMACIÓN EN MATLAB	006
1.1. Propiedades dinámicas de los sistemas estructurales	006
1.2. Masa, rigidez y amortiguamiento estructural	009
1.3. Frecuencia natural, periodo estructural y respuesta ante excitaciones arbitrarias	014
1.4. Programa MATLAB	020
1.5. Archivos con extensión “.m”	023
CAPÍTULO 2. PROGRAMAS DE LECTURA, IMPORTACIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD (MARK_000 Y MARK_001)	027
2.1. Antecedentes	027
2.2 Programa de carga de datos MARK_000	029
2.3 Evaluación numérica de la respuesta dinámica y método de Newmark para análisis elástico lineal	035
2.4 Programa de análisis de sistemas de un grado de libertad MARK_001	039
2.5 Comportamiento de fuerzas contra desplazamiento	046

CAPÍTULO 3. PROGRAMA DE ANÁLISIS INELÁSTICO DE SISTEMAS

DE UN GRADO DE LIBERTAD (MARK_003) 051

- 3.1 Modelos de histéresis, fuerza de fluencia y ductilidad del sistema 051
- 3.2 Evaluación numérica de la respuesta dinámica y método de Newmark para análisis inelástico 057
- 3.3 Programa de análisis de sistemas de un grado de libertad MARK_003 059
- 3.4 Comportamiento de respuesta del sistema de un grado de libertad 074
- 3.5 Comportamiento de fuerzas contra desplazamiento 077
- 3.6 Información de salida del programa, exportación de datos en formato CSV 080
- 3.7 Energía desarrollada por el sistema y espectro de energía para el sismo de El Centro y Distrito Federal 083

CONCLUSIÓN 103

ANEXO 1. 105

- A.1 Ejemplo comparativo de resultados, Bibliografía contra MARK_001 105
- A.2 Ejemplo comparativo de resultados, bibliografía contra MARK_003 110

NOTACIÓN	119
BIBLIOGRAFÍA	121

Agradecimientos

A mis padres, por darme la vida, su sabiduría y apoyo, a ellos mi admiración completa y cariño incondicional.

A mis maestros, los buenos claro está, por transmitir su conocimientos y apoyo.

A mis profesores, por retarme y aprender cómo no debo ser.

A mis amigos de toda la vida, por acompañar, escuchar y aunque no los vea tan seguido por compartir cualquier momento.

A mi novia maravillosa inigualable, grandiosa y hermosa Eliz, por estar apoyándome en cualquier momento, por aportar ideas, mover mi mundo y ser como es.

A todos, infinitas gracias por ser parte de mi vida.

Introducción

El objetivo fundamental del análisis frente a sollicitaciones sísmicas es el de mantener la respuesta estructural dentro de límites establecidos por la seguridad, servicio y confort humano. Dicho objetivo puede alcanzarse aplicando los conceptos básicos del diseño sismo-resistente convencional.

Ciertos detalles de análisis y diseño, que se encuentran prácticamente en todas las normativas del mundo, tienen como objetivo disipar una parte de esta energía a fin de evitar aceleraciones excesivas y desplazamientos que la estructura no pudiera resistir. Precisamente, la disipación suele conseguirse mediante la plastificación de algunos elementos estructurales que, en el caso de edificios, son por lo general, en las vigas cerca de las intersecciones con las columnas. Es entonces, paradójico que la protección de una estructura se realice a costa de desperfectos en parte de la misma.

Los principios básicos actuales de diseño sismo-resistente de edificios, están orientados a lograr estructuras que:

- resistan sin daños movimientos sísmicos de intensidad moderada;
- limiten los daños en elementos no estructurales durante sismos de mediana intensidad;
- aunque presenten daños, eviten el colapso durante sismos de intensidad excepcionalmente severa.

En algunos países, durante los últimos años, un nuevo método comenzó a aparecer, denominado "Diseño Sismo-resistente mediante Sistemas de Control de Respuesta" o "Diseño Sismo-resistente mediante Sistemas de Control de Vibraciones", distinguible del diseño sismo-resistente tradicional.

Hace algunos años atrás, la razón por la cual el desarrollo tecnológico relativo a la reducción de vibraciones no se extendía a las estructuras sometidas a sismos era fundamentalmente "el costo". Es fácil reconocer que el costo de estos sistemas irá bajando progresivamente en forma inevitable en la medida que se comiencen a utilizar cada vez más.

¿Qué faltaba para que estos sistemas fueran mundialmente aceptados?, una década de investigaciones sobre el tema no logró lo que treinta segundos sí: Northridge en 1994 y Kobe en 1995. Los resultados de estructuras con sistemas de reducción de vibraciones durante estos sismos, especialmente Kobe, han revolucionado la ingeniería sísmica, y para bien; en la medida que se diseñen estos sistemas en forma cuidadosa.

¿Qué es lo diferente que aportan éstas nuevas tecnologías que no aporta el diseño sismo-resistente convencional? En realidad es muy simple, satisface la desigualdad Capacidad contra Demanda reduciendo esta última. Esto no significa que se altere la excitación, lo que sería esencialmente imposible; pero sí que alteremos lo que percibe nuestro

sistema a través de modificar sus propiedades dinámicas de rigidez y amortiguamiento de modo que las vibraciones inducidas por la excitación sean considerablemente menores.

Los sistemas de aislación sísmica no forman parte de un análisis estructural convencional, estos dispositivos se basan en presentar grandes deformaciones en soportes de materiales elastoméricos. Es por ende, que se necesitan métodos iterativos desarrollados los cuales iniciaron su desarrollo hace más de cuarenta años y con el avance en tecnología y herramientas computacionales se han ido empleando en algunos programas para la ingeniería sísmica.

Capítulo 1. Características dinámicas y fundamentos de programación en MATLAB

1.1. PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES

Los distintos sistemas estructurales que existen o pueden llegar a existir poseen propiedades naturales que definen su comportamiento. Dichas características dependen de la constitución fundamental de cualquier sistema, el sistema estructural empleado para generar el esqueleto, las dimensiones de las columnas, la altura de entrepiso, así como el uso propio de la estructura, los materiales empleados para la construcción así como el tipo de unión entre elementos fundamentales son algunas de las variantes.

Estas propiedades son únicas, definidas e inalterables mientras el comportamiento de la estructura no incurra en grandes deformaciones. No importa que actué en el sistema principal, en teoría, cualquier excitación o perturbación no cambia ni cambiaría dichas características, esto es en sí, de manera teórica como parte del fundamento para el análisis estructural elástico lineal.

El problema fundamental es determinar el número de grados de libertad relacionado al estudio que se quiere realizar, esto determinará la ecuación de movimiento necesaria para determinar la respuesta estructural, mientras más compleja la ecuación, más

compleja será la respuesta del sistema global. En este trabajo se estudiarán sistemas de un solo grado de libertad, los programas desarrollados calculan la respuesta con respecto a la variable de tiempo.



Fig. 1.1 Sistema de un grado de libertad.

Todos los sistemas estructurales tienen características dinámicas que no se alteran mientras el sistema se comporte en el rango elástico lineal, es así como se define el comportamiento de la estructura analizada. Así mismo a determinado sistema le corresponde una respuesta específica, que depende de las condiciones iniciales o excitación sobre la estructura. En los casos más sencillos, el análisis de respuesta se basa en el comportamiento de vibración libre, puede ser inexistente la liberación de energía lo

cual es un caso en absoluto teórico o el caso de tener la capacidad específica de poder disipar energía en el sistema.

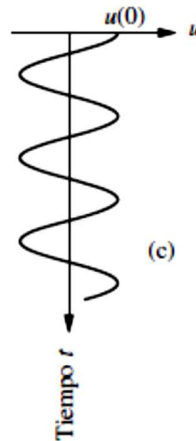


Fig. 1.2. Respuesta de un sistema sin disipar energía.

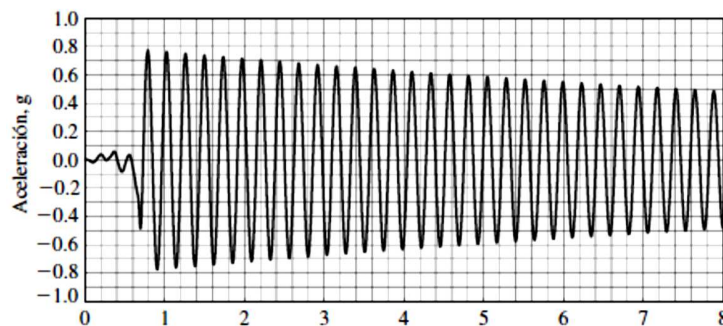


Fig. 1.3. Respuesta de un sistema disipando energía.

Las propiedades elementales de cualquier sistema dinámico son la masa, la rigidez y el amortiguamiento. Cada componente determina parte de la respuesta o comportamiento global del sistema. Es necesario como mínimo tener los componentes de masa

y rigidez, sin alguno de ellos no se podrían definir las propiedades dinámicas de las estructuras.

1.2. PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES

Las propiedades fundamentales son la masa, rigidez y amortiguamiento. Los tres siempre existen en cualquier sistema dinámico real, es decir tienen su contribución a un sistema estructural cualquiera.

La componente estructural de masa en los edificios comunes los proporciona con mayor preponderancia los sistemas de piso, por ejemplo las losas de concreto o techumbres ligeras. Todos los elementos propios de cualquier sistema tienen peso, sin embargo, si por cada longitud unitaria de cada elemento por ejemplo columna se colocara un grado de libertad relacionada a la masa, haría más complejo el planteamiento de la ecuación de movimiento, llegando al límite de tener infinitos grados de libertad. En la forma más sencilla y lógica la masa de un sistema cualquiera es el cociente del peso total considerado entre la constante de gravedad.

$$m = \frac{w}{g} \text{ Ec. 1.1}$$

Por ejemplo, si se tiene la siguiente estructura en elevación, y se tiene cuantificado el peso total de la armadura con el sistema de cubierta, es sencillo calcular el peso considerado en el sistema de un solo grado de libertad, en forma sencilla el peso provisto por las columnas se coloca en el centro de gravedad del sistema.

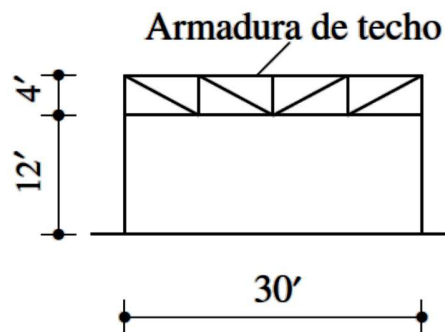


Fig. 1.4. Sistema de un solo grado de libertad a base de armaduras.

La masa depende de las dimensiones de las secciones empleadas para la estructura, de los materiales que se emplean para el mismo sistema, de los acabados, las cargas vivas consideradas. A final de cuenta, todo lo que este afectado por la gravedad se debe tomar en cuenta para el análisis de masa.

La rigidez se define como la oposición a que la estructura se deforme, en forma adicional, es la componente estructural que determinará que tanto se deforme el sistema ante la aplicación de

cargas. En ingeniería sísmica, dado que lo que más interesa es limitar los desplazamientos laterales a rangos aceptables, la rigidez más frecuente es la lateral, la cual depende de la altura de las columnas o elementos que se opongan al desplazamiento, los apoyos que se tengan, el punto de análisis, la sección transversal del elemento, la geometría de la estructura y los materiales provistos. De igual forma, todos los materiales empleados en la construcción actual proveen cierta rigidez lateral, algunos más, algunos menos. Considerando el rango elástico lineal, el comportamiento matemático se da por la siguiente ecuación:

$$f_s = ku \quad \text{Ec. 1.2}$$

La rigidez del sistema de manera teórica puede calcularse en base a suponer sistemas infinitamente rígidos unidos a las columnas, el resultado final nunca será el mismo a comparación de un modelo real.

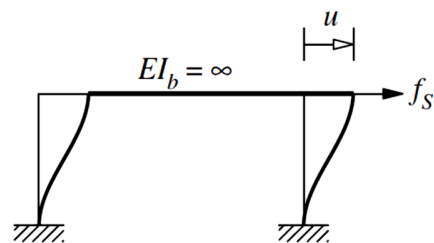


Fig. 1.5. Sistema de un solo grado de libertad con infinita rigidez en el sistema de piso.

En la forma más precisa, debido a que los sistemas de piso no son infinitamente rígidos, la condensación estática determina la rigidez lateral real del sistema tomando en cuenta la contribución de todos los elementos. Para el análisis estático y dinámico el comportamiento elástico y lineal es válido para casi cualquier sistema, siempre y cuando se tengan pequeñas deformaciones. Los reglamentos actuales en su mayoría, toman como referencia este tipo de análisis debido a la simplificación matemática de la determinación de las fuerzas con base a los desplazamientos.

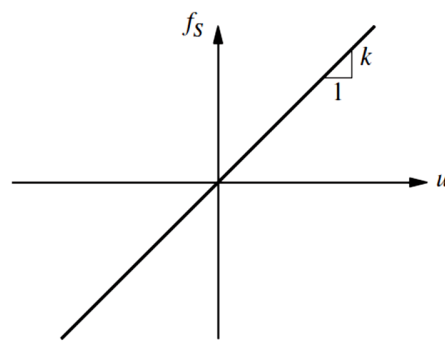


Fig. 1.6. Comportamiento elástico lineal de la fuerza de rigidez.

La última propiedad es el amortiguamiento, la cual contribuye a liberar la energía poco a poco en el sistema analizado. Esta característica depende de diversos mecanismos en una estructura real, como por ejemplo la fricción en las conexiones de acero, la apertura y cierre de microfisuras en el concreto y diversas acciones

adicionales. Esta forma de liberación de energía es difícil cuantificar en sistemas de múltiples grados de libertad, sin embargo en sistemas sencillos de un grado, esta característica se puede idealizar como un comportamiento viscoso constante para cualquier deformación. En los sistemas constructivos se tiene un bajo coeficiente de amortiguamiento, en general dicha propiedad se identifica mediante la fracción de amortiguamiento. En las construcciones habituales, este valor de fracción oscila en cinco por ciento.

Las fuerzas disipadoras relacionadas a esta propiedad, se ven relacionadas a la velocidad de movimiento del sistema, esto considerando el comportamiento viscoso idealizado, mientras más sea la velocidad en el sistema, mayor será la fuerza de disipación de energía.

$$f_D = c\dot{u} \quad \text{Ec. 1.3}$$

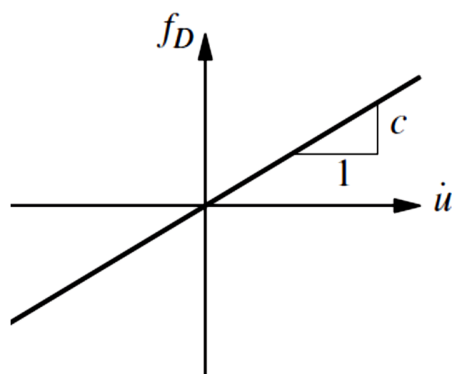


Fig. 1.6. Comportamiento viscoso de la fuerza de disipación.

1.3. FRECUENCIA NATURAL, PERIODO ESTRUCTURAL Y RESPUESTA ANTE EXCITACIONES ARBITRARIAS

Al poder determinar las características estructurales como son la masa, rigidez y amortiguamiento, se tiene que formular la ecuación de movimiento relacionada al fenómeno que se estudia. Dicha ecuación involucra en su solución la respuesta o comportamiento dinámico del sistema estructural. En los sistemas dinámicos, la masa se relaciona al efecto de la inercia, el amortiguamiento a las fuerzas de disipación y la rigidez se involucra por los desplazamientos propios de la estructura.

Esta ecuación se fundamenta en el equilibrio dinámico permanente en el sistema, considerando el comportamiento elástico lineal se tiene lo siguiente:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad \text{Ec. 1.4}$$

Como se observa, en ningún momento se tiene una fuerza de excitación directamente sobre el sistema, el término de lado derecho es una fuerza “equivalente” que surge de calcular la aceleración total que sufre el sistema cuando entra en movimiento. En forma adicional, si se tiene el registro de aceleración de un sismo específico, se puede determinar la respuesta en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración relativa para cualquier instante de tiempo.

La deducción matemática parte del diagrama de cuerpo libre realizado para los sistemas de un grado de libertad como el que se presenta a continuación.

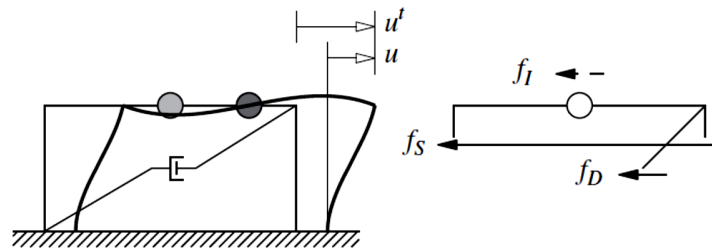


Fig. 1.7. Sistema de un grado de libertad y diagrama de cuerpo libre.

Pero antes de calcular la respuesta ante la excitación sísmica es necesario determinar las características dinámicas de los sistemas. Para esto, se puede simplificar la ecuación de movimiento al comportamiento en vibración libre y sin tomar en cuenta el amortiguamiento.

$$m\ddot{u} + ku = 0$$

Ec. 1.5

El movimiento que determina esta ecuación es periódico y armónico y se entra en este estado al imponer al sistema un desplazamiento o velocidad inicial en el sistema. La solución de la ecuación diferencial para el comportamiento de vibración libre sin amortiguar, trae como consecuencia la primera propiedad dinámica llamada velocidad angular o frecuencia natural del sistema, la cual

depende de las características de masa y rigidez que se tenga en el modelo de un grado de libertad. Dicha propiedad se calcula como sigue:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ Ec. 1.6}$$

El movimiento alcanza los máximos o mínimos con instantes de tiempo bien definidos y para esto es necesario llevar a cabo ciclos de oscilación, y el tiempo para completar una oscilación se conoce como periodo natural (T_n).

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \text{ Ec. 1.7}$$

En contraparte se puede calcular el número de ciclos completos por cada intervalo de tiempo, en específico, ciclos por segundo o Hertz.

$$f_n = \frac{1}{T_n} \text{ Ec. 1.8}$$

Todos los sistemas existentes tienen estas propiedades dinámicas las cuales, dependen de las características de masa y rigidez. Por ejemplo, con mayor rigidez, se obtiene periodos más cortos (menor tiempo necesario para completar ciclos de oscilación). Estas propiedades pueden ser idénticas en distintos sistemas estructurales, pueden tener distinta masa o rigidez, e incluso distinta

configuración estructural geométrica, y aun así podrían coincidir las propiedades dinámicas.

En los sistemas de un solo grado de libertad, se tienen distintos métodos para obtener la respuesta ante excitaciones sísmicas. Una de esas herramientas es el análisis dinámico paso a paso el cual determina el comportamiento de sistema para cualquier tiempo necesario. Este método tiene dos variantes principales, el primero, considerar a los sistemas con características elásticas lineales, el segundo, tomando como datos fundamentales, la rigidez, la ductilidad, la resistencia del elemento analizado.

En la forma más sencilla, la excitación sísmica no tiene ningún parámetro para poder asignar una ecuación con variación lineal, cuadrática, exponencial, etc. Es indispensable tener el registro de aceleración causadas por el sismo y la liberación de energía, para esto las soluciones clásicas de ecuaciones diferenciales no sirven dado que las aceleraciones no son una función. Actualmente se tienen métodos que proporcionan la respuesta ante eventos sísmicos. Dichos métodos son numéricos y como tal no proporcionarán la solución exacta, pero sí de forma aproximada el desplazamiento o aceleración que desarrolle el sistema. La excitación sísmica que se imponga en la base es producto de cierta liberación de energía y propagación de ondas. El efecto resultante

sobre las estructuras es provocar distintos desplazamientos, aceleraciones o velocidades. Estos efectos dependen de las propiedades dinámicas de la estructura analizada y el terreno empleado para apoyar al sistema. La respuesta dinámica de cualquier estructura depende de la excitación que se provea, al resolver la ecuación de movimiento, se obtendrán respuestas totalmente distintas o similares si es que los sistemas cambian en sus propiedades dinámicas.

Por ejemplo, teniendo el registro de aceleraciones del sismo de El Centro en 1940 mostrado en la figura siguiente y calculando la respuesta sísmica paso a paso para tres distintos sistemas se obtiene el siguiente comportamiento.

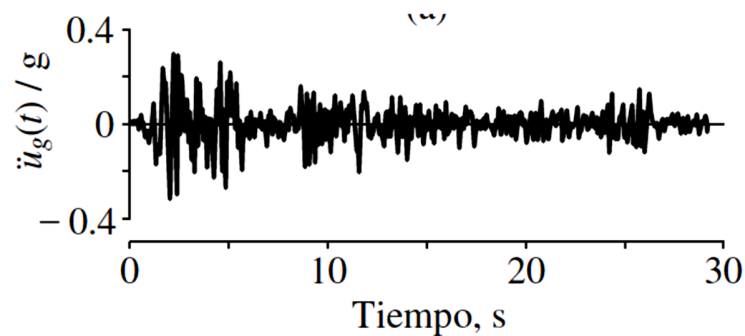


Fig. 1.8. Registro de aceleraciones del terreno.

En las gráficas de respuesta se observa que los tres sistemas cambian con respecto al periodo, alterando la masa o la rigidez del sistema. Dadas las condiciones de cada estructura, los tres sistemas se comportan de forma distinta y se obtendría la misma respuesta si

el registro de aceleraciones se induce en cada uno de ellos de forma repetitiva.

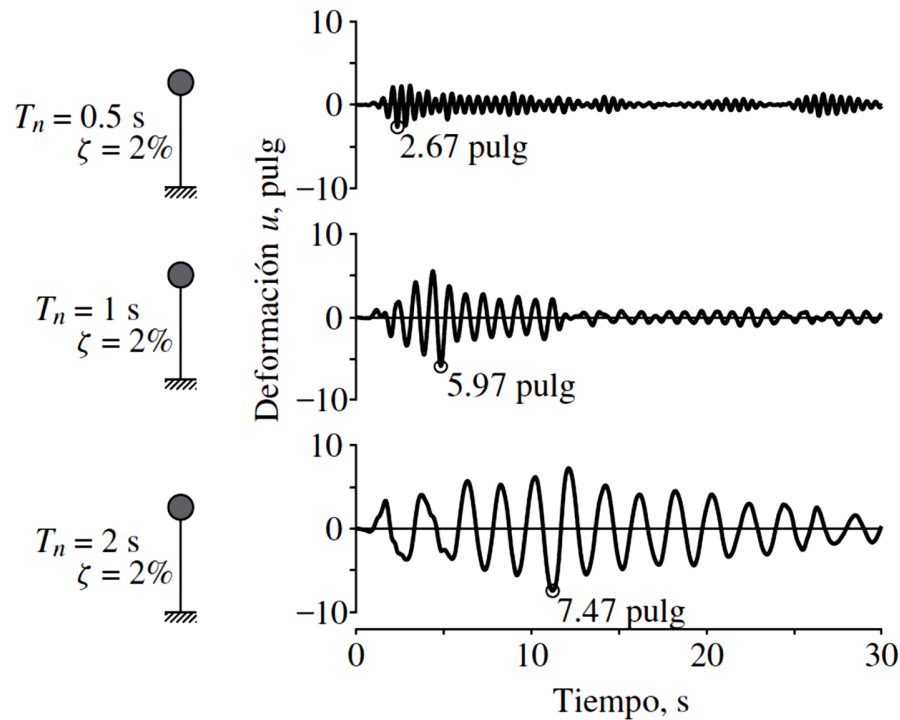


Fig. 1.9. Respuesta en términos de desplazamiento.

Sin embargo, uno de los problemas fundamentales es que nunca se podrá desarrollar la misma cantidad de energía liberada durante un sismo, así mismo, el terreno de desplante se encuentra en constante movimiento, modificando o no las propiedades dinámicas del suelo. Los sismos aunque tengan la misma magnitud no desarrollan la misma intensidad en términos de aceleración y por lo tanto el análisis de sismos futuros no se conoce. Para determinar la respuesta ante eventos sísmicos futuros es necesario coleccionar

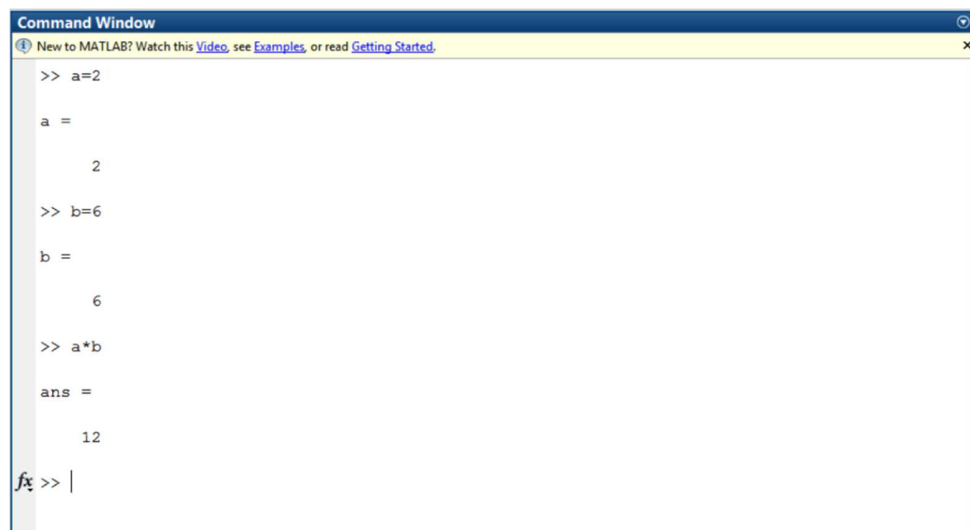
toda la información de sismos pasados, e introducirlos como excitación a las estructuras nuevas, esto nos ayudará a comprender de qué forma se comportan los sistemas y estudiar nuevas soluciones estructurales. Más importante aún, se necesita un esfuerzo de cálculo considerable al determinar la respuesta paso a paso de los sistemas, por ejemplo si se tienen diez registros sísmicos distintos y diez estructuras se deben realizar el análisis paso a paso cien veces.

1.4. PROGRAMA MATLAB

Actualmente el desarrollo computacional ha generado muchos avances en ingeniería, los cálculos se hacen con mayor eficiencia y rapidez, el detallado de los planos se puede corregir tantas veces como sea necesario. En algunos problemas se tiene la necesidad de tener arreglos matemáticos y poder manipular esa información de forma correcta y ordenada.

MatLab es un programa computacional que se creó a mediados de los años ochenta con el objetivo específico de poder trabajar con matrices. Posteriormente nacieron programas como MathCAD, Maple o Mathematica. Las funciones originales eran escasas, sin embargo se enfocaban al uso en ciencias, ingeniería y finanzas, por lo tanto se convirtió en una herramienta útil para desarrollar

cualquier tipo de investigación. En la actualidad es el programa más utilizado por universidades a nivel mundial, en centros de investigación y diversas compañías privadas. Ahora se tiene un número de más de 11000 funciones disponibles para cálculos matemáticos o programación. Una de las ventajas más importantes es poder combinar en forma sencilla y eficaz varias herramientas de programación similar al lenguaje C++ y la utilización de matemáticas.



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.
>> a=2
a =
    2
>> b=6
b =
    6
>> a*b
ans =
    12
fx >> |
```

Fig. 1.10. Operaciones básicas en el ambiente MatLab.

El programa MatLab permite realizar desde operaciones elementales de matemáticas hasta los cálculos más complejos de ecuaciones diferenciales o aplicar distintos métodos de solución.

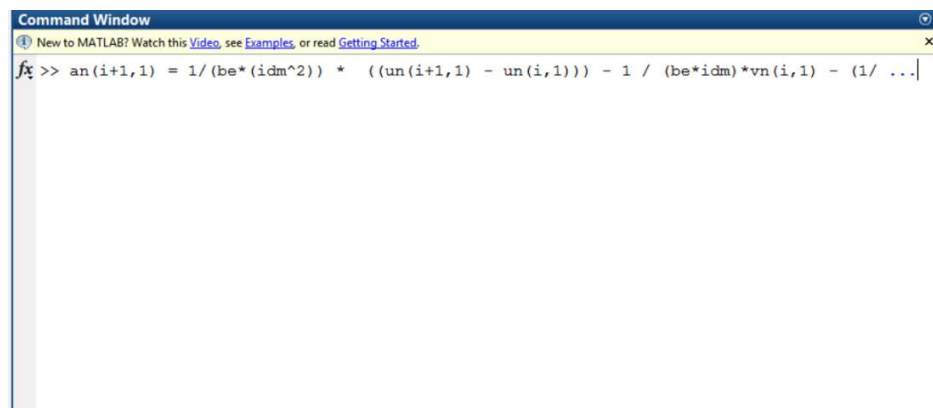


Fig. 1.11. Operaciones complejas en el ambiente MatLab.

Sin embargo, no son las únicas opciones que se pueden desarrollar en este programa, se tienen múltiples opciones para realizar operaciones matriciales, gráficas, programación, generar programas independientes y más.

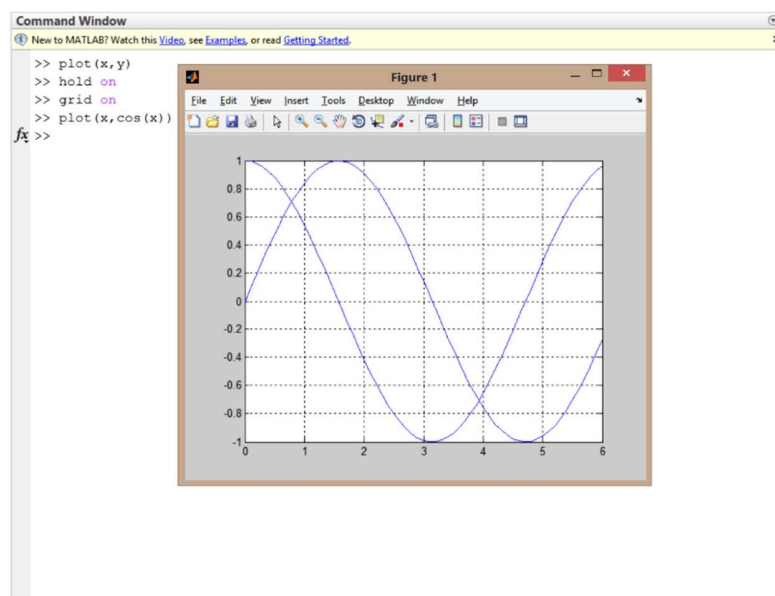


Fig. 1.11. Gráficas bidimensionales en MatLab.

En el programa MatLab se tienen por el momento, casi infinitas opciones de cálculos, herramientas para graficar, posibilidades de programar, herramientas de simulación y más, es un programa muy poderoso el cual está creciendo conforme la tecnología, es por eso que en esta tesis se optó por emplear esta herramienta para generar varias operaciones elementales y “complejas” para determinar la respuesta sísmica en los sistemas de un grado de libertad.

1.5. ARCHIVOS CON EXTENSIÓN “.M”

MatLab posee un lenguaje de programación propio el cual permite crear programas, subprogramas o funciones adicionales para realizar cálculos. Para realizar lo anterior, se emplea el lenguaje – m el cual, no necesita declarar variables iniciales desde el principio.

Los archivos que contienen el lenguaje de programación reconocible por MatLab se les llama archivos – m y poseen la extensión “.m”. En específico se tienen dos divisiones de archivos “.m”, los Scripts y funciones. La estructura fundamental de estos archivos es tener comentarios, instrucción de datos de entrada, instrucción a ejecutar, instrucciones para datos de salida y las instrucciones para terminar los programas.

Así mismo, existen instrucciones elementales de programación como las instrucciones “if-end”, “if-else-if”, “elseif”, “switch-case”, “for”, “while” solo por mencionar algunas. El funcionamiento de dichas instrucciones es totalmente idéntico a las que se tienen en lenguajes de programación como Visual Basic, o C++. Esto no es lo único que permite el lenguaje de programación de MatLab.

Por ejemplo se muestra un subprograma de búsqueda de datos y reemplazo por otra información. El código de programación se puede escribir directamente en un script (archivo .m) y se ejecuta con solo oprimir la tecla “enter”.

```
% PROGRAMA DE BUSQUEDA Y REEMPLAZO DE DATOS
%
clc
suma=0;
b1=length(B1);
R2=B2;
%
for i=1:b1
    if B1(i,1)
        suma=suma+B1(i,1);
        R2(i,1)=R1(suma,1);
    elseif B1(i,1)
        fprintf('prueba 2 \n');
    else
        fprintf('salida \n');
    end
end
%
clc
a=[B1,B2,R2];
```

Otra herramienta poderosa es la manipulación de archivos externos a MatLab, por ejemplo, abrir y dar lectura a datos con extensiones diversas creados por otros programas, así mismo, poder utilizar esos datos o texto para realizar operaciones o utilizar en forma general la información. Además se puede exportar los resultados calculados por los programas o subprogramas generados por el lenguaje de programación y poder leer la nueva información en Excel o block de notas, Word u otro programa comercial.

En el código siguiente se muestra la manipulación de datos creados en MatLab y exportados a Microsoft Excel.

```
% Archivo ejemplo6_7_1.m
%
fid_brasil = fopen('Datos_de_Jugadores.csv','w');
for i = 1:length(Goles);
    fprintf(fid_brasil,'%8s,%5s,%2s,%2s
\n',Nombre(i,:),Apellido(i,:),Goles(i,:),Edad(i,:));
end
fclose(fid_brasil);
```

En específico, MatLab tiene una gran interacción con Microsoft Excel, existe una extensión “.csv” la cual permite crear archivos en block de notas y que estos archivos sean leídos por Excel. Así mismo, se puede abrir o leer en MatLab, grabar información adicional entre los dos programas sin retirar compatibilidad no importando las versiones que contenga la computadora. En forma sencilla, los archivos CSV se convierten en arreglos matriciales

identificados, legibles y modificables por Excel, MatLab o cualquier editor de texto.

Capítulo 2. Programas de lectura, importación de datos y análisis de sistemas de un grado de libertad (MARK_000 y MARK_001)

2.1. ANTECEDENTES

En la ingeniería civil, existe una diversidad de programas comerciales enfocados para realizar el análisis y diseño estructural de distintos sistemas, algunos ejemplos son el Staad Pro, SAP 2000 solo por mencionar algunos. El análisis convencional que realizan estos programas es el elástico lineal, pero con ciertos comandos o instrucciones puede modificarse a otras variantes como el análisis elástico lineal dinámico o análisis inelástico dinámico y más. Uno de los inconvenientes de estos sistemas es realizar el análisis dinámico no lineal o inelástico dada la complejidad matemática. Fundamentalmente existen dos variantes del análisis no lineal, el primero dependiente de los efectos geométricos de la estructura y su configuración deformada, y el segundo depende del comportamiento no lineal de los materiales empleados. Los programas anteriormente mencionados tienen muy pocas capacidades si se quiere realizar el análisis de cualquier sistema dado. El problema consiste en que existen varios modelos históricos que representan distintos comportamientos y se debe ajustar el modelo más congruente a una estructura real. Existen otros programas de investigación que se han desarrollado en los últimos 40 años para generar distintas variantes de no linealidad del

material. Algunos de ellos son “Drain”, “3D Basis” y “Ruamoko” solo por mencionar algunos. En estas herramientas se tienen distintas opciones computacionales para calcular la respuesta estática no lineal o la respuesta dinámica no lineal de cualquier estructura o componente de ella.

Los modelos histéricos definen el comportamiento de un sistema ante la acción repetitiva de ciclos de carga y descarga. El modelo más sencillo es el lineal, pero este comportamiento solo existe bajo condiciones extraordinarias como tener un rango de esfuerzos bajos y por lo tanto deformaciones pequeñas, a veces imperceptibles.

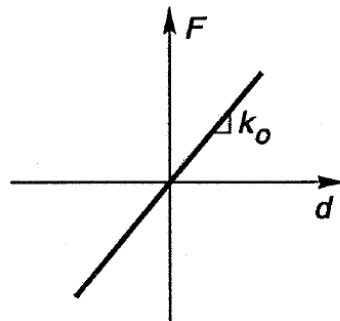


Fig. 2.1 Líneas de histéresis en comportamiento elástico lineal.

El dato elemental para poder utilizar este modelo es la rigidez del sistema, la resistencia no tiene límites así como las deformaciones. Si en la realidad existiera un sistema con estas

características, se convertiría en una estructura frágil, dado que no se tiene rango de deformaciones permanentes.

Como se mencionó anteriormente, con relativa facilidad se puede desarrollar el análisis elástico lineal estático o dinámico en cualquier programa comercial. Para el tema tratado en esta tesis, se decidió generar programas que faciliten el entendimiento del comportamiento de los diversos sistemas estructurales, y así mismo tener herramientas disponibles para poder comparar en diversos tipos de análisis estructural.

2.2. PROGRAMA DE CARGA DE DATOS MARK_000

El primer programa de herramienta es el MARK_000, su objetivo específico es poder importar los diversos datos de aceleración de un registro sísmico (o cualquier variante) y tener disponible la información para realizar cualquier tipo de análisis dinámico. Dado que los sismos se registran habitualmente por los canales norte-sur, este-oeste y vertical, se puede elegir un canal de aceleración para trabajar con él. La herramienta de programación es lenguaje – m y su interfaz de trabajo se desarrolla en MatLab, el registro sísmico se carga en cualquier archivo de block de notas o Microsoft Word o con extensiones arbitrarias como a veces están en la base mexicana de sismos fuertes. Mientras los archivos estén legibles no existe

inconveniente al cargar los datos, en sí es para cualquier archivo universal.

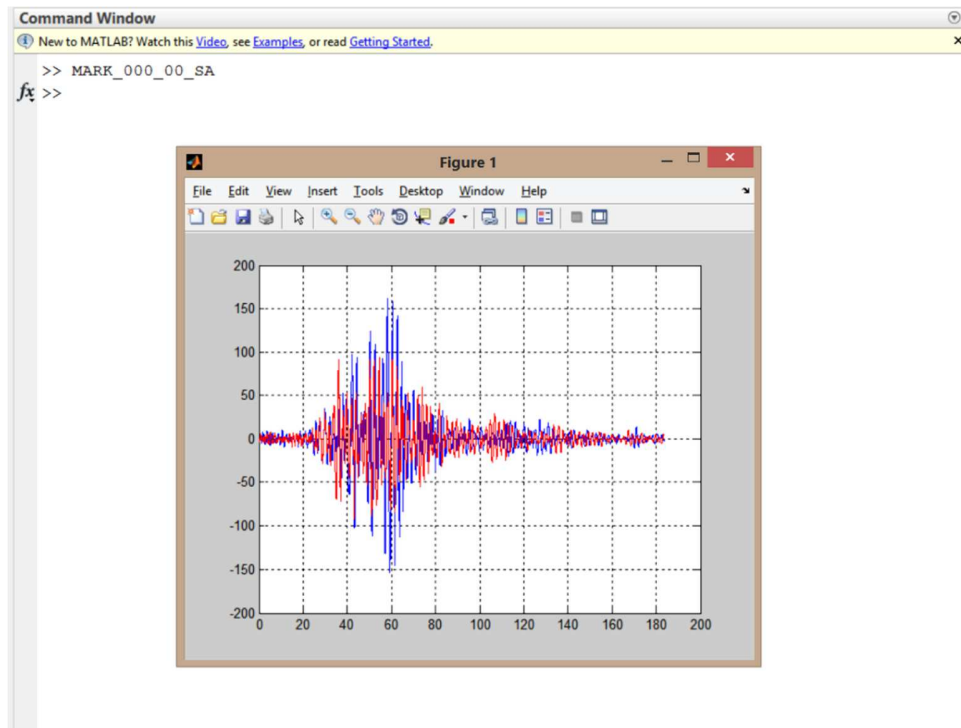


Fig. 2.2 Registro sísmico del terreno.

La primera variante de este programa es cargar el registro de aceleraciones del sismo del 19 de Septiembre de 1985 en la estación SCT. El nombre que se tiene del archivo en la base mexicana de sismos fuertes es "SCT18509.191". El tratamiento del archivo es, leer los encabezados, definirlos como "cadenas" o texto y solo cargar los datos de aceleraciones en los tres canales. El registro

tiene aceleraciones en sentido vertical, este-oeste y norte sur, correspondiendo el primer canal al número uno.

En la gráfica de la figura 2.2 de la página anterior se tiene sobre el eje de las abscisas el tiempo total del registro sísmico, sobre el eje de ordenadas la aceleración en gals y se muestran las variaciones de aceleración en sentido Norte-Sur (rojo) y sentido Este-Oeste (azul).

El único paso necesario es correr el programa en MatLab e internamente se determina con base al registro el intervalo de muestreo, los datos de cada canal se colocan en las variables del programa CH1, CH2 y CH3.

El código en lenguaje – m es el siguiente, y se puede manipular en cualquier editor de texto, no es necesario tener MatLab para poder escribir líneas de comandos adicionales o hacer comentarios.

```
% Este archivo es MARK_000_00_SA.m
% Este archivo lee y selecciona el registro de
aceleraciones del sismo
% del 19 de Septiembre de 1985 registrado en la estación
SCT del DF
%
fid1 = fopen('SCT18509.191','r');
%
% Se leen encabezados
cadenal = fscanf(fid1,'%2432c',1);
% Intervalo de muestreo
idm = fscanf(fid1,'%4g',1);
% segunda parte de encabezado
```

```

cadena2 = fscanf(fid1, '%2276c', 1);
%
% Registro de canales
CH1 = zeros(1,1);
CH2 = zeros(1,1);
CH3 = zeros(1,1);
% Lee registro de canales
while ~ (fid1)
    reg = fscanf(fid1, '%10g', 1);
    CH1 = [CH1;reg];
    reg = fscanf(fid1, '%10g', 1);
    CH2 = [CH2;reg];
    reg = fscanf(fid1, '%10g', 1);
    CH3 = [CH3;reg];
end
    = fscanf(fid1, '%1c', 1);
end
fclose(fid1);
%
% Vector de tiempo
t = zeros(1,1);
for i = 1:(length(CH1)-1)
    t(i+1,1) = t(i,1)+idm;
end
% Gráficas de registros
plot(t,CH2, 'b', t,CH3, 'r'); grid on

```

El código mostrado se puede copiar y pegar en block de notas, un script de MatLab, UltraEdit o similar para empezar a manipular, y posteriormente hacer correr en MatLab. Se debe tener el registro con el nombre exacto y sin hacer alteraciones al archivo de forma interna.

La variante de este programa es cargar los datos del registro de aceleraciones del sismo de El Centro (California) de 1940, que de igual forma tiene algunos encabezados y se tiene indicado el intervalo de muestreo. Por el momento solo se tiene el registro de

aceleraciones del canal Norte-Sur, es así, que el programa se enfoca a cargar un solo registro y colocar en la variable CH1. Sin embargo, si se desea, el código puede modificarse para cargar los canales restantes si se tienen disponibles.

A continuación se muestra el código observando que se tiene distinto número de encabezados y se considera la gravedad terrestre en el sistema inglés, dado que el registro está normalizado.

```
% Este archivo es MARK_000_01_SA.m
% Este archivo lee y selecciona el registro de
aceleraciones del sismo
% de El Centro, California en 1940
%
fid1 = fopen('ELCENTRO.DAT','r');
%
% Se leen encabezados
cadenal = fscanf(fid1,'%97c',1);
% Intervalo de muestreo
idm = fscanf(fid1,'%4g',1);
% segunda parte de encabezado
cadena2 = fscanf(fid1,'%141c',1);
%
% Registro de canal           % Solo se tiene el componente
norte - sur del registro
CH1 = zeros(1,1);
% Lee registro de canales
while ~ feof(fid1)
    reg = fscanf(fid1,'%10g',1);
    CH1 = [CH1;reg];
end
    = fscanf(fid1,'%1c',1);
end
fclose(fid1);
CH1 = CH1 * 386.2205;           % Se ha multiplicado por la
constante de gravedad terrestre, dado que el registro está
normalizado.
%
% Vector de tiempo
```

```

t = zeros(1,1);
for i = 1:(length(CH1)-1)
    t(i+1,1) = t(i,1)+idm;
end
% Gráficas de registros
plot(t,CH1,'b'); grid on

```

Al ejecutar el programa en MatLab se tiene el siguiente resultado, se muestra el registro del sismo de El Centro.

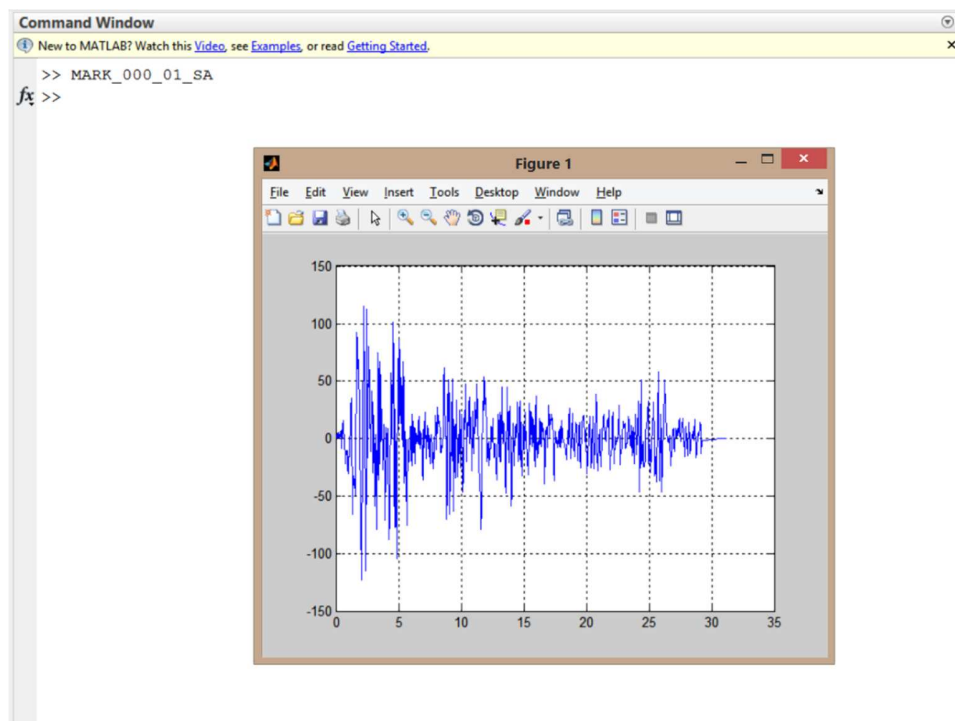


Fig. 2.3 Registro sísmico del terreno.

Al momento de concluir la ejecución, todos los datos disponibles como encabezados, tiempo, y registro de aceleraciones están disponibles para trabajar o guardar en distintos formatos.

Todo el tiempo se manipula esa información en MatLab de forma interna y las gráficas solo muestran de forma visible los registros.

2.3. EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LA RESPUESTA DINÁMICA Y MÉTODO DE NEWMARK PARA ANÁLISIS ELÁSTICO LINEAL

Para poder obtener la respuesta dinámica de los sistemas, se puede hallar la solución por varios métodos distintos de ecuaciones diferenciales, existen soluciones exactas mientras la excitación sea una función armónica, periódica y/o constante. Sin embargo los registros de aceleraciones sísmicas no tienen las características antes descritas y es necesario plantear soluciones aproximadas para poder determinar la respuesta. Algunos de esos métodos son la interpolación lineal de la excitación, la diferencia central, el método de Newmark, método de Wilson, etc. Estos métodos dependen de los intervalos de muestreo, y su convergencia es muy variable comparando un método contra otro.

El método de Newmark se desarrolló a finales de la década de los años cincuenta como una familia de métodos de análisis paso a paso en el tiempo. Dos de estos métodos son el de aceleración promedio y la aceleración lineal, los cuales proveen la respuesta en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración en el sistema. El método de aceleración lineal utiliza como principales constantes

los valores de gama igual a un medio y de beta igual a un sexto, se empleará este método debido a su convergencia comparativa entre la solución exacta y la aproximada de una fuerza con variación sinusoidal. En forma adicional el método es estable si se cumple la siguiente igualdad.

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{\gamma - 2\beta}} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Para el método de aceleración lineal el método posee estabilidad si se sustituyen las constantes obteniendo lo siguiente.

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq 0.551 \quad \text{Ec. 2.2}$$

En la siguiente figura se tienen mostradas las respuestas calculadas con diversos métodos numéricos ante el efecto de vibración libre, así mismo se compara contra la solución teórica calculada mediante métodos de solución para ecuaciones diferenciales.

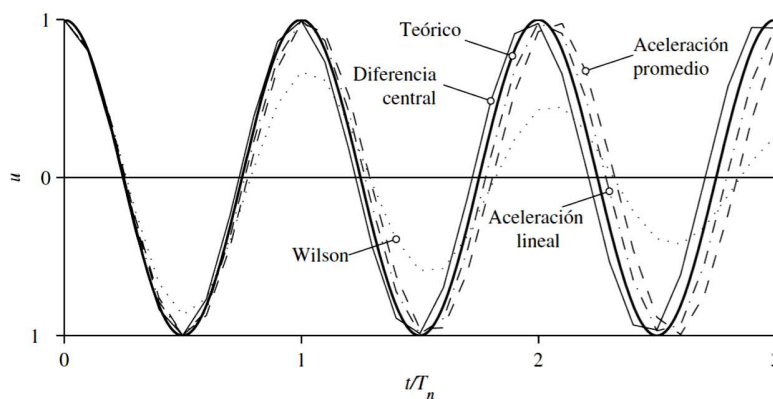


Fig. 2.4 Solución de vibración libre con 4 métodos numéricos.

La siguiente tabla provee el procedimiento para generar la evaluación numérica de la respuesta mediante el método de Newmark, el procedimiento es iterativo y se necesita el análisis de respuesta en el tiempo anterior al analizado.

MÉTODO DE NEWMARK: SISTEMAS LINEALES

Casos especiales

- (1) Método de la aceleración promedio constante ($\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{4}$)
 (2) Método de la aceleración lineal ($\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{6}$)

1.0 Cálculos iniciales

$$1.1 \quad \ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m}$$

1.2 Seleccione Δt .

$$1.3 \quad a_1 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}m + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}c; \quad a_2 = \frac{1}{\beta\Delta t}m + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right)c; \quad y$$

$$a_3 = \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)m + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)c.$$

$$1.4 \quad \hat{k} = k + a_1.$$

2.0 Cálculos para cada paso de tiempo, $i = 0, 1, 2, \dots$

$$2.1 \quad \hat{p}_{i+1} = p_{i+1} + a_1 u_i + a_2 \dot{u}_i + a_3 \ddot{u}_i.$$

$$2.2 \quad u_{i+1} = \frac{\hat{p}_{i+1}}{\hat{k}}.$$

$$2.3 \quad \dot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}(u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right)\dot{u}_i + \Delta t\left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{u}_i.$$

$$2.4 \quad \ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}(u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{u}_i - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\ddot{u}_i.$$

3.0 Repetición para el siguiente paso de tiempo. Reemplace i por $i + 1$ y aplique los pasos 2.1 a 2.4 para el siguiente paso de tiempo.

Tabla. 2.1

Para poder emplear este método es común realizar los cálculos en tablas de cálculo como las provistas por Microsoft Excel. Pero existe el inconveniente de que surge información innecesaria que ocuparía espacio por la capacidad de la computadora, para ello es

todavía mejor generar un programa que emplee solo la cantidad de información necesaria y manipular dicha información por ejemplo en el ambiente de MatLab.

Características del sistema				Método de Newmark			Incremento de Periodo				
m=	1.0000			γ =	1/2		Δt_n =	0.075			
k=	39			β =	1/6		N paso	1			
c=	0.6283										
ζ	0.05			Condiciones iniciales							
c crit	12.57			u0=	0		k^=	658.3280			
Tn=	0.075 s			v0=	0		a1=	618.8496			
ω_n =	84 rad/s			P0=	0		a2 =	61.2566			
							a3 =	2.0314			
							ü0=	0			
				Intervalo de Muest	0.1		Δt =	0.1			
N datos	ti	pi	pic	ui	vi	üi	ti	ui	vi	üi	
1	0.00	0.00	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	
2	0.10	5	5.0	0.0076	0.2278	4.5570	0.10	0.0076	0.2278	4.5570	
3	0.20	8.6603	36.6	0.0556	0.7553	5.9924	0.20	0.0556	0.7553	5.9924	
4	0.30	10	102.8	0.1562	1.2087	3.0745	0.30	0.1562	1.2087	3.0745	
5	0.40	8.6603	185.6	0.2819	1.2012	-3.2245	0.40	0.2819	1.2012	-3.2245	
6	0.50	5	246.5	0.3744	0.5341	-10.1176	0.50	0.3744	0.5341	-10.1176	
7	0.60	0	243.9	0.3705	-0.6817	-14.1966	0.60	0.3705	-0.6817	-14.1966	

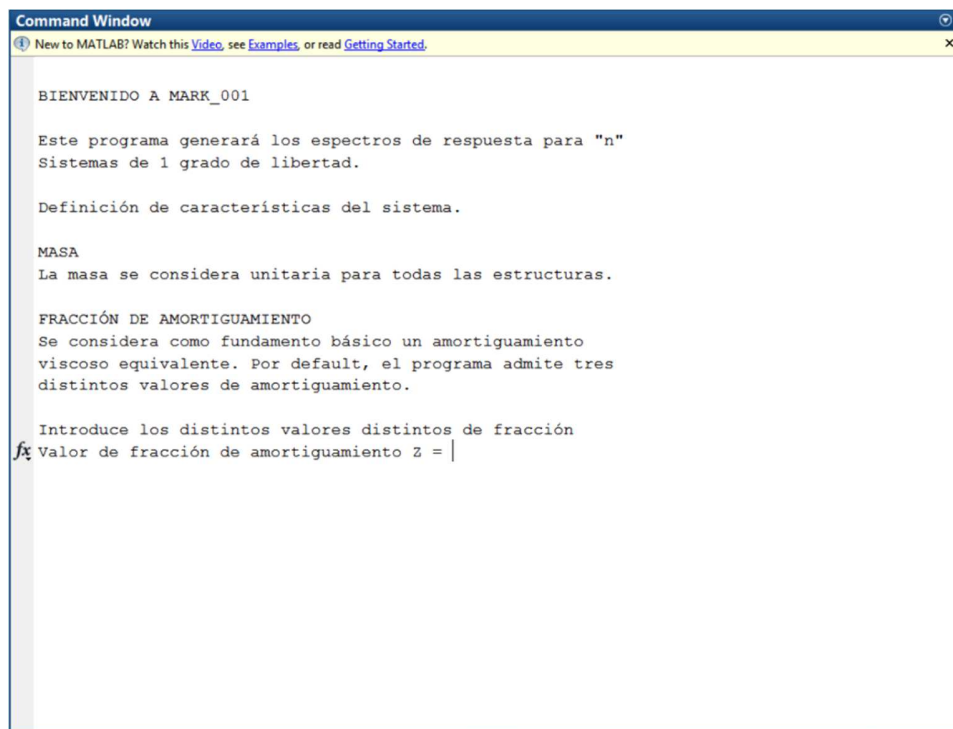
Tabla. 2.2

Mediante este procedimiento, el comportamiento del sistema se mantiene en el rango elástico lineal. No importa si se tiene empleado concreto o acero como material estructural, a final de cuenta, las deformaciones serán proporcionales a las fuerzas de la excitación.

2.4. PROGRAMA DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD MARK_001

Se ha desarrollado una herramienta de análisis lineal paso a paso de sistemas de un grado de libertad para determinar la respuesta de una estructura. El método de solución para cualquier excitación es el método de Newmark considerando la variante de aceleración lineal y los datos necesarios son la excitación aplicada en la base, el intervalo de muestreo y las propiedades dinámicas del sistema a analizar.

Al ejecutar el programa se tiene la siguiente ventana



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.

BIENVENIDO A MARK_001

Este programa generará los espectros de respuesta para "n"
Sistemas de 1 grado de libertad.

Definición de características del sistema.

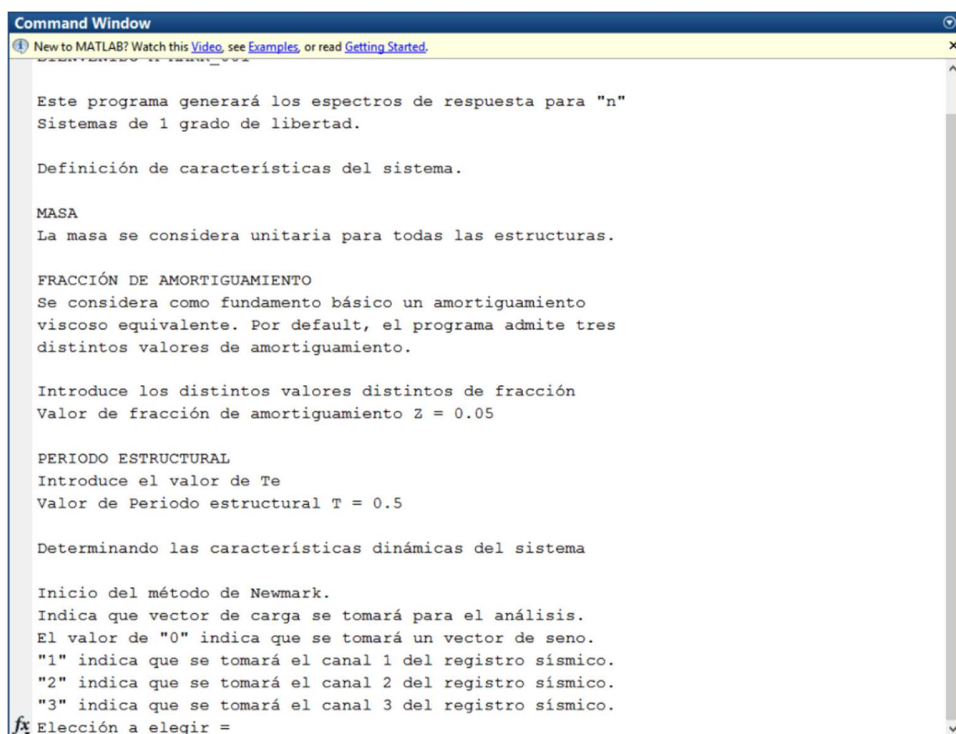
MASA
La masa se considera unitaria para todas las estructuras.

FRACCIÓN DE AMORTIGUAMIENTO
Se considera como fundamento básico un amortiguamiento
viscoso equivalente. Por default, el programa admite tres
distintos valores de amortiguamiento.

Introduce los distintos valores distintos de fracción
fx Valor de fracción de amortiguamiento z = |
```

Fig. 2.5 Ejecución de Programa MARK_001.

La masa que toma el sistema es unitaria para generar el análisis, el siguiente dato necesario que se solicita es la fracción de amortiguamiento supuesta en el sistema. Posteriormente se introduce el periodo natural de la estructura y se termina por calcular la rigidez del mismo.



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.

Este programa generará los espectros de respuesta para "n"
Sistemas de 1 grado de libertad.

Definición de características del sistema.

MASA
La masa se considera unitaria para todas las estructuras.

FRACCIÓN DE AMORTIGUAMIENTO
Se considera como fundamento básico un amortiguamiento
viscoso equivalente. Por default, el programa admite tres
distintos valores de amortiguamiento.

Introduce los distintos valores distintos de fracción
Valor de fracción de amortiguamiento Z = 0.05

PERIODO ESTRUCTURAL
Introduce el valor de Te
Valor de Periodo estructural T = 0.5

Determinando las características dinámicas del sistema

Inicio del método de Newmark.
Indica que vector de carga se tomará para el análisis.
El valor de "0" indica que se tomará un vector de seno.
"1" indica que se tomará el canal 1 del registro sísmico.
"2" indica que se tomará el canal 2 del registro sísmico.
"3" indica que se tomará el canal 3 del registro sísmico.
fx Elección a elegir =
```

Fig. 2.6 Introducción de periodo de vibrar de la estructura.

Hasta aquí están dadas las características de la estructura, el paso siguiente es elegir la información dada por la excitación. En forma predeterminada se tiene en un canal llamado "0" una excitación variable en el tiempo de tipo sinusoidal que sirve para mostrar un ejemplo rápido y verificar los resultados si se realiza a

mano los cálculos. Solo existen 4 canales disponibles y estos serán manipulables si antes se ejecutó el programa MARK_000_00 o MARK_000_01, los cuales leen y cargan la información de aceleración de los sismos de la Ciudad de México en 1985 y El Centro, California en 1940.

La ejecución del programa de análisis paso a paso termina con la elección de la excitación o canal a cargar, finalmente se muestra la gráfica de respuesta dinámica en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración.

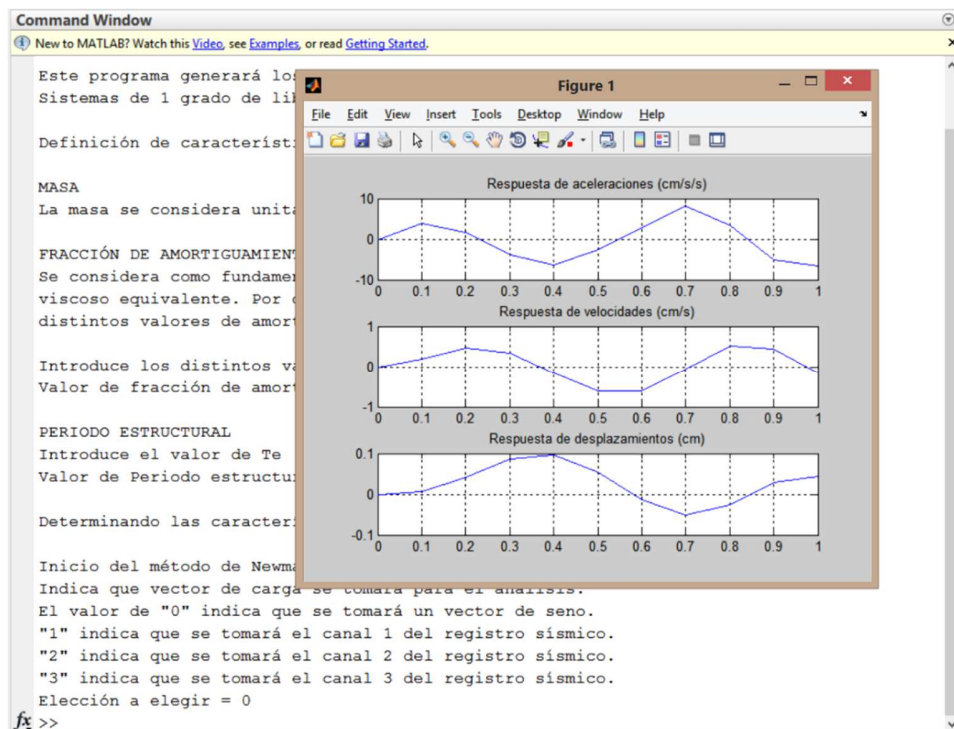


Fig. 2.7 Respuesta paso a paso de la estructura analizada.

Toda la información desarrollada y obtenida mediante el método de Newmark, así como la respuesta en forma de datos estará disponible inmediatamente en MatLab y se pueden copiar a cualquier programa, la información no se guarda, los datos se borran si se introduce un nuevo sistema, pero se puede generar el código adicional para exportar la información. El programa generado MARK_001 toma en cuenta el comportamiento elástico lineal de los sistemas y su desarrollo esta generado en lenguaje – m. A continuación se presenta el código en el correspondiente lenguaje de programación.

```
% Ing. Marcos Alfredo León Porquillo.  
%  
% Este programa desarrolla y calcula la respuesta para  
sistemas de un  
% grado de libertad. Como elementos teóricos básicos, se  
supone un  
% comportamiento elástico lineal, la masas en el sistema es  
unitaria y el  
% amortiguamiento se toma como viscoso equivalente con  
determinado valor  
% definido por el usuario.  
% Para evaluar la respuesta de la estructura a través del  
tiempo se emplea  
% el método de Newmark, obteniendo los valores pico se  
agrupan en un vector  
% y se procede con la construcción de la gráfica de la  
respuesta ante  
% determinada excitación.  
% Se toma el método de aceleración lineal.  
% Este programa puede evaluar la respuesta empleando 3  
valores distintos de  
% fracción de amortiguamiento.  
%
```

```

% Variables necesarias:
%
% M      Masa del sistema.
% K      Rigidez del sistema.
% C      Amortiguamiento del sistema (Se toma como viscoso
equivalente).
% Ccr    Amortiguamiento crítico del sistema.
% Z      Fracción de amortiguamiento crítico.
% ga     valor gamma para el método de aceleración lineal.
% be     valor beta para el método de aceleración lineal.
%
clc
fprintf ('\n');
fprintf ('BIENVENIDO A MARK_001 \n');
fprintf ('\n');
fprintf ('Este programa generará los espectros de respuesta
para "n" \n');
fprintf ('Sistemas de 1 grado de libertad. \n');
fprintf ('\n');
fprintf ('Definición de características del sistema. \n');
fprintf ('\n');
fprintf ('MASA \n');
fprintf ('La masa se considera unitaria para todas las
estructuras. \n');
M = 1;
% Fracción de amortiguamiento
% Introducción de valores de amortiguamiento
fprintf ('\n');
fprintf ('FRACCIÓN DE AMORTIGUAMIENTO \n');
fprintf ('Se considera como fundamento básico un
amortiguamiento \n');
fprintf ('viscoso equivalente. Por default, el programa
admite tres \n');
fprintf ('distintos valores de amortiguamiento. \n');
fprintf ('\n');
fprintf ('Introduce los distintos valores distintos de
fracción \n');
Z = input('Valor de fracción de amortiguamiento Z = ');
% Método de aceleración lineal de Newmark: Sistemas
lineales.
ga = 1/2;    be = 1/6;
fprintf ('\n');
fprintf ('PERIODO ESTRUCTURAL \n');
fprintf ('Introduce el valor de Te \n');
T = input('Valor de Periodo estructural T = ');
fprintf ('\n');

```

```

fprintf ('Determinando las características dinámicas del
sistema \n');
fprintf ('\n');
% frecuencia natural del sistema.
wn = T\ (2*pi);
% rigidez lateral del sistema.
K = wn^2; % la masa se considera unitaria.
% amortiguamiento crítico en el sistema "Ccr".
Ccr = 2*M*wn;
% amortiguamiento efectivo en el sistema "C".
C = Z*Ccr;
%
fprintf ('Inicio del método de Newmark. \n');
fprintf ('Indica que vector de carga se tomará para el
análisis. \n');
fprintf ('El valor de "0" indica que se tomará un vector de
seno. \n');
fprintf ('"1" indica que se tomará el canal 1 del registro
sísmico. \n');
fprintf ('"2" indica que se tomará el canal 2 del registro
sísmico. \n');
fprintf ('"3" indica que se tomará el canal 3 del registro
sísmico. \n');
%
EL = input('Elección a elegir = ');
if
    P = [0.000;5.000;8.6603;10.000;8.6603;5.000;0;0;0;0;0];
    t = (0:0.1:1)';
    idm = 0.1;
elseif EL
    P = -CH1;
elseif EL
    P = -CH2;
elseif EL
    P = -CH3;
else
    fprintf ('No se aceptan códigos distintos de los
indicados. \n');
    return
end
% Cálculos iniciales.
a = zeros(length(P),1);
v = zeros(length(P),1);
u = zeros(length(P),1);
%
a(1,1) = ( P(1,1)-C*v(1,1)-K*u(1,1) ) / M;

```

```

%
a1 = M/(be*idm^2) + ga*C/(be*idm);
a2 = M/(be*idm) + (ga/be-1)*C;
a3 = (1/(2*be)-1)*M + idm*(ga/(2*be)-1)*C;
kc = K + a1;
%
% Cálculos para cada paso de tiempo.
Pc = zeros(length(P)-1,1);
%
for j = 1:(length(P)-1)
    Pc(j+1,1) = P(j+1,1) + a1*u(j,1)+a2*v(j,1)+a3*a(j,1);
    u(j+1,1) = Pc(j+1)/kc;
    v(j+1,1) = ga/(be*idm)*(u(j+1,1)-u(j,1))+(1-
ga/be)*v(j,1)+idm*(1-ga/(2*be))*a(j,1);

end
%
subplot(3,1,1)
plot(t,a);
title('Respuesta de aceleraciones (cm/s/s) o (plg/s/s)')
grid on
% subplot(3,2,2)
% plot(u,M*(a+CH2));
% title('Fuerzas de inercia (Kgf)')
% grid on
subplot(3,1,2)
plot(t,v);
title('Respuesta de velocidades (cm/s) o (plg/s)')
grid on
%subplot(3,2,4)
%plot(u,C*v);
%title('Fuerzas de Amortiguamiento (Kgf)')
%grid on
subplot(3,1,3)
plot(t,u);
title('Respuesta de desplazamientos (cm) o (plg)')
grid on
%subplot(3,2,6)
%plot(u,K*u);
%title('Fuerzas Restitutivas (Kgf)')
%grid on

```

2.5. COMPORTAMIENTO DE FUERZAS CONTRA DESPLAZAMIENTO

Una vez terminado el programa MARK_001 se pueden generar las gráficas que muestren el comportamiento o variación de las fuerzas de rigidez, de amortiguamiento o de inercia del sistema. Una forma sencilla de representar la variación de la respuesta desarrollada en el sistema es graficar las fuerzas restauradoras contra el desplazamiento relativo respecto a la base, sin embargo también se puede graficar la fuerza de amortiguamiento contra velocidad.

Se procede a mostrar primero la variación de las fuerzas de rigidez con los desplazamientos del edificio, como referencia se tiene estudiado un sistema de un grado de libertad considerando el análisis elástico lineal. El sismo considerado es el del 19 de Septiembre de 1985 en la ciudad de México en dirección Este – Oeste y la estación S.C.T., el sistema tiene un periodo de 1.5 segundos y una fracción de amortiguamiento de cinco por ciento. En el eje horizontal se tiene los desplazamientos y en el eje vertical las fuerzas restauradoras o de rigidez del sistema.

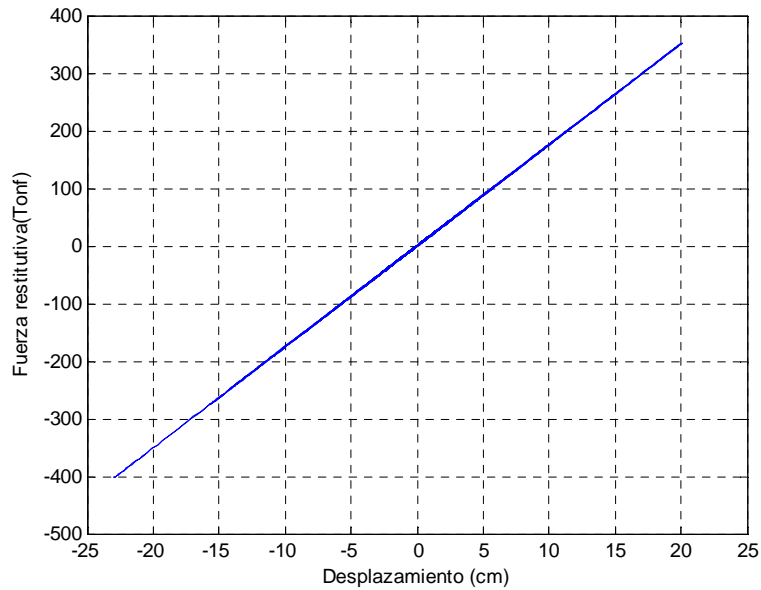


Fig. 2.8. Gráfica de desplazamientos contra fuerzas de rigidez.

Como era de esperarse, la variación de las fuerzas son proporcionales a la deformación, el programa MARK_001 no utiliza otras consideraciones como son la degradación de la rigidez o comportamiento inelástico.

La siguiente figura, muestra la variación de las fuerzas de amortiguamiento relacionadas al desplazamiento del sistema en el grado de libertad analizado. El eje de abscisas mide los desplazamientos, el eje de las ordenadas indica las fuerzas de amortiguamiento.

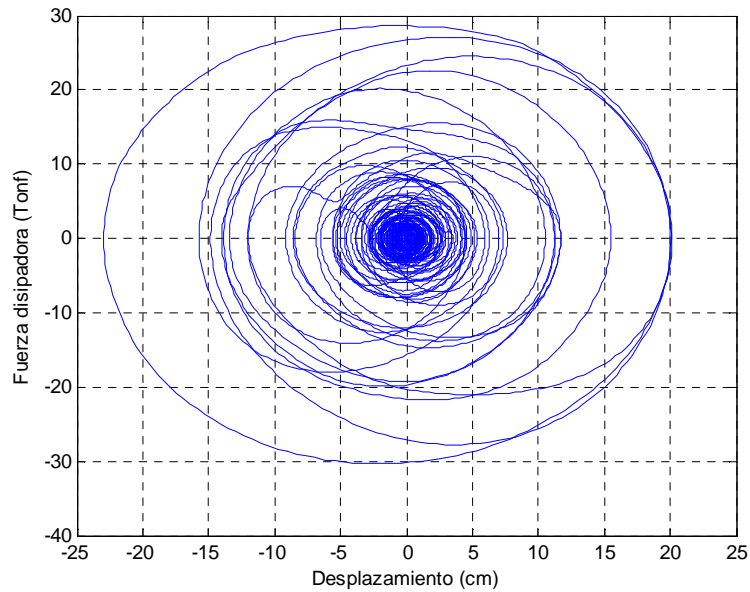


Fig. 2.9. Gráfica de desplazamientos contra fuerzas de amortiguamiento.

En este caso, al relacionar las fuerzas de amortiguamiento contra desplazamiento se puede observar que no se tienen proporciones directas o una relación en específico. Realizando la comparación entre las fuerzas de rigidez y de amortiguamiento, se tiene una proporción de diez veces a uno, lo que indica que el amortiguamiento es bajo en su contribución a la respuesta del sistema.

Finalmente la última gráfica muestra la variación de las fuerzas de “inercia” relativa a la base relacionadas al desplazamiento del sistema con el grado de libertad analizado. El eje de las abscisas

mide los desplazamientos, el eje de las ordenadas indica las fuerzas de inercia.

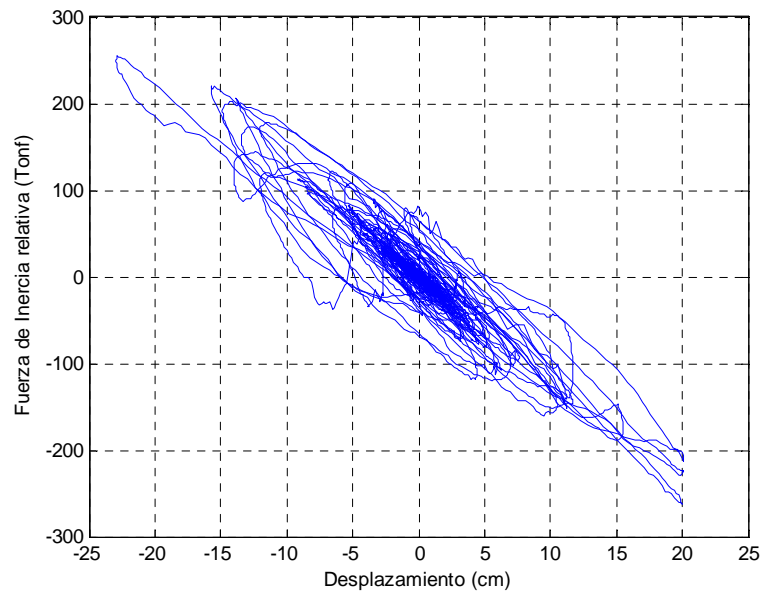


Fig. 2.10. Gráfica de desplazamientos contra fuerzas de inercia.

Las fuerzas de inercia de la figura anterior solo se relacionan con la aceleración relativa del sistema, además, se puede generar una gráfica adicional que considere los desplazamientos y la aceleración total del sistema. Para la aceleración total se toma en cuenta la aceleración del terreno más la aceleración calculada para el grado de libertad analizado. Dicha gráfica se presenta a continuación.

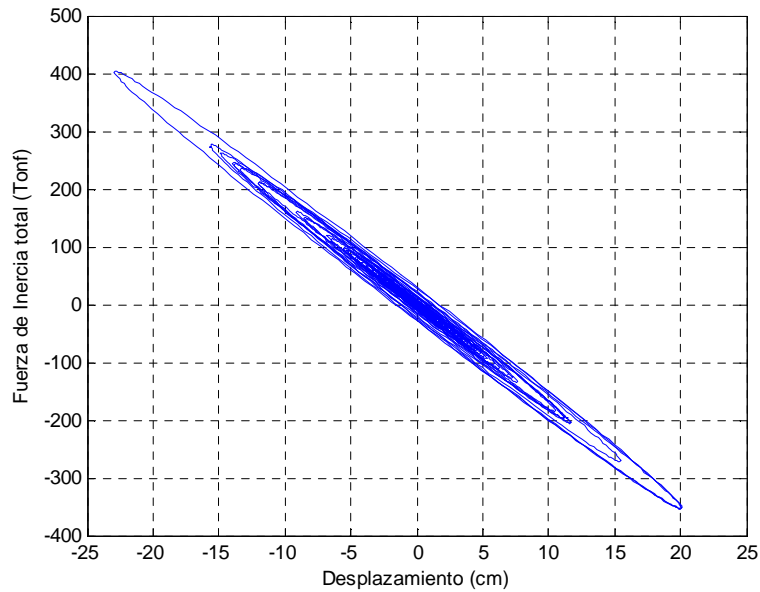


Fig. 2.11. Gráfica de desplazamientos contra fuerzas de inercia considerando la aceleración total del sistema.

Toda la información generada por el programa MARK_001 se puede copiar, exportar y guardar en block de notas, Excel o en cualquier otro formato. La información de salida de estos programas está disponible mientras MatLab siga en operación y no se ejecute alguna otra herramienta, como ejemplo, se puede determinar los valores máximos de desplazamiento o velocidades, además del tiempo en el que ocurre dicha respuesta.

Capítulo 3. Programa de análisis inelástico de sistemas de un grado de libertad (MARK_003)

3.1. MODELOS DE HISTÉRESIS, FUERZA DE FLUENCIA Y DUCTILIDAD DEL SISTEMA

El análisis más sencillo por considerar es el elástico lineal, el inconveniente radica en que no se toman características adicionales como la fluencia de la sección o plastificación del material, sin embargo es el método clásico para determinar los desplazamientos de una estructura convencional.

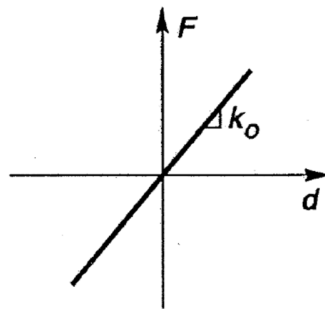


Fig. 3.1 Comportamiento elástico lineal.

El problema de este tipo de análisis es que desconoce el comportamiento del material, elemento o estructura en términos de respuesta dinámica si ésta llegara a desarrollar grandes deformaciones. Para eso se tienen como herramientas las líneas de histéresis, que como se mencionó en el capítulo anterior, representa el comportamiento ante ciclos de carga y descarga de cualquier elemento estudiado.

Existe una diversidad de modelos propuestos por investigadores, algunos de esos modelos de comportamiento se representan gráficamente en las siguientes figuras.

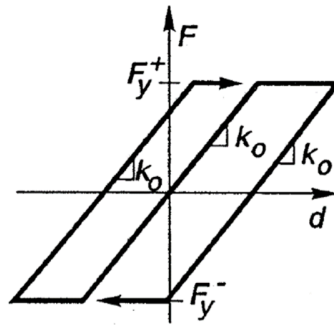


Fig. 3.2 Modelo histerético elasto-plástico.

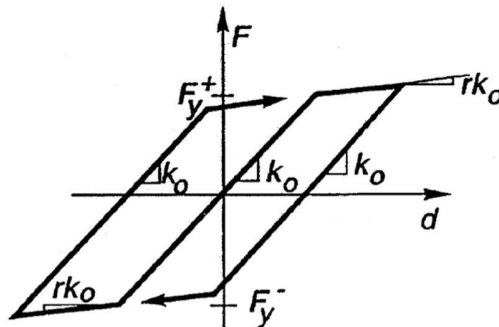


Fig. 3.3 Modelo histerético con rigidez degradada (bilineal).

Los modelos mostrados en la figura 3.2 y 3.3 son los más sencillos para realizar el análisis paso a paso después del análisis lineal clásico. Los datos mínimos necesarios son la rigidez inicial del sistema analizado y la fuerza de fluencia alcanzada por el propio sistema. Para realizar el análisis ya se debe tener cierto sistema con

características bien definidas, por ejemplo, el material escogido, la sección transversal del elemento o geometría de la estructura.

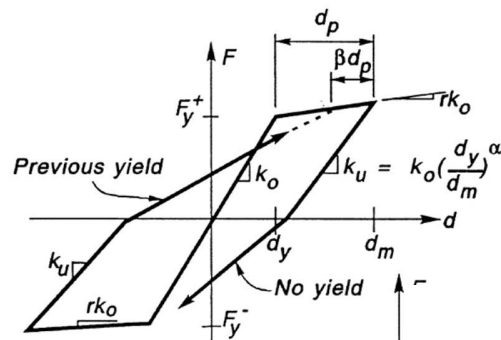


Fig. 3.4 Modelo histerético de Takeda (modificado).

Los modelos mostrados en las figuras anteriores solo son algunos ejemplos de los modelos empleados, así mismo, cada modelo se relaciona con cierto comportamiento específico, es decir, la histéresis de una conexión de acero atornillada no será lo mismo que un elemento de concreto probado ante fuerza cortante, por lo tanto, dichas líneas de comportamiento se necesitan identificar y verificar las características esenciales como fluencia y rigidez antes y después de haber cargado al elemento o estructura estudiada. En la siguiente figura se muestra el comportamiento histerético de un elemento probado con acero como material fundamental.

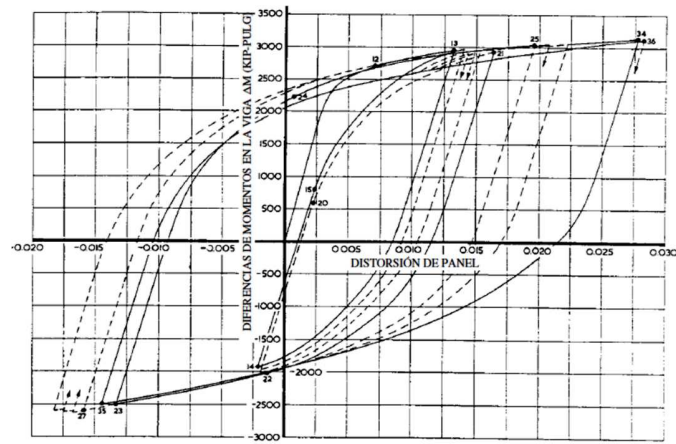


Fig. 3.5 Modelo histerético de un elemento de acero.

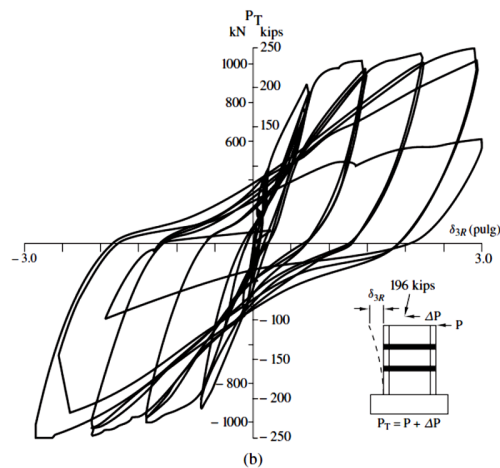


Fig. 3.6 Modelo histerético de un elemento de concreto.

La fluencia es la fuerza máxima que un elemento o sistema puede soportar antes de incurrir en deformaciones permanentes, en el acero empleado como material estructural, este valor se encuentra aledaño al límite proporcional y por facilidad se consideran como la misma posición en una curva carga deformación.

El concreto simple no tiene un punto de fluencia en específico, su curva fuerza deformación o en otra forma, esfuerzo deformación se asemeja a una parábola, y su rigidez va cambiando conforme la deformación alcanzada. Desde el punto de vista de la sección, elemento o sistema estructural de acero o concreto reforzado se puede idealizar la existencia de un punto marcado como valor de fluencia, inmediatamente relacionado a una deformación denominada de fluencia. Esta propiedad es fundamental, todos los sistemas existentes poseen esta característica y nos marcara la frontera entre un comportamiento “elástico lineal” o variantes conforme la carga.

La ductilidad es una propiedad que todos los sistemas deberían poseer, esto consiste en permitir que los sistemas se deformen sin llegar a la falla. En otras palabras, el esfuerzo, o fuerza desarrollada no incrementará, pero si lo harán las deformaciones. En la forma sencilla, esta propiedad en su valor numérico se obtiene mediante el cociente de la máxima deformación alcanzada y la deformación de fluencia. En el siguiente sistema se ejemplifica y se calcula la ductilidad.

El desplazamiento máximo desarrollado es de 1.6 cm, la deformación de fluencia tiene un valor de 0.18 cm. Realizando el cociente entre estos dos valores se obtiene un valor aproximado de 8.89. Este valor es adimensional, por lo mismo de que no

necesariamente se miden desplazamientos de traslación, también se puede relacionar la ductilidad a deformaciones rotacionales.

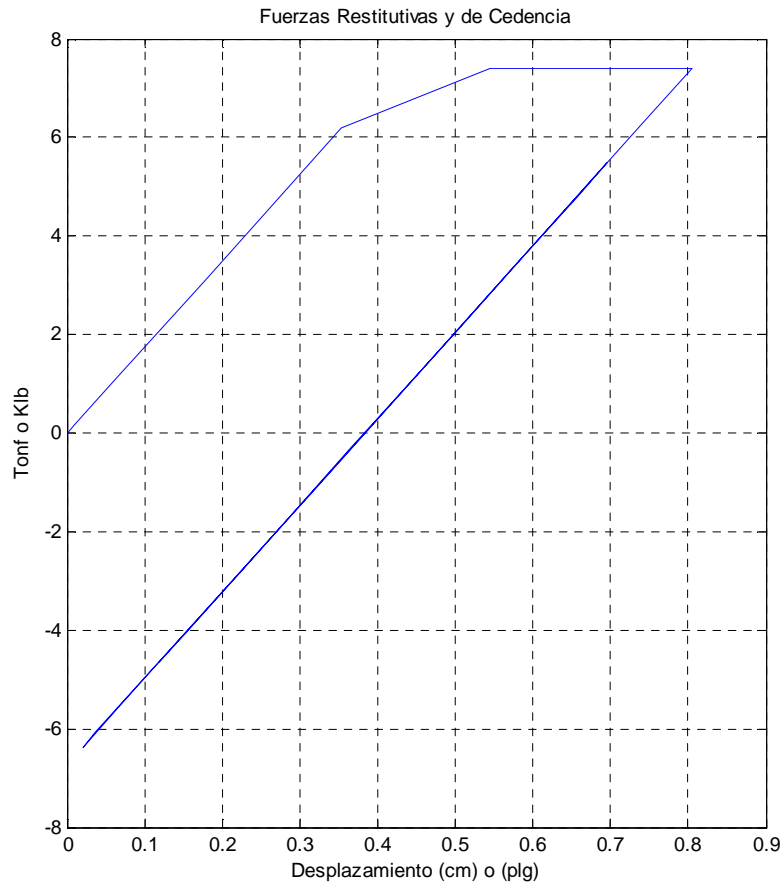


Fig. 3.6 Modelo histérico bilineal.

Mientras más alta sea la ductilidad del sistema analizado, más capacidad se tendrá de obtener deformaciones inelásticas, obteniendo con ella capacidad de deformarse considerablemente antes de fallar.

3.2. EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LA RESPUESTA DINÁMICA Y MÉTODO DE NEWMARK PARA ANÁLISIS INELÁSTICO

El método de integral de Duhamel o integración numérica no es válida si es que se desea determinar la respuesta dinámica de los sistemas, la razón, es que su fundamento principal es la superposición de efectos empleada para los análisis elásticos lineales.

La ecuación de movimiento varía con respecto a los sistemas lineales en la componente de rigidez. Ahora este valor depende de la deformación que se tenga en el sistema. La ecuación de movimiento adopta la siguiente forma.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u) = p(t) \quad \text{Ec. 3.1}$$

Para resolver esta ecuación diferencial, se tienen diversos métodos numéricos de análisis dinámico paso a paso los cuales determinan a cada instante la respuesta del sistema. En los sistemas no lineales no es posible generar la superposición de efectos, es necesario tener como información el desplazamiento en un instante de tiempo anterior. El método empleado para determinar la respuesta es el de Newmark, pero adicionalmente se tiene que determinar la rigidez instantánea para recalcular esta propiedad, es

así que como herramienta adicional se emplea el método de iteración de Newton-Raphson. En la siguiente tabla se muestra el procedimiento paso por paso para determinar la respuesta instantánea. Este procedimiento se puede generar en una hoja de cálculo para poder agilizar el método, sin embargo, surgen datos que no tienen utilidad. Para ello se utilizará la programación en MatLab para hacer más eficiente el procedimiento. Con el Método de Newmark se toman en cuenta varios datos fundamentales, las condiciones iniciales o excitación impuesta en el sistema, la rigidez inicial, la masa, el amortiguamiento y el valor de fuerza de fluencia provista por la sección que se emplea además del material constitutivo.

TABLA 5.7.1 MÉTODO DE NEWMARK: SISTEMAS NO LINEALES

Casos especiales

(1) Método de la aceleración promedio ($\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{4}$)(2) Método de la aceleración lineal ($\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{6}$)

1.0 Cálculos iniciales

1.1 Determinación del estado: $(f_S)_0$ y $(k_T)_0$.

$$1.2 \quad \ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - (f_S)_0}{m}$$

1.3 Seleccione Δt .

$$1.4 \quad a_1 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}m + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}c; \quad a_2 = \frac{1}{\beta\Delta t}m + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right)c; \quad y$$

$$a_3 = \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)c.$$

2.0 Cálculos para cada instante de tiempo, $i = 0, 1, 2, \dots$ 2.1 Inicialice $j = 1, u_{i+1}^{(j)} = u_i, (f_S)_{i+1}^{(j)} = (f_S)_i, y (k_T)_{i+1}^{(j)} = (k_T)_i$.

$$2.2 \quad \hat{p}_{i+1} = p_{i+1} + a_1 u_i + a_2 \dot{u}_i + a_3 \ddot{u}_i.$$

3.0 Para cada iteración, $j = 1, 2, 3 \dots$

$$3.1 \quad \hat{R}_{i+1}^{(j)} = \hat{p}_{i+1} - (f_S)_{i+1}^{(j)} - a_1 u_{i+1}^{(j)}.$$

3.2 Verifique la convergencia; si los criterios de aceptación no se cumplen, realice los pasos 3.3 a 3.7, de lo contrario, omita estos pasos y vaya al paso 4.0.

$$3.3 \quad (\hat{k}_T)_{i+1}^{(j)} = (k_T)_{i+1}^{(j)} + a_1.$$

$$3.4 \quad \Delta u^{(j)} = \hat{R}_{i+1}^{(j)} \div (\hat{k}_T)_{i+1}^{(j)}.$$

$$3.5 \quad u_{i+1}^{(j+1)} = u_{i+1}^{(j)} + \Delta u^{(j)}.$$

3.6 Determinación del estado: $(f_S)_{i+1}^{(j+1)}$ y $(k_T)_{i+1}^{(j+1)}$.Reemplace j por $j + 1$ y repita los pasos 3.1 a 3.6; indique el valor final como u_{i+1} .

4.0 Cálculos de la velocidad y la aceleración

$$4.1 \quad \dot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}(u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right)\dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{u}_i.$$

$$4.2 \quad \ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}(u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{u}_i - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\ddot{u}_i.$$

5.0 Repetición para el siguiente paso. Reemplace i por $i + 1$ y aplique los pasos 2.0 a 4.0 para el siguiente paso de tiempo.

Tabla. 3.1

3.3. PROGRAMA DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD MARK_003

En los aisladores de base es común desarrollar un comportamiento no lineal al momento de inducir movimientos por

sismo, a continuación se muestra una herramienta que determina la respuesta del sistema estructural para poder proponer distintas configuraciones.

La herramienta computacional desarrollada se basa en el Método de Newmark para sistemas no lineales en la modalidad de aceleración lineal. Este método se transformó a lenguaje “m” para poder manipular en MatLab y poder obtener resultados de forma más práctica. El programa generado se llama MARK_003 y solo sirve para realizar el análisis no lineal de sistemas de un grado de libertad considerando cualquier excitación en la base. En forma adicional el modelo constitutivo empleado por el programa para los sistemas aislantes es el elastoplástico, aunque con una variante podría desarrollarse para el modelo bilineal.

Es indispensable tener las características dinámicas del sistema, en forma adicional un valor de fuerza de fluencia esperada y la excitación del sistema. El programa generará la respuesta dinámica considerando condiciones iniciales nulas, sin embargo también podría tomarse en cuenta el desplazamiento o velocidad inicial impuesta en el sistema. El ambiente de trabajo es muy similar al programa MARK_001, lo cual facilita la introducción de datos, y ejecutando el programa en MatLab se genera la siguiente ventana.

```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.

BIENVENIDO A MARK_006

Este programa genera la respuesta no lineal para "n"
Sistemas de 1 grado de libertad.

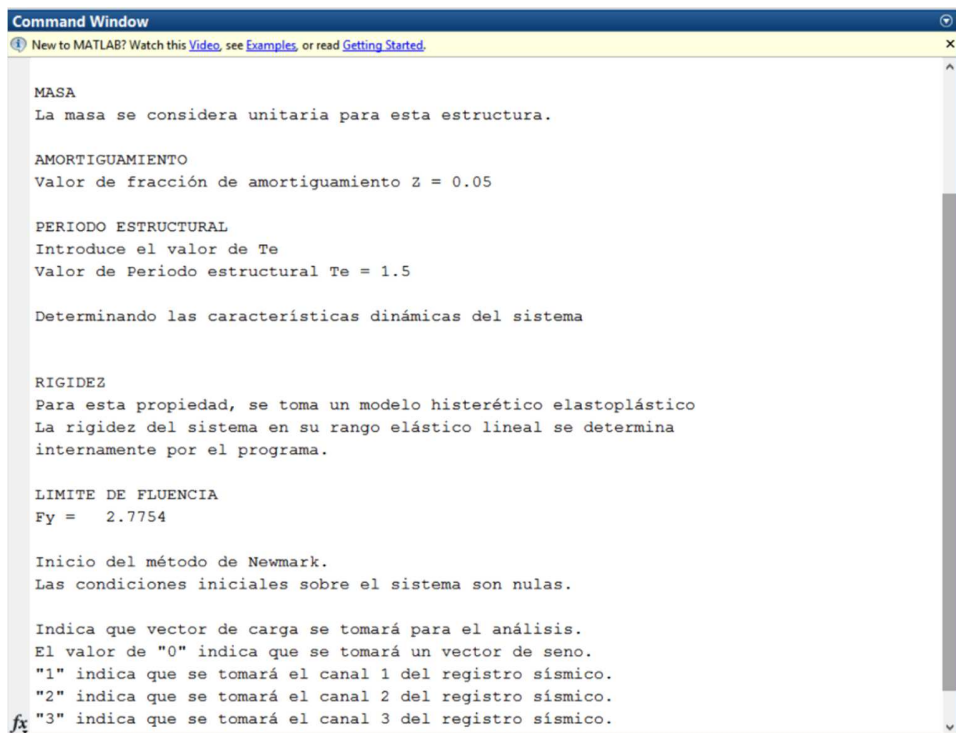
Definición de características del sistema.

MASA
La masa se considera unitaria para esta estructura.

AMORTIGUAMIENTO
fx Valor de fracción de amortiguamiento z = |
```

Fig. 3.7 Ejecución de Programa MARK_006.

El primer dato fundamental es la masa, sin embargo para el programa, las propiedades dinámicas se han normalizado respecto a esta propiedad y la masa se toma con valor unitario. El dato posterior por introducir es el amortiguamiento que se maneja en forma decimal y a continuación se indica el periodo natural tomando en cuenta que esta propiedad solo está definida para la estructura en su rango elástico lineal. Con esta propiedad dinámica determinada, se calcula la rigidez inicial del sistema, la cual solamente se toma para las deformaciones pequeñas que no superen la deformación de fluencia en la estructura.



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.

MASA
La masa se considera unitaria para esta estructura.

AMORTIGUAMIENTO
Valor de fracción de amortiguamiento  $\zeta = 0.05$ 

PERIODO ESTRUCTURAL
Introduce el valor de  $T_e$ 
Valor de Periodo estructural  $T_e = 1.5$ 

Determinando las características dinámicas del sistema

RIGIDEZ
Para esta propiedad, se toma un modelo histerético elastoplástico
La rigidez del sistema en su rango elástico lineal se determina
internamente por el programa.

LIMITE DE FLUENCIA
 $F_y = 2.7754$ 

Inicio del método de Newmark.
Las condiciones iniciales sobre el sistema son nulas.

Indica que vector de carga se tomará para el análisis.
El valor de "0" indica que se tomará un vector de seno.
"1" indica que se tomará el canal 1 del registro sísmico.
"2" indica que se tomará el canal 2 del registro sísmico.
fx "3" indica que se tomará el canal 3 del registro sísmico.
```

Fig. 3.8 Introducción de periodo de vibrar de la estructura.

Internamente se ha definido una fuerza de fluencia con un valor específico, la cual podría modificarse sin ningún inconveniente, el programa se desarrolló para ser compatible con cualquier sistema de unidades y dependiendo de la elección será la interpretación que debe generarse. Una vez introducida la información necesaria, el programa genera la respuesta inelástica del sistema obteniendo como resultados la gráfica de desplazamientos, velocidades y aceleraciones del sistema relativas a la base. En forma adicional se calcula la variación de las fuerzas restauradoras y de fluencia, las fuerzas de amortiguamiento y las fuerzas de inercia inducidas en el

sistema. Como parte final se calcula la variación de la energía introducida en el sistema por la excitación en la base.

Se muestra a continuación los resultados de un sistema determinado:

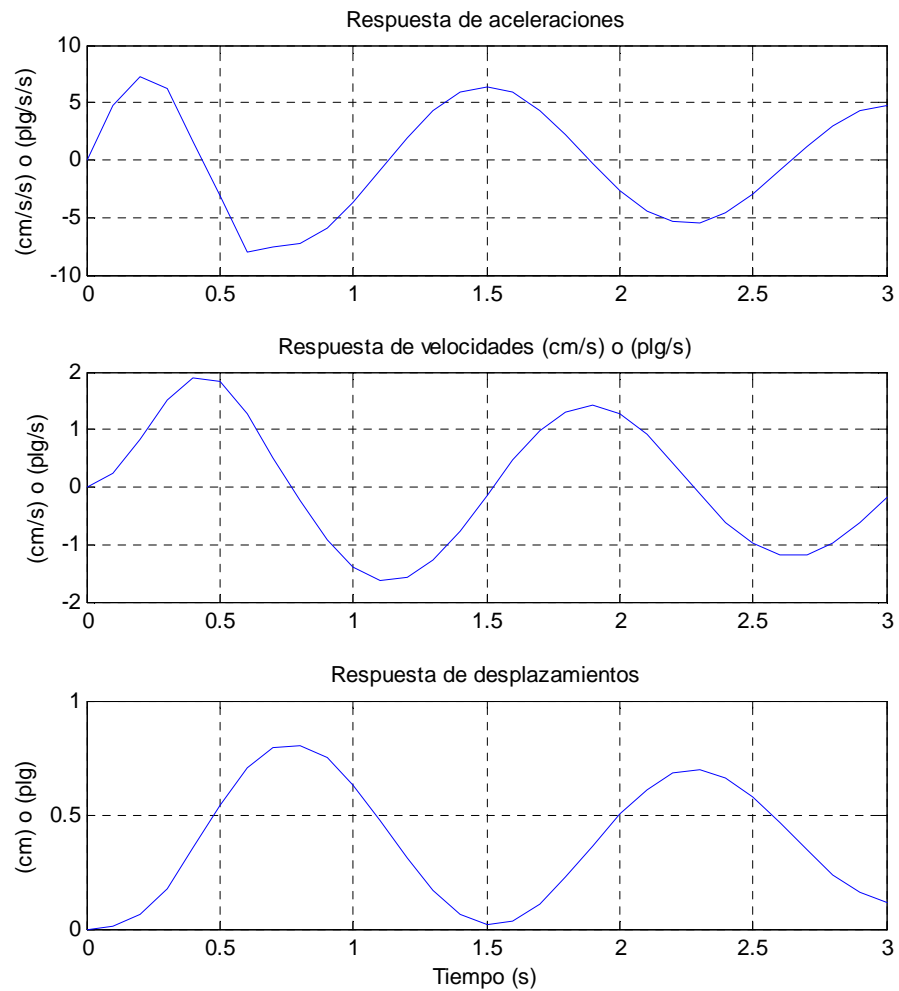


Fig. 3.9 Respuesta paso a paso de la estructura analizada.

En la figura anterior se observa la variación de los desplazamientos, velocidad y aceleración que tiene el sistema. Todo está en función del tiempo y las unidades pueden ser utilizadas para cualquier sistema.

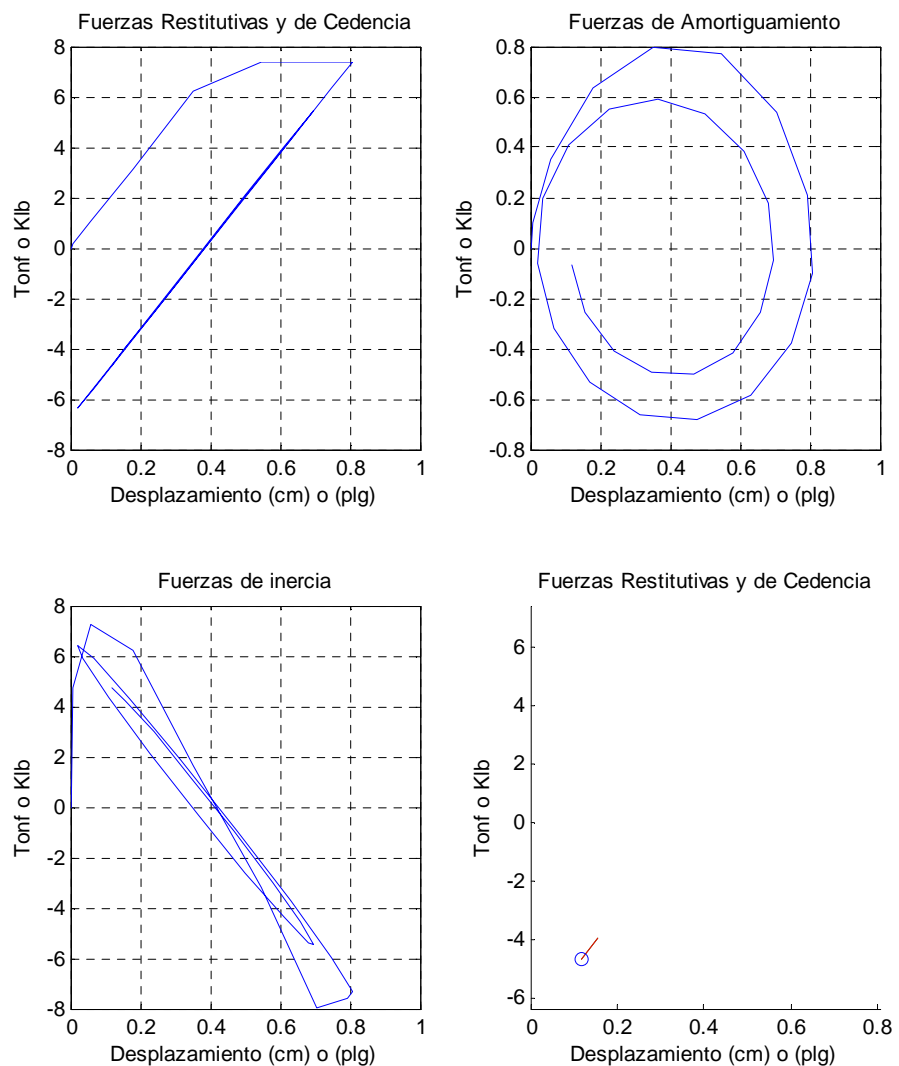


Fig. 3.10 Variación de las fuerzas de rigidez y fluencia, amortiguamiento e inercia en el sistema.

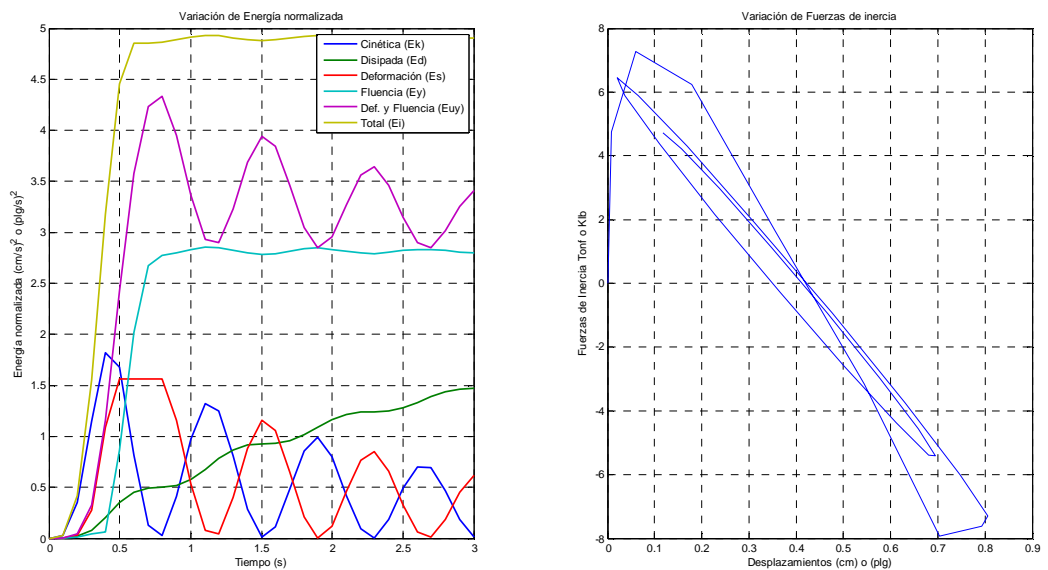


Fig. 3.11 Variación de la energía introducida en el sistema, energía de deformación, cinética y energía disipada en el sistema.

El programa desarrollado tiene la capacidad de guardar toda la información generada en la introducción de datos y los resultados al obtener la respuesta del sistema. Se puede utilizar para cualquier excitación y no existe inconveniente con el sistema de un grado de libertad empleado.

El código del programa es el siguiente:

```
% Programa de Análisis de Respuesta de Sistemas de 1 Grado de
Libertad
% No Lineal
% 06 Ago 2015.
% Ing. Marcos Alfredo León Porquillo.
%
% Este programa desarrolla y calcula la respuesta para
sistemas de un
```

```

% grado de libertad en el rango inelástico. Como elementos
teóricos
% básicos, se supone un comportamiento bilineal, la masa en el
sistema
% tiene un valor arbitrario así como la rigidez y el
amortiguamiento.
% La característica de amortiguamiento se idealiza
matemáticamente como
% viscoso equivalente.
% Para evaluar la respuesta de la estructura a través del
tiempo se emplea
% el método de Newmark y el método iterativo de Newton-Raphson
% Se toma el método de aceleración lineal, aunque se puede
modificar sin
% problema a la aceleración promedio.
%
% Variables necesarias:
%
% M      Masa del sistema.
% K      Rigidez del sistema.
% C      Amortiguamiento del sistema (Se considera como
viscoso equivalente).
% Ccr   Amortiguamiento crítico del sistema.
% Z      Fracción de amortiguamiento crítico.
% ga    valor gamma para el método de aceleración lineal.
% be    valor beta para el método de aceleración lineal.
%
clc
fprintf ('\n');
fprintf ('BIENVENIDO A MARK_006 \n');
fprintf ('\n');
fprintf ('Este programa genera la respuesta no lineal para "n"
\n');
fprintf ('Sistemas de 1 grado de libertad. \n');
fprintf ('\n');
fprintf ('Definición de características del sistema. \n');
fprintf ('\n');
% Masa
fprintf ('MASA \n');
fprintf ('La masa se considera unitaria para esta estructura.
\n');
M = 1;
fprintf ('\n');
% Fracción de amortiguamiento
% Introducción de valores de amortiguamiento
fprintf ('AMORTIGUAMIENTO \n');

```

```

Z = input('Valor de fracción de amortiguamiento Z = ');
% Periodo estructural deseado
fprintf ('\n');
fprintf ('PERIODO ESTRUCTURAL \n');
fprintf ('Introduce el valor de Te \n');
Tn = input('Valor de Periodo estructural Te = ');
fprintf ('\n');
fprintf ('Determinando las características dinámicas del
sistema \n');
% frecuencia natural del sistema en rango lineal.
wnn = Tn\ (2*pi);
% rigidez lateral del sistema.
K1 = wnn^2; % la masa se considera unitaria.
% amortiguamiento crítico en el sistema "Ccr".
Ccrn = 2*M*wnn;
% amortiguamiento efectivo en el sistema "C".
Cn = Z*Ccrn;
%
fprintf ('\n');
% Rigidez
fprintf ('\n');
fprintf ('RIGIDEZ \n');
fprintf ('Para esta propiedad, se toma un modelo histerético
elastoplástico \n');
fprintf ('La rigidez del sistema en su rango elástico lineal
se determina \n');
fprintf ('internamente por el programa. \n');

% MUESTRA LA RIGIDEZ CALCULADA POR EL PROGRAMA

fprintf ('\n');
K2 = 0; % modifique
este valor %%%%%%%%%%%
fprintf ('LIMITE DE FLUENCIA \n'); % El
valor mínimo de fuerza con el periodo de 0.5
fprintf ('Fy = %8.4f\n',Fy); % y
fracción de 0.05 es de 355.2528 para el movimiento del centro.
%
fprintf ('\n');
%
fprintf ('Inicio del método de Newmark. \n');
fprintf ('Las condiciones iniciales sobre el sistema son
nulas. \n');
fprintf ('\n');

```



```

A3 = (1/(2*be)-1)*M + idm*(ga/(2*be)-1)*Cn;
%
% Cálculos para cada paso de tiempo.
Pc = zeros(length(t)-1,1);
Fs = zeros(length(t)-1,1);
Rc = zeros(length(t)-1,1);
k = 0;
Kc = 0;
Du = zeros(length(t)-1,1);
%
for i = 1:(length(t)-1)
    Pc(i+1,1) = P(i+1,1) + A1*un(i,1)+A2*vn(i,1)+A3*an(i,1);
    Rc(i+1,1) = Pc(i+1,1) - Fs(i,1) - A1*un(i,1);
    %
    if Fs(i,1) >= Fy
        k = K2;
    else
        k = K1;
    end
    Kc = k + A1;
    Du(i+1,1) = Rc(i+1,1) / Kc;
    un(i+1,1) = un(i,1)+ Du(i+1,1);
    %
    Fs(i+1,1) = Fs(i,1) + K1 * (un(i+1,1) - un(i,1));
    %
    if Fs(i+1,1) >= Fy
        Fs(i+1,1) = Fy;
        k = K2;
        Rc(i+1,1) = Pc(i+1,1) - Fs(i+1,1) - A1*un(i+1,1);
        Kc = k + A1;
        Du(i+1,1) = Rc(i+1,1) / Kc;
        un(i+1,1) = un(i+1,1)+ Du(i+1,1);
    elseif Fs(i+1,1) <= -Fy
        Fs(i+1,1) = -Fy;
        k = K2;
        Rc(i+1,1) = Pc(i+1,1) - Fs(i+1,1) - A1*un(i+1,1);
        Kc = k + A1;
        Du(i+1,1) = Rc(i+1,1) / Kc;
        un(i+1,1) = un(i+1,1)+ Du(i+1,1);
    else
        Fs(i+1,1) = Fs(i+1,1);
        k = K1;
        Rc(i+1,1) = Pc(i+1,1) - Fs(i+1,1) - A1*un(i+1,1);
        Kc = k + A1;
        Du(i+1,1) = Rc(i+1,1) / Kc;
        un(i+1,1) = un(i+1,1)+ Du(i+1,1);
    end
end

```

```

        Fs(i+1,1) = Fs(i,1) + K1 * (un(i+1,1) - un(i,1));
    end
    %
    vn(i+1,1) = ga/(be*idm)*((un(i+1,1) - un(i,1))) + (1-
ga/be)*vn(i,1) + idm*(1-ga/(2*be))*an(i,1);
    an(i+1,1) = 1/(be*(idm^2)) * ((un(i+1,1) - un(i,1))) - 1
/ (be*idm)*vn(i,1) - (1/ (2*be) - 1) *an(i,1);
end
%
subplot(3,1,1)
plot(t,an);
title('Respuesta de aceleraciones (cm/s/s) o (plg/s/s)')
grid on
%
subplot(3,1,2)
plot(t,vn);
title('Respuesta de velocidades (cm/s) o (plg/s)')
grid on
%
subplot(3,1,3)
plot(t,un);
title('Respuesta de desplazamientos (cm) o (plg)')
xlabel('Tiempo (s)')
grid on
%
figure % Nueva Ventana
subplot(2,2,1)
plot(un,Fs);
title('Fuerzas de Restitutivas y de Cedencia')
xlabel('Desplazamiento (cm) o (plg)')
grid on
%
subplot(2,2,2)
plot(un,Cn*vn);
title('Fuerzas de Amortiguamiento')
xlabel('Desplazamiento (cm) o (plg)')
grid on
%
if EL == 0
    subplot(2,2,3)
    plot(un,M*(an));
    title('Fuerzas de inercia')
    xlabel('Desplazamiento (cm) o (plg)')
    grid on
elseif EL == 1
    subplot(2,2,3)

```

```

    plot(un,M*(an+CH1));
    title('Fuerzas de inercia')
    xlabel('Desplazamiento (cm) o (plg)')
    grid on
elseif EL == 2
    subplot(2,2,3)
    plot(un,M*(an+CH2));
    title('Fuerzas de inercia')
    xlabel('Desplazamiento (cm) o (plg)')
    grid on
elseif EL == 3
    subplot(2,2,3)
    plot(un,M*(an+CH3));
    title('Fuerzas de inercia')
    xlabel('Desplazamiento (cm) o (plg)')
    grid on
end
%
%subplot(2,2,4)
Quita los simbolos
%comet(un,Fs);
%title('Fuerzas de Restitutivas y de Cedencia')
%
% Resistencia a la cedencia normalizada "ft"
uy = Fy/K1;
um = max(abs(max(un)),abs(min(un)));
Duc = um/uy;
%figure % Nueva Ventana
%plot(t,Fs);
%hold on
%plot(t,Fy,t,-Fy);
%title('Fluencia en el sistema')
%
%
%
% CALCULO DE ENERGIA TOTAL EN EL SISTEMA
%
% Energía cinética
% La masa esta normalizada          Ek = m*v^2
Ek = (vn.^2) / 2;
%
% Energía disipada
% El amortiguamiento esta definido previamente
ed = Cn*(vn.^2);
%
% Energía disipada parcial instantanea

```

```

edp = zeros(length(t),1);
Ed = zeros(length(t),1);
%
% Energía de deformación
K1)
Es = ( Fs.^2 )/ ( 2 *
%
% Energía por deformación y fluencia
ecd = Fs.*vn;
ecp = zeros(length(t),1);
Euy = zeros(length(t),1);
%
for i = 1:(length(t)-1)
    % Energía de amortiguamiento
    edp(i+1,1) = 1/2*( ed(i+1,1) + ed (i,1) ) * idm;

    % Energia de deformación y fluencia
    ecp(i+1,1) = 1/2*( ecd(i+1,1) + ecd (i,1) ) * idm;

end
%
% Energía de Fluencia
Ey = Euy-Es;
%
% Energía de entrada en el sistema
Ei = Ek + Ed + Es + Ey;
% POR FIN, EL
FIN!!!! 27 Ago 2015
%
% Energía Máxima en el sistema
Em = max(abs(max(Ei)),abs(min(Ei)));
%
figure
subplot(1,2,1)
plot (t,Ek,t,Ed,t,Es,t,Ey,t,Euy,t,Ei);
title('Energía normalizada (cm/s)^2 o (plg/s)^2')
xlabel('Tiempo (s)')
legend('Cinética (Ek)', 'Disipada (Ed)', 'Deformación
(Es)', 'Fluencia (Ey)', 'Def. y Fluencia (Euy)', 'Total (Ei)')
grid on
if
    subplot(1,2,2)
    plot(un,M*(an));
    title('Fuerzas de inercia')
    grid on
elseif
    subplot(1,2,2)

```

```

    plot(t,CH1,'r',t,an);
    title('Aceleraciones de terreno y del sistema (cm/s/s) o
(plg/s/s)')
    xlabel('Tiempo (s)')
    grid on
elseif
    subplot(1,2,2)
    plot(t,CH2,'r',t,an);
    title('Aceleraciones de terreno y del sistema (cm/s/s) o
(plg/s/s)')
    xlabel('Tiempo (s)')
    grid on
elseif
    subplot(1,2,2)
    plot(t,CH3,'r',t,an);
    title('Aceleraciones de terreno y del sistema (cm/s/s) o
(plg/s/s)')
    xlabel('Tiempo (s)')
    grid on
end
%
% Exportación de datos a Excel
%
fid    =    en('Estructura_NL.csv','w');
fprintf(      , 'Estructura con comportamiento elastoplástico
\n');
fprintf(fid_NL, 'Masa de la estructura \n');
fprintf(fid_NL, '%8f \n',M);
fprintf(fid_NL, 'Rigidez de la estructura \n');
fprintf(fid_NL, '%8f \n',K1);
fprintf(fid_NL, 'Fracción de amortiguamiento del sistema \n');
fprintf(fid_NL, '%8f \n',Z);
fprintf(fid_NL, 'Periodo del sistema (en el rango elástico)
\n');
fprintf(fid_NL, '%8f \n',Tn);
fprintf(fid_NL, 'Valor de Fluencia del sistema \n');
fprintf(fid_NL, '%8f \n',Fy);
fprintf (fid_NL, '\n');
fprintf(fid_NL, 'Desplazamiento de fluencia del sistema \n');
fprintf(fid_NL, '%8f \n',uy);
fprintf(fid_NL, 'Desplazamiento máximo del sistema \n');
fprintf(fid_NL, '%8f \n',um);
fprintf (fid_NL, '\n');
fprintf(fid_NL, 'Ductilidad del sistema \n');
fprintf(fid_NL, '%8f \n',Duc);
fprintf (fid_NL, '\n');

```

```

fprintf(          'Energía máxima desarrollada en el sistema
\n');
fprintf(          '%8f \n',Em);
fprintf (          '\n');
%
fprintf(          'Respuesta del sistema (nota: la respuesta es
la relativa y no la total) \n');
fprintf(          '\n');
fprintf(          't,a,v,u,Fs(u),Ek,Ed,Es,Ey,Euy,Ei \n');
for i = 1:length(t);

fprintf(          '%10f,%10f,%10f,%10f,%10f,%10f,%10f,%10f,%10f,%
10f,%10f
\n',t(i,:),an(i,:),vn(i,:),un(i,:),Fs(i,:),Ek(i,:),Ed(i,:),Es(
i,:),Ey(i,:),Euy(i,:),Ei(i,:));
end

%
clc

```

3.4. COMPORTAMIENTO DE RESPUESTA DEL SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD

El análisis paso a paso determina la respuesta dinámica de un sistema de un grado de libertad, tal respuesta consiste en la aceleración, velocidad relativa y desplazamiento del sistema.

Al tratar con sistemas inelásticos, se necesita el valor de fuerza de fluencia que tenga el sistema, esto determinará los esfuerzos o fuerzas desarrolladas y generará que el sistema se deforme más allá o no del intervalo elástico. Incurriendo en el intervalo inelástico se desconoce el periodo de vibrar de la estructura, esto se debe a la modificación de rigidez de la misma y si esta nueva rigidez es nula,

en teoría no existe un periodo que calcular. La estructura ya no oscila alrededor de una posición de reposo con nulas deformaciones, la deformación final depende de la deformación de fluencia y de las propiedades dinámicas del sistema como son la masa y el amortiguamiento.

En la gráfica siguiente se muestra la respuesta de un sistema de un grado de libertad, la fuerza de excitación es una función coseno y el modelo constitutivo es elastoplástico del sistema analizado.

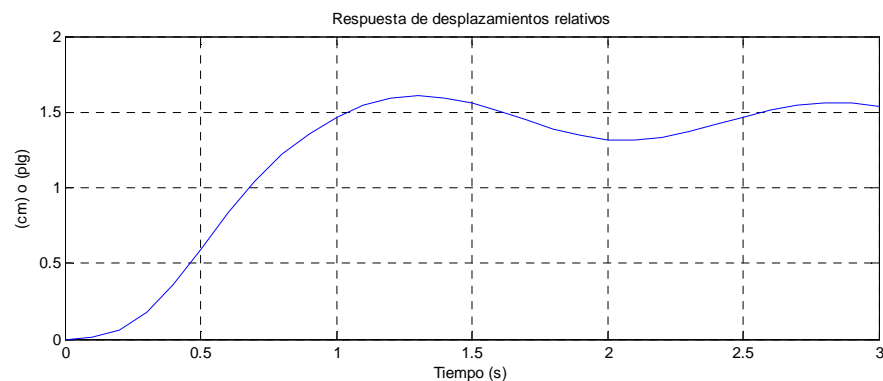


Fig. 3.12 Respuesta de un sistema elastoplástico.

En este ejemplo se observa que la respuesta en términos de desplazamiento no tiende a regresar a la estructura a la posición de reposo, debido a la baja fuerza de fluencia del sistema, la posición final tiende a un valor de 1.5 pulgadas, físicamente esto representaría un desplazamiento final permanente en la estructura.

Al realizar la descripción de la variación de fuerzas restitutivas contra desplazamiento en la siguiente figura, se observa como detalle notable que existe una degradación de rigidez entre el tiempo de cero y cero punto dos segundos, el modelo constitutivo no tiene considerada esta características, sin embargo, la explicación de este fenómeno es que el intervalo de muestreo es muy “abierto”, si se quisiera minimizar esta diferencia se puede hacer más pequeño el paso de tiempo utilizado para el análisis.

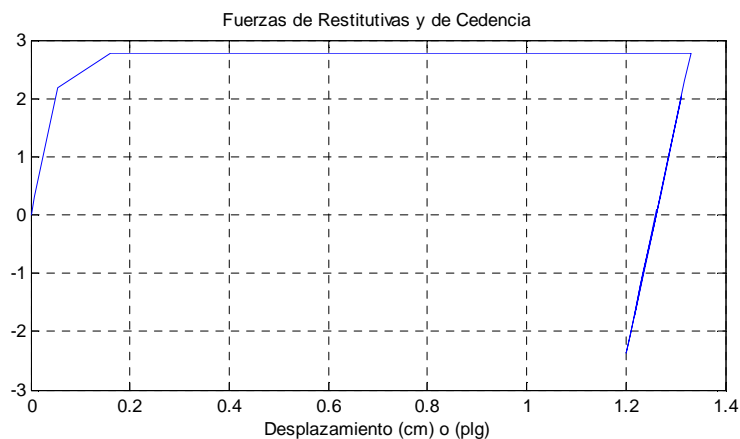


Fig. 3.13 Respuesta de un sistema elastoplástico.

De igual forma, si se obtiene la variación de las fuerzas restauradoras en el sistema se observa que no se desarrolla un valor superior de 2.8, esta característica seleccionada o inducida es fundamental en el sistema y, si este valor se cambia, la respuesta dinámica también se modifica. Así mismo se verifica que la

deformación máxima permanente alcanzada solo en los intervalos de tiempo mostrados es de alrededor de 1.2 pulgadas.

3.5. COMPORTAMIENTO DE FUERZAS CONTRA DESPLAZAMIENTO

El programa de análisis no lineal llamado MARK_003 calcula como forma adicional la respuesta en términos de las fuerzas desarrolladas en el sistema. En los sistemas inelásticos se consideran ahora las fuerzas restitutivas, las de fluencia, las debidas al amortiguamiento y la inercia. Solo para mencionar, los sistemas elásticos no desarrollan fuerzas debidas a la fluencia y su comportamiento en términos de rigidez nunca incurre en alguna variación, siempre es idéntico al momento de carga y descarga.

Se muestran tres gráficas indicando las fuerzas relacionadas anteriormente. Las fuerzas se representan en función del desplazamiento del sistema.

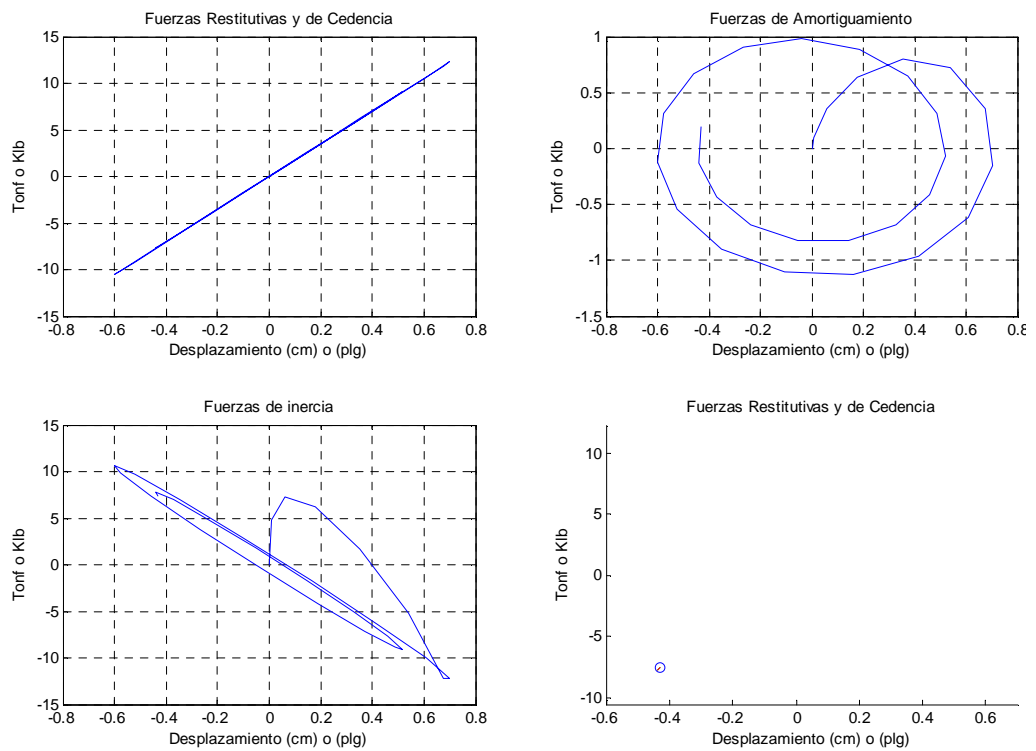


Fig. 3.14. Variación de las fuerzas en el sistema de un grado de libertad.

Ahora se muestra la variación de fuerzas considerando un sistema inelástico ante una excitación seno, se observa el cambio en comparación del sistema elástico debido a que el sistema fluye en ciertos instantes de tiempo.

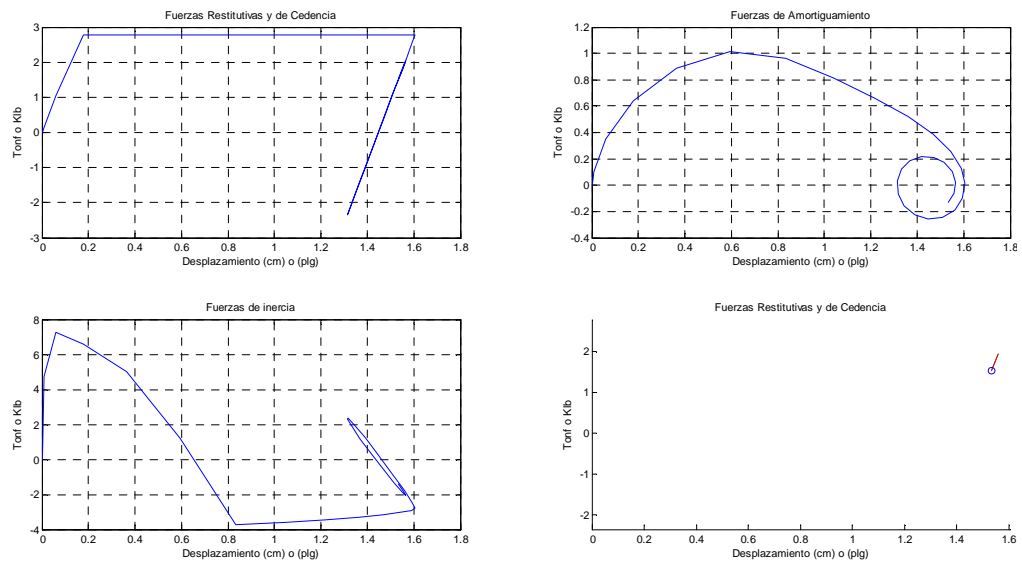


Fig. 3.15. Variación de las fuerzas en el sistema de un grado de libertad con comportamiento inelástico.

Mientras las fuerzas de excitación superen la resistencia a la fluencia del sistema, este cederá y se desplazará dependiendo de la duración de la excitación. En este primer programa de análisis no lineal se toma en consideración un modelo elastoplástico, el cual se debe calibrar a la fuerza de fluencia mínima deseada para los distintos sistemas o experimentos a desarrollar y estudiar. Si el modelo constitutivo no coincide con el comportamiento real del sistema, debe proponerse un sistema constitutivo distinto, una formulación diferente en el método de Newmark y volver a calibrar, los modelos experimentales deberán ser compatibles con los resultados teóricos calculados mediante el programa MARK_003.

3.6. INFORMACIÓN DE SALIDA DEL PROGRAMA, EXPORTACIÓN DE DATOS EN FORMATO CSV

La información detallada requerida del sistema en estudio corresponde a la rigidez inicial, la masa del sistema, el amortiguamiento y el valor de resistencia de fluencia de la estructura. Como respuesta del análisis estructural no lineal se obtiene la deformación de fluencia, el desplazamiento máximo del sistema, y la ductilidad relacionada. En forma adicional, se calcula la respuesta en el tiempo en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración relativa del sistema, también se calcula la variación de la energía cinética, de amortiguamiento, potencial, de fluencia y total desarrollada por la estructura en un sismo determinado. Toda la información está disponible en el ambiente de trabajo de MatLab. Por facilidad, para respaldar dicha información el programa MARK_003 almacena en un archivo con formato CSV todos los datos de salida. Este archivo puede modificarse en su nombre, o extensión, y es totalmente reconocible por los blocks de notas o cualquier programa editor de texto. La extensión CSV permite exportar los datos y hacerlos manipulables en Microsoft Excel, el archivo de salida o exportado se llama para este trabajo "Estructura_NL.csv". Este proceso es automático, no es necesario colocar alguna instrucción adicional y la forma de trabajo entre

MatLab y Microsoft Excel es reemplazar toda la información si es que existe previamente, si se gusta alterar esta secuencia y almacenar datos anteriores no existe inconveniente. A continuación se muestra un ejemplo que expone los datos de salida en el archivo con extensión "CSV". Los datos principales del sistema y su respuesta son los primeros en mostrar, posteriormente se muestran los datos en términos de respuesta relativa, en forma adicional se adjunta la variación de la energía desarrollada por el sistema y solo se muestran unos pocos datos como ejemplo.

Estructura con comportamiento elastoplástico

Masa de la estructura

1

Rigidez de la estructura

39.478418

Fracción de amortiguamiento del sistema

0.05

Periodo del sistema (en el rango elástico)

1

Valor de Fluencia del sistema

2.775412

Desplazamiento de fluencia del sistema

0.070302

Desplazamiento máximo del sistema

1.33082

Ductilidad del sistema

18.930034

Energía total máxima desarrollada en el sistema

4.908418

t	a	v	u	Fs(u)	Ek	Ed	Es	Ey	Euy	Ei
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	4.557	0.228	0.008	0.300	0.026	0.002	0.001	0.002	0.003	0.031
0.2	5.992	0.755	0.056	2.193	0.285	0.021	0.061	0.029	0.090	0.396
0.3	6.362	1.373	0.162	2.775	0.943	0.098	0.098	0.265	0.363	1.404
0.4	4.675	1.925	0.328	2.775	1.853	0.274	0.098	0.723	0.821	2.947
0.5	0.842	2.201	0.537	2.775	2.422	0.543	0.098	1.296	1.393	4.357
0.6	-4.057	2.040	0.754	2.775	2.081	0.825	0.098	1.884	1.982	4.888
0.7	-3.810	1.647	0.938	2.775	1.356	1.041	0.098	2.396	2.493	4.890
0.8	-3.578	1.277	1.084	2.775	0.816	1.178	0.098	2.801	2.899	4.892
0.9	-3.360	0.930	1.194	2.775	0.433	1.256	0.098	3.108	3.205	4.894

Tabla. 3.2

Toda la información generada como parte del análisis no lineal paso a paso está disponible tanto en MatLab como en el archivo de salida de Microsoft Excel, los datos en absoluto son editables y utilizables para cualquier objetivo o busca de resultados.

3.7. ENERGÍA DESARROLLADA POR EL SISTEMA Y ESPECTRO DE ENERGÍA PARA EL SISMO DE EL CENTRO Y DISTRITO FEDERAL

La información provista hasta el momento se centra en la respuesta en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración de los sistemas no lineales. Como punto adicional, el programa MARK_003 calcula internamente y muestra la variación de dicha característica a través del tiempo para un sismo determinado. Esta última parte utiliza como referencia el sismo de El Centro y el sismo de Cd. De México de 1985. Como primer paso, el programa de análisis no lineal muestra la gráfica de variación de energía en el siguiente orden: Energía Cinética (color azul), Energía Disipada (color verde), Energía de Deformación (color rojo), Energía de Fluencia (azul claro), Energía de deformación y fluencia (morado) y la energía total desarrollada para el sistema analizado (en amarillo). En la figura siguiente se muestra la variación de las energías descritas con anterioridad en función del tiempo. La energía se encuentra normalizada con respecto a la masa, es decir, la masa tiene un valor unitario. Los datos del sismo de El Centro se determinaron registrando la aceleración mediante el sistema Inglés, la información de entrada necesaria y de salida del programa se

obtiene entonces en unidades de Klb y plg respectivamente para la fuerza y el desplazamiento.

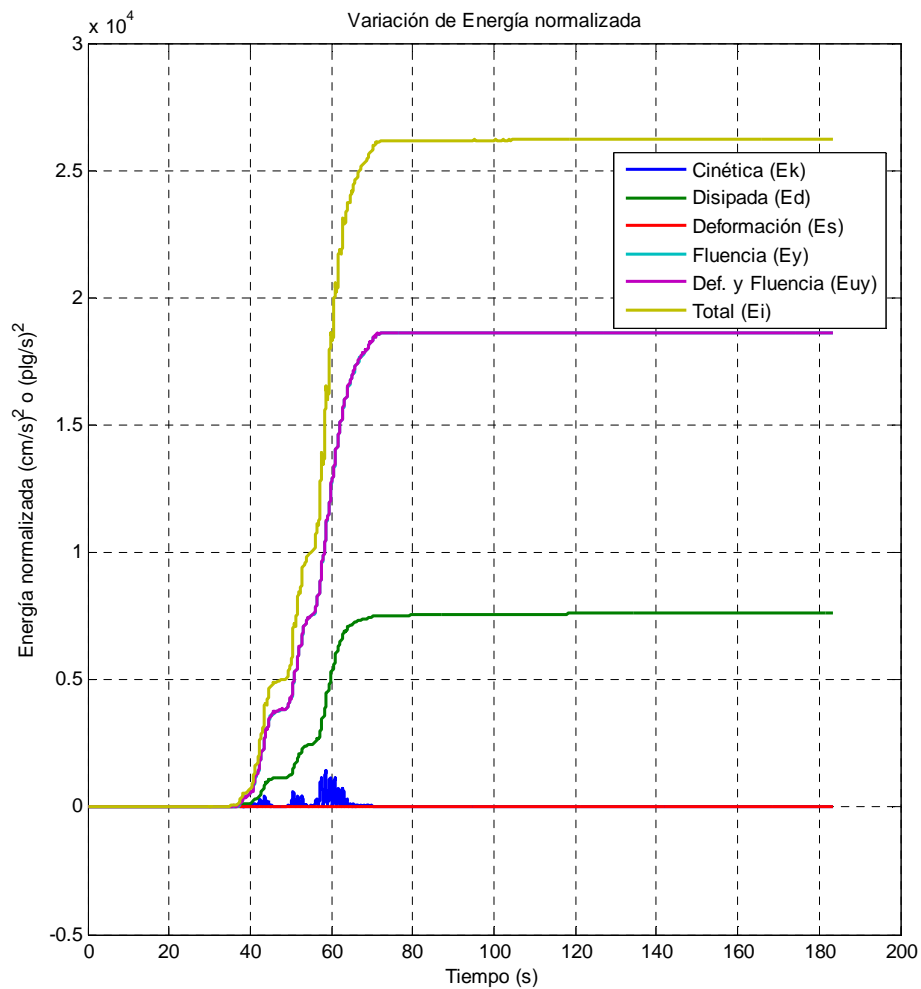


Fig. 3.16. Respuesta en términos de energía para un sistema inelástico.

Se observa con mucha importancia en la gráfica cual es la aportación de la característica de rigidez del sistema, prácticamente un 5% de la energía total, esto se obtuvo mediante un sistema de un

grado de libertad con 5% de fracción de amortiguamiento, 1 s en su periodo elástico y una fuerza de 44.41 Klb. Se introduce un sistema con idénticas características anteriores excepto el periodo natural del sistema con valor igual a 2 s para observar nuevamente la variación en la componente de rigidez.

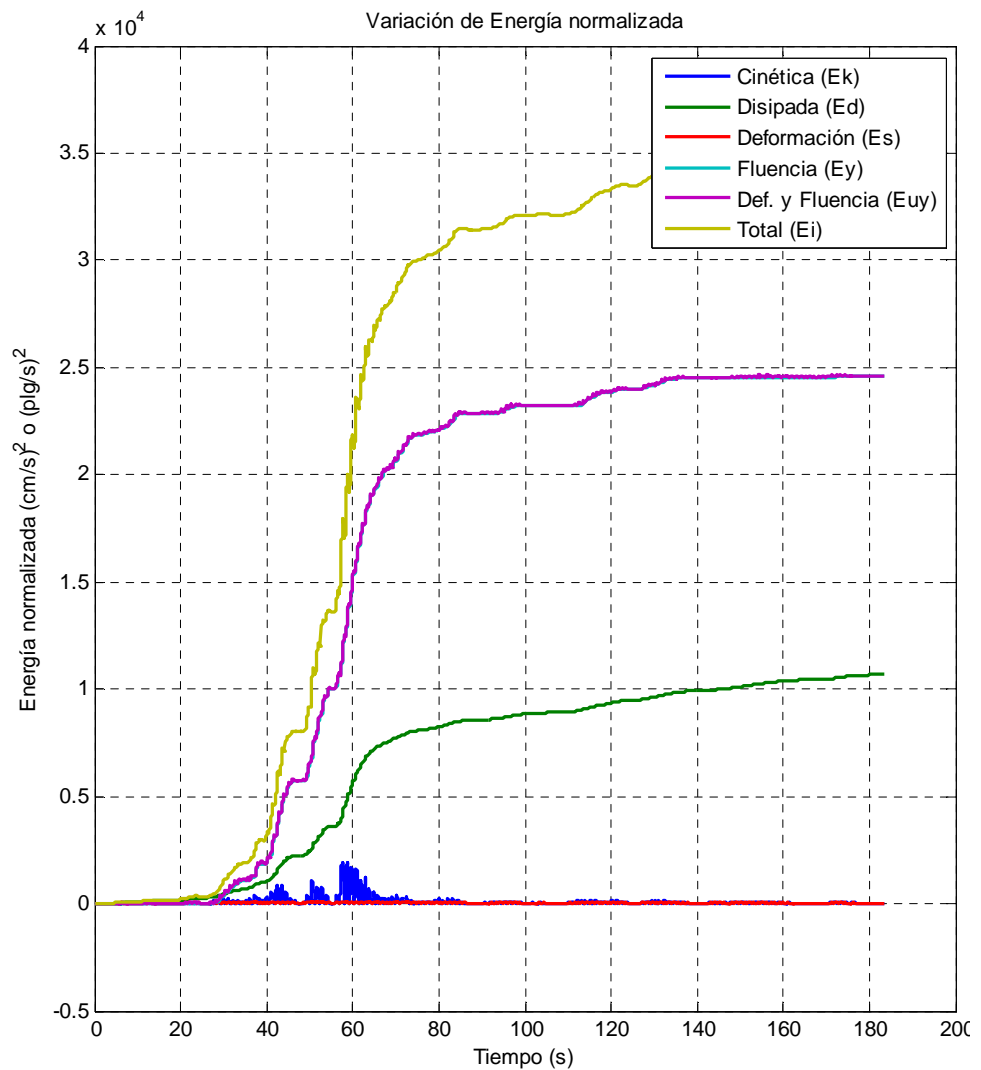


Fig. 3.17 Respuesta en términos de energía para un sistema inelástico con un periodo natural de dos segundos.

En esta ocasión, la contribución de la energía por deformación relacionada a la rigidez es mínima con respecto a la energía total desarrollada por el sistema. Se cree que este efecto es por la fuerza que el sistema pueda resistir en el intervalo elástico y la contribución de amortiguamiento. Para verificar esto se puede ejecutar varias veces y con distintos sismos para poder observar la contribución de cada componente dinámica.

Los picos desarrollados se dan en momento intermedios a la culminación de la excitación debido a que en ciertos instantes la aceleración y velocidad es muy elevada en el sistema, dando como resultado una mayor energía de movimiento. La energía de disipación presentada es la acumulada a través del paso del tiempo, internamente se calcula la energía liberada para cada instante.

A continuación, se calculó la respuesta en términos de energía para múltiples sistemas y relacionadas con el sismo de El Centro. La energía máxima desarrollada por los diversos sistemas se tomó como dato y se colecciona esta información en un espectro de energía total máxima desarrollada. Como se mencionó con anterioridad, el espectro está relacionado al sismo de El Centro, pero en forma adicional se tomó una fuerza de fluencia para todos los sistemas con un valor de 44.41 Klb y también se calcula para cada estructura la ductilidad desarrollada durante el evento.

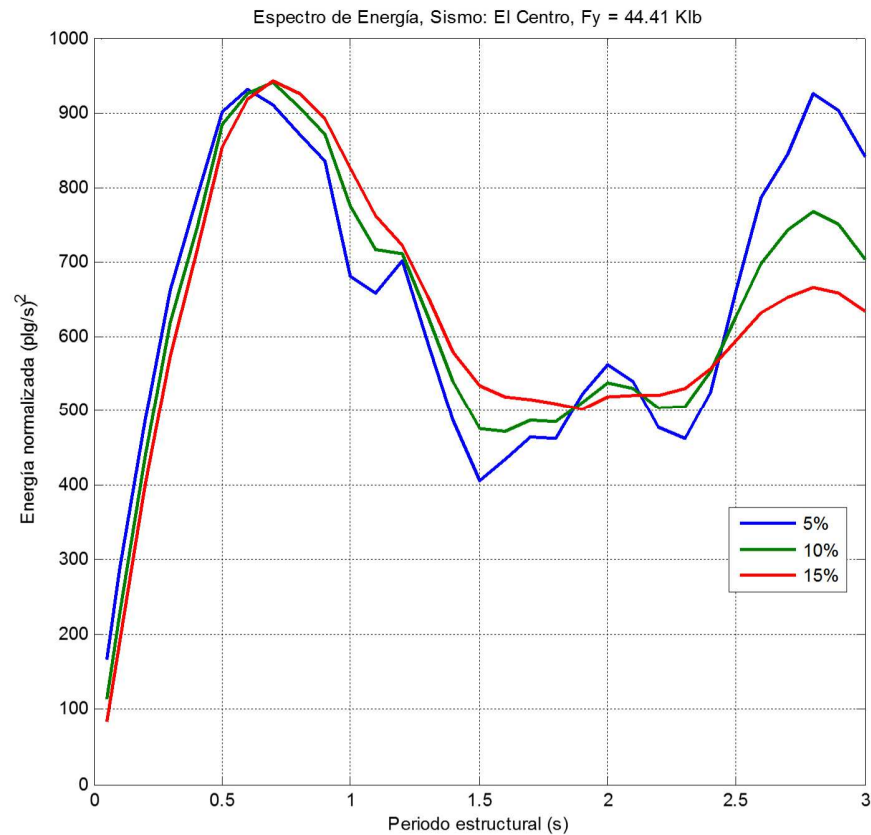


Fig. 3.18 Espectro de respuesta en términos de energía para sistemas inelásticos (sismo de El Centro)

Se muestra en la gráfica anterior que el amortiguamiento estructural no evita desarrollar energía hasta un periodo de 2.25 segundos aproximadamente, en forma posterior ayuda pero se desconoce el comportamiento de 3 segundos como periodo en adelante. El sistema utilizado para generar el espectro de respuesta anterior para el sismo de El Centro es el inglés, en el siguiente espectro se muestran resultados empleando el sistema gravitacional

de unidades pero empleando el sismo de la ciudad de México de 1985.

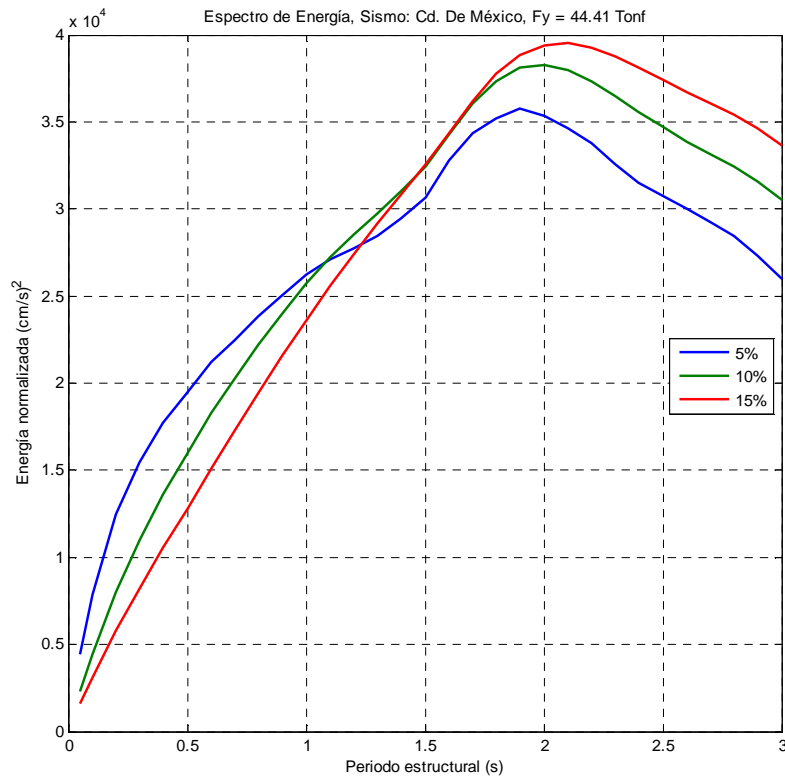


Fig. 3.19 Espectro de respuesta en términos de energía para sistemas inelásticos (sismo de Distrito Federal, estación S.C.T.)

En la figura anterior se muestra la variación de la energía máxima desarrollada por sistemas con una fuerza de fluencia de 44.41 Toneladas fuerza. A comparación del caso anterior, no se observan diversos picos en diferentes instantes de tiempo, la energía desarrollada va en aumento y empieza decaer hasta el periodo de dos segundos, la capacidad de disipar energía no

disminuye la respuesta, al contrario, mientras más amortiguamiento se tiene más energía se desarrolla. En los espectros se muestra la respuesta hasta un periodo de tres segundos por practicidad, sin embargo, podría determinarse para sistemas con periodo de vibrar más grande. Uno de los detalles en los espectros anteriores es que solo se acumula la información sin hacer variar la fuerza de fluencia, el siguiente paso sería formar nuevos espectros pero con ductilidad constante, en las gráficas anteriores la ductilidad va cambiando para cada sistema, se muestra a continuación solo algunos resultados de este detalle.

Rigidez de la estructura 48.738787	Rigidez de la estructura 39.478418
Fracción de amortiguamiento del sistema 0.05	Fracción de amortiguamiento del sistema 0.05
Periodo del sistema (en el rango elástico) 0.9	Periodo del sistema (en el rango elástico) 1
Valor de Fluencia del sistema 44.4066	Valor de Fluencia del sistema 44.4066
Desplazamiento de fluencia del sistema 0.911114	Desplazamiento de fluencia del sistema 1.124832
Desplazamiento máximo del sistema 21.28265	Desplazamiento máximo del sistema 18.902517
Ductilidad del sistema 23.358927	Ductilidad del sistema 16.804742
Energía máxima desarrollada en el sistema 25010.3535	Energía máxima desarrollada en el sistema 26247.2375

Tabla. 3.3

Los datos anteriores pertenecen a sistemas probados para el sismo de D.F. de 1985 y las unidades empleadas son del Sistema Gravitacional (Tonf, cm). El mismo efecto de variación de ductilidad se encontró durante el sismo de El Centro. El programa MARK_003 tiene la capacidad de emplear cualquier sistema de unidades, el detalle es, que si los datos de aceleración se introducen empleando el sistema gravitacional, la respuesta será en cm o m. Lo mismo sucederá si se utiliza el sistema inglés, por lo tanto los datos de salida deben ser interpretados por la persona que haya introducido la información de entrada.

En la siguiente figura, se compara solo por inquietud, el espectro de Energía del sismo de El Centro contra el de 1985 en la ciudad de México. En sí, no se debe hacer dicha comparación, dado que en forma estructural no es lo mismo 44.4 Tonf (empleadas para el análisis del sismo de Ciudad de México) que 44.4 Klb (empleadas para el análisis del sismo de El Centro). Si quisiera compararse de forma equivalente habría que introducir las mismas unidades para el sismo de El Centro y ciudad de México. En forma adicional se tienen distintas características tanto geotécnicas y geológicas las que existen de un lugar y otro.

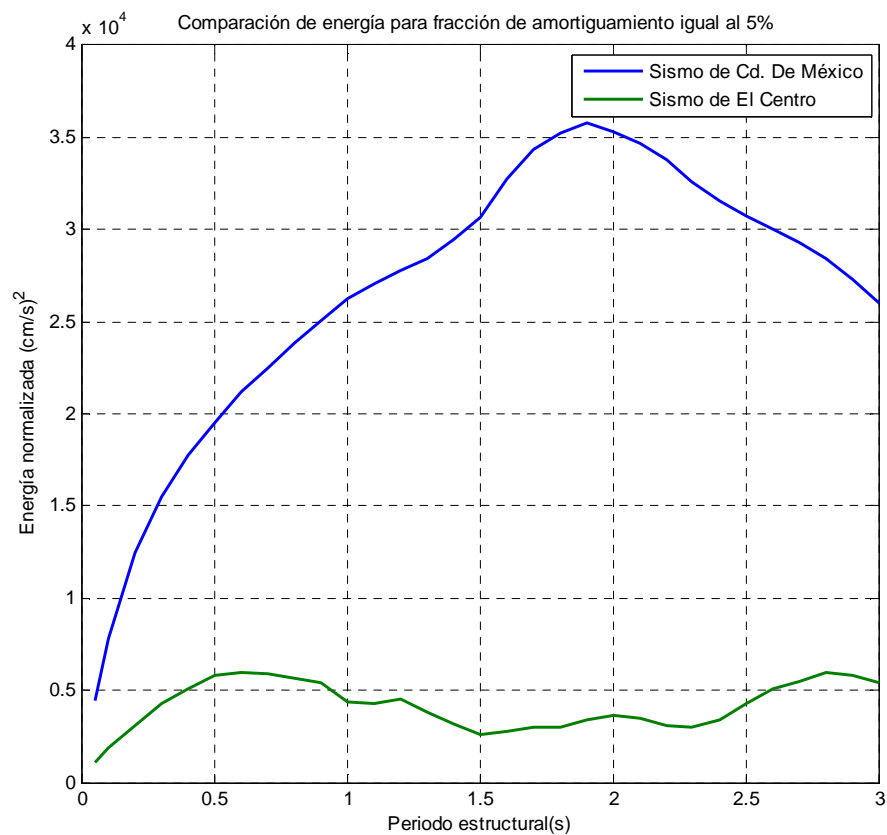


Fig. 3.20 Comparación de espectros de respuesta en términos de energía para sistemas inelásticos

Los espectros de energía no se emplean en la reglamentación actual regional, sin embargo, una utilidad de esta herramienta podría ser en la utilización de conocer el comportamiento, el uso y optimización de tecnología en ingeniería sísmica como son los aisladores de base.



Fig. 3.21 Aislador de base

Los aisladores son dispositivos que se han empleado con más frecuencia a partir de 30 años en diversos países, la utilidad de estos es evitar que la energía generada por un sismo se transmita a los edificios por estar conectados rígidamente al terreno de cimentación.



Fig. 3.22 Aislador de base en la construcción del hospital militar de Santiago, Chile

Esta tecnología no es nueva, se ha empleado desde hace más de dos mil años, sin embargo el proceso se ha ido refinando en la actualidad. En países como Japón se ha implementado con éxito, en Australia y en Latinoamérica se ha ido difundiendo esta herramienta. En nuestro país no se emplea para minimizar los efectos de eventos sísmicos en edificios y ningún reglamento los menciona, apenas el Manual de Obras Civiles de C.F.E. da algunas recomendaciones y simplifica por condiciones específicas su estudio.

Existen algunos reglamentos que se tienen en desarrollo en varios países y se tienen ya en uso como el de Chile, que aunque tiene un código de construcción para estructuras convencionales, tienen códigos específicos para el uso o empleo del aislamiento sísmico.



Fig. 3.23 Hospital militar de Santiago, Chile (el edificio principal tiene aisladores de base)

En la figura anterior se presenta uno de los varios edificios ya construidos en Chile, aunque representa un costo a largo plazo moderado, la revisión y mantenimiento debe ser frecuente para verificar el correcto comportamiento de los aisladores de base, lo cual es fundamental.

En la página siguiente solo se muestra la portada del código de construcción específico para el empleo de aislación sísmica empleado en el país sudamericano. Solo por mencionar, en México no existe algo semejante para poder utilizar aisladores de base.

Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica - Requisitos

Preambulo

El Instituto Nacional de Normalización, INN, es el organismo que tiene a su cargo el estudio y preparación de las normas técnicas a nivel nacional. Es miembro de la INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) y de la COMISION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS (COPANT), representando a Chile ante esos organismos.

La norma NCh2745 ha sido preparada por la Division de Normas del Instituto Nacional de Normalización, y en su estudio participaron los organismos y personas naturales siguientes:

Arze, Reciné y Asociados
Instituto Nacional de Normalización, INN

Marcial Baeza S. y Asociados
Pontificia Universidad Católica de Chile

RCP Ingeniería Ltda.
Universidad de Chile

Universidad Técnica Federico Santa María
VMB Ingeniería Estructural S.A.

Iván Darrigrande E.
Pedro Hidalgo O.
Agnes Leger A.
Marcial Baeza S.
Juan C. De la Liera M.
Christian Ledezma A.
Carl Lüders Sch.
Rodrigo Concha P.
Rubén Boroscchek K.
M. Ofelia Moroni Y.
Rodolfo Saragoni H.
Mauricio Sarrazín A.
Patricio Bonelli C.
Leopoldo Breschi G.

Esta norma se estudió para establecer las disposiciones exigibles al análisis y diseño de edificios que cuentan con un dispositivo de aislación sísmica.

I

Fig. 3.23 Norma Chilena NCh2745-2003 (Portada)

Este código permite en ciertas circunstancias realizar un análisis “estático”, sin embargo exige en varias condiciones el análisis dinámico no lineal para poder justificar el uso de los aisladores de base en un sistema estructural.

También se tiene el código ASCE el cual es uno de los estándares en Estados Unidos para poder diseñar y verificar el comportamiento de los aisladores de base, así mismo, algunos otros países como Japón y Nueva Zelanda se tiene códigos similares para el uso y diseño de aisladores de base.

Una de las posibles aplicaciones al obtener los espectros de energía se ejemplifica para el sismo de El Centro en el ejemplo siguiente, como propósito del aislamiento sísmico es poder incrementar en forma sustancial el periodo fundamental de los edificios de poca a mediana altura. Con esto se logra que las aceleraciones por nivel sean disminuidas, a condición de que el edificio en la base permita grandes desplazamientos, similares a los del terreno. Si se tuvieran los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento, se puede verificar que el disminuir la aceleración hace crecer el desplazamiento en sistemas de un grado de libertad. Se muestra a continuación el espectro elástico para el sismo de El Centro, en él se calcula la respuesta máxima para un periodo de dos segundos y una fracción de amortiguamiento igual al cinco por ciento.

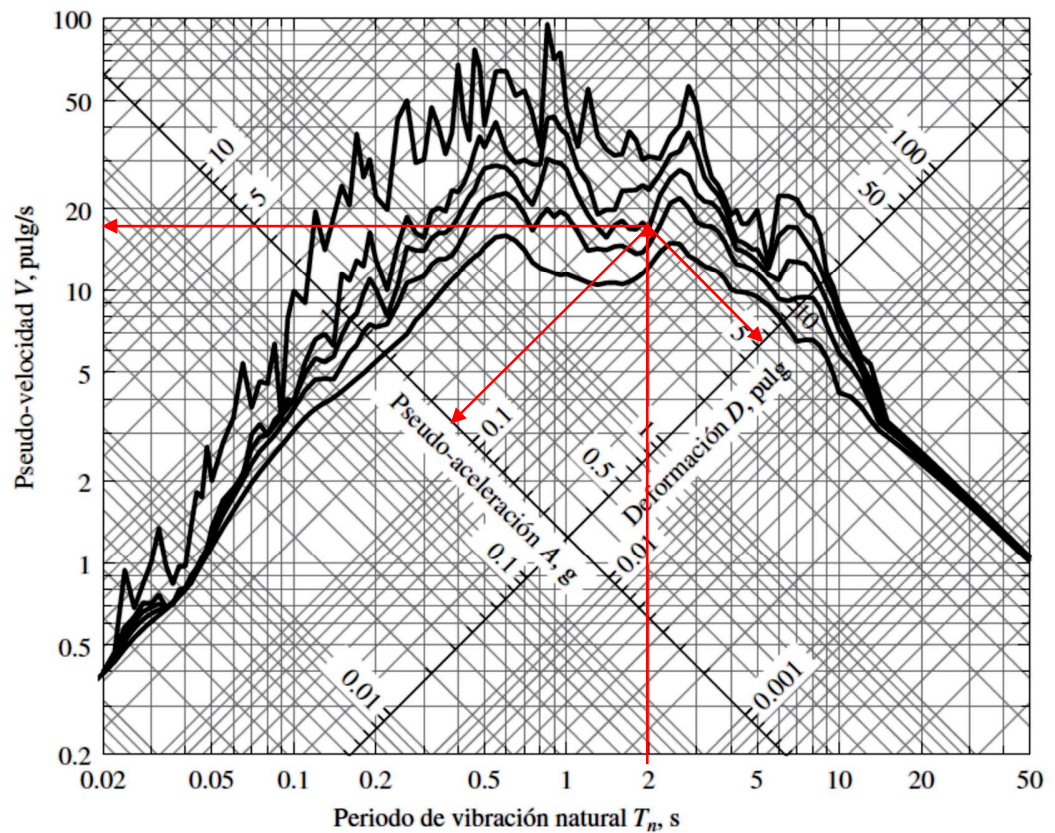


Fig. 3.24 Espectro combinado D-V-A para el sismo de El Centro

Con el espectro de respuesta anterior se determina un desplazamiento de 5.1 plg y una aceleración de 0.14 veces el valor de la gravedad. Si se tiene el espectro de respuesta inelástico del sismo de El Centro se obtiene la información siguiente:

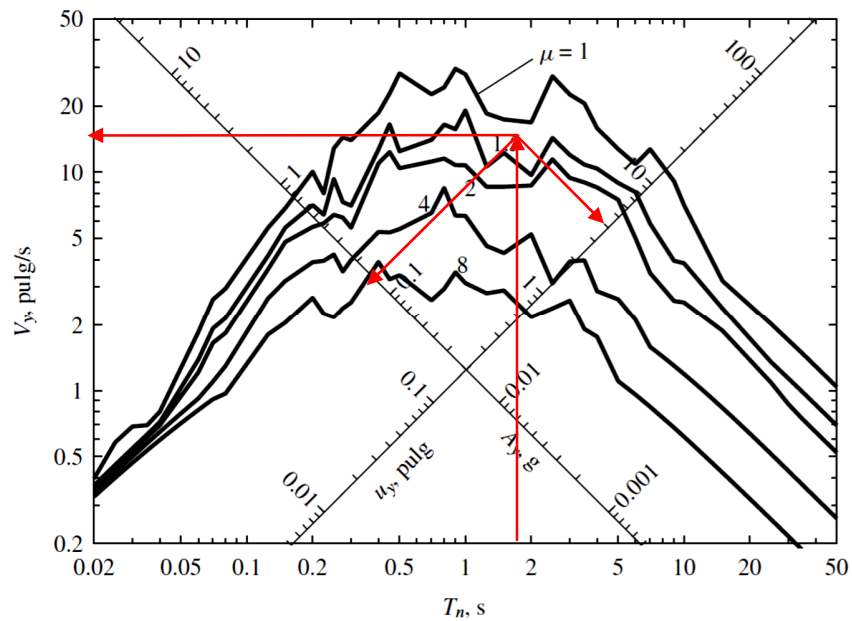


Fig. 3.25 Espectro combinado inelástico D-V-A para el sismo de El Centro con ductilidad constante.

En la figura anterior se obtuvo el desplazamiento de fluencia en el sistema, el cual tiene un valor de 4.9 pulgadas, y una aceleración de fluencia de 0.12 veces la aceleración terrestre. Como valor de entrada en el espectro se trata con una ductilidad de 1.21. Con estos datos, se puede calcular la deformación máxima en el sistema. Una de las ventajas del programa MARK_003 mencionadas con anterioridad es que se puede construir el espectro de respuesta considerando la energía total máxima desarrollada por el sistema. Ahora se tratará la aplicación de dicho diagrama representando el periodo estructural contra la energía normalizada, se emplea el

espectro para el sismo de El Centro y se observa si es conveniente emplear el aislamiento sísmico.

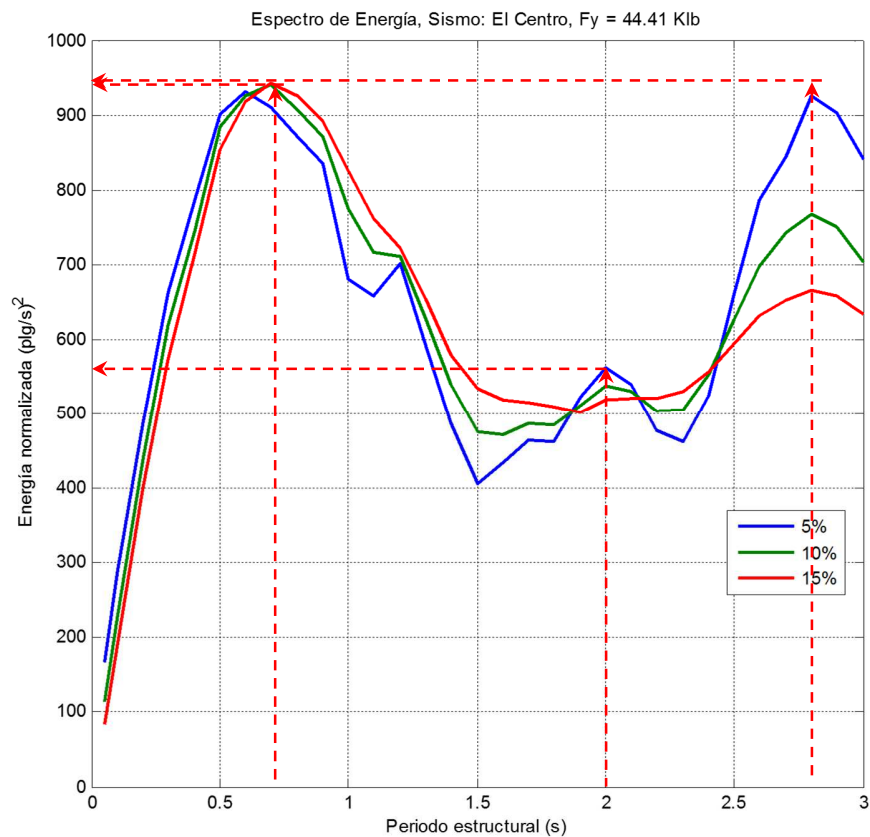


Fig. 3.26 Espectro de respuesta en términos de energía para sistemas inelásticos (sismo de El Centro)

Así como en las figuras y espectros D-V-A, se ha seleccionado el periodo natural de 2 s, el sistema estructural consiste en un modelo elastoplástico ligado a la cimentación mediante aisladores de base y sin modificar el amortiguamiento (5% habitual en la

mayoría de edificios), se ha obtenido uno de los valores mínimos de energía desarrollada por la estructura. Dadas las condiciones descritas, el sistema de aislación es conveniente para el tipo de zona sísmica similar a la ubicación del sismo de El Centro. Sin embargo, si se llega a construir un edificio con sistema de aislación y periodo fundamental de 2.8 s aproximadamente, la estructura estaría obligada a desarrollar la máxima cantidad de energía durante un evento sísmico similar. Para este sismo, zona geográfica y características geotécnicas, los periodos adecuados para emplear el aislamiento de base es de 1.5 s a 2.4 s. pero también, si no se colocara el sistema de aislación, los sistemas con periodo de oscilar considerablemente corto desarrollarían una mínima cantidad de energía por este sismo previamente analizado.

Ahora se emplea el programa MARK_003 para desarrollar el espectro de Energía del sismo de 1985 estación SCT. En la figura siguiente se vuelven a utilizar distintas fracciones de amortiguamiento, la fuerza de fluencia del sistema es idéntica para todos los modelos y se grafica la energía contra el periodo natural de los sistemas oscilatorios.

La energía representada en la gráfica es la total desarrollada por la estructura y por conveniencia se grafica hasta un periodo de tres segundos considerando las estructuras convencionales construidas o por construir.

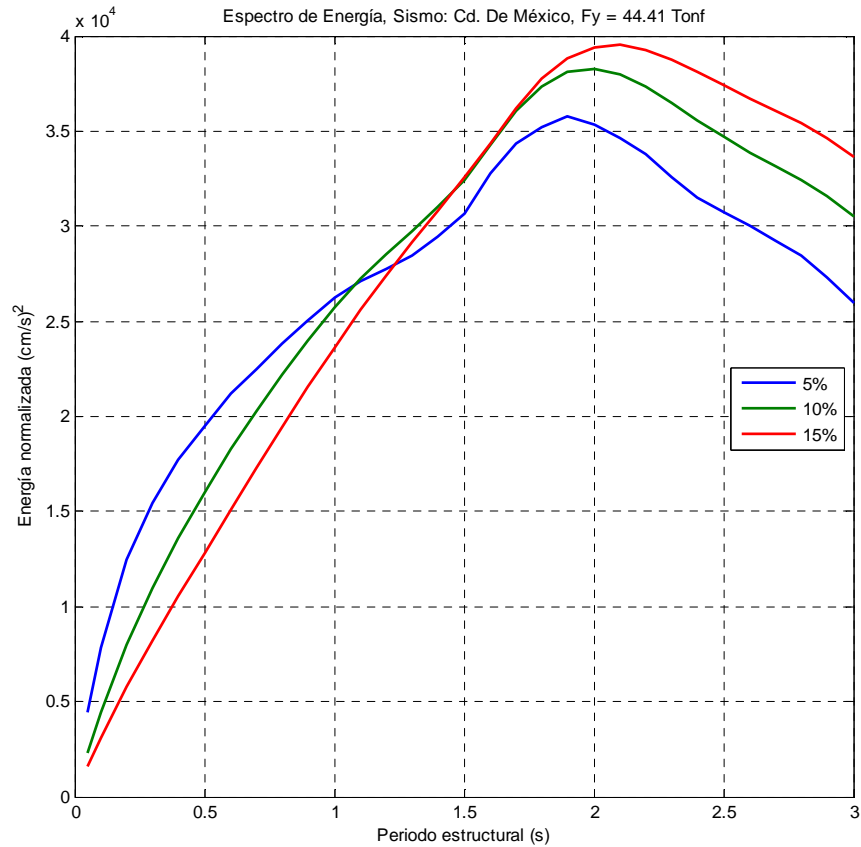


Fig. 3.27 Espectro de respuesta en términos de energía para sistemas inelásticos (sismo de Cd. De México 1985)

En este caso, no se tiene decremento considerable de la energía desarrollada por las estructuras, a comparación del caso anterior que existía una zona de mínima energía, el sismo de la Ciudad de México no tiene este efecto. La zona en la que sería deseable ubicar el periodo fundamental sería hasta antes de 0.5 s lo cual se obtiene construyendo estructuras rígidas. De ahí en

adelante, casi sin importar el nivel de amortiguamiento, no es deseable tener sistemas con mayor periodo debido a que se desarrolla más y más energía.

Para los dos casos anteriores solo se presentan los resultados por los sismos de El Centro y Ciudad de México, para poder confirmar el empleo o no del sistema de aislamiento, se deben realizar más análisis variando la fuerza de fluencia, distintos sismos y zonas geotécnicas. Por el momento no se puede aseverar que el uso de aisladores en zonas cercanas a las ubicaciones mencionadas sea óptimo o desfavorable.

Conclusión

En la actualidad existen diversos programas de análisis no lineal que no tienen inconveniente para trabajar con distintos modelos constitutivos de material o modelo estructural. Algunos presentan los resultados en una forma compleja de entender y necesitan adquirirse con algún costo económico. Sin embargo para poder realizar estudios e investigaciones futuras se han creado los programas MARK_000, MARK_001 y MARK_003 como herramientas que faciliten la manipulación de información como los acelerogramas o señales y obtener el comportamiento en forma simplificada para diversos sistemas de un grado de libertad. Este trabajo no pretende generar una reglamentación local para su uso en México, lo que busca es optimizar el uso de los aisladores de base mediante herramientas computacionales. Los programas desarrollados, ayudarían a diversas estructuras en específico en los que se desee utilizar el aislamiento sísmico. Sin embargo no es todo, para los códigos mencionados en el capítulo 3 en múltiples ocasiones es fundamental realizar un análisis dinámico no lineal y corroborar esos resultados con laboratorio.

El determinar la energía desarrollada por un sistema no es nuevo, se han desarrollado diversos trabajos y normatividades que exigen difundir o dar a conocer el comportamiento de esta

característica. Las herramientas computacionales generadas MARK dan a conocer dicha variación en función del tiempo y una aplicación de esta herramienta fue el generar espectros de energía, que aunque solo se comparó para dos sismos, podrían tener mayor aplicación para diversas ubicaciones o regiones sísmicas empleando aisladores sísmicos.

Por el momento el trabajo fundamental está desarrollado para esta utilidad, sin embargo, podrían generarse mejoras o simplificaciones para optimizar aún más los programas MARK. Así mismo con algunas modificaciones podría llegar a emplearse con otro fin, como por ejemplo, modelar el comportamiento de amortiguadores viscosos o mecanismos friccionantes. Es así como se concluye, denotando algunas características útiles de los programas desarrollados para analizar la respuesta de un sistema de un grado de libertad y la manipulación de información como de entrada como de salida.

Anexo 1

En este anexo se muestran algunas comprobaciones que se hicieron entre los programas MARK y el libro “Dinámica de las estructuras” de Anil K. Chopra. La primera parte corresponde a sistemas elásticos lineales, mientras que la segunda, se enfoca a sistemas elastoplásticos. El objetivo de este apéndice es mostrar la veracidad de los resultados y así poder emplearlo en trabajos futuros obteniendo la respuesta “real” de los sistemas estructurales de un grado de libertad.

A.1 EJEMPLO COMPARATIVO DE RESULTADOS, BIBLIOGRAFÍA CONTRA MARK_001

El programa MARK_001 no tiene ningún límite para evaluar o calcular la respuesta elástica lineal paso a paso de los diferentes sistemas de un grado de libertad, los datos necesarios son la excitación, no hay problema si es una función o con variación arbitraria.

A continuación se muestra la comparación de resultados entre el programa MARK_001 y una de las bibliografías empleadas, en ellas se puede observar la respuesta en el paso de tiempo, así como la respuesta máxima para el sismo de El Centro de 1940.

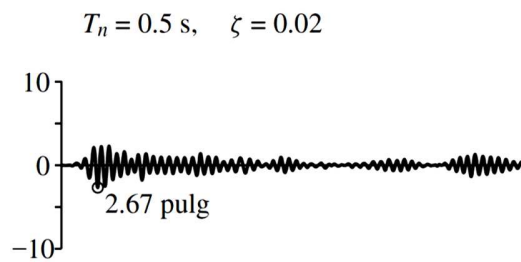


Fig. A.1.1. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

En los dos sistemas comparados se tiene las mismas propiedades dinámicas, tanto en periodo natural y fracción de amortiguamiento, la respuesta está medida en desplazamientos y los datos están disponibles en MatLab.

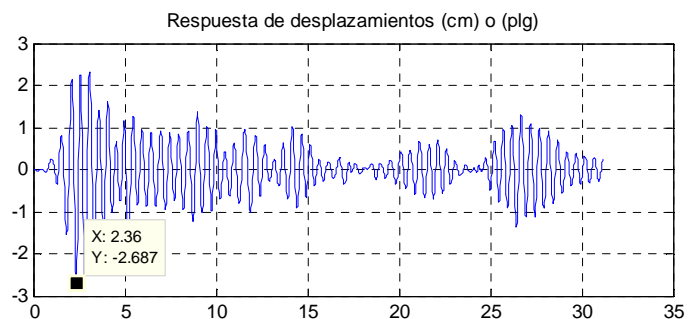


Fig. A.1.2. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro mediante MARK_001.

En las dos gráficas se observa la variación de la respuesta del mismo sistema de un grado de libertad, el máximo desplazamiento calculado para ambos sistemas es de 2.68 plg.

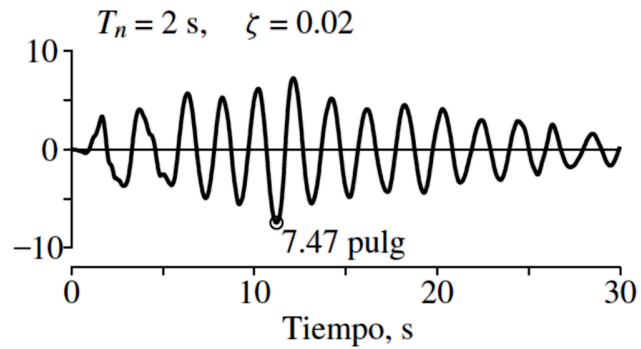


Fig. A.1.3. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

En la gráfica A.1.3 se modifica el periodo natural de vibrar del sistema, se introducirán las mismas propiedades en el programa MARK_001 para generar la comparación nuevamente. La fracción de amortiguamiento sigue conservándose en dos por ciento y el sismo considerado para ambos sistemas es el mismo que en el caso anterior.

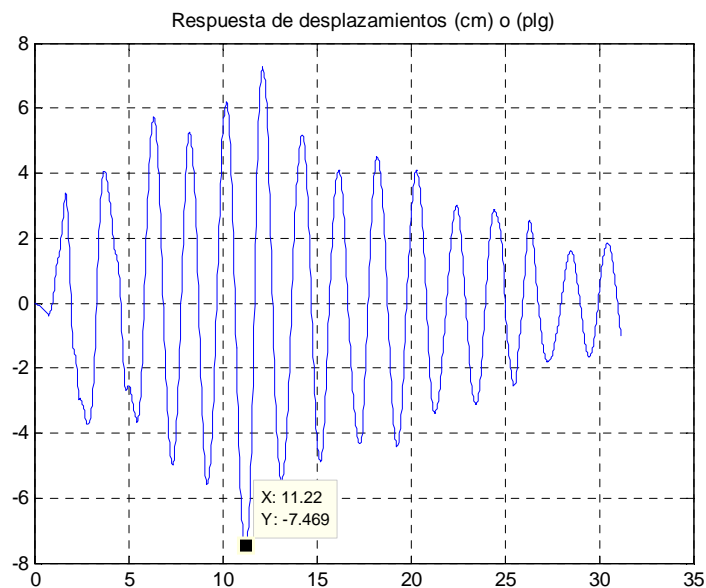


Fig. A.1.4. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro mediante MARK_001.

El desplazamiento obtenido de 7.47 plg es muy similar empleando la referencia bibliografía y el programa MARK_001, así mismo en términos de variación sigue el mismo comportamiento entre ambos resultados. En forma adicional, en las gráficas a continuación se muestra otro sistema adicional comparativo para poder generar confianza en el uso del programa MARK_001.

En esta nueva condición, el periodo de vibrar se mantiene en dos segundos, la variante ahora radica en la fracción de amortiguamiento considerada del cinco por ciento.

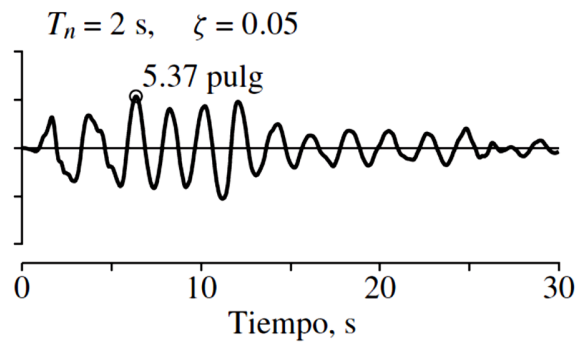


Fig. A.1.5. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

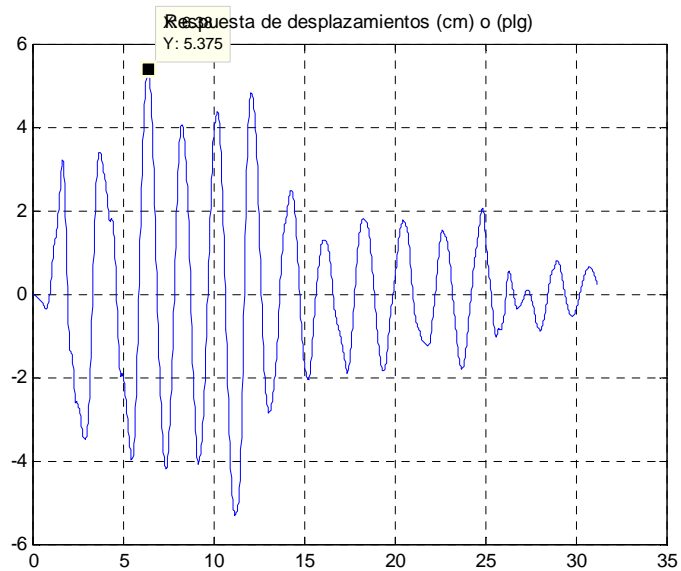


Fig. A.1.6. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

El resultado final es obtener la respuesta de un sistema definido ante cualquier excitación, con los tres resultados comparativos mostrados. Con lo anterior se concluye y se determina que el

programa de análisis para sistemas de un solo grado de libertad está desarrollado para realizar y calcular la respuesta paso a paso.

A.2 EJEMPLO COMPARATIVO DE RESULTADOS, BIBLIOGRAFÍA CONTRA MARK_003

El programa MARK_003 se enfoca a determinar la respuesta inelástica en el tiempo de un sistema de un grado de libertad considerando un modelo constitutivo elastoplástico. En este segmento, se presenta la comparación empleando el sismo de El Centro que utiliza el libro del Dr. Anil K. Chopra.

En el primer caso se tiene una estructura con un periodo de vibrar de 0.5 s y valor de fracción de amortiguamiento nulo, se expone la respuesta en términos de desplazamiento.

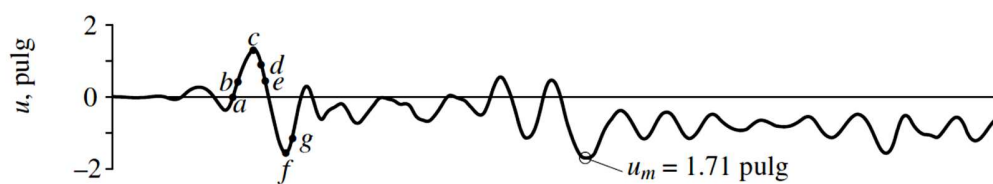


Fig. A.2.1. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

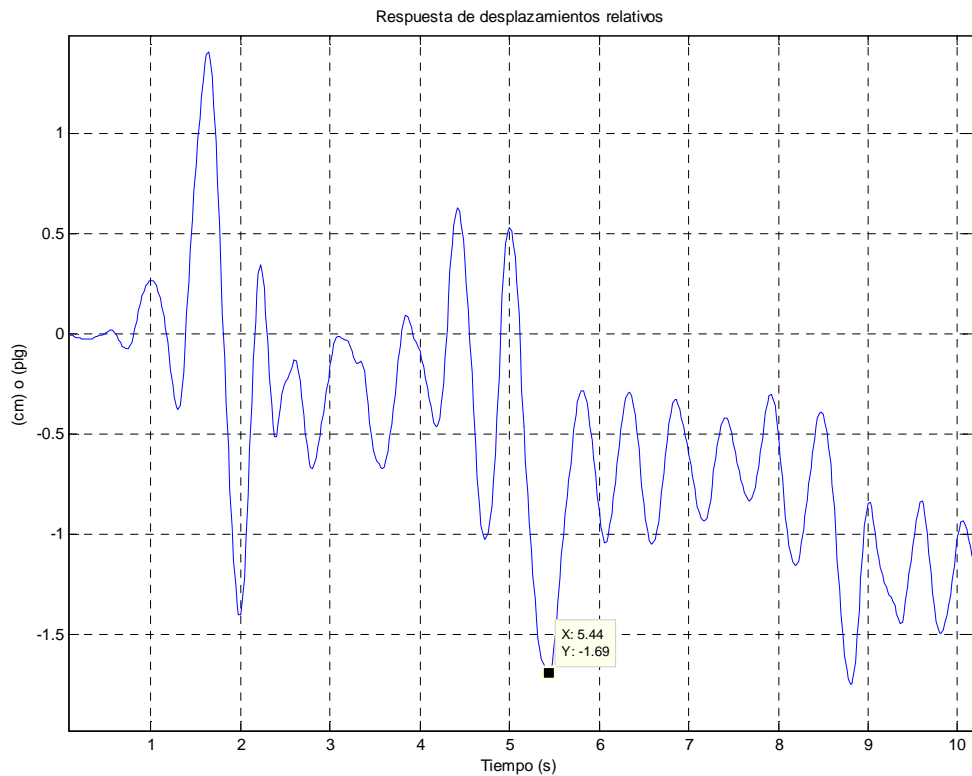


Fig. A.2.2. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

En primer orden se encuentra el ejercicio de la bibliografía, posteriormente se presenta el resultado mediante el empleo de MARK_003.

En forma similar se presentan a continuación distintos sistemas variando la fuerza de fluencia en cada uno, se presentan entonces las mismas características en periodo igual a 0.5 s y 5% como valor de fracción de amortiguamiento.



Fig. A.2.3. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

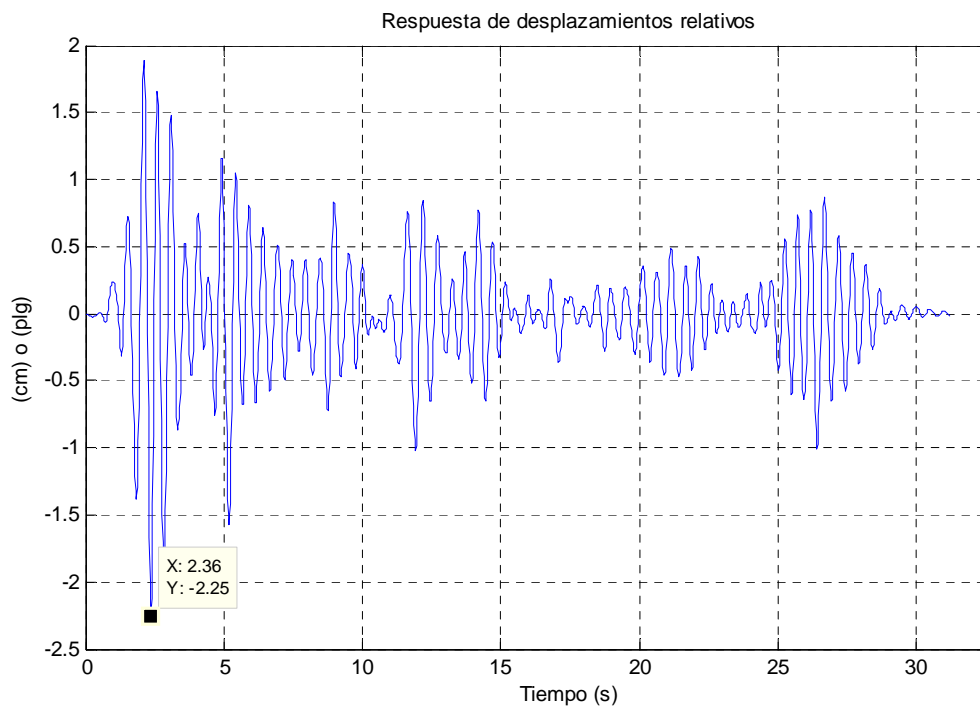


Fig. A.2.4. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

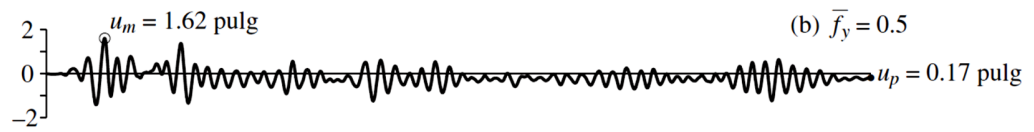


Fig. A.2.5. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

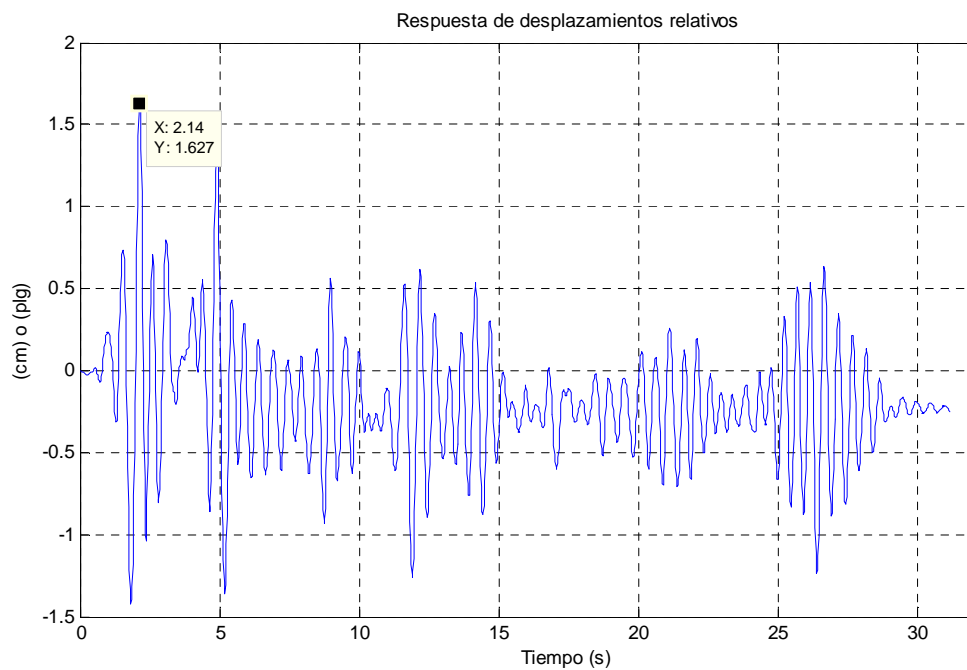


Fig. A.2.6. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

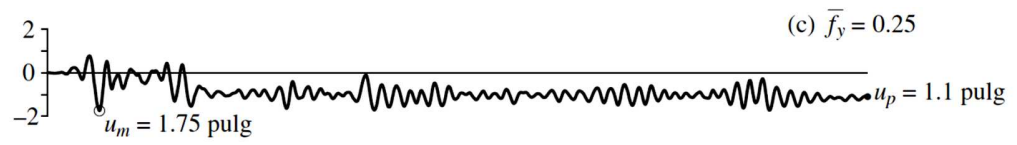


Fig. A.2.7. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

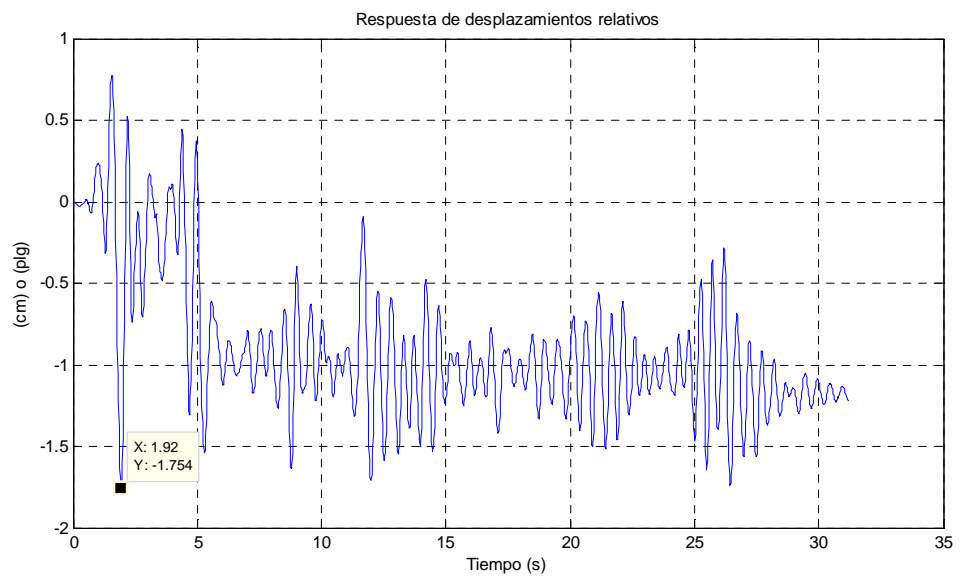


Fig. A.2.8. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

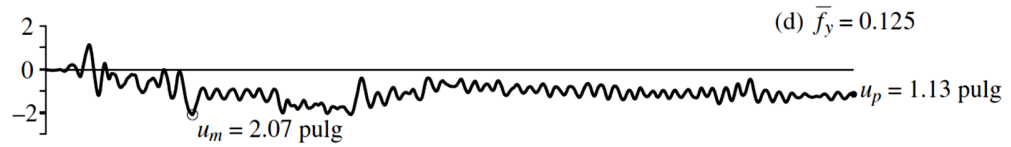


Fig. A.2.9. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

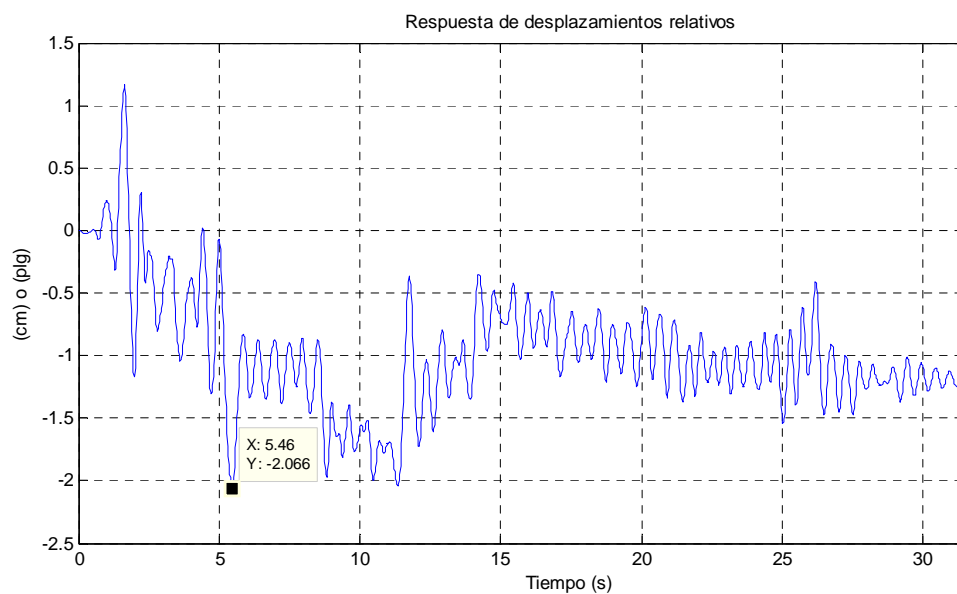


Fig. A.2.10. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

Hasta el momento se ha verificado la eficiencia del programa MARK_003 comparando la respuesta en términos de desplazamiento. En la siguiente parte, se muestra la comparación de la respuesta en términos de la energía desarrollada. Primero se muestra la gráfica indicada en la bibliografía, en forma posterior se observa la gráfica obtenida mediante el programa desarrollado.

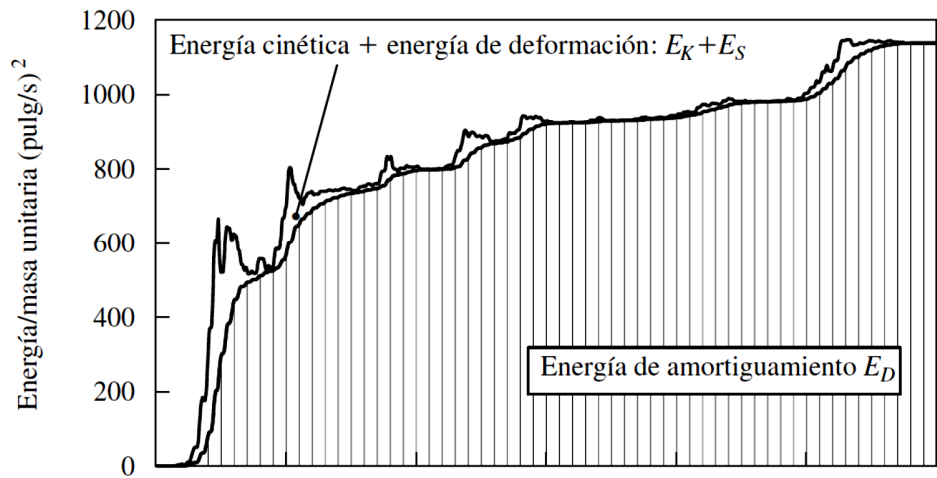


Fig. A.2.11. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

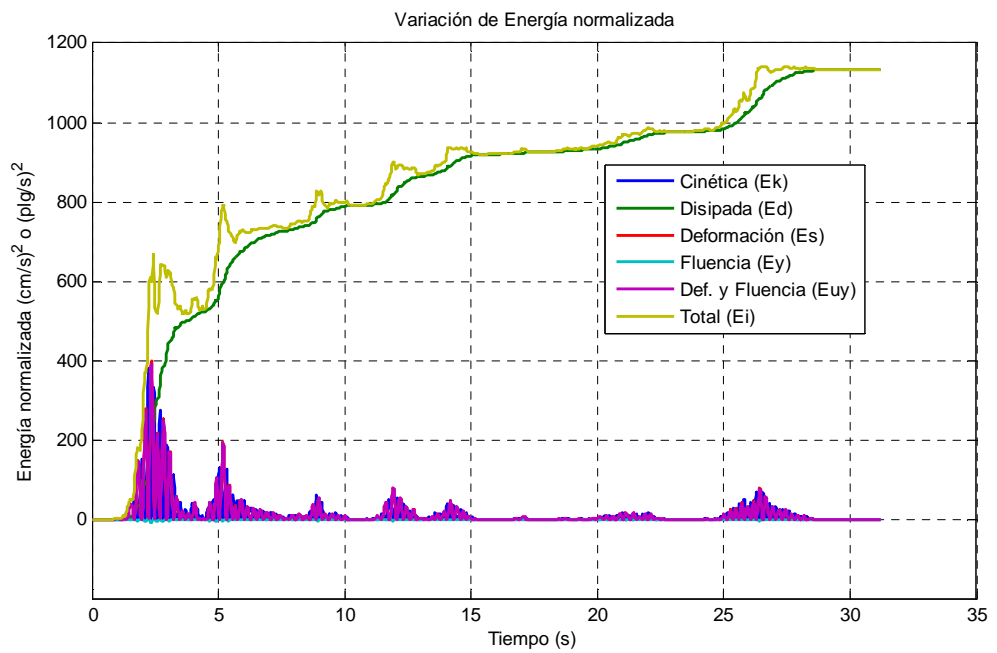


Fig. A.2.12. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

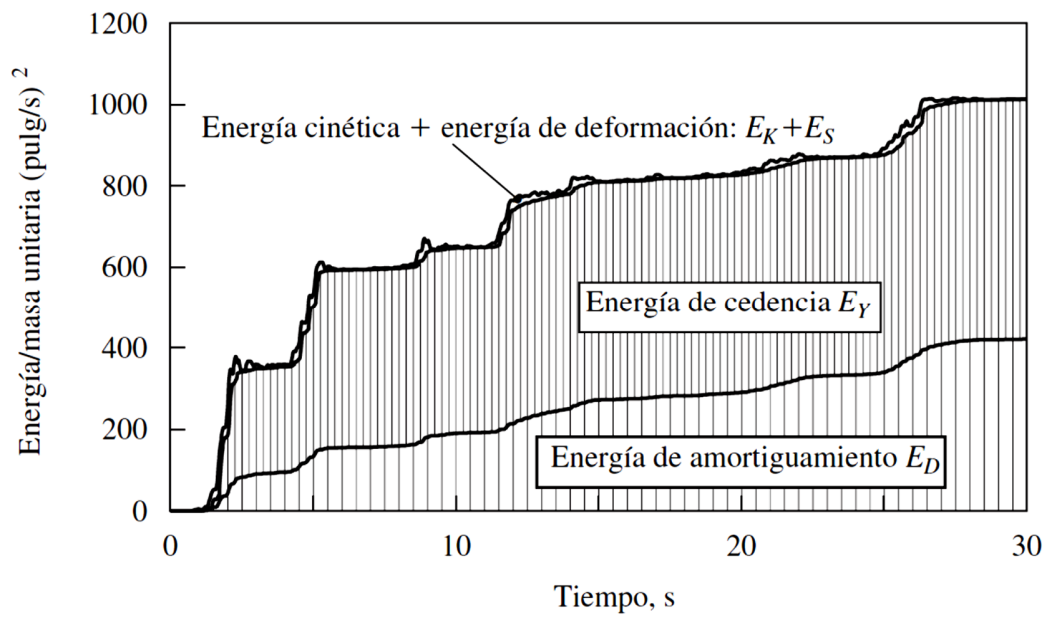


Fig. A.2.13. Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

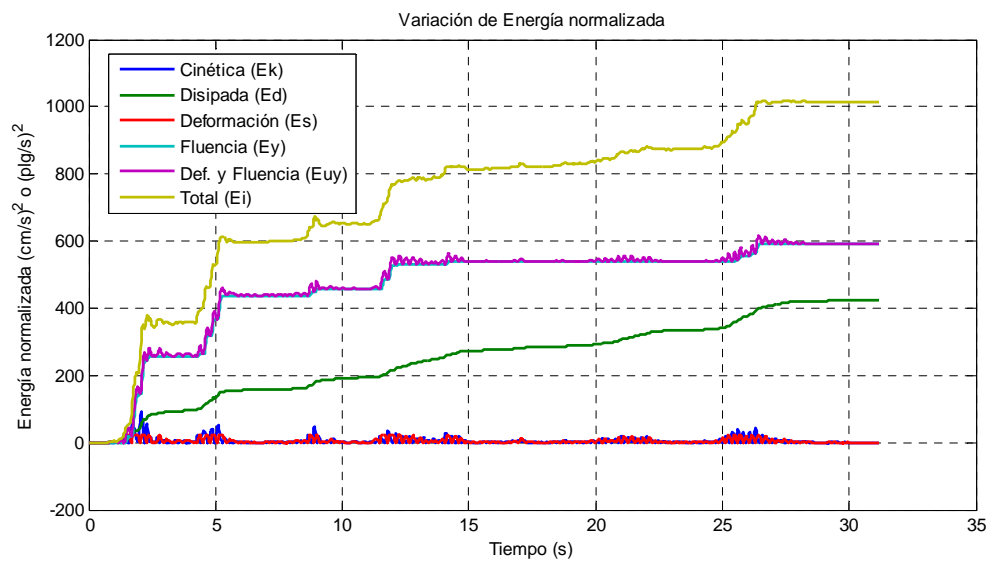


Fig. A.2.14 Respuesta de desplazamientos para el sismo de El Centro.

Con esto se ha verificado la eficiencia y resultados de los programas desarrollados, existe una mínima diferencia y se piensa que es por la elección del tipo de método analizado. Para el método de análisis dinámico se eligió el método de aceleración lineal de Newmark, mientras la bibliografía emplea el método de aceleración promedio. Sin embargo, para los intervalos de muestreo empleados existe concordancia entre los dos métodos y se ha minimizado entonces el error numérico.

Notación

a	Respuesta en términos de aceleraciones relativas
an	Respuesta de aceleraciones relativas para el programa MARK_003
a1	Constante para el método de Newmark
a2	Constante para el método de Newmark
a3	Constante para el método de Newmark
A1	Constante para el método de Newmark en el programa MARK_003
A2	Constante para el método de Newmark en el programa MARK_003
A3	Constante para el método de Newmark en el programa MARK_003
be	Valor de beta para el método de Newmark
c	Constante de amortiguamiento en el sistema
C	Constante de amortiguamiento en el sistema
Cn	Amortiguamiento del sistema para el programa MARK_003
Ccrit	Amortiguamiento crítico del sistema
Ccrn	Amortiguamiento crítico del sistema para el programa MARK_003
CH1	Canal de registro de aceleraciones número 1
CH2	Canal de registro de aceleraciones número 2
CH3	Canal de registro de aceleraciones número 3
Du	Incremento instantáneo de desplazamiento en el método de Newmark
Duc	Ductilidad desarrollada en el sistema al realizar el análisis no lineal
ed	Energía instantánea disipada
Ed	Energía disipada acumulada en el paso de tiempo
Ek	Energía cinética
Ei	Energía total desarrollada por el sistema
EL	Elección de canal de excitación sobre el sistema
Em	Energía total máxima desarrollada en el sistema
Es	Energía de deformación
Euy	Energía de deformación y fluencia en el sistema
Ey	Energía por fluencia
fd	Fuerza disipadora generada por la velocidad
fi	Fuerza de inercia generada por la aceleración
fn	Frecuencia natural cíclica
fs	Fuerza provocada por el desplazamiento
Fs	Fuerza debida al desplazamiento en el programa MARK_003
Fy	Fuerza de fluencia desarrollada en el sistema
g	Constante gravitacional terrestre
ga	Valor de gamma para el método de Newmark
imd	Intervalo de muestreo del registro de aceleraciones

k	Constante de rigidez lateral en un sistema
K	Rigidez del sistema de un grado de libertad
kc	Valor de rigidez instantánea para el método de Newmark
Kc	Valor de rigidez instantánea para el método de Newmark y sistemas no lineales
K1	Rigidez inicial del sistema analizado para el programa MARK_003
K2	Rigidez post fluencia del sistema para el programa MARK_003
m	Cantidad de materia que posee el sistema
M	Masa del sistema de un grado de libertad
P	Excitación actuante sobre el sistema analizado de un grado de libertad
Pc	Valor de excitación instantánea para el método de Newmark
Rc	Residuo existente al emplear el método de Newton Raphson
t	Variable tiempo
Te	Periodo estructural del sistema
Tn	Periodo natural del sistema
u	Desplazamiento relativo del sistema
ui+1	Desplazamiento relativo en el tiempo i+1
um	Desplazamiento máximo del sistema en el programa MARK_003
un	Respuesta de desplazamientos relativos para el programa MARK_003
ut	Desplazamiento total del sistema
uy	Desplazamiento de fluencia del sistema
u(0)	Desplazamiento inicial
uo	Desplazamiento inicial
û(0)	Velocidad inicial en el sistema
û	Velocidad relativa del sistema
ûi+1	Velocidad relativa en el tiempo i+1
ü	Aceleración relativa del sistema
üg	Aceleración del terreno
üi+1	Aceleración relativa en el tiempo i+1
üo	Aceleración inicial para el método de Newmark
v	Respuesta en términos de velocidades relativas
vn	Respuesta de velocidades relativas para el programa MARK_003
w	Peso del sistema
Z	Fracción de amortiguamiento en el sistema estructural
wn	Frecuencia natural en el sistema analizado
wnn	Frecuencia natural en el sistema analizado en el programa MARK_003

β	Constante para el método numérico de análisis paso a paso de Newmark
γ	Constante para el método numérico de análisis paso a paso de Newmark
Δt	Intervalo de muestreo de la excitación
ζ	Fracción de amortiguamiento
μ	Factor de ductilidad del sistema elastoplástico
π	Constante numérica del número pi
ω_n	Frecuencia natural o velocidad angular

Bibliografía

- Báez López, David y O. Cervantes Villagómez. *MATLAB con Aplicaciones a la Ingeniería, Física y Finanzas*. 2ª ed. México: Pearson Educación, 2013
- Chopra, Anil K. *Dynamics of structures. Theory and applications to earthquake engineering*. 3ª ed. U.S.A.: Prentice Hall, 1995.
- Chopra, Anil K. *Dinámica de estructuras*. 4ª ed. México: Pearson Educación, 2014.
- Clough, Ray W. y Joseph Penzien. *Dynamics of structures*. 3ª ed. U.A.A.: Computers & Structures, 1995.
- Paz, Mario. *Dinámica estructural. Teoría y cálculo*. 3ª ed. España: Editorial Reverté S.A., 1992.

Zavala Cueva, Norma Verónica (1996). *Efecto del aislamiento de base en la respuesta no lineal de estructuras*. (Tesis Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlán. México.