

MODELACIÓN INELÁSTICA DINÁMICA SIMPLIFICADA DE EDIFICACIONES DE CONCRETO REFORZADO

J.R. Hernández Ávila¹,

Programa de Ingeniería Civil - Universidad Pontificia Bolivariana, Montería Córdoba.

Recibido enero 15 de 2014 – Aceptado abril 25 de 2014

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v8n1.a06>

Resumen— En Colombia los métodos de análisis inelásticos dinámicos son poco utilizados debido a su complejidad y demora en la obtención de respuestas, por lo cual es necesario contar con una herramienta sencilla que ayude a solucionar problemas sísmicos. Se presenta un programa de modelación inelástica dinámica simplificada de un grado de libertad, tiene como dato de entrada la curva de pushover, utiliza el método de Newmark para la obtención de la respuesta inelástica y propone dos alternativas de solución para mejorar el comportamiento estructural de un edificio utilizando amortiguadores y disipadores, los cuales se colocan en los pisos donde la deriva máxima permitida no se cumple, para mejorar la deriva de estos pisos.

Palabras clave— Inelástico, Dinámico, Empuje.

Abstract— In Colombia the inelastic dynamic analysis methods are hardly used because of their complexity and show speed to get results, for this reason, it is necessary to have a simple but efficient tool to help engineers to solve seismic problems. In this paper a program that models inelastic and dynamic behavior, based in a one degree of freedom simplification is presented. The programs employs as principal input the pushover curve and use the Newmark method to obtain the inelastic response and in the same way, it proposes two alternatives of solution to improve the structural behavior of a building by the introduction of dampers or dissipators, which are placed in the floors where the maximum allowed drift is exceed.

Keywords—Inelastic, Dynamic, pushover.

I. INTRODUCCIÓN

Colombia es un país en el cual se han presentado sismos de magnitud importante en las últimas décadas. Las estructuras debido a sismos se dañan o colapsan por la deficiencia de la ductilidad.

La mayoría de análisis y diseños realizados actualmente en Colombia son elásticos y los métodos de análisis inelásticos dinámicos son muy complejos y demorados, por lo cual es necesario tener una

herramienta simplificada, que ayude a pronosticar el comportamiento de la estructura y darle soluciones ante problemas sísmicos.

El programa parte de un modelo en este caso un pórtico normal establecido de múltiple grados de libertad y se convierte en un sistema de un grado de libertad inelástico dinámico simplificado el cual nos ayudará a predecir el comportamiento estructural del pórtico. En universidades de Estados Unidos, Europa y Asia se han elaborado programas que resuelven analíticamente sistemas de un grado de libertad, sin embargo software's tales como el USEE, el BISPEC los cuales son muy académicos.

II. METODOLOGIA

La dinámica estructural estudia las vibraciones de cuerpos flexibles aunque en muchos caso las deformaciones relativas entre algunas partes de la estructura [1] dentro del contexto de la mecánica es el estudio de los cuerpos o conjuntos de partículas en movimiento. La dinámica se divide en dos campos: La cinemática la cual estudia la geometría del movimiento relacionando el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y el tiempo, sin hacer referencia a las causas del movimiento. La Cinética la cual estudia la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, la masa del cuerpo y su movimiento permitiendo predecir los movimientos que causan las fuerzas o determinar las fuerzas necesarias para producir un movimiento dado. Las tres leyes de Newton son los fundamentos de la estática y de la dinámica tanto de cuerpos rígidos como de flexibles. El número de grados de libertad de un sistema, desde el punto de vista de la dinámica, corresponde al número mínimo de coordenadas necesarias para definir la posición en el espacio y en el tiempo de todas las partículas de masa del sistema [1].

Los sistemas de control de movimiento (Fig. 1.), se pueden clasificar como de control activo, pasivo. Sistemas de control activo: tienen como particularidad que la magnitud y dirección de las fuerzas generadas están determinadas por un controlador basado en la información de un sensor y una estrategia (algoritmo) de control que determina la magnitud de las fuerzas.

¹ J. Hernández Ávila, Universidad Pontificia Bolivariana, Montería Córdoba. E mail: jose.hernandez@upb.edu.co

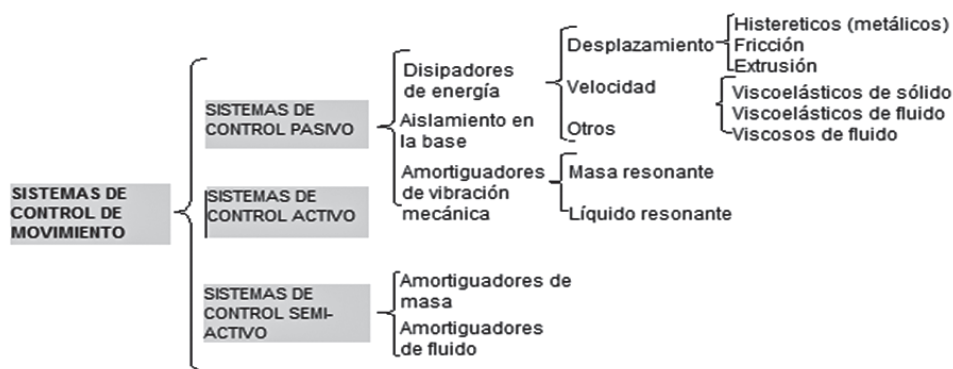


Fig. 1. Sistema de control de movimiento

Sistemas de control activo: tienen como particularidad que la magnitud y dirección de las fuerzas generadas están determinadas por un controlador basado en la información de un sensor y una estrategia (algoritmo) de control que determina la magnitud de las fuerzas. Las fuerzas son suministradas por un sistema de control activo (Fig. 2), desarrolladas por medio de actuadores electro-hidráulicos los cuales necesitan ser totalmente activados por una fuente de poder. En principio un sistema de control activo debería proveer mejor respuesta que un sistema de control pasivo. Sin embargo, debido a que las fuerzas de control que se requieren para mitigar sismos fuertes son más grandes que el mecanismo de control y la exigencia

de mantenimiento constante estos sistemas aún no han sido utilizados para aplicaciones sísmicas [2].

Sistemas de control semi-activo: estos sistemas son una derivación de los sistemas de control pasivo. En principio son sistemas de control pasivo a los cuales se les pueden variar sus propiedades mediante un mecanismo parecido al de los sistemas de control activo. Estos sistemas mantienen el esquema de los sistemas de control activo, sin embargo las fuerzas de control son generadas por los movimientos relativos entre los puntos de unión del dispositivo y la estructura. Los sistemas de control semi-activo requieren fuentes de poder para poder cambiar las propiedades de los dispositivos [2].



Fig. 2. Sistema de control activo.

Sistemas de control pasivo: se caracterizan porque desarrollan fuerzas de control de movimiento en los puntos donde se unen al sistema estructural. Uno de los más importantes sistemas de control pasivo es el aislamiento de base, el cual desacopla parcialmente la estructura del movimiento del terreno mediante mecanismos que incrementan la flexibilidad del

sistema global estructura-base y al mismo tiempo producen un amortiguamiento apropiado [3]. La energía necesaria para generar estas fuerzas es provista por el movimiento de los puntos de unión durante vibraciones dinámicas (Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7) [2].

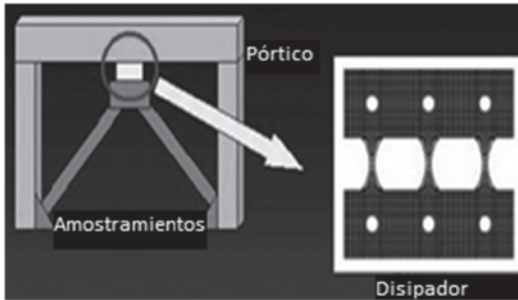


Fig. 3. Modelo de disipador.

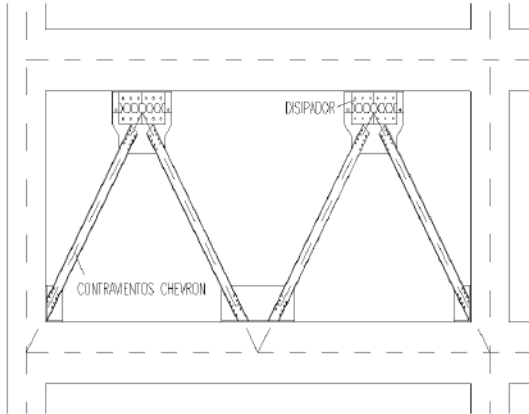


Fig. 4. Disipador pasivo (Disipador con contraviento chevron)

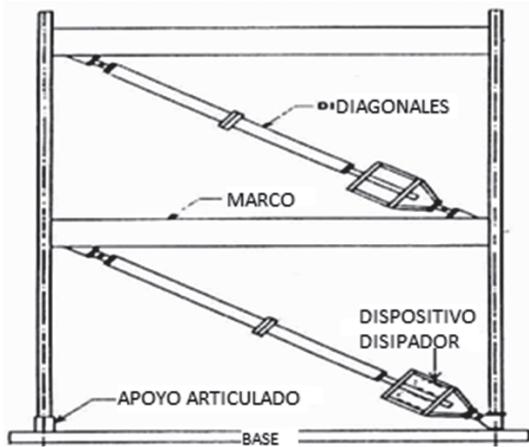


Fig. 5. Disipador pasivo en diagonal
Fuente: Reyes, 2002.



Fig. 6. Amortiguador pasivo.
Fuente: Reyes, 2002

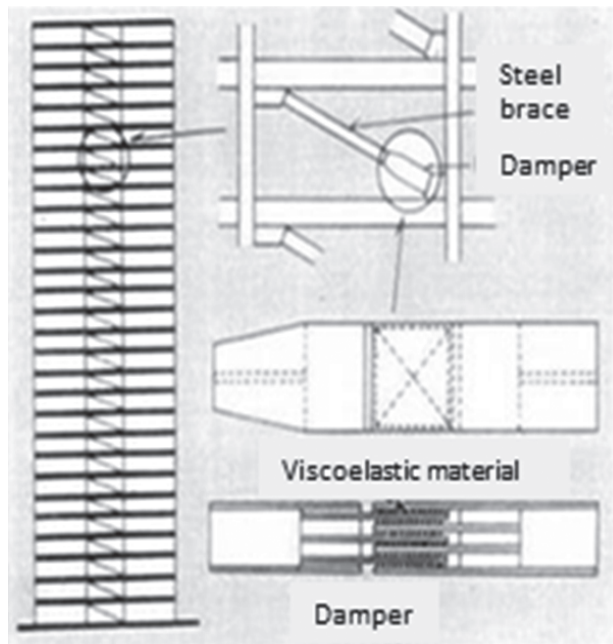


Fig. 7. Amortiguador pasivo inclinado
Fuente: Reyes, 2002.

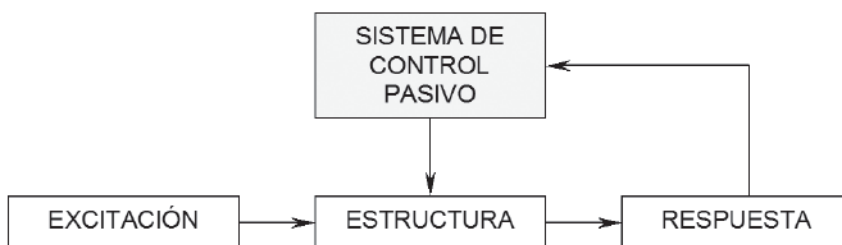


Fig. 8. Funcionamiento de los sistemas de control pasivo

El Software de modelación inelástica dinámica simplificada (Fig. 10) fue programado en visual Basic ver (Fig. 9) [4] y verificado mediante hojas de cálculo de Microsoft Excel [5], en el cual se le da la curva pushover como dato de entrada obtenida del programa SAP2000 [6]. Mediante procedimientos dinámicos paso a paso se obtendrán resultados de análisis, los cuales serán comparados con un modelo real específico de un edificio. En la mayoría de países del mundo se utilizan códigos de diseño, para Colombia la norma reglamentada para el análisis y diseño de estructuras es la NSR-98 [7], la cual están soportada mediante reuniones de ingenieros en la asociación colombiana de ingeniería sísmica AIS, normas extranjeras tales como las de Norteamérica ATC40 [8] y Europa y están en continua evaluación debido a una serie de movimientos sísmicos que además de producir lamentablemente víctimas humanas y daños en edificaciones revivió la necesidad de revisar toda la problemática de la construcción sismo resistente y de las obligaciones y responsabilidades que al respecto tiene el estado, los profesionales de la ingeniería, la arquitectura y la construcción. [5]



Fig. 9. Software de Modelación inelástica dinámica simplificada

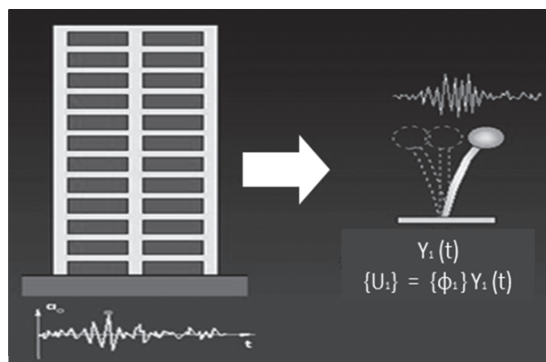


Fig. 10. Modelo de un grado de libertad.
Fuente: Molinares, 1996.

Datos Iniciales

Cualquier estructura posee un número infinito de grados de libertad, debido a su continuidad, pero el proceso de discretización en elementos supone un número finito [9], por lo tanto se debe convertir la estructura de varios grados a un grado de libertad equivalente, para ello es necesario realizar previamente un análisis paso a paso [10] “pushover” (Fig. 11).

Los datos de aproximación bilineal de la curva de capacidad son: Período fundamental de la edificación (T), Porcentaje del amortiguamiento intrínseco con respecto al crítico (ξ), Cortante de fluencia de la edificación (V_y), Porcentaje de coeficiente de la rigidez post-fluencia ó porcentaje de endurecimiento de la edificación (α).

Otros datos básicos son: Número de pisos del edificio, Porcentaje de la altura de entrepiso para el cálculo de la deriva máxima (%hpi), Matriz de masa de la edificación $[M]$, Forma modal asociada a el período fundamental de la edificación $\{\phi\}$, Matriz de altura de la edificación $\{H\}$.



Fig. 11. Método de pushover.
Fuente: Molinares, 1996.

La ecuación diferencial que gobierna el desplazamiento lateral $u(t)$ para la idealización estructural aplicando fuerzas es $m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{y}_s(t)$, donde se denota el diferencial con respecto al tiempo, la velocidad, la aceleración y la masa del sistema idealizado [11]

Cálculos para convertir la estructura en un grado de libertad

Conociendo los datos anteriormente mencionados se calculan las propiedades de la estructura de un grado de libertad equivalente en el primer modo de vibración el cual puede ser asumido como un sistema elástico aplicando una fuerza externa oscilatoria [12] ver (Fig. 12 y Fig. 13) así:

Masa equivalente (M_r) = $\{\phi\}^T [M] \{\phi\}$
 Frecuencia natural del sistema (w) = $2\pi / T$
 Constante del amortiguador (c) = $2 M_r w (\xi/100)$
 Rigidez de la edificación (K_t) = $w^2 \{\phi\}^T [M] \{\phi\}$
 Rigidez equivalente (K_r) = $4\pi^2 M_r / T^2$
 Rigidez post-fluencia (K_{sh}) = $K_r (\alpha/100)$
 Cortante de fluencia equivalente (V_{ry}) = $V_{ty} * \{\phi\}^T [M] * \{\phi\} / T^2$
 Desplazamiento de fluencia de la cubierta de la edificación (u_{ty}) = V_{ty} / K_t
 Desplazamiento de fluencia de la cubierta de la estructura equivalente (u_{ry}) = V_{ry} / K_r
 Factor de conversión de desplazamiento en la cubierta de la estructura equivalente a desplazamiento de la cubierta de la edificación $u_{ty} / u_{ry} = V_{ty} / V_{ry}$

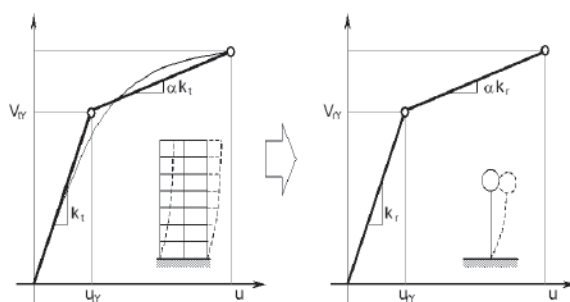


Fig. 12. Conversión de varios grados de libertad a un grado de libertad.

Método de Newmark para el análisis dinámico

Después de la obtención de los valores anteriores se procede a aplicar el método de Newmark para realizar el análisis de respuesta inelástico. El método necesita como datos iniciales: Masa equivalente (M_r), Rigidez equivalente (K_r), Constante del amortiguador (c), definir si el método es de aceleración promedio ($\gamma=1/2$ $\beta=1/4$) o de aceleración lineal ($\gamma=1/2$ $\beta=1/6$), desplazamiento inicial $u(1)=0$, velocidad inicial $\dot{u}(1)=0$, Aceleración del terreno $a(t)$, Rigidez inicial $k_{i(1)} = 0$. Aplicando el Método de Newmark se obtienen las aceleraciones, velocidades y desplazamientos para cada instante de tiempo.

Derivas

Para el cálculo de la deriva máxima permisible y la deriva de piso se tienen como datos:

Forma modal asociada a el periodo fundamental de la edificación $\{\phi\}$.

Matriz de altura de la edificación $\{H\}$.

Factor de conversión de desplazamiento en la cubierta de la estructura equivalente a desplazamiento de la cubierta de la edificación $u_{ty} / u_{ry} = V_{ty} / V_{ry}$ - Deflexión máxima de la estructura equivalente $u(\max)$.

Deriva de máxima permisible por piso $\{\Delta p_i\} = \%h p_i * \{H\}$.

Deflexión de la cubierta $u_{tmax} = (u_{ty} / u_{ry}) * u_{max}$

Deflexión por piso $\{u_t\} = u_{tmax} * \{\phi\}$.

Deriva de piso $\{\Delta i\} = ((u_t(i) - u_t(i-1))^2)^{1/2}$.

Demanda de ductilidad $U = u_{tmax} / u_{ty} = u_{max} / u_{ry}$

Si $\Delta p_i > \Delta i$ Cumple con la deriva máxima permisible.

Se determinan cuales pisos cumplen o no la deriva máxima permisible.

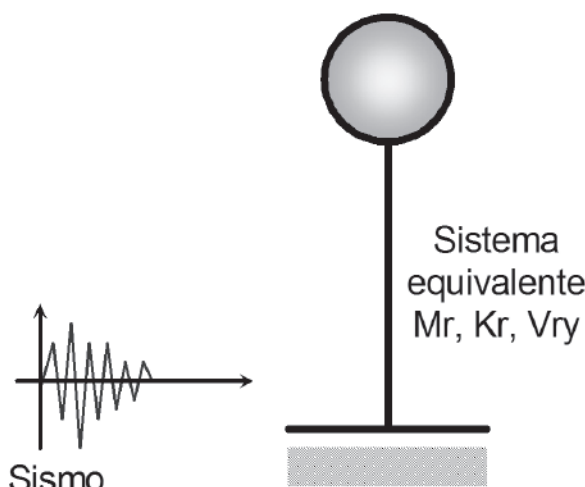


Fig. 13. Edificio modelado como un grado de libertad.

Propiedades del Amortiguador

Se realizan los mismo cálculos que en el edificio (Fig. 14), se tienen en cuenta los mismos datos del edificio lo único que cambia es el Porcentaje del amortiguamiento intrínseco con respecto al crítico (ξ) el cual tiene en cuenta el amortiguamiento del amortiguador.

Hay que buscar un amortiguamiento tal que cumpla con $\Delta p_i > \Delta i$ (que todas las derivas cumplan con la deriva máxima permisible).

La constante del amortiguador equivalente se calcula como la diferencia entre la constante del amortiguador del edificio con amortiguador y la del edificio sin amortiguador.

La cantidad de amortiguadores por piso se obtiene multiplicando la constante del amortiguador equivalente y el vector de diferencias de ϕ y se colocan en los pisos donde la deriva máxima permisible no se cumple.

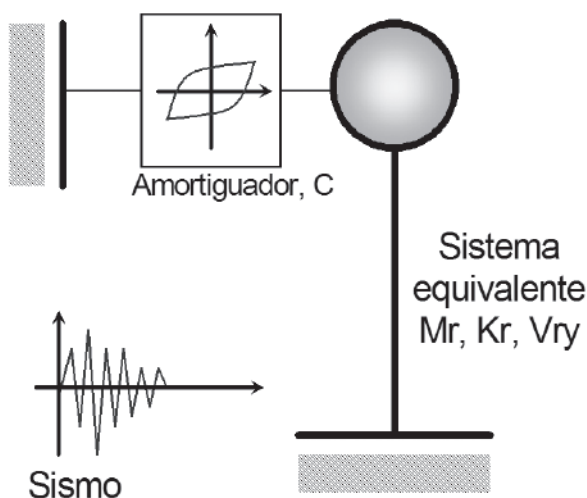


Fig. 14. Edificio con amortiguadores modelado como un grado de libertad con un amortiguador equivalente.

Propiedades del Disipador

Modelación del edificio con el disipador (Figura 15).

La rigidez de piso es la división entre el cortante de piso y la deriva. $K_{pi} = V_i / \text{Deriva} = w^2 \cdot [M] \cdot \{\phi\} / (\phi_i - \phi_{i-1})$.

La rigidez de fluencia es igual al cortante de fluencia entre la deriva de fluencia.

La Rigidez del disipador por piso se calcula con la diferencia entre la rigidez de piso y la rigidez de fluencia.

La cantidad de disipadores por piso se calcula dividiendo la rigidez del piso entre la rigidez del disipador suministrado y se colocan en los pisos donde la deriva máxima permisible no se cumple.

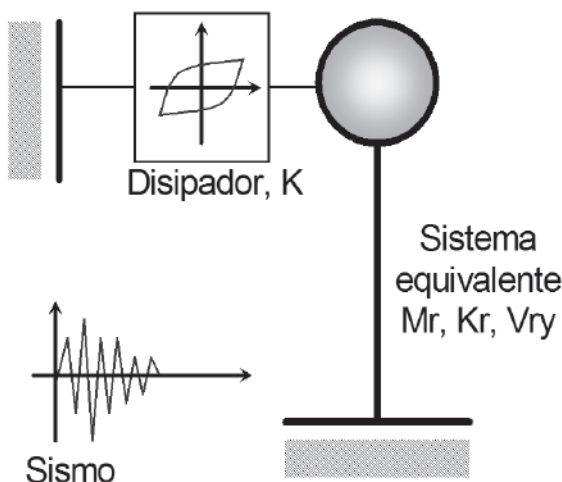


Fig. 15. Edificio con disipadores modelado como un grado de libertad con un disipador equivalente.

Para comprobar el programa se analizó el Edificio Sherman Oaks el cual se eligió como ejemplo teniendo en cuenta que se encuentra completamente instrumentada y ha sufrido durante su vida dos sismos importantes: el sismo de San Fernando en 1971 y el sismo de Northridge en 1994.

Descripción de la estructura

El edificio comercial Sherman Oaks posee 15 pisos (Fig. 16), se encuentra localizado en Los Ángeles (USA). La estructura tiene una planta rectangular de 58.83 m de longitud por 22.86 m de ancho, donde se encuentran ubicados ocho ejes de pórticos transversales separados 8.23 m y dos ejes de pórticos longitudinales separados 10.97 m.

El edificio tiene dos sótanos encerrados por muros de cortante. El suelo de cimentación es un depósito aluvial reciente conformado por suelo firme con capas de suelo blando que varían con la altura.

El edificio esta cimentado sobre zapatas con pilotes de concreto de 7.32 m de profundidad. Las columnas del primer piso son de concreto reforzado de 35 MPa de resistencia a la compresión mientras que las vigas y columnas de los demás pisos son de concreto reforzado de 262.5 MPa de resistencia a la compresión. El sistema estructural del edificio está conformado por pórticos de concreto reforzado resistentes a momentos en la dirección transversal y longitudinal. El entrepiso está conformado por una placa maciza de 10.16 cm apoyada sobre vigas secundarias armadas en sentido longitudinal [2].



Figura 16. Edificio de análisis.
Fuente: Reyes, 2002

Modelo en Sap2000

Se utilizó un modelo en el programa Sap 2000 [4] (Fig. 17) para la estimación de los datos básicos para el programa realizado.

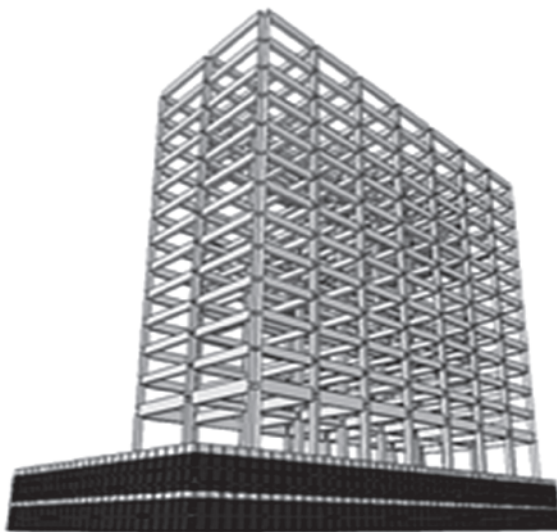


Fig. 17. Edificio de análisis modelado en SAP2000.
Fuente: Sap 2000.

Los datos básicos son: Periodo en segundos (T), Cortante de fluencia (V_{ty}), porcentaje de coeficiente

de la rigidez post-fluencia (α), forma de la deflexión.

Se realizó un análisis elástico de eigenvector y se obtuvo que el periodo fundamental del edificio es 2.95 s para el primer modo de vibración de la estructura.

Características

Datos básicos:

Número de pisos = 13.

Periodo fundamental de la edificación $T = 2.95$ s.

Porcentaje del amortiguamiento intrínseco con respecto al crítico $\xi = 5$ %.

Cortante de fluencia de la edificación $V_{ty} = 10898$ kN.

Porcentaje de coeficiente de la rigidez post-fluencia ó porcentaje de endurecimiento de la edificación $\alpha = 60.6$ %.

Porcentaje de la altura de entrepiso para el cálculo de la deriva máxima $\%h_{pi} = 1$ %.

En la TABLA I se muestran los datos por piso de la masa M_i , forma modal asociada al periodo fundamental ϕ_i , altura H_i .

TABLA I.
DATOS DEL EDIFICIO DE ANÁLISIS

PISO	MASA $\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}$	ϕ	ALTURA m
1	972.2	0.1	7.1628
2	849.4	0.2	3.5814
3	849.4	0.3	3.5814
4	849.4	0.4	3.5814
5	849.4	0.5	3.5814
6	849.4	0.6	3.5814
7	849.4	0.7	3.5814
8	849.4	0.8	3.5814
9	849.4	0.8	3.5814
10	849.4	0.9	3.5814
11	849.4	0.9	3.5814
12	849.4	1	3.5814
13	1546.9	1	3.5814

Se escogió el sismo de San Fernando (figura 18) ocurrido en Estados Unidos el 9 de febrero de 1971, el cual tiene una magnitud de 6.5. Máximo valor positivo 1.294 m/s^2 a los 9 s, máximo valor negativo -1.317 m/s^2 a los 7.02 s. Duración del sismo 59.58 s.

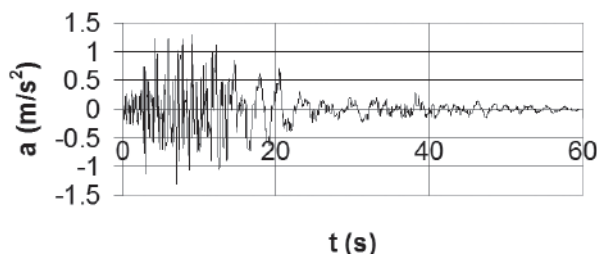


Fig. 18. Sismo San Fernando.

III. RESULTADOS

Los siguientes son obtenidos por el software de modelación inelástica dinámica simplificada

Masa equivalente $M_r = 7636.071 \text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}$.
 Frecuencia natural del sistema $\omega = 2.12 \text{ rad/s}$
 Constante del amortiguador $c = 1624.3 \text{ kN}\cdot\text{s}/\text{m}$.
 Rigidez de la edificación $K_t = 346406 \text{ kN}/\text{m}$.
 Rigidez equivalente $K_r = 346406 \text{ kN}/\text{m}$.
 Rigidez post-fluencia $K_{sh} = 20992.2 \text{ kN}/\text{m}$.
 Cortante de fluencia equivalente $V_{ry} = 8493 \text{ kN}$.
 Desplazamiento de fluencia de la cubierta de la edificación $U_{ty} = 0.31 \text{ m}$.
 Desplazamiento de fluencia de la cubierta de la estructura equivalente $U_{ry} = 0.24 \text{ m}$.
 Factor de conversión de desplazamiento en la cubierta de la estructura equivalente a desplazamiento de la cubierta de la edificación $U_{ty} / U_{ry} = 1.28$.
 Deriva de máxima permisible por piso $\{\Delta p_i\}$ (Fig. 23).

Resultados después de utilizar el método de Newmark

Desplazamiento de la cubierta = $U_{\text{max}} = 40.6 \text{ cm}$.
 Demanda de ductilidad = $U = 1.29$.
 Deflexión por piso $\{u_t\}$ ver Fig. 22.
 Deriva por piso $\{\Delta i\}$ ver Fig. 23.

El desplazamiento en la cubierta del modelo de un grado de libertad del programa es bastante aproximado al modelo de múltiple grados de libertad como se muestra en la Figura 19.

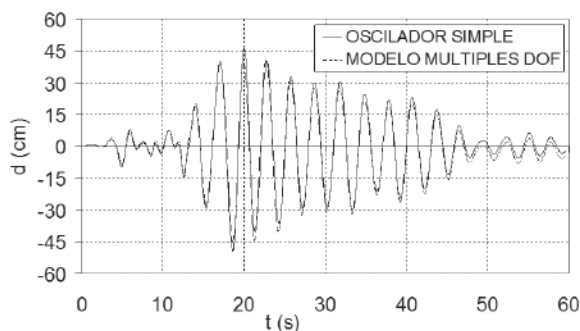


Fig. 19. Desplazamiento de la cubierta del edificio para un grado de libertad y múltiple grados de libertad.

El desplazamiento de la cubierta para el edificio con amortiguadores se muestra en la Figura 20

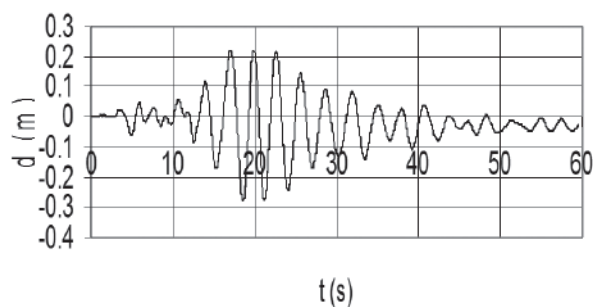


Fig. 20. Desplazamiento de la cubierta del edificio para un grado de libertad con amortiguadores.

El Desplazamiento de la cubierta para el edificio con disipadores se muestra en la Fig. 21.

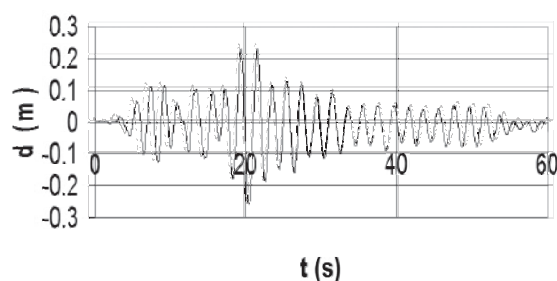


Fig. 21. Desplazamiento de la cubierta del edificio para un grado de libertad con disipadores.

La forma de la deflexión del edificio se muestra en la Fig. 22.

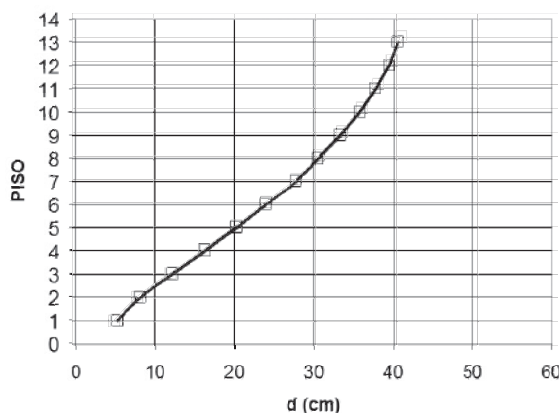


Fig. 22. Deflexión del edificio.

La Deriva del edificio y la deriva máxima permitida se muestran en la Fig. 23.

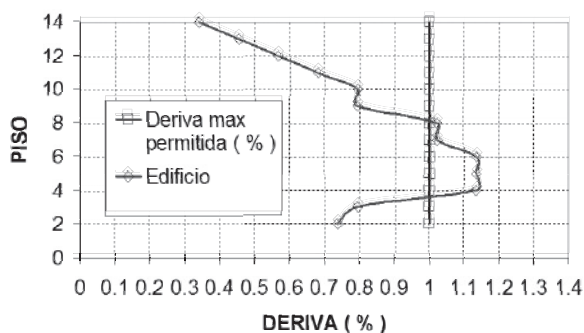


Fig. 23. Deriva del edificio y Deriva máxima permitida.

La Deriva del edificio y la deriva del edificio con amortiguadores se muestran en la Fig. 24.

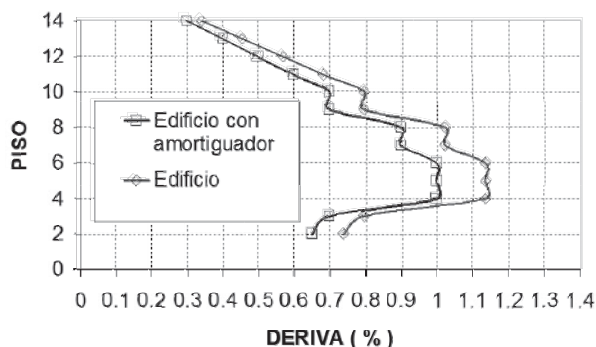


Fig. 24. Deriva por piso para el edificio y el edificio con amortiguadores.

La Deriva del edificio y la deriva del edificio con disipadores se muestran en la Fig. 25.

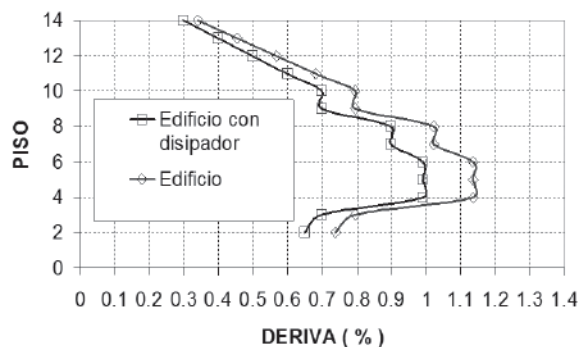


Fig. 25. Deriva por piso para el edificio y el edificio con disipadores

IV CONCLUSIONES

En este artículo se muestran los resultados de un programa de modelación inelástica dinámica simplificada de un grado de libertad en el cual se calculan cuales pisos cumplen o no con la deriva máxima permisible. Además se calcula la cantidad de disipadores y amortiguadores necesarios por piso.

El programa se revisó con un modelo en Sap 2000 del Edificio Sherman Oaks, se comparó con el programa y se concluyó que los resultados tienen una buena confiabilidad.

Para el caso estudiado la colocación de amortiguadores y disipadores contribuyó a disminuir los desplazamientos de la cubierta.

Se deben colocar los disipadores y amortiguadores en los pisos donde la deriva no cumple.

Este programa es un modelo para tener un estimado de la cantidad de disipadores y amortiguadores por piso necesarios para cumplir con la deriva máxima permisible. Se deben colocar los disipadores y amortiguadores en los pisos donde la deriva no cumple. Este programa es un modelo para tener un estimado de la cantidad de disipadores y amortiguadores por piso necesarios para cumplir con la deriva máxima permisible.

REFERENCIAS

- [1] García, L. E. 1999. Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico. Universidad de los Andes.
- [2] Juan Carlos Reyes Ortiz. Modelamiento sísmico no lineal de estructuras de concreto con disipadores de energía. Bogotá. Uniandes. 2002.
- [3] Molinares, N. 1996. Estudio de sistemas pasivos y activos no lineales de aislamiento de base para edificios sometidos a acciones sísmicas. Universidad Politécnica de Cataluña.

- [4] Microsoft Visual Basic 6.0, 2005.
- [5] Microoft Excel. 2005.
- [6] SAP2000. 1997. Integrated Structural Analysis & Design Software, Computers and Structures Inc.
- [7] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Bogotá, 1998.
- [8] Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Applied Technology Council ATC-40. California Seismic Safety Commission. Redwood City, California. 1996.
- [9] Jorge Eduardo Hurtado Gómez. Introducción a la Dinámica de Estructuras. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. 2000.
- [10] Clough, Ray W. Dynamics of structures. New York. Mcgraw Hill. 1993.
- [11] Chopra, Anil K. Dynamics of structures : theory and applications to earthquake engineering. Upper Saddle River. New Jersey. Prentice hall. 2001.
- [12] Fertis, Demeter G. Dynamics and vibration of structures. New York. Wiley. 1973.

BIOGRAFÍA



José Rodrigo Hernández Ávila, Magister en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Especialista en Estructuras, Universidad del Norte, Ingeniero Civil, Investigador UPB, Montería, Colombia, Docente interno Facultad de Ingeniería Civil, UPB, Montería, Colombia. Intereses de investigación en Estructuras, Construcción, Nuevos Materiales, Gerencia de la Construcción y Sostenibilidad.