

ESTUDIO PARAMÉTRICO DE LA EFICACIA DE DISIPADORES FRICCIONALES PARA PROTECCIÓN ANTISÍSMICA DE EDIFICIOS

S.T. De la Cruz¹, F. López-Almansa², L.M. Bozzo³, Ll.G. Pujades¹

¹Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica,
tulio.delacruz@upc.es

²Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Estructuras en Arquitectura

³Universidad de Girona, Departamento de Ingeniería Industrial

RESUMEN

Este trabajo trata sobre la simulación numérica del comportamiento dinámico de edificios de varias plantas equipados con dispositivos disipadores de energía cuyo funcionamiento se basa en la fricción seca. Los edificios se modelan como pórticos planos (un grado de libertad por planta). El comportamiento dinámico de estas estructuras se describe por un modelo numérico no lineal desarrollado por los autores. Éste consiste en un algoritmo de integración temporal paso a paso basado en el método de Newmark. Se supone que la fuerza de fricción que actúa en cada disipador sigue la ley de rozamiento seco de Coulomb. Los resultados obtenidos con el algoritmo propuesto se comparan con los proporcionados por el programa comercial ADINA; la concordancia es satisfactoria. Además, los primeros resultados hallados (preliminares) muestran que los disipadores de fricción reducen sustancialmente la respuesta.

Palabras clave: Disipadores de Energía, Fricción, Dinámica de Estructuras, Control Pasivo, Simulación Numérica, Análisis no Lineal.

SUMMARY

This paper deals with the numerical simulation of buildings equipped with friction energy dissipation devices. Such buildings are modeled as 2-D multi-degree-of-freedom (MDOF) systems. A nonlinear numerical model developed by the authors simulates the dynamic behavior of these structures. This numerical model consists of an algorithm that carries out step-by-step time integration, and it's based on Newmark's method. The friction force acting on the dissipaters is assumed to follow Coulomb's law of dry friction. The results obtained are compared to those got with the commercial software ADINA, and the agreement is good. Besides, preliminary results show that friction dissipaters reduce substantially the dynamic response of structures.

Keywords: Energy Dissipators, Friction, Dynamics of Structures, Passive Control, Numerical Simulation, Nonlinear Analysis.

Introducción

La necesidad de reducir la respuesta de los edificios sometidos a acciones dinámicas es una de las mayores preocupaciones para la mayoría de ingenieros estructurales, tanto para prevenir el colapso estructural como para mantener unas condiciones adecuadas de servicio. El enfoque tradicional de diseño ha consistido en disipar la energía de entrada a través de la estructura principal, sometiendo a los diferentes miembros de ésta a esfuerzos considerables, causándoles daños y/o conduciendo a diseños conservativos e inadecuados. Por estas razones, en los años 70 se propuso el uso de dispositivos que no forman parte de la estructura principal. Estos dispositivos están específicamente diseñados para absorber la energía aportada por la excitación y pueden ser fácilmente reemplazados después de la ocurrencia de eventos sísmicos fuertes. Entre los distintos elementos que se utilizan

actualmente están los siguientes: dispositivos basados en la fluencia de metales, dispositivos visco-elásticos y dispositivos friccionales (Hanson et al, 1993; Soong y Dargush, 1997). Este trabajo trata sobre el comportamiento de estructuras de edificación equipadas con dispositivos disipadores de energía de fricción. La Fig. 1 muestra un edificio de varios pisos en el cual se han colocado los disipadores en la conexión de la viga principal y el sistema de arriostramiento.

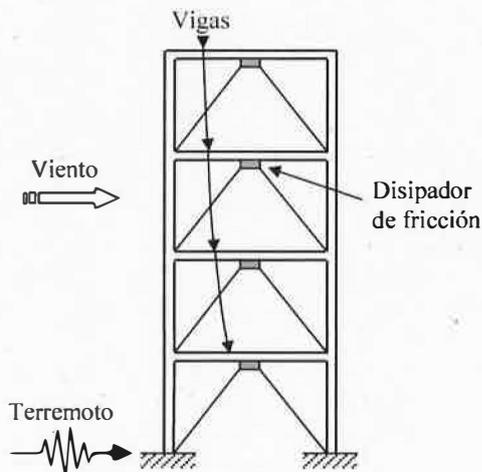


Figura 1. Pórtico bidimensional equipado con disipadores de fricción

El sistema mostrado en la Fig. 1 está planeado para prevenir desplazamientos laterales excesivos debido a cargas laterales (viento) o movimientos del suelo (terremotos). Se ha considerado un disipador friccional por cada piso.

Para describir el comportamiento dinámico de edificios que poseen disipadores de energía, los modelos generales no-lineales no son adecuados por dos razones: en primer lugar, la estructura permanece elástica mientras que las no-linealidades son absorbidas por los disipadores y, en segundo lugar, la coexistencia de elementos de rigideces muy distintas (los disipadores son mucho más flexibles que la estructura principal) genera problemas numéricos. Por dichos motivos, un cierto número de procedimientos de diseño y de modelos numéricos han sido desarrollados, como los que considerados en el Programa para Pórticos Arriostrados Equipados con Amortiguadores de Fricción —FDBFAP— (Filiatrault y Cherry, 1990), y en el programa ADINA —éste incluye la formulación de problemas generales del análisis del contacto— (Bathe, 1996).

Objetivos

Este trabajo se enfoca al análisis de estructuras equipadas con dispositivos de fricción, porque estos disipadores tienen varias ventajas:

- Tienen una capacidad alta de disipación de energía
- Su comportamiento no se ve seriamente afectado por la amplitud de las excitaciones, por su contenido de frecuencias o por el número de ciclos de carga
- La fuerza de fricción se puede regular fácilmente
- Poseen una confiabilidad alta y una duración larga

Por otra parte, el comportamiento dinámico de estos elementos es altamente no-lineal, por lo que su simulación numérica es un tema interesante (Filiatrault y Cherry, 1989). La dificultad de modelización hace que algunos aspectos del comportamiento sean

polémicos, como la introducción de altas frecuencias en la estructura y la reducción de la respuesta para pulsos de falla cercana ("near-fault pulses").

Desarrollo del trabajo

Actualmente existe una amplia variedad de dispositivos de fricción que han sido propuestos para la disipación de energía de las estructuras (Soong y Dargush, 1997). Estos dispositivos difieren en su comportamiento mecánico y en los materiales usados en las superficies de deslizamiento, pero si se supone que el coeficiente de fricción no es dependiente de la velocidad y que la fuerza de fricción es constante, casi todos ellos generan ciclos rectangulares de histéresis, típicos de la fricción de Coulomb, como el que se muestra en la Fig. 2.

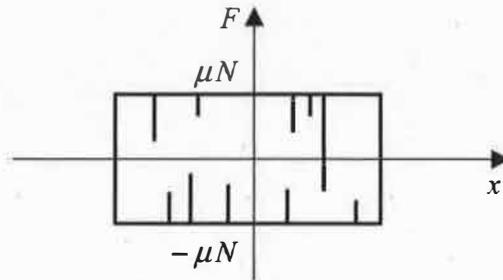


Figura 2. Ciclos de histéresis para un disipador de fricción típico

Modelo constitutivo de la fricción

El comportamiento estático de un disipador de fricción se describe a continuación (Oliver et al, 1992). La Fig. 3 muestra el modelo mecánico del problema del contacto.

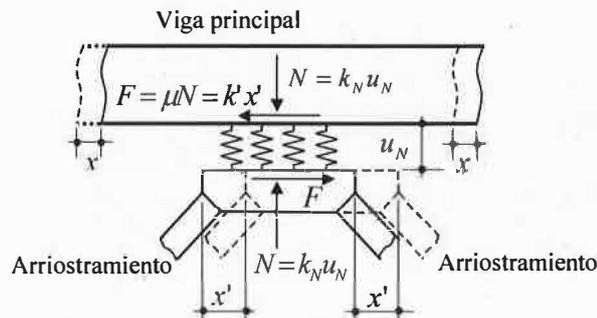


Figura 3. Detalle del modelo mecánico de un disipador de fricción

En la Fig. 3 x y x' representan, respectivamente, los desplazamientos horizontales del marco principal y del dispositivo disipador. El coeficiente k' es la rigidez del arriostamiento que sostiene al disipador.

En un punto cualquiera que pertenezca a la superficie de contacto, la condición límite para el modelo unidireccional constitutivo —basado en la ley de Coulomb— es

$$f(F, u_N) = g(F, u_N) = |F| - \langle \mu N \rangle = |F| - \langle \mu k_N u_N \rangle \leq 0 \quad (1)$$

donde $f(F, u_N)$ y $g(F, u_N)$ son la función del límite de fluencia plástica y el potencial plástico, respectivamente. F es la fuerza de fricción entre el disipador y la estructura, μ es el coeficiente de fricción seca ($\mu = \tan \phi^{fric}$ donde ϕ^{fric} es el ángulo de deslizamiento estático) y N es la fuerza de pretensado —actúa normalmente a la superficie de contacto— dada por $N = K_N u_N$, donde K_N y u_N son la rigidez a la penetración y el desplazamiento, respectivamente.

Si, dentro del proceso de cálculo esta condición límite no es satisfecha, ello indica que hay deslizamiento ($\dot{x} \neq \dot{x}'$). En dicho caso la fuerza de fricción máxima está dada por

$$F = \mu N \quad (2)$$

como se establece en la ley de Coulomb sobre la fricción seca (Chopra, 2001).

Ecuaciones del movimiento para edificios de varios niveles

En esta sección se considerará un edificio con N pisos o niveles equipado con disipadores de fricción en cada planta (véase la Fig. 1). La excitación externa consiste en un movimiento sísmico; sin embargo, el caso de carga de viento puede ser analizado de una manera similar.

Como se ha mencionado anteriormente, el edificio es modelado como un marco bi-dimensional. Los grados de libertad son los desplazamientos horizontales (relativos respecto del terreno) de los diferentes pisos (x_1, x_2, \dots, x_N) y de los disipadores (x'_1, x'_2, \dots, x'_N). El número total de grados de libertad varía desde un valor mínimo N (no hay ningún disipador deslizando) hasta un valor máximo $2N$ (todos los disipadores están deslizando).

Suponiendo que el edificio se comporta como un pórtico de cortante ("shear building"), las ecuaciones de movimiento de los $2N$ grados de libertad son

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g) + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) \\ - c'_2(\dot{x}'_2 - \dot{x}'_1) - k'_2(x'_2 - x'_1) = -F_1 \\ m'_1(\ddot{x}'_1 + \ddot{x}_g) + c'_1\dot{x}'_1 + k'_1x'_1 = F_1 \\ \dots \\ m_i(\ddot{x}_i + \ddot{x}_g) + c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + k_i(x_i - x_{i-1}) - c_{i+1}(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) - k_{i+1}(x_{i+1} - x_i) \\ - c'_{i+1}(\dot{x}'_{i+1} - \dot{x}'_i) - k'_{i+1}(x'_{i+1} - x'_i) = -F_i \\ m'_i(\ddot{x}'_i + \ddot{x}_g) + c'_i(\dot{x}'_i - \dot{x}'_{i-1}) + k'_i(x'_i - x'_{i-1}) = F_i \\ \dots \\ m_N(\ddot{x}_N + \ddot{x}_g) + c_N(\dot{x}_N - \dot{x}_{N-1}) + k_N(x_N - x_{N-1}) = -F_N \\ m'_N(\ddot{x}'_N + \ddot{x}_g) + c'_N(\dot{x}'_N - \dot{x}'_{N-1}) + k'_N(x'_N - x'_{N-1}) = F_N \end{aligned}$$

donde \ddot{x}_g es la aceleración del suelo; m_i, c_i y k_i son, respectivamente, la masa, el coeficiente de amortiguamiento viscoso y el coeficiente de rigidez del piso i -ésimo y m'_i, c'_i y k'_i son los valores correspondientes para el arriostamiento conectado al disipador y a la estructura principal. F_i es la fuerza de rozamiento (interacción entre el disipador y la estructura) y μ_i y N_i son los coeficientes de fricción y las fuerzas de preesfuerzo, respectivamente. Los valores de F_i están limitados por

$$|F_i| \leq \mu_i N_i \quad (3)$$

El conjunto de las $2N$ ecuaciones del movimiento puede ser escrito en forma matricial como:

$$\mathbf{M}^{ss} \ddot{\mathbf{x}}^s + \mathbf{C}^{ss} \dot{\mathbf{x}}^s + \mathbf{C}^{sd} \dot{\mathbf{x}}^d + \mathbf{K}^{ss} \mathbf{x}^s + \mathbf{K}^{sd} \mathbf{x}^d = -\mathbf{M}^{ss} \mathbf{r} \ddot{x}_g - \mathbf{F} \quad (4a)$$

$$\mathbf{M}^{dd} \ddot{\mathbf{x}}^d + (\mathbf{C}^{sd})^T \dot{\mathbf{x}}^s + \mathbf{C}^{dd} \dot{\mathbf{x}}^d + (\mathbf{K}^{sd})^T \mathbf{x}^s + \mathbf{K}^{dd} \mathbf{x}^d = -\mathbf{M}^{dd} \mathbf{r} \ddot{x}_g + \mathbf{F} \quad (4b)$$

El superíndice s se refiere a la estructura principal y el d se refiere a los disipadores: $\mathbf{x}^s = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ y $\mathbf{x}^d = [x'_1, x'_2, \dots, x'_N]^T$. El conjunto de ecuaciones (4b) puede ser a su vez dividido en dos subconjuntos distinguidos con los superíndices sl (deslizamiento, "sliding") y st (unión, "sticking"). Los grados de libertad involucrados en cada uno de ellos varían en cada instante conforme cambian las condiciones de deslizamiento (o unión) en los disipadores. Hay que tener en cuenta que si las fuerzas externas están aplicadas en cada piso (acción del viento, por ejemplo), entonces los miembros de la derecha de las Ecs. (4a) y (4b) tienen que ser reemplazados por los vectores $\mathbf{P} - \mathbf{F}$ y \mathbf{F} , respectivamente, donde el vector \mathbf{P} contiene las fuerzas de excitación en función del tiempo.

Las ecuaciones matriciales (4a) y (4b) pueden ser escritas como el siguiente sistema de orden $2N \times 2N$:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}^{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}^{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}^s \\ \ddot{\mathbf{x}}^d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}^{ss} & \mathbf{C}^{sd} \\ (\mathbf{C}^{sd})^T & \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}^s \\ \dot{\mathbf{x}}^d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}^{ss} & \mathbf{K}^{sd} \\ (\mathbf{K}^{sd})^T & \mathbf{K}^{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^s \\ \mathbf{x}^d \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}^{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}^{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} \ddot{x}_g - \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ -\mathbf{F} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Solución numérica de las ecuaciones del movimiento para edificios de varios pisos

Las Ecs. (4a) y (4b) están acopladas a través de las fuerzas de interacción friccionales \mathbf{F} y las matrices cruzadas \mathbf{C}^{sd} (y $(\mathbf{C}^{sd})^T$) y \mathbf{K}^{sd} (y $(\mathbf{K}^{sd})^T$). En cada instante $k+1$ la respuesta se calcula a partir de la respuesta en el instante previo k (procedimiento paso a paso) mediante una modificación del método de la aceleración lineal (método de Newmark). En el procedimiento propuesto se ejecutan iterativamente tres bucles anidados (ver la Fig. 4). En éstos están involucradas las cantidades acopladas ($\dot{\mathbf{x}}^d$, \mathbf{x}^d , $\dot{\mathbf{x}}^s$, \mathbf{x}^s y \mathbf{F}) y las aceleraciones estimadas para el próximo instante $k+1$ ($\ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{s*}$ y $\ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{d*}$).

Inicialmente se considera que las condiciones de deslizamiento en los disipadores en el instante k son las mismas que para el instante $k+1$. A continuación se suponen unos conjuntos de valores para los vectores $\ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{s*}$ (estimación para $\ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^s$), ${}_{sl} \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{d*}$ (estimación para ${}_{sl} \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^d$) y ${}_{st} \mathbf{F}_{k+1}^*$ (estimación para ${}_{st} \mathbf{F}_{k+1}$). Usualmente se toma $\ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{s*} = \ddot{\mathbf{x}}_k^s$, ${}_{sl} \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{d*} = {}_{sl} \ddot{\mathbf{x}}_k^d$ y ${}_{st} \mathbf{F}_{k+1}^* = {}_{st} \mathbf{F}_k$. Las aceleraciones restantes ${}_{sl} \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{d*}$ y las fuerzas ${}_{sl} \mathbf{F}_{k+1}^*$ se consideran iguales a las de $\ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^s$ y $\text{sgn}(\dot{x}_i - \dot{x}'_i) \mu_i N_i$, respectivamente. Como se ha mencionado en el párrafo anterior, el algoritmo propuesto consiste en tres bucles anidados que se resuelven iterativamente. En cada uno de estos ciclos las variables que rigen las iteraciones son $\ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^s$, ${}_{st} \mathbf{F}_{k+1}^*$ y ${}_{sl} \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{d*}$, respectivamente (ver la Fig. 4).

El criterio de interpolación considerado en el método de aceleración lineal (Berg, 1989) conduce a

$$\mathbf{x}_{k+1}^s = \mathbf{x}_k^s + \Delta t \dot{\mathbf{x}}_k^s + \frac{\Delta t^2}{6} (2\ddot{\mathbf{x}}_k^s + \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{s*}) \quad (6a)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{k+1}^s = \dot{\mathbf{x}}_k^s + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{\mathbf{x}}_k^s + \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{s*}) \quad (6b)$$

$$\mathbf{x}_{k+1}^d = \mathbf{x}_k^d + \Delta t \dot{\mathbf{x}}_k^d + \frac{\Delta t^2}{6} (2\ddot{\mathbf{x}}_k^d + \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{d*}) \quad (7a)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{k+1}^d = \dot{\mathbf{x}}_k^d + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{\mathbf{x}}_k^d + \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{d*}) \quad (7b)$$

Las condiciones de deslizamiento consideradas en el i -ésimo disipador (véase la Ec. (3)) son

$$\text{Si } F_i \geq \mu_i N_i \text{ entonces hay deslizamiento y } F_i = \text{sgn}(\dot{x}_i - \dot{x}'_i) \mu_i N_i \quad (8)$$

$$\text{Si } (\dot{x}_i^s - \dot{x}_i^d)_k (\dot{x}_i^s - \dot{x}_i^d)_{k+1} \leq 0 \text{ entonces se revisa la condición de deslizamiento} \quad (9)$$

Las ecuaciones de movimiento (4a) y (4b) (para los instantes k y $k+1$), las relaciones de interpolación (6) y (7) y las condiciones (8) y (9) gobiernan el movimiento del edificio equipado con disipadores de fricción. El algoritmo propuesto para resolver este problema se describe a continuación.

Primer bucle iterativo. Los desplazamientos \mathbf{x}_{k+1}^s y las velocidades $\dot{\mathbf{x}}_{k+1}^s$ de la estructura se calculan a partir de las Ecs. (6a) y (6b). En los disipadores que no deslizan los desplazamientos ${}_{st} \mathbf{x}_{k+1}^d$ y las velocidades ${}_{st} \dot{\mathbf{x}}_{k+1}^d$ son iguales a los valores correspondientes de \mathbf{x}_{k+1}^s y de $\dot{\mathbf{x}}_{k+1}^s$. Luego se calculan los valores de $\ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^s$ de la Ec. (4a) para el instante $k+1$. Si $\ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^s \neq \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{s*}$ (para una tolerancia predeterminada), entonces este procedimiento se repite tomando $\ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{s*} = \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^s$ sin hacer cambios en las condiciones de deslizamiento (es decir, los disipadores mantienen su condición de deslizamiento o unión anterior). Una vez que se alcanza la convergencia deseada, la Ec. (4a) se cumple, y finaliza este primer bucle.

Segundo bucle iterativo. En los disipadores que deslizan las fuerzas de fricción ${}_{st} \mathbf{F}_{k+1}$ son conocidas ($F_i = \text{sgn}(\dot{x}_i - \dot{x}'_i) \mu_i N_i$) y los desplazamientos ${}_{st} \mathbf{x}_{k+1}^d$ y las velocidades ${}_{st} \dot{\mathbf{x}}_{k+1}^d$ son calculados a partir de las ecuaciones correspondientes (7a) y (7b) suponiendo ${}_{st} \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^d = {}_{st} \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{d*}$. Las fuerzas de fricción ${}_{st} \mathbf{F}_{k+1}$ en los disipadores que no deslizan se calculan a partir de las ecuaciones correspondientes incluidas en la Ec. (4b). Las componentes que resulten mayores (en valor absoluto) que $\mu_i N_i$ se fijan iguales a dicho valor; luego todas ellas se comparan a los valores supuestos en ${}_{st} \mathbf{F}_{k+1}^*$. Si algunas componentes son diferentes (para una tolerancia predeterminada), los nuevos valores de ${}_{st} \mathbf{F}_{k+1}$ se suponen iguales a los valores recién calculados de ${}_{st} \mathbf{F}_{k+1}$. Entonces un nuevo conjunto de valores para las aceleraciones $\ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^s$ de la estructura se calcula a partir de la Ec. (4a) y se sustituye en las Ecs. (6a) y (6b) para obtener los valores actualizados de \mathbf{x}_{k+1}^s y de $\dot{\mathbf{x}}_{k+1}^s$ (véase el párrafo correspondiente al primer bucle iterativo). Este procedimiento se repite hasta que ${}_{st} \mathbf{F}_{k+1} = {}_{st} \mathbf{F}_{k+1}^*$ (para una tolerancia predeterminada). Una vez que se alcanza la convergencia deseada, la Ec. (4a) y las correspondientes a los disipadores que no deslizan en la Ec. (4b) se cumplen, y termina este segundo bucle.

Tercer bucle iterativo. Una vez que se consigue la convergencia en ${}_{st} \mathbf{F}_{k+1}$ en el segundo bucle, entonces las aceleraciones ${}_{st} \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^d$ son calculadas de las ecuaciones correspondientes incluidas en la Ec. (4b). Si ${}_{st} \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^d \neq {}_{st} \ddot{\mathbf{x}}_{k+1}^{d*}$ (para una tolerancia

predeterminada) entonces los valores actualizados de ${}_{sl}\ddot{x}_{k+1}^d$ se consideran iguales a los de ${}_{sl}\ddot{x}_{k+1}^{d*}$. Luego, los valores para las aceleraciones \ddot{x}_{k+1}^s se calculan a partir de la Ec. (4a). Estos nuevos valores se usan como nuevas aproximaciones para el vector de aceleraciones \ddot{x}_{k+1}^s (véase el párrafo correspondiente al primer bucle de iteración). Este procedimiento termina cuando ${}_{sl}\ddot{x}_{k+1}^d = {}_{sl}\ddot{x}_{k+1}^{d*}$ (para una tolerancia preestablecida). Una vez que se alcanza la convergencia, las Ecs. (4a) y (4b) (esta última tanto para las componentes que deslizan como para las que están unidas) se cumplen. El algoritmo propuesto se repite nuevamente para el próximo paso.

Los tres bucles anidados de iteración involucrados en el cálculo de la respuesta en el instante $k + 1$ a partir de la respuesta en el instante k se ilustran gráficamente en el diagrama de flujo de la Fig. 4.

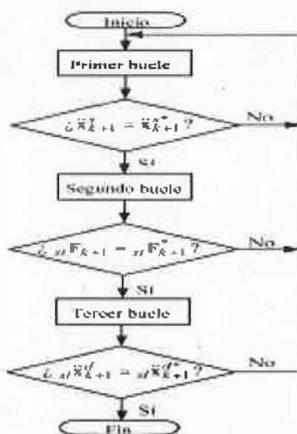


Figura 4. Diagrama de flujo del algoritmo de solución propuesto

Resultados

En esta sección se pueden ver algunas gráficas que muestran resultados obtenidos con el algoritmo propuesto. Éstos corresponden a un edificio de acero de 3 niveles ($N = 3$) equipado con disipadores de fricción (véase la Fig. 1) y sometido a una excitación sísmica. Se han considerado los momentos de inercia reales de las vigas y las columnas (es decir, no es un edificio de cortante). Sin embargo, al suponer que no hay deformaciones axiales, el edificio se analiza como un sistema de 3 grados de libertad (hasta 6 cuando existe deslizamiento en todos los disipadores), que consisten en la traslación horizontal de cada nivel. Las matrices de masa, amortiguamiento (2% de amortiguamiento modal para el primer modo de vibración) y rigidez para la estructura principal son, respectivamente,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 94.617 & 0 & 0 \\ 0 & 94.617 & 0 \\ 0 & 0 & 43.253 \end{bmatrix} \text{ kg}\cdot\text{seg}^2/\text{cm}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 2.4836 & 6.0835 & 4.0350 \\ 6.0835 & 14.9010 & 9.8837 \\ 4.0350 & 9.8837 & 6.5560 \end{bmatrix} \text{ kg}\cdot\text{seg}/\text{cm}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 125660 & -69960 & 14730 \\ -69960 & 86400 & -35280 \\ 14730 & -35280 & 23210 \end{bmatrix} \text{ kg}/\text{cm}$$

Las matrices correspondientes para el sistema arriostramiento-disipador son

$$\mathbf{M}' = \begin{bmatrix} 0.35 & 0 & 0 \\ 0 & 0.35 & 0 \\ 0 & 0 & 0.35 \end{bmatrix} \text{ kg}\cdot\text{seg}^2/\text{cm} \quad \mathbf{C}' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ kg}\cdot\text{seg}/\text{cm} \quad \mathbf{K}' = \begin{bmatrix} 65196.9 & 0 & 0 \\ 0 & 65196.9 & 0 \\ 0 & 0 & 65196.9 \end{bmatrix} \text{ kg}/\text{cm}$$

La Fig. 6 muestra la historia temporal del desplazamiento x_3 para el tercer piso. En este caso los valores máximos de la fuerza de fricción son, desde el primer nivel hasta el último, $\mu_1 N_1 = 10196.8 \text{ kg}$, $\mu_2 N_2 = 10196.8 \text{ kg}$ y $\mu_3 N_3 = 10196.8 \text{ kg}$. La excitación del suelo está dada por el acelerograma sintético mostrado en la Fig. 5, el cual se obtuvo a partir de una serie de terremotos fuertes (Newmark et al, 1973). La aceleración máxima es 0.5g.

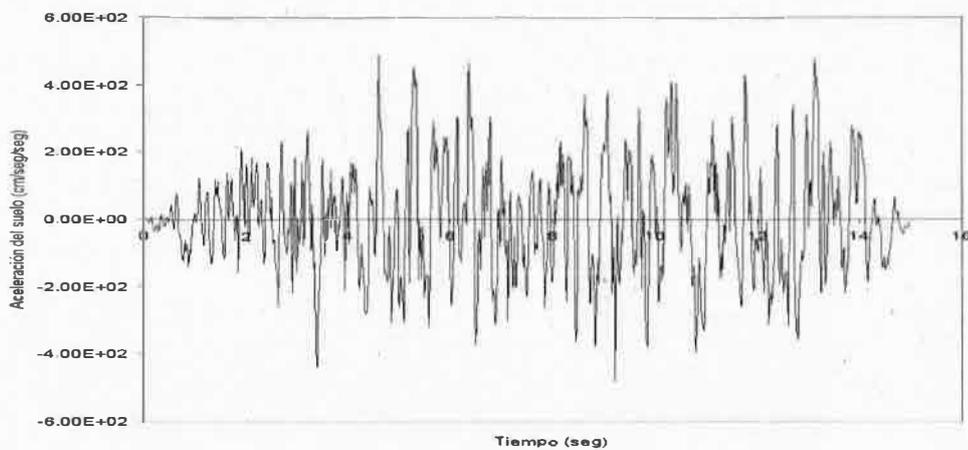


Fig. 5. Acelerograma artificial (Newmark, Blume, Kapur, 1973)

La línea continua en la Fig. 6 corresponde a la respuesta obtenida con el algoritmo propuesto, mientras que la línea discontinua es la respuesta proporcionada por el programa ADINA. Se puede apreciar la similitud entre ambas.

En la Fig. 7 se muestran las historias temporales del desplazamiento x_3 para el tercer piso del pórtico sin arriostramiento ni disipadores ($\mu_1 N_1 = \mu_2 N_2 = \mu_3 N_3 = 0$) y del pórtico con arriostramiento y disipadores para los mismos valores de los umbrales de deslizamiento considerados en la figura anterior. Considerando las historias temporales de los desplazamientos de la Fig. 7 se puede ver que el uso de disipadores de fricción reduce significativamente la respuesta del edificio cuando se somete a una excitación del suelo.

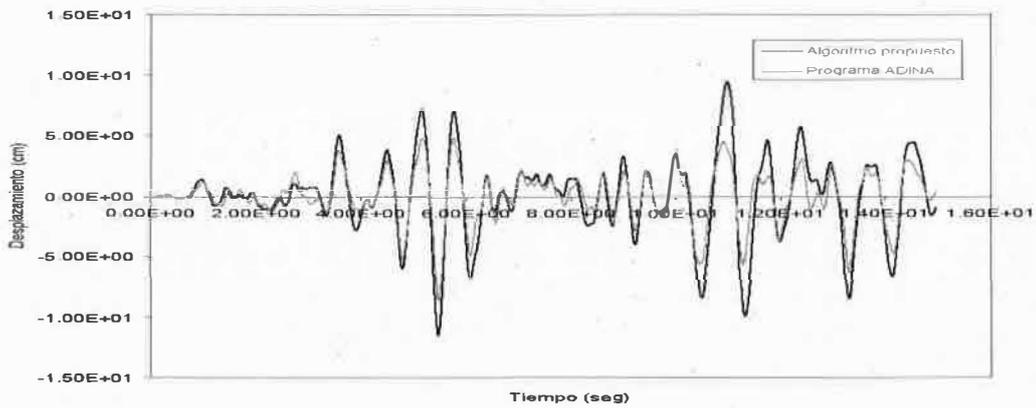


Figura 6. Comparación entre los resultados obtenidos con el algoritmo propuesto y el programa ADINA para el tercer piso

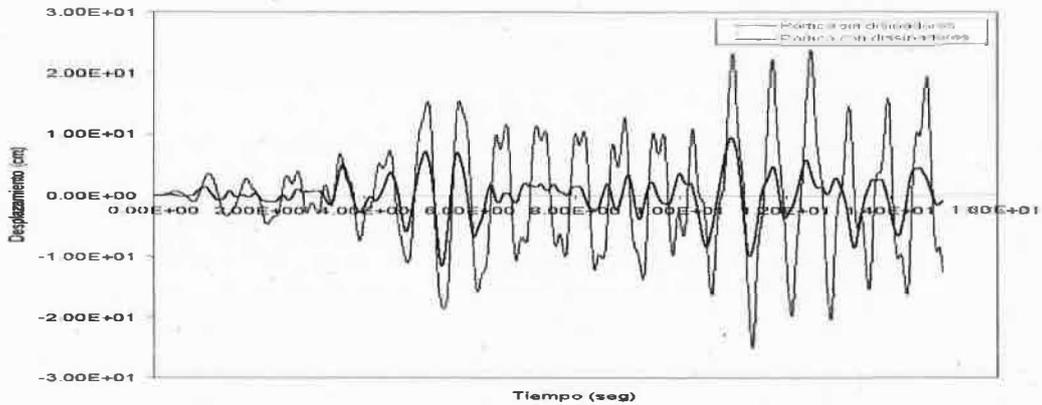


Figura 7. Comparación de respuestas para el tercer piso de un pórtico de acero sin disipadores, y para el mismo piso de un pórtico de acero con disipadores de fricción

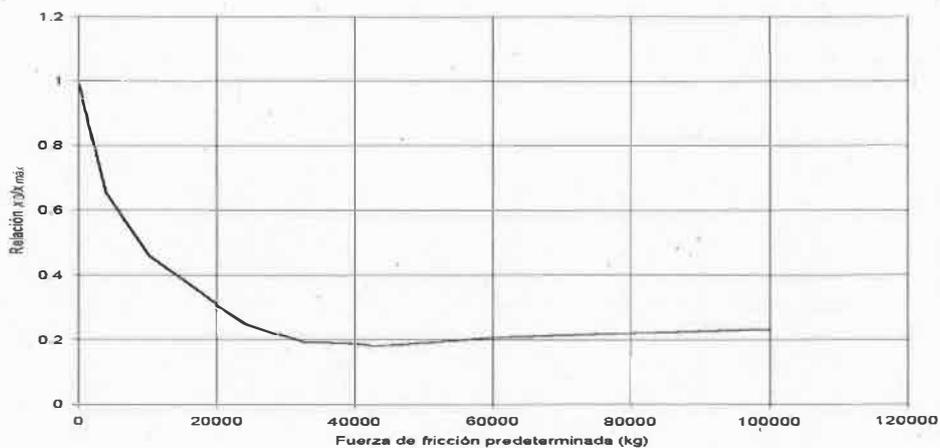


Figura 8. Gráfica de la relación $x_0 / x_{máx.} - F$ para el tercer piso del pórtico de 3 niveles

En la Fig. 8 se muestran resultados preliminares de un estudio paramétrico empleando el algoritmo propuesto por los autores. En el eje vertical se representa el cociente $x_0 / x_{m\acute{a}x}$ (de la tercera planta, x_0 y $x_{m\acute{a}x}$ son los desplazamientos máximos sin y con disipadores, respectivamente) y en el eje horizontal se representa el umbral de deslizamiento μN (se considera el mismo valor en las tres plantas). Se consideran varios valores de μN , para llegar al valor óptimo para minimizar la relación $x_0 / x_{m\acute{a}x}$.

Conclusiones y líneas futuras de investigación

En este trabajo se ha presentado un modelo numérico del comportamiento dinámico de edificios de varias plantas equipados con disipadores de energía de fricción. Un algoritmo numérico paso a paso desarrollado por los autores resuelve las ecuaciones no lineales del movimiento. Dicho algoritmo está basado en el método de aceleración lineal de Newmark. Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos con el programa comercial ADINA.

Estos estudios preliminares muestran que los disipadores reducen sustancialmente la respuesta de las estructuras.

También se ha mostrado una aplicación del procedimiento propuesto en la obtención de curvas para determinar valores óptimos de las fuerzas de fricción.

Actualmente se está llevando a cabo un estudio paramétrico más completo y está previsto realizar experimentos.

Referencias

- Bathe, K. J., *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, 1996.
- G. Berg, *Elements of Structural Dynamics*, Prentice-Hall, 1989.
- Chopra, A. K., *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, 2001.
- Filiatrault, A. y Cherry, S., Efficient Numerical Modelling for the Design of Friction Damped Braced Steel Plane Frames, *Canadian Journal of Civil Engineering*, **16** (3), pp. 211-218 (1989).
- Filiatrault, A. y Cherry, S., A Simplified Seismic Design Procedure for Friction Damped Structures, *Proceedings of Fourth U. S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California, **3**, pp. 479-488, 1990.
- Hanson, R., Aiken, I., Nims, D., Richter, P. y Bachmann, R., State of the Art of the Practice in Seismic Energy Dissipation, *Proc. ATC 17-1 on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Control*, **2**, pp. 449-471, 1993.
- Newmark, N. M., Blume, J. A. y Kapur, K. K., Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants, *ASCE Journal of the Power Division*, **99** (PO2), pp. 287-303, 1973.
- Oliver, J., Oller, S. y Cante, J. C., Numerical Simulation of Uniaxial Compaction Processes in Powder Materials, *International Congress on Numerical Methods in Engineering*, Chile, 1992.
- Soong, T. T. y Dargush, G. F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, 1997.

Agradecimientos

Este trabajo ha recibido el soporte financiero de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) del Gobierno Español, Proyectos de Investigación AMB98-0558 y REN2000-1740 y por la Subdirección General de Investigación del MCYT, Proyecto de Investigación PB98-0455. La estancia del Sr. De la Cruz en Barcelona es apoyada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México, Beca No. 116708/117876 y por la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) de España.