

## DESARROLLO DE UN CÓDIGO NUMÉRICO PARA EL ANÁLISIS NONLINEAL DE ESTRUCTURAS SOMETIDAS A ACCIONES SÍSMICAS

P. Mata A<sup>1</sup>, S. Oller<sup>1</sup>, A.H. Barbat<sup>1</sup> y R. Boroschek<sup>2</sup>

<sup>1</sup>: *Universidad Politécnica de Cataluña, UPC*

<sup>2</sup>: *Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.*

### RESUMEN

En este trabajo se estudia la respuesta dinámica no lineal de estructuras de ingeniería civil que incorporan dispositivos disipadores de energía. La estructura se modela usando la formulación del Reissner–Simo para las vigas en la deformación finita. El efecto de la deformación por cortante se considera permitiendo rotando el sistema local de cada viga independientemente de la posición del eje de la viga. La no linealidad constitutiva se trata en el nivel de punto material con leyes constitutivas apropiadas para el comportamiento del concreto y de las fibras para los refuerzos longitudinales de acero y los estribos. El material compuesto resultante se trata por medio de la teoría de mezclas simple. Las ecuaciones de movimiento del sistema así como las leyes de la conservación se expresan en términos de fuerzas seccionales y las tensiones generalizadas y el problema dinámico se resuelve por medio del método de los elementos finitos. Un tipo específico de elemento finito se propone para modelar los dispositivos disipadores de energía. La validación del modelo numérico se lleva a cabo por medio de varios ejemplos donde se reproduce la respuesta no lineal de las estructuras concretas sometidas a terremotos.

### SUMMARY

The nonlinear dynamic response of civil structures with energy dissipating devices is studied. The structure is modeled using the Vu Quoc–Simo formulation for beams in finite deformation. The effects of shear stresses are considered, allowing rotating the local system of each beam independently of the position of the beam axis. The material nonlinearity is treated at material point level with an appropriated constitutive law for concrete and fiber behavior for steel reinforcements and stirrups. The simple mixing theory is used to treat the resulting composite. The equation of motion of the system as well as the conservation laws are expressed in terms of sectional forces and generalized strains and the dynamic problem is solved in the finite element framework. A specific kind of finite element is proposed for modeling the energy dissipating devices. Several tests were conducted to validate the ability of the model to reproduce the nonlinear response of concrete structures subjected to earthquake loading.

### Introducción

En la aproximación tradicional empleada en el diseño sísmico, los cálculos se realizan en base a un análisis estático elástico y lineal. El comportamiento no lineal y la disipación de energía se consideran trivialmente, por medio de una aproximación basada en el método de fuerzas, analizando los espectros elásticos de la respuesta de un sistema de un grado de libertad (SDF) y suponiendo un factor de reducción para introducir la ductilidad de los elementos estructurales. Un concepto más racional, el diseño basado en desplazamientos, vuelve hacia el diseño basado en los estados límite de los elementos [Davenne y otros. 2003]. Ambos procedimientos de diseño se basan en el estudio de un SDF o de las estructuras substitutas simplificadas, que no son capaces de considerar

apropiadamente la redistribución de las cargas en las estructuras debido a no linealidades locales. Ésta es una de las desventajas principales que se previene teniendo en cuenta una descripción más realista del comportamiento global y local de la estructura hasta la falta [Davenne y otros. 2003]. Por otro lado, si se consideran conceptos energéticos, es posible obtener mejoras adicionales en el comportamiento sísmico de las estructuras. El control pasivo de estructuras saca ventaja de la posibilidad de disipar energía en dispositivos específicos que alivian las tensiones en los elementos estructurales principales y que controlan los desplazamientos laterales de toda la estructura.

Una opción para realizar análisis más realistas del comportamiento sísmico de estructuras equipadas con dispositivos que disipan energía es el empleo de técnicas de análisis no lineal en historias del tiempo, asumiendo descripciones físicas apropiadas para los materiales registros de aceleración de base que representen de manera fidedigna los movimientos del suelo. El modelo empleado para la estructura debe poder simular los cambios de la configuración de la estructura durante la acción dinámica, especialmente para casos de comportamiento estructural flexible. Además, se deben proporcionar leyes constitutivas para los materiales de los elementos estructurales y para los dispositivos que disipadores.

En este trabajo la estructura se modela por el medio de la formulación del Simo–Vu Quoc para las vigas y las barras capaces en grandes desplazamientos y rotaciones [Simo y otros. 1985]. Cada sección de la viga está discretizada en una rejilla de celdas, y cada una de ellas corresponde a una fibra dirigida a lo largo del eje de la viga. El material asociado a una fibra puede estar formado por varios componentes, empleando la teoría de mezclas simple para el tratamiento del compuesto que resulta [Oller, y otros. 1997]. La incorporación de los dispositivos disipadores de energía se obtiene por medio del desarrollo de un elemento especial de barra libre de rotaciones y con un solo punto de la integración. Adicionalmente se proponen leyes constitutivas unidimensionales apropiadas o relaciones tensión–deformación para el elemento disipador. En varios ejemplos numéricos se estudia la capacidad del modelo para simular la respuesta dinámica de las estructuras sometidas a cargas sísmicas.

### Cinemática de la viga en deformación finita

El análisis no lineal de estructuras de vigas tridimensionales sujetos en grandes desplazamientos y rotaciones es un problema aparece con frecuencia en la ingeniería sísmica. La formulación tridimensional para vigas empleada aquí hace uso las ecuaciones del equilibrio en términos de las fuerzas y momentos a nivel de sección para deducir correspondiente medida de deformación conjugada por medio del uso del principio de trabajos virtuales. El método de Newmark se emplea para integrar las ecuaciones de movimiento en la versión linearizada dinámica [Simo y otros. 1985, 1986; Ibrahimbegovic, 1995].

Una sección transversal típica de la viga será asociada a una base ortonormal de vectores,  $\{t_i(S,t)\}_{i=1,2,3}$ , unida a su eje, en donde  $S \in [0, L] \subset R$  denota la coordenada curvilínea definida lo largo de la línea de centroides de la viga en configuración no deformada y el parámetro  $t \in R$  es el tiempo. La componente  $t_3(S)$  permanece siendo normal a la cara de la sección en todo momento. El sistema fijo de ejes de referencia (también llamado sistema de descripción material) de la misma sección es designado como  $\{E_i(S,0)\}_{i=1,2,3}$  de tal forma que  $\{t_i(S,0)\}_{i=1,2,3} \equiv \{E_i(S)\}_{i=1,3} \forall S \in [0, L]$ . La base espacial fija se denota como  $\{e_i(S,0)\}_{i=1,2,3}$ . Ver Figura 1. La

orientación del sistema de ejes locales (móviles)  $\{t_i(S,t)\}_{i=1,2,3}$  a lo largo de la coordenada  $S \in [0,L]$  y a medida que transcurre el tiempo  $t \in R$  es especificada por medio de la transformación ortogonal  $\Lambda(S,t) = \Lambda_{ij}(S,t)e_i \otimes E_j$  tal que  $t_i(S,t) = \Lambda(S,t)E_i = \Lambda_{ij}(S,t)e_j$ . La posición  $x_0 \in R^3$  del centroide de la sección transversal es definida por medio del mapeo:  $x_0 = \phi_0 = \phi_{0i}(S,t)e_i$ . Aquí  $\Lambda(S,t) \in SO(3)$  es el grupo especial (de Lie) con la siguiente propiedad:  $\Lambda\Lambda^t = 1$ . Las derivadas (espaciales y temporales) de la transformación ortogonal se resumen en los fórmulas siguientes [Simo y otros. 1985, 1986]:

Derivadas de la base móvil

Descripción espacial

Descripción material

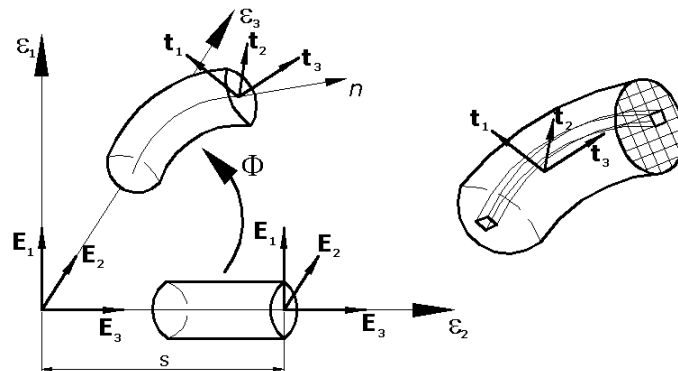
$$\frac{\partial \Lambda(S,t)}{\partial S} = \Omega(S,t)\Lambda(S,t); \quad \frac{\partial \Lambda(S,t)}{\partial t} = W(S,t)\Lambda(S,t) \quad \frac{\partial \Lambda(S,t)}{\partial S} = \Lambda(S,t)K(S,t); \quad \frac{\partial \Lambda(S,t)}{\partial t} = \Lambda(S,t)\bar{W}(S,t) \quad (1)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} 0 & -k_3 & k_2 \\ k_3 & 0 & -k_1 \\ -k_2 & k_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\omega = \omega_1 e_1 + \omega_2 e_2 + \omega_3 e_3 = k_1 t_1 + k_2 t_2 + k_3 t_3 \quad k = k_1 E_1 + k_2 E_2 + k_3 E_3 \quad (3)$$

$$w = w_1 e_1 + w_2 e_2 + w_3 e_3 = \bar{w}_1 t_1 + \bar{w}_2 t_2 + \bar{w}_3 t_3 \quad w = \bar{w}_1 E_1 + \bar{w}_2 E_2 + \bar{w}_3 E_3 \quad (4)$$

Donde  $\Omega(S,t), W(S,t), K(S,t), \bar{W}(S,t)$  son la representación espacial y material de los tensores de curvatura y spin de la sección transversal de la viga, respectivamente. Se debe notar que  $K + K^t = 0, \Omega + \Omega^t = 0$ .



Cuadro 1: Cinemática de vigas en la tensión finita para las secciones de la fibra.

**Momentos y fuerzas resultantes**

Denotando con  $P = T_i \otimes E_j$  al primer tensor no simétrico tensión de Piola-Kirchhoff, se tiene que la fuerza resultante  $n$  y el momento resultante (espacial)  $m$  sobre una sección transversal en la configuración actualizada, se calculan de acuerdo con:

$$n = \int_{\Gamma} T_3 d\Gamma, \quad m = \int_{\Gamma} (x - \phi_0(S,t)) \times T_3 d\Gamma \quad (5)$$

La descripción material de las fuerzas y momentos resultantes se obtienen por medio del 'pull-back' de  $n$  y  $m$  a la configuración de referencia por medio de  $\Lambda$  [Simo y otros. 1985]. Las medidas de deformación conjugadas a las fuerzas y momentos resultantes en la sección se obtienen por medio del empleo de la equivalencia entre el funcional de potencia y el principio de trabajos virtuales [Simo y otros. 1986], ecuación (6).

$$\int_{\Gamma \times [0,L]} P : \dot{F} d\Gamma dS = \int_{[0,L]} [n \cdot \overset{\nabla}{\gamma} + m \cdot \overset{\nabla}{\omega}] dS = \int_{[0,L]} [N \cdot \dot{\Gamma} + M \cdot \dot{\kappa}] dS \quad (6)$$

Donde  $\dot{F}$  es la derivada temporal del tensor gradiente de deformación y el punto superpuesto indica diferenciación con respecto al tiempo. Adicionalmente,  $\overset{\nabla}{(\bullet)} = (\frac{\partial}{\partial t})(\bullet) - w \times (\bullet)$  denota derivada co-rotada, es decir, el ratio medido por un observador sujeto al sistema de referencia móvil. Las medidas de deformación correspondientes están dadas en la ecuación (7).

$$\gamma = \frac{\partial \phi_0(S,t)}{\partial t} - t_3; \quad \Gamma = \Lambda' \frac{\partial \phi_0(S,t)}{\partial t} - E_3; \quad \kappa = \Lambda' \omega \quad (7)$$

### Forma débil y operador de inercia

El sistema de las ecuaciones diferenciales parciales que se solucionarán consiste en los leyes del balance y las ecuaciones constitutivas expresados en forma local. Considerando una variación admisible arbitraria  $\eta(S) = (\eta_0(S), \mathcal{G}(S))$  de la configuración espacial de la viga, y multiplicándola por la forma local de los leyes del balance, después de varios procedimientos matemáticos, es posible obtener la forma débil de las ecuaciones del equilibrio (para una descripción detallada consulte a Simo y otros. 1986, 1988):

$$G_{dyn}(\mathcal{G}, \eta) := \int_{[0,L]} \{ A_\rho \ddot{\phi}_0 \cdot \eta_0 + [I_\rho \dot{w} + w \times (I_\rho w)] \cdot \mathcal{G} \} dS + G(\mathcal{G}, \eta) \equiv 0 \quad (8)$$

donde

$$G(\mathcal{G}, \eta) := \int_{[0,L]} \left\{ N \cdot \Lambda' \left[ \frac{\partial \eta_0}{\partial S} - \mathcal{G} \times \frac{\partial \phi_0}{\partial S} \right] + M \cdot \Lambda' \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial S} \right\} dS - \int_{[0,L]} (\tilde{n} \cdot \eta + \tilde{m} \cdot \mathcal{G}) dS \equiv 0 \quad (9)$$

donde  $A_\rho$  y  $I_\rho$  son la densidad de área y el tensor de inercia, respectivamente.

### Integración temporal

El método del Newmark se emplea para integrar el sistema linealizado obtenido de la forma débil. La novedad del acercamiento propuesto reside en el tratamiento de la parte rotacional que emplea la contraparte discreta del mapeo exponencial sobre el grupo especial SO(3). El problema básico referente a la actualización paso a paso de las variables dinámicas en el problema discreto es: dada una configuración de desplazamientos y tensores de la rotación  $\varphi_n := (d_n, \Lambda_n)$ , las velocidades lineales y angulares,  $(v_n, w_n)$ , y las aceleraciones  $(a_n, \alpha_n)$ , en el paso  $n$  del tiempo, obtener la configuración actualizada en el paso  $n+1$  del tiempo. El algoritmo empleado se resume en las ecuaciones (10), (11) y (12) para la descripción material de las variables dinámicas,  $\Delta t$  es la longitud del paso del tiempo. Es interesante observar que el procedimiento actualización para la parte rotacional de las variables dinámicas tiene que ser realizado en la descripción material debido al hecho de que esta configuración es independiente del tiempo y el punto base en la variedad rotacional es fijo [Makinen, 2001].

#### Algoritmo de integración implícito en descripción material

| Traducción   | Rotación  |      |
|--|---|------|
| $d_{n+1} = d_n + u_n$  | $\Lambda_{n+1} = \Lambda_n \exp[\Theta_n] \equiv \exp[\theta_n] \Lambda_n$  | (10) |
| $u_n = (\Delta t)v_n + (\Delta t)^2[(0.5 - \beta)a_n + \beta a_{n+1}]$ | $\Theta_n = (\Delta t)W_n + (\Delta t)^2[(0.5 - \beta)A_n + \beta A_{n+1}]$ | (11) |
| $v_{n+1} = v_n + \Delta t[(1 - \gamma)a_n + \gamma a_{n+1}]$           | $W_{n+1} = W_n + \Delta t[(1 - \gamma)A_n + \gamma A_{n+1}]$                | (12) |

Trabajando en la forma linealizada de la ecuación (9) y empleando técnicas estándares del método de elementos finitos, es posible obtener la versión discreta del sistema de la ecuaciones [ Simo et al, 1988 ] como:

$$LG_{dyn\ n+1}^i = \sum_{I,J=1}^N \eta_I \cdot [P_I(\varphi_{n+1}^{(i)}) + K_{IJ}(\Lambda_n, \varphi_{n+1}^{(i)}) \Delta \varphi_{J,n+1}^{(i)}] = 0 \quad (13)$$

$$K_{IJ}(\Lambda_n, \varphi_{n+1}^{(i)}) := M_{IJ}(\Lambda_n, \Lambda_{n+1}^{(i)}) + S_{IJ}(\varphi_{n+1}^{(i)}) + G_{IJ}(\Lambda_{n+1}^{(i)}) + L_{IJ}(\Lambda_{n+1}^{(i)}) \quad (14)$$

Donde  $P_I$  y  $K_{IJ}$  son el vector de fuerzas residuales y la matriz de la rigidez, respectivamente. La matriz  $K_{IJ}$  recibe contribuciones de los términos de la inercia, materiales y geométricos,  $M_{IJ}$ ,  $S_{IJ}$  y  $(G_{IJ}, L_{IJ})$ , respectivamente. Un esquema iterativo paso a paso de Newton-Rapson con el método del predictor–corrector se emplea para obtener la respuesta dinámica del sistema.

### Elementos multifibra

La sección transversal de la viga se divide en una rejilla no homogénea ortogonal de celdas como se muestra en la Figura 2. Cada celda corresponde a una fibra dirigida a los largo del eje de la viga. Esto evita la formulación de leyes constitutivas usando fuerzas y desplazamientos ó momentos y curvaturas seccionales, que es la manera tradicional de solucionar el problema aunque válido solamente en ciertos casos particulares [Oller y Barbat, 2006]. Las fuerzas seccionales son descompuestas fibra por fibra, calculando el tensor de tensión que posteriormente es corregido con los leyes constitutivas asignadas para los materiales de la fibra y por medio del empleo de la teoría el mezclas simple para tratar el compuesto que resulta [Car, Oller y otros. 2000]. Las fuerzas y los momentos seccionales corregidos entonces son obtenidos aplicando la integración sobre el área de la sección. Las fuerzas y los momentos seccionales obtenidos se utilizan para estimar las fuerzas residuales, y el proceso iterativo se repite hasta que se obtiene el equilibrio (Ver la Figura 2).

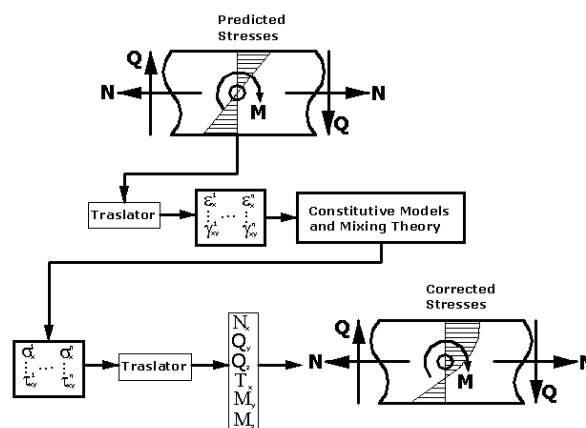


Figure 2: Iterative process at Integration point level in each section.

### Leyes constitutivas

En este trabajo el comportamiento hormigón se simula que emplea un modelo de daño basado en la teoría de Kachanov para los materiales que degradan. El modelo puede considerar propiedades diferenciadas para la tensión o la compresión. Los refuerzos y los estribos de acero se modelan por medio de un comportamiento de la fibra elástico–plástico.

Ambos modelos son termodinámicamente consistentes evitando la representación del comportamiento de los materiales en una forma aproximada basada principalmente en estudios experimentales. Durante el proceso de carga, se espera que la localización de la deformación ocurra en algunos miembros estructurales, y por lo tanto, una técnica basada en la regularización de la energía disipada se realiza a nivel constitutivo para obtener objetividad en la respuesta de la estructura [Hanganu y otros. 2002].

### Modelo constitutivo para el hormigón

El modelo del daño empleado en este trabajo tiene una formulación rigurosa pero relativamente simple, con sólidas bases termodinámicas [Simo y Ju, 1987]. El modelo se formula en la configuración material sin variaciones temporales de la temperatura. La energía libre presenta la forma siguiente:

$$\psi(\varepsilon, d) = (1-d)\psi_0(\varepsilon) = (1-d)\left(\frac{1}{2\rho_0}\varepsilon^T\sigma_0\right) = (1-d)\left(\frac{1}{2\rho_0}\varepsilon^T C_0 \varepsilon\right) \quad (15)$$

donde  $\varepsilon$  es el tensor de deformaciones,  $d$  ( $0 \leq d \leq 1$ ) es la variable interna de daño,  $\rho_0$  es la densidad en la configuración material,  $C_0$  es el tensor constitutivo elástico en el estado inicial no dañado. El cumplimiento de la desigualdad de Clausius Planck proporciona la ley constitutiva y la expresión explícita para la disipación mecánica,  $\dot{\Xi}_m$ , de acuerdo con la ecuación (16).

$$\sigma = (1-d)C_0\varepsilon; \quad \dot{\Xi}_m = -\frac{\partial\Psi}{\partial d}\dot{d} \geq 0 \quad (16)$$

El criterio de daño umbral se define en la función de la energía libre elástica del material como:  $F = K(\sigma_0)\sqrt{2\rho_0\Psi_0} - 1$ , donde  $K(\sigma_0)$  es una función de las tensiones principales y considera la capacidad del modelo de considerar diferentes propiedades a tracción y a compresión [Barbat, y otros. 1997]. Ver la Figura 3. Finalmente, el tensor constitutivo tangente [Oller y otros. 1997] se obtiene como:

$$\delta\sigma = C^D\delta\varepsilon = [(1-d)I - \frac{dG(\bar{\sigma})}{d\bar{\sigma}}\sigma^0 \otimes \frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\sigma^0}]C^0\delta\varepsilon = (I-D)C^0\delta\varepsilon \quad (17)$$

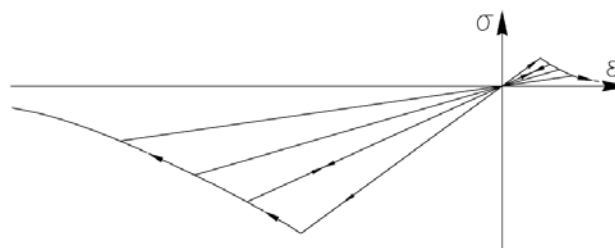


Figure 3: Local damage model with different tension–compression properties.

### Modelo constitutivo para los reesfuerzos de acero y estribos

El acero de los refuerzos y estribos de la viga es simulado por el medio del empleo de una ley constitutiva para fibras. Las fibras se tratan como material ortotrópico con el módulo elástico del acero en la dirección del refuerzo y el módulo elástico del concreto en las otras dos direcciones. El coeficiente de Poisson se toma igual a cero para evitar introducir la interacción lateral entre los esfuerzos del hormigón y del acero. Después de que se haya alcanzado el criterio de fluencia el flujo plástico se orienta en la dirección de la fibra [Car y otros. 2000].

## Teoría de mezclas simple para compuestos

El comportamiento del material compuesto se define según la fracción del volumen total de las sustancias que lo componen (ver la Figura 4). También se asume que en cada punto material todos los componentes contribuyen con su propia ley constitutiva en la proporción asignada de acuerdo a su fracción volumétrica. Esto permite combinar materiales con diversos comportamientos constitutivos. En este trabajo se asume que todas los componentes de la mezcla están sujetos al mismo campo de deformación. El estado de la tensión del compuesto se obtiene a partir de un modelo hiper-elástico que satisface la condición de disipación del segundo principio de la termodinámica. Es decir, para los  $n$  materiales componentes de un compuesto, de cada uno de ellos con su propia fracción volumétrica  $k_c$ , densidad total  $m_c$  y energía libre  $\psi_c$ , la tensión es dada por la ecuación (18) [Car y otros. 2000].

$$\sigma = \sum_{c=1}^n k_c m_c \frac{\partial \psi_c}{\partial \varepsilon} = \sum_{c=1}^n k_c m_c (\sigma)_c \quad (18)$$

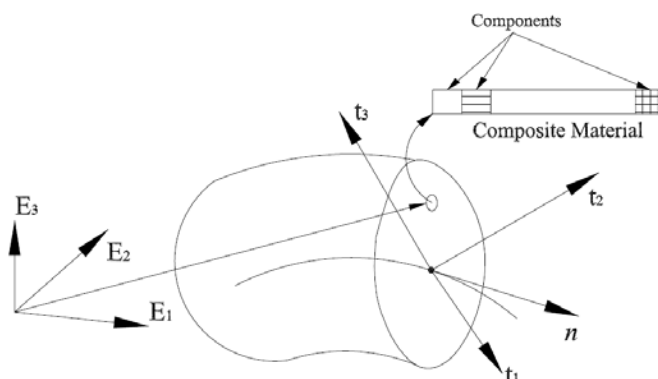


Figura 4: Cada fibra de la sección tiene asignado un material compuesto.

## Dispositivos disipadores de energía

Los dispositivos disipadores de energía se simulan usando un elemento de la barra con solamente un punto de la integración y la regla de Gauss. Los grados de libertad rotatorios se eliminan en ambos extremos de la viga para obtener solamente desplazamientos relativos en el dispositivo. La ley constitutiva empleada para los dispositivos disipadores corresponde a plasticidad bilineal, pero cualquier otra descripción un dimensional se puede emplear, por ejemplo en Mata y otros. (2006), se presenta una descripción constitutiva para elastomers empleados en disipadores de energía.

## Ejemplos Numéricos

En los tres ejemplos numéricos que se presentan y se explican en esta sección se valida la formulación propuesta para las vigas en el rango no lineal geométrico y constitutivo. Los primeros dos ejemplos corresponden a la respuesta elástica no lineal de una barra en régimen estático y dinámico. El tercero corresponde al estudio de un edificio concreto dúctil y flexible, al que se le incorporan dispositivos que se disipan energía.

## Flexión elástica de una viga

Este ejemplo presenta el análisis geométrico no lineal de una viga en voladizo rectilínea con un momento flector,  $M$ , aplicado en el extremo libre (Figura 5). Ver Ibrahimbegovic (1995) para más detalles. Para los datos elegidos el valor del momento flector que transforma la línea recta de la referencia en un círculo corresponde a  $20\pi$ , si el momento aplicado se aumenta otra vez, otro círculo más pequeño se forma en  $M=40\pi$ . La viga se modela empleando 40 elementos finitos cuadráticos con dos puntos de la integración de Gauss para evitar el bloqueo por cortante en la respuesta. Es posible observar la capacidad del modelo de reproducir la respuesta de la barra elástica incluso para los grandes desplazamiento y rotaciones que se presentan en este problema.

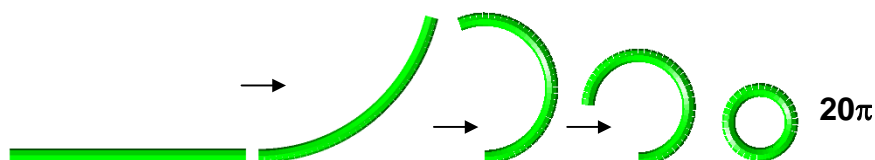


Figura 5: Flexión elástica de una viga.

### Análisis dinámico de una viga en grandes rotaciones

La misma viga del ejemplo anterior es sometida a una rotación impuesta de valor  $\pi$  en el extremo empotrado. La respuesta dinámica se obtiene para una densidad de masa de  $3.0 \times 10^{-5} \text{ Kg/cm}^3$ . Los resultados de la simulación permiten ver la versatilidad de la formulación para predecir las configuraciones complejas del sistema durante el movimiento. Los términos rotatorios de la inercia que se consideran en la formulación permiten mejorar la predicción de la respuesta dinámica para el caso de rotaciones grandes. Ver Figura 6.

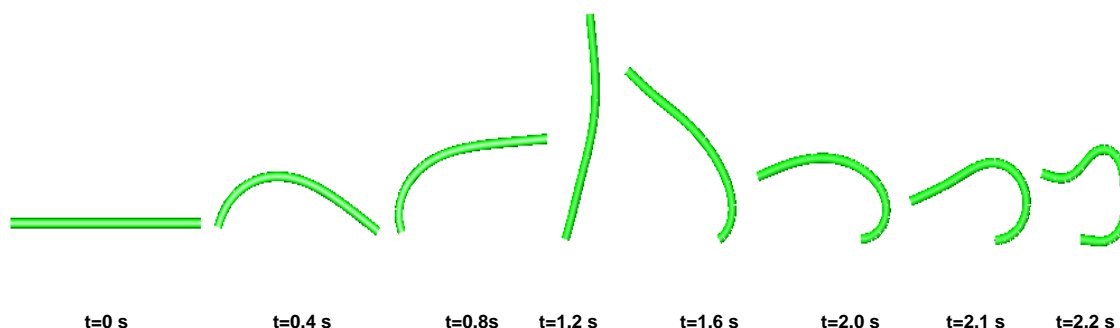


Figura 6: Respuesta dinámica no lineal de la viga.

### Respuesta sísmica no lineal de una estructura plana

En este trabajo se estudia la respuesta sísmica no lineal de un edificio industrial típico de hormigón armado in situ. El edificio tiene una luz de 20 m y de 24 m entre ejes en el plano frontal y en profundidad, respectivamente. Su altura es de 10 m. El hormigón de la viga es H-50, (50 Mpa, compresión última), con un módulo elástico de 35.000 Mpa para la viga y H-30 para el hormigón de las columnas. Se ha asumido un coeficiente del Poisson de 0.2 para ambos casos. Los refuerzos de acero de la viga considerados en el estudio y la discretización de las secciones en fibras son los que se muestran en la Figura 7. La tensión de rotura del acero es de 510 Mpa. Las dimensiones de las columnas son los 60x60 cm<sup>2</sup>. La viga tiene una sección variable con un colmo de la inicial de 80 centímetros en los apoyos y de 120 centímetros en el centro de la luz.



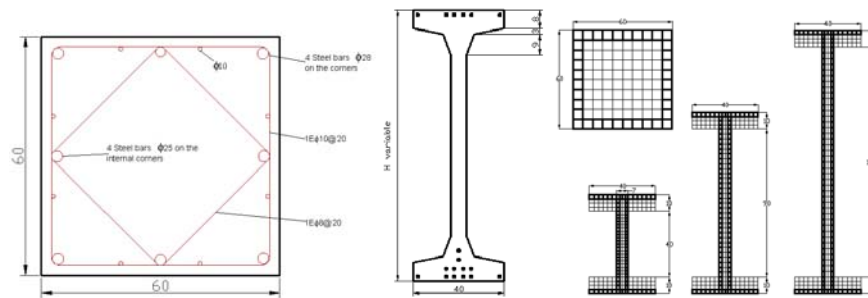


Figura 7: Detalle de las columnas y vigas.

Las cargas permanentes consideradas son  $2000 \text{ N/m}^2$  y el peso de la mitad superior de las paredes de cierre, es decir,  $270,000 \text{ N}$ . El registro de aceleración empleado es la componente N-S del terremoto del EL Centro, 1940. La sección de los dispositivos disipadores de energía fue diseñada para fluir con una fuerza axial de  $300.000 \text{ N}$  y para un desplazamiento relativo entre los dos nodos de  $1.0$  milímetros. La longitud de los dispositivos disipadores es de  $2.5 \text{ m}$  (Ver Figura 8).

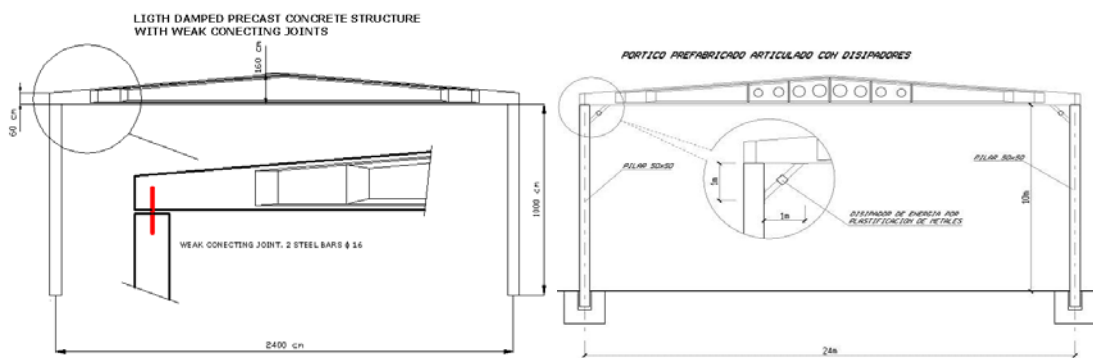


Figura 8: Edificio industrial prefabricado con y sin disipadores de energía.

En la Figura 9 es posible ver la contribución de los disipadores en la reducción de los desplazamientos en la respuesta estructural. La reducción obtenida es del orden de un 51% minimizando el efecto  $P-\Delta$ . La aceleración máxima muestra una reducción del orden de un 30% comparada con el caso cuando no se emplean disipadores.

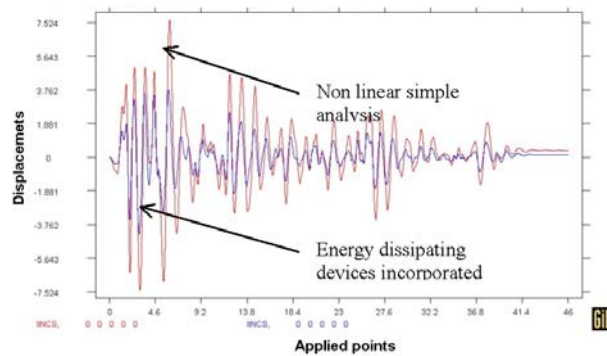


Figura 9: Historia de tiempo de desplazamientos.

## Conclusiones

Un estudio detallado de la respuesta sísmica de estructuras requiere considerar el comportamiento no lineal geométrico y material de la estructura para incluir la demanda de la ductilidad en miembros estructurales, el comportamiento mecánico en ablandamiento, la disipación de energía y el efecto  $P-\Delta$ . La formulación geométrica exacta de a Simo y Vu-Quoc para las vigas es extendida para considerar leyes constitutivas apropiados para los materiales, lo que proporciona una herramienta útil para simular los efectos del terremoto sobre las estructuras de hormigón armado. El empleo de dispositivos que disipan la energía por medios plásticos permiten introducir mejoras del comportamiento sísmico de las estructuras flexibles de hormigón armado con baja ductilidad lo que se verifica en el ejemplo estudiado en este trabajo. De los actuales estudios es posible ver que el uso de los dispositivos que disipan energía reduce la respuesta en desplazamientos cerca de un 50% y la respuesta en aceleración alrededor de un 30% para la componente N-S del registro del terremoto del EL Centro 1940.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por: La Universidad de Chile, proyecto FONDECYT nº 1970732; el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, Proyecto: "Numerical simulation of the seismic behavior of structures with energy dissipation systems", Contract nº: BIA2003 - 08700 - C03 - 02; Y el proyecto de la comisión europea: Integrated R&D Project of the EC "LessLoss-Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides" funded by the European Commission, Directorate General of Research under the Contract nº GOCE-CT-2003-505448.

## Referencias:

- Barbat A. H, Oller S, Oñate E and Hanganu A. (1997). *Viscous damage model for Timoshenko beam structures*. International Journal of Solids and Structures. Vol. 34. Nº 30. pp. 3953—3976.
- Car J, Oller. S and Oñate E. (2000). *Modelo constitutivo continuo para el estudio del comportamiento mecánico de los materiales compuestos*. International Center for Numerical Methods in Engineering, CIMNE, Barcelona, Spain. PhD Thesis. (In Spanish).
- Davenne L, Ragueneau F, Mazars J and Ibrahimbegovic. A. (2003). *Efficient approaches to finite element analysis in earthquake engineering*. Computers & Structures 81, 1223—1239.
- Hanganu Alex D., Oñate E. and Barbat A.H. (2002). A finite element methodology for local/global damage evaluation in civil engineering structures. Computers & Structures 80, 1667—1687.
- Ibrahimbegovic A. (1995). On the finite element implementation of geometrically nonlinear Reissner's beam theory: three-dimensional curved beam elements. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 122, 11—26.
- Makinen J. (2001). *Critical Study of Newmark scheme on manifold of finite rotations*. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering. 191, 817—828.
- Mata P., Boroschek R., Barbat A.H. and Oller S. (2006). *High damping rubber model for energy dissipating devices*. Journal of Earthquake Engineering, JEE, (accepted for publication).
- Oller S. and Barbat A.H. (2006). *Moment-curvature damage model for bridges subjected to seismic loads*. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering. (In Press).

- Simo J.C, and Vu-Quoc L. (1985). *A finite strain beam formulation, Part I*. Computer Methods in Applied Mechanic Engineering. 49, 55–70
- Simo J.C, and Vu-Quoc L. (1986). A three dimensional finite strain rod model, Part II: Computational aspects. Computational Methods in Applied Engineering. 58, 79–116.
- Simo J.C, and Vu-Quoc L. (1988). On the dynamic in space of rods undergoing large motions–A geometrically exact approach. Computer Methods in Applied Mechanic Engineering. 66, 125–161.