

Ensayo pseudodinámico de estructuras sometidas a acciones sísmicas

FRANCISCO NAVARRO COLOM (*)

RESUMEN La mayoría de los códigos de diseño frente a acciones sísmicas consideran el comportamiento no lineal de la estructura como el principal mecanismo de disipación de energía, lo que obliga a diseñar ensayos en que se reproduzca esa fase del comportamiento. Un tipo de ensayo que es capaz de hacerlo es el ensayo pseudodinámico, que, a partir de un modelo de masas concentradas resuelto en el dominio del tiempo por un método paso a paso, sustituye el cálculo del término de fuerzas de deformación ($k \cdot x$) por la medida directa de dichas fuerzas en el ensayo. Se consideran las ventajas y limitaciones del método, así como el problema de transmisión de errores que se presenta en los modos elevados de vibración.

PSEUDODYNAMIC TESTING OF STRUCTURES UNDER SEISMIC LOADS

ABSTRACT *The most of the seismic codes consider the no lineal behaviour of structures as first mechanism of energie dissipation. For this reason, it is necessary design test to reproduce this type of movement. The pseudodynamic test evaluate the seismic performance of structural models in a laboratory by means of on-line computer controlled testing. The displacement response to a specified seismic excitation is numerically computed, based on analytically prescribed inertia and experimentally measured structural restoring forces. The capabilities and limitations of the method are examined, and the errors transmission problems for high number modes of vibration.*

Palabras clave: Ingeniería Sísmica; Simulación; Ensayo pseudodinámico; Comportamiento no lineal; Transmisión de errores; Ensayos estructurales híbridos; Ensayos on-line.

INTRODUCCIÓN

Históricamente, el comportamiento dinámico de las estructuras se ha modelizado como un equilibrio entre fuerzas de inercia, fuerzas de deformación y acciones exteriores. La solución correspondiente lleva a oscilaciones estacionarias, de acuerdo con el principio de conservación de la energía; alternativamente energía cinética de las masas en movimiento y energía potencial de deformación de la estructura. Sin embargo, la experiencia comprueba que el movimiento libre no es estacionario, sino que más o menos rápidamente las oscilaciones se amortiguan exponencialmente hasta detenerse. La mejor aproximación para este comportamiento es la definición de fuerzas viscosas, proporcionales a la velocidad, que dan un término disipativo en la ecuación de equilibrio, con amortiguamiento exponencial de vibraciones libres. El modelo entonces encaja muy bien con el comportamiento global de la estructura, especialmente a pequeñas deformaciones, y con bajos niveles de amortiguamiento; pero no tanto en cuanto se pretende definir el mecanismo físico interno que disipa esa energía: el resultado de la experimentación nos lleva a la histéresis de los ciclos de carga-descarga como vía principal de generación del amortiguamiento. Únicamente en casos de fuerte interacción suelo-estructura, la transmisión de energía de las masas de la estructura en movimiento

al suelo supone un efecto en el movimiento de ésta similar a un amortiguamiento viscoso (amortiguamiento de radiación).

Cuando consideramos el sismo como acción dinámica, especialmente para fuertes movimientos, la respuesta de la estructura raramente alcanza estado estacionario, dada la brevedad de la acción; y además los mecanismos de amortiguamiento corresponden a la fase no lineal de las características del material. La histéresis de la curva carga-deformación en ciclos de carga-descarga se relaciona con la ductilidad del material y con su comportamiento a fatiga por bajo número de ciclos.

La modelización numérica correspondiente se hace especialmente compleja, al depender la respuesta del material de la historia tensional previa y de la trayectoria de esas tensiones. Para conseguir una buena aproximación al comportamiento real es necesario utilizar un gran número de parámetros, cuyo ajuste se consigue mediante el análisis experimental correspondiente; de tal forma que técnicas numéricas cada vez más sofisticadas exigen simultáneamente mayor protagonismo de las técnicas experimentales.

El ensayo sísmico más generalizado es la simulación mediante mesa sísmica, que reproduce correctamente los efectos de inercia y amortiguamiento. No obstante, es muy difícil garantizar una reproducción fiel de las características no lineales en un modelo, tanto más cuanto mayor es la escala lineal utilizada. El ensayo pseudodinámico permite, mediante un mecanismo híbrido modelo numérico-medida de fuerzas de deformación, una simulación correcta del compor-

(*) Ingeniero de Caminos, C. y Puertos. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (MOPIMA).

tamiento dúctil, e independientemente de la escala de tiempo utilizada. El método calcula el vector de desplazamientos en el dominio del tiempo, por uno de los métodos habituales paso a paso (Newmark, diferencias centrales, Hilber, implícito, etc.), a partir de un modelo numérico de masas concentradas, sustituyendo el cálculo del vector de fuerzas de deformación en cada incremento de tiempo, por la medida de las correspondientes fuerzas reales desarrolladas en el espécimen de ensayo, al imponer los desplazamientos calculados en el paso anterior. Las variaciones de los elementos de la matriz de rigidez originadas por no linealidades en el comportamiento quedan automáticamente tenidas en cuenta al medir las fuerzas reales desarrolladas.

El método fue desarrollado en Japón, en el Instituto de Ciencias de la Industria de la Universidad de Tokyo, y en el Instituto de Investigación de la Edificación (BRI) del Ministerio de la Construcción, en 1976. Fue objeto de un convenio del Programa Cooperativo sobre Sismos USA-Japón, que dio lugar a un desarrollo intenso e importantes trabajos de evaluación principalmente en las universidades de California, Berkeley, y Michigan, Ann Arbor. En 1990, se instala en el Instituto para Tecnología de la Seguridad de Ispra, Italia, un equipo de ensayos a escala de prototipo, con un muro de reacción de 17 m. de altura, a cargo de la Comisión para las Comunidades Europeas.

PLANTEAMIENTO TEÓRICO

La acción sísmica se manifiesta como una aceleración en la base de la estructura que se transmite sucesivamente a todos los grados de libertad de la misma. Si llamamos x al desplazamiento de la base (sismograma), e y al de los grados de libertad de la estructura, la ecuación de la dinámica en fuerzas, para el sismo como única acción exterior, y sin considerar el amortiguamiento viscoso, es:

$$m \cdot y'' + k \cdot (y - x) = 0 \quad (1)$$

Llamando z al desplazamiento relativo de la estructura respecto de la cimentación:

$$\begin{aligned} z &= y - x \\ z'' &= y'' - x'' \\ m \cdot (z'' + x'') + k \cdot z &= 0 \\ m \cdot z'' + k \cdot z &= -m \cdot x'' \end{aligned} \quad (2)$$

que es la ecuación original, pero expresada en coordenadas relativas a la cimentación, y con el término independiente $-m \cdot x''$. Habitualmente, para terremotos se considera que el vector x afecta a una sola componente, correspondiente a una traslación horizontal, pero el mismo planteamiento serviría para las tres traslaciones necesarias si consideramos la acción tridimensional del sismo; e, incluso, los seis movimientos posibles teóricos. El vector z , por tanto, define los movimientos de la estructura respecto a la base como si ésta estuviese inmóvil. La ecuación (2) es una expresión dimensional en fuerzas, correspondiendo cada término a un concepto físico distinto: $m \cdot z''$ es la inercia de las masas en movimiento (ficticia, al utilizar desplazamientos relativos), $k \cdot z$ las fuerzas de deformación, y $m \cdot x''$ las cargas exteriores (en este caso, cargas ficticias equivalentes, por tratarse de un sismo, planteado en coordenadas relativas).

Si llamamos F al vector de fuerzas de deformación, y S al vector $m \cdot x''$, tenemos:

$$m \cdot z'' = F - S \quad (3)$$

Esta ecuación diferencial puede resolverse en el dominio del tiempo por incrementos sucesivos. Para el incremento n tenemos:

$$\begin{aligned} m \cdot z''(n) &= \frac{m}{\Delta t^2} [z(n+1) - 2z(n) + z(n-1)] = F(n) - S(n) \\ z(n+1) &= \frac{\Delta t^2}{m} [F(n) - S(n)] + 2z(n) - z(n-1) \end{aligned}$$

Esta fórmula de recurrencia nos permite obtener los desplazamientos en cada incremento de tiempo a partir de los vectores F y S , y los desplazamientos en los dos momentos anteriores. Es necesario definir un desplazamiento ficticio $z(-1)$ para iniciar la iteración, que en función de las condiciones iniciales vale:

$$z(-1) = z(0) - \Delta t \cdot z'(0) + \frac{\Delta t^2}{2} \cdot z''(0)$$

En la gran mayoría de los casos $z(-1) = z(0) = 0$. Esta formulación es conocida como el método de las diferencias centrales, y nos permite calcular explícitamente los desplazamientos, con las ventajas de tiempo de cálculo que ello supone. El mayor inconveniente es que se trata de un método condicionalmente convergente, esto es, la solución converge establemente si $\Delta t < 2/\omega$, siendo ω la frecuencia modal máxima del sistema. Esta limitación obliga a incrementos de tiempo muy pequeños.

Existen muchas formulaciones alternativas para la integración numérica. El grupo más utilizado es el de los métodos implícitos, en los que el vector $z(n+1)$ se obtiene por resolución de un sistema de ecuaciones. La gran ventaja reside en que son métodos incondicionalmente estables, para cualquier valor de Δt , pero con el inconveniente de tener que resolver el sistema implícito iterativamente, con consumo de tiempo de ordenador.

En toda el desarrollo anterior se ha prescindido del término de amortiguamiento viscoso. Cuando se considera la fase no lineal del comportamiento del material, el mecanismo preferente de disipación de la energía es el proceso de histéresis en las trayectorias cíclicas tensión-deformación. Este efecto supone variaciones en el tiempo de los elementos de la matriz k que deja de ser constante. En el planteamiento anterior, el vector de fuerzas de deformación, F , ya engloba los fenómenos de disipación estructural.

ENSAYO PSEUDODINÁMICO DE ESTRUCTURAS

Cuando se utiliza el método de las diferencias centrales para la resolución en el tiempo de la ecuación de equilibrio dinámico, es necesario modelizar previamente el comportamiento de la estructura a calcular. Esto se consigue definiendo las matrices m y k , tanto en dimensiones como en valor de sus elementos. Si el modelo a utilizar es de masas concentradas, los grados de libertad se localizan en los nudos de la estructura, simplificando generalmente el planteamiento del problema. Podremos entonces medir el vector F de fuerzas en lugar de calcularlo, para cada deformación de la estructura definida por el vector de desplazamientos z calculado en el paso anterior. Con este valor se resuelve el vector de desplazamientos para el tiempo incrementado, y sus valores se imponen a la estructura en ensayo. En la figura 1 se indica un esquema de funcionamiento.

En el desarrollo del ensayo, los únicos valores medidos que intervienen en la resolución de la ecuación de la dinámica son los elementos del vector F , que a su vez solo dependen de la deformación de la estructura en ese momento. Es

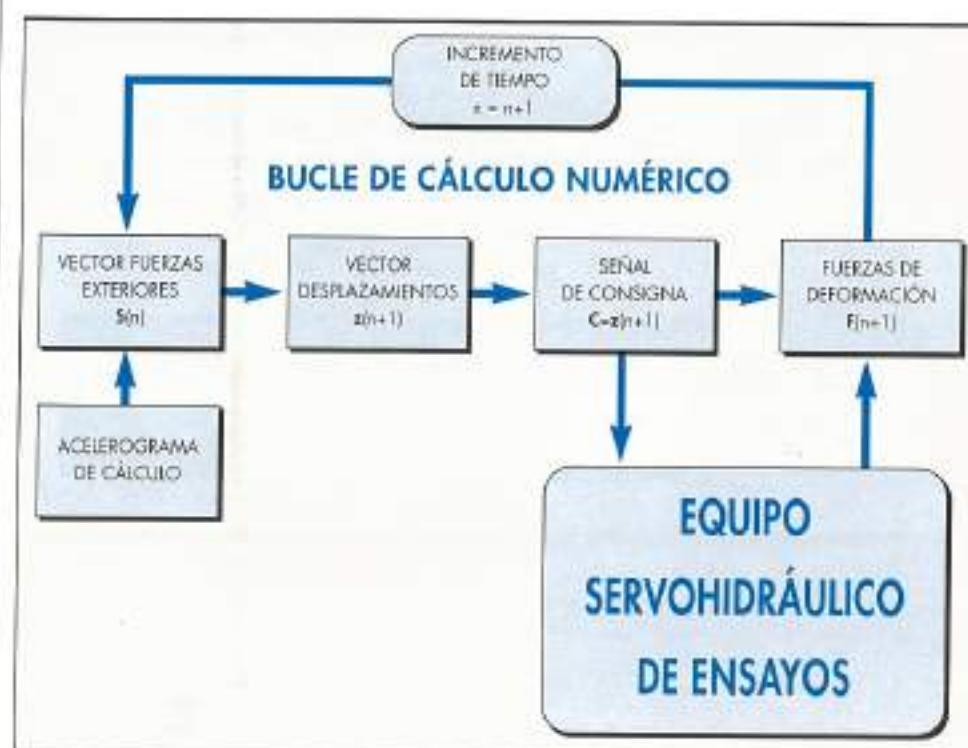


FIGURA 1. Esquema de funcionamiento del ensayo pseudodinámico de estructuras.

decir, que todos los efectos cinemáticos (inercia, viscosidad, etc) son simulados por el ordenador. El proceso, entonces, es independiente del tiempo, y los resultados del cálculo no deben utilizarse en el ensayo en tiempo real necesariamente. Por otra parte, debe asegurarse que los esfuerzos medidos corresponden únicamente a las fuerzas de deformación; en otras palabras, la estructura deformada debe de estar inmóvil en el momento de realizar la medición, pues cualquier masa en movimiento producirá alteraciones en la medida de los transductores de carga.

El método se ha utilizado con otros algoritmos de resolución, además del de diferencias centrales. En general, interesan métodos rápidos que no introduzcan distorsiones en el proceso, como pueden ser efectos de relajación de tensiones, etc. La existencia de ordenadores cada vez más rápidos y potentes permite utilizar planteamientos implícitos sin que el tiempo de cálculo en cada escalón sea excesivo. Aparte de ser incondicionalmente convergentes, tienen menor sensibilidad a la transmisión de errores.

Como antes se ha indicado, la medida de fuerzas de deformación incluso en el rango no elástico de comportamiento, tiene en cuenta automáticamente las características histeréticas de la estructura. En algunos casos se ha planteado teniendo en cuenta los términos de amortiguamiento viscoso, reduciendo la matriz de amortiguamiento de Rayleigh a una proporcional a la matriz de masas, y calculando en ordenador el término correspondiente.

El principal inconveniente práctico en la realización del ensayo es la sensibilidad a la transmisión de errores en los sucesivos pasos de cálculo. Si la distribución en frecuencia del error tiene algún armónico cercano a frecuencias modales de la estructura, las formas modales correspondientes se ven excitadas repetidamente en cada incremento de tiempo, lo que puede dar lugar a resultados espúreos (figura 2). Cuando el desplazamiento llega a deformaciones dúctiles se pueden presentar errores por ciclos positivos de

carga-deformación que aumenten la energía proporcionada al sistema. Los modelos implícitos de resolución son menos sensibles a transmisión de errores, y además permiten incrementos de tiempo superiores sin peligro de inestabilidad numérica.

El número de grados de libertad es también una variable importante a tener en cuenta. Aunque el planteamiento teórico permite cualquier número de movimientos, es aconsejable definir el modelo más simplificado posible de acuerdo con la estructura a ensayar. Una modificación muy interesante del método es aplicar el principio de cálculo por división en subestructuras, reduciendo el ensayo y, por tanto, la medida del vector F a la subestructura en que se sospecha la aparición de rótulas, y calculando en ordenador el resto de términos en deformación, que al corresponder a subestructuras en régimen elástico mantienen submatrices de rigidez de elementos constantes. Al existir mayor número de frecuencias modales, es más sensible al efecto de transmisión de errores.

EQUIPOS FÍSICOS

Tal como se ha indicado previamente, es necesario imponer el vector de deformaciones a todos los grados de libertad del ensayo, para lo que se utilizan actuadores servohidráulicos con control en desplazamiento. Este control debe hacerse numéricamente, es decir, desde el mismo ordenador utilizado en la resolución de la ecuación por incrementos finitos de tiempo, ya que de esta forma se puede utilizar inmediatamente el vector de desplazamientos calculado como señal de consigna de los actuadores. Esto supone una limitación en el número máximo de grados de libertad a ensayar, pues los equipos comerciales de este tipo tienen todos un límite en el número de ciclos de control numérico a utilizar simultáneamente. Las grandes instalaciones (Berkeley, Ispra) han desarrollado programas de control numérico específico.

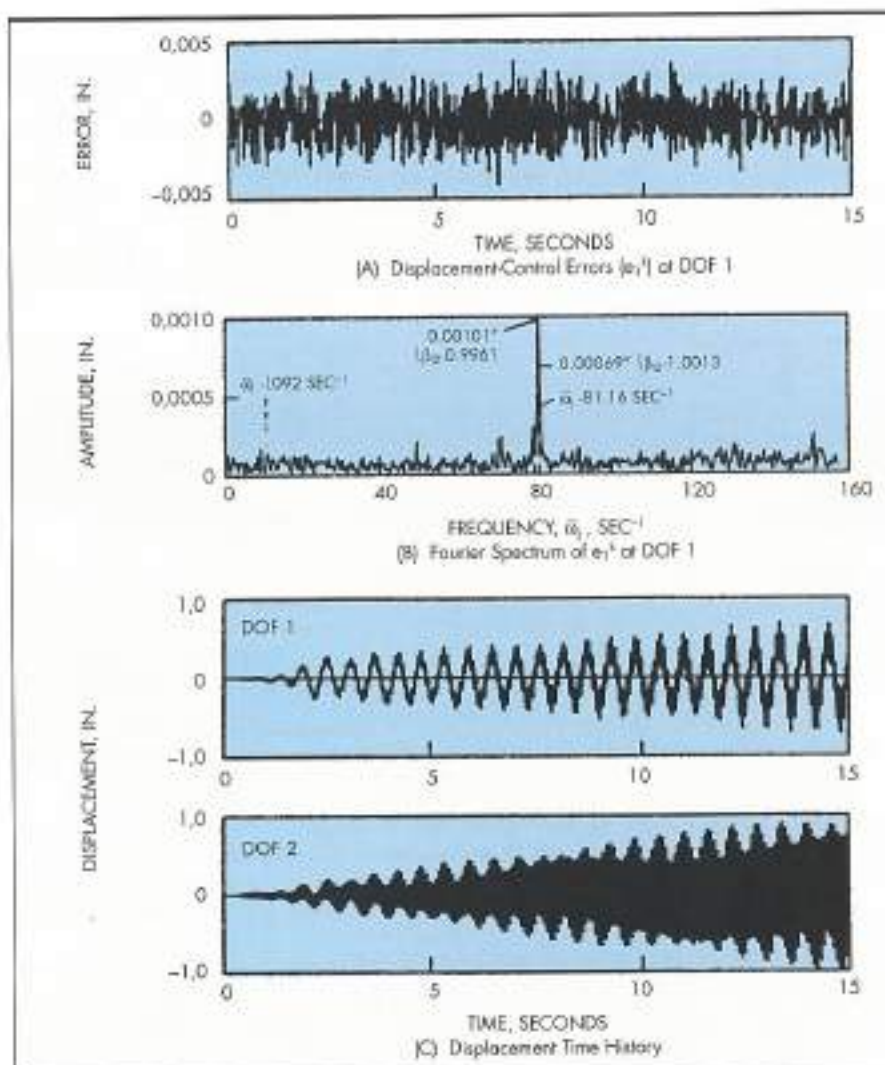


FIGURA 2. Efecto de transmisión de errores en un ensayo de 2 grados de libertad (SHING y MAHIN, 1987).

Dado que el principal problema es la transmisión de errores, deben utilizarse equipos que garanticen la estabilidad de las deformaciones impuestas: actuadores de tipo dinámico, incluso con servoválvulas dobles, y sistemas de control sofisticados con bucles de estabilización (procesadores PIDF). Aunque el ensayo no dependa del tiempo, el tipo de actuador no puede ser estático ya que los errores inducidos serían inadmisibles.

Aunque el planteamiento teórico permitiría cualquier tipo de grado de libertad (incluso una aplicación en elementos finitos), la realización práctica limita mucho el número de posibilidades. El movimiento más sencillo de imponer es una traslación única en la dirección del actuador. Si en el mismo nudo se imponen dos o tres traslaciones, la realización física se complica, y se hace impracticable si además hay que fijar giros. Hay que tener en cuenta que sistemas complicados de imposición de desplazamientos pueden favorecer la aparición de errores de fustas consecuencias. El sistema más habitual de reacción para los actuadores es el muro vertical, con sistemas de fijación articulados para permitir los movimientos no impuestos. Frecuentemente hay que simultanear cargas estáticas (peso propio, reacciones estáticas, etc.) lo que complica la disposición del ensayo. La

necesidad de inmovilizar la estructura en el momento de medir las fuerzas de deformación hace que las rótulas esféricas de articulación sean un punto crítico del sistema.

El Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX ha instalado un equipo de realización de ensayos pseudodinámicos cuyas características se indican en la tabla 1. La figura 3 muestra una imagen de los actuadores utilizados, con doble servoválvula de control y rótulas esféricas precomprimidas. En la figura 4 se muestra una vista general del equipo, con el muro de reacción horizontal, y el panel de control a distancia.

CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS PSEUDODINÁMICOS

Aunque este tipo de ensayos presenta ventajas notables, exige unas condiciones muy concretas en el tipo de estructura a ensayar que limitan mucho su aplicación. Algunas de las ventajas de este método son:

- Desarrollo del ensayo independiente del tiempo, con la posibilidad de estudiar el inicio y propagación del mecanismo de rotura (fisuración o pandeo). El equipo físico utilizado no necesita simular las características de inercia del modelo.

**EQUIPO DE ENSAYOS PSEUDODINÁMICOS
DEL LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES DEL CEDEX.**

- Muro de reacción de hormigón pretensado de 5 m x 3 m, con sistemas de fijación de actuadores cada 40 cm x 40 cm.
- Dos actuadores servohidráulicos dinámicos de 15 Tn de capacidad, con doble rótula esférica y medidores de desplazamiento integrados de $\pm 12,5$ cm.
- Dos células de carga dinámicas de precisión, de 20 Tn de capacidad, incluso los acondicionadores de señal correspondientes.
- Sistema de control numérico para cuatro canales simultáneos, con subrutinas de sintonización PIDF, variables de control externas auxiliares, mando a distancia de instalación del ensayo y seguimiento gráfico en tiempo real.
- Compiladores informáticos para lenguajes C y Basic, con rutinas de manejo del sistema de control numérico.
- Sistema de toma de datos de ocho canales, totalmente digital, incluso filtrado y almacenamiento en disco, controlado por el sistema de control numérico.

TABLA 1. Características generales del equipo de ensayos pseudodinámicos del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (MOPTMA).

- Reproducción correcta del amortiguamiento estructural y de sus variaciones en función de la historia tensional previa (fatiga). También es posible establecer un amortiguamiento inicial viscoso, y superponer la histéresis de los ciclos de carga y descarga a lo largo del ensayo.
- Posibilidad de reducir la acción física de ensayo a la subestructura de interés (rótulas plásticas localizadas). El resto del modelo se calcula en régimen elástico en el proceso numérico correspondiente. Incluso es posible utilizar un modelo no lineal de cálculo numérico, de acuerdo con unas ecuaciones constitutivas previas, y comprobar el desarrollo de la ductilidad en las zonas de interés. Sería el caso de interacción cimiento-estructura, con un modelo no lineal de comportamiento de suelo, y llevando la acción sísmica en la estructura hasta rotura.
- En general, los equipos electrohidráulicos necesarios son más económicos que los simuladores sísmicos por mesa vi-

brante. Al ser ensayos independientes del tiempo, el velocidad máxima no es un parámetro crítico, y la capacidad del grupo de presión puede ser mucho menor.

Recíprocamente, el método de ensayo pseudodinámico presenta los siguientes inconvenientes:

- Necesidad de un modelo de comportamiento dinámico de la estructura de masas concentradas, que sea muy próximo al comportamiento real. Todos los movimientos de la estructura en ensayo deben estar reproducidos en el modelo numérico inercial, y si no es así se producen errores en los resultados.
- Número y tipo de grados de libertad muy limitados. La estructura debe de ser sencilla, tanto en los movimientos posibles como en su comportamiento modal. No es un método correcto para comportamientos complejos (formas modales acopladas, frecuencias modales múltiples, etc.).

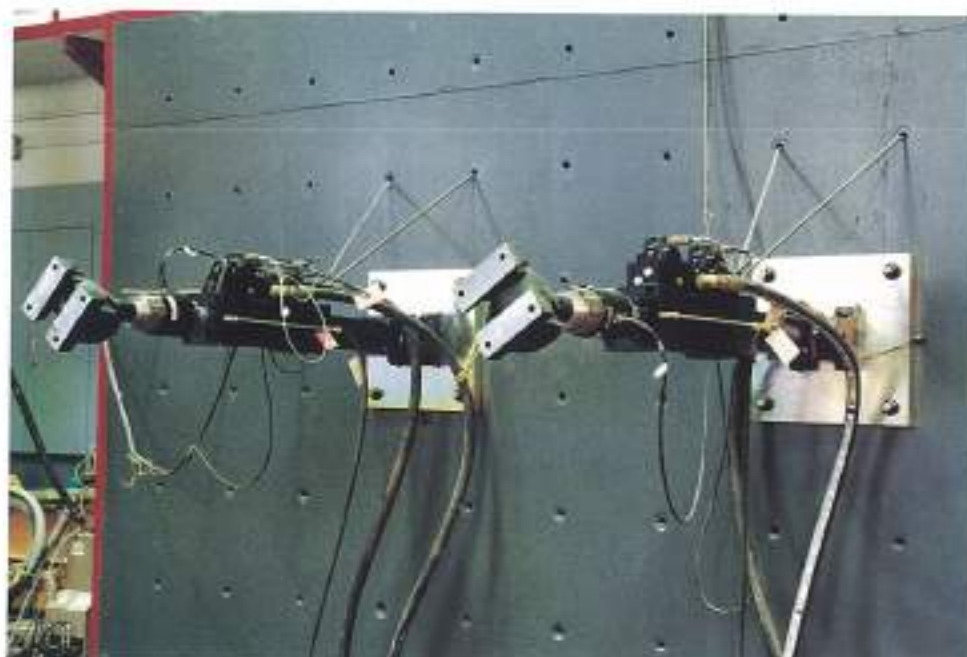


FIGURA 3. Actuadores hidráulicos de doble servoválvula para ensayos pseudodinámicos de estructuras.



FIGURA 4. Vista general del equipo de realización de ensayos pseudodinámicos.

La dificultad del ensayo crece con el número de grados de libertad.

- Sensibilidad a los errores de ensayo. El procedimiento debe de ser muy cuidado, con rutinas de sintonía y acondicionamiento de ciclos servohidráulicos sofisticadas. Es imprescindible la utilización de equipos de servocontrol numérico, capaces de relacionarse en tiempo real con los programas de resolución del modelo numérico. El equipo de control debe garantizar la inmovilidad de la estructura en el momento de toma de datos de fuerza.
- La independencia del tiempo en el ensayo (esto es, la ralentización del mismo) puede potenciar los efectos de relajación de tensiones por cambios en la velocidad de carga. Los materiales sensibles no son adecuados para este tipo de métodos.
- No es apropiado para reproducir comportamientos complejos de la estructura. No sirve para ensayos de validación de métodos de control tanto activos como pasivos.

Los procedimientos de ensayo pseudodinámico y de mesa vibrante puede decirse que son complementarios. Los primeros se recomiendan para acciones dinámicas y estructuras en las que el término de inercia tenga un comportamiento predecible, y nos interese una zona localizada, incluso a rotura. Es un método muy adecuado para pórticos de edificación, con forjados rígidos en su plano, y masas concentradas por plantas, con dos traslaciones y un giro como grados de libertad. Cuando los términos cinemáticos tengan importancia, y, en general, cuando el comportamiento global de la estructura sea complejo y no bien conocido, el tipo de ensayo

adecuado sigue siendo el simulador sísmico de seis grados de libertad.

BIBLIOGRAFÍA

- RAO, S. S. (1990). "Mechanical Vibrations". Addison-Wesley Publishing.
- CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. (1993). "Dynamics of Structures". Mc Graw-Hill.
- DONEA, J.; JONES, P. M. (1991). Editores "Experimental and Numerical Methods in Earthquake Engineering" Kluwer Academic Publishers.
- MAHIN, S. A.; SHING, P. B. (1985). "Pseudodynamic method for seismic testing", J. Struct. division ASCE 111.
- TAKANASHI, K.; UDAGAWA, K.; SEKI, M.; OKADA, T. y TANAKA, H. (1975). "Nonlinear Earthquake response analysis of structures by a Computer-Actuator On-Line system", Bulletin of Earthquake resistant Structure Research Center, n° 8, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- TAKANASHI, K.; TANIGUCHI, H. y TANAKA, H. (1980). "Inelastic response of H-shaped columns to two dimensional earthquake motions", Bulletin of Earthquake resistant Structure Research Center, n° 13, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- RADAKOVIC-GUZINA, Z. (1995). "TestStar Program for Pseudodynamic Testing", University of Colorado, Boulder.
- SHING, P. B.; MAHIN, S. A. (1987). "Elimination of spurious higher-mode response in pseudodynamic tests", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, V. 15.

BANDAS PREVENTIVAS SONORAS



las
"salvavidas"

Salvar vidas, evitar accidentes, prevenir. Esta es nuestra contribución a la seguridad vial. Por eso, desde hace tres años, venimos aplicando en toda España las Bandas Transversales Preventivas Sonoras, y los resultados saltan a la vista. En el último año la demanda se ha multiplicado.

En cruces y zonas escolares, en peajes de autopista, en los accesos a poblaciones, en puntos "negros" de la calzada, etc... y siempre que sea necesario reducir la velocidad, la instalación de estas Bandas desarrolladas por Pinturas Jaque, constituyen una eficaz solución para evitar accidentes y salvar vidas.

reliband

nuevo producto

Para hacérselo más fácil, también puede solicitar las Bandas Preventivas Sonoras Prefabricadas, que su propio personal podrá instalar con un acabado de profesional.



la seguridad en pintura

TEL: (968) 88 00 00 FAX: (968) 88 17 82 MURCIA



Obra de infraestructura M-40 Madrid

Acceso Puerto de Valencia

Ahorramos
tiempo, ganamos
en seguridad.

**CUBIERTAS**

V.M.20V S.A. CIA. GRAL. DE CONSTRUCCIONES