

SIMULACIÓN DE EVENTOS CON MEF EN PROBLEMAS SÍSMICOS

Patricia M. Bellés

Universidad Nacional del Sur, Departamento de Ingeniería
Av. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Argentina.
Prof. Visitante del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Madrid, España).

Pablo Vicente Legazpi

CAEsoft Consulting SL
Meléndez Valdés 28, 28015 Madrid, España.

RESUMEN

Se describe una aplicación del método de elementos finitos (MEF), mediante el procesador de cálculo no lineal Accupak/VE de Algor. El tipo particular de análisis que se emplea, denominado Mechanical Event Simulation (MES), permite realizar análisis de tensiones con elementos finitos lineal y no lineal, estático y dinámico. Se reproduce un experimento en un simulador sísmico, que muestra la posibilidad de emplear esta herramienta como complemento de los métodos tradicionales de análisis.

ABSTRACT

This paper describes an application of the finite element method (FEM), by means of the non-linear processor Accupak/VE of Algor. The particular type of analysis used, named Mechanical Event Simulation (MES), performs linear and non-linear, static and dynamic finite element stress analysis. An experiment in a seismic simulator is reproduced, showing the utility of employing this tool as a complement of conventional methods of analysis.

INTRODUCCIÓN

Se analizan efectos de la acción sísmica sobre una estructura utilizando un software basado en el método de elementos finitos que permite la simulación de eventos mecánicos. Puede decirse que la estructura es modelada y ensayada en un laboratorio virtual. Se analizó un modelo construido en el Simulador Sísmico del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, España. El análisis se aplica a un prototipo **virtual** —modelo de elementos finitos—, que reemplaza al prototipo **físico** de prueba empleado en el laboratorio. Es sabido que el análisis experimental dinámico y más específicamente, la simulación mediante mesa sísmica, es el medio más apropiado para este fin ya que reproduce correctamente los efectos de inercia y amortiguamiento. Los resultados obtenidos por medio del software de simulación de eventos con elementos finitos, se comparan con los del simulador sísmico.

DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR SÍSMICO

El Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX cuenta con un simulador sísmico de 6 grados de libertad que permite la excitación simultánea e independiente de seis movimientos: dos traslaciones horizontales y una vertical, dos giros de basculamiento y una torsión respecto al eje vertical. El parámetro fundamental de un simulador es el número de grados de libertad que es capaz de reproducir el sistema simultáneamente. Para reproducir el movimiento espacial causado por un sismo en la superficie del terreno, son necesarios al menos tres grados de traslación. Sin embargo, por problemas de control, es aconsejable utilizar seis grados de libertad para un simulador sísmico que reproduzca las tres componentes del movimiento [1].

Básicamente, el simulador sísmico (Figura 1) consiste en una mesa rígida cuadrada de 3m de lado y 0.80m de altura. Está construida con paneles de acero y apoyada sobre cimentación flotante. Cuenta con un sistema de soporte estático centrado por pistón neumático, con rótulas esféricas [2]. La mesa es movida por cuatro actuadores horizontales y cuatro verticales (Figura 2), que la someten a movimientos programados. Los actuadores utilizados son del tipo electrohidráulico y su movimiento es servocontrolado.

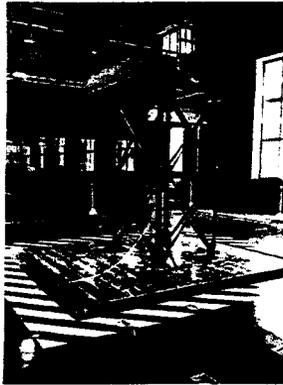


Figura 1: mesa sísmica

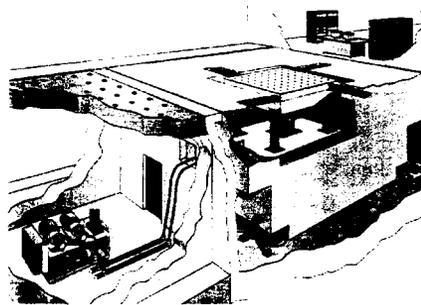


Figura 2: Esquema de actuadores y bomba hidráulica.

DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE ANÁLISIS: SIMULACIÓN DE EVENTOS

El procesador para cálculo no lineal (Accupak/VE) de Algor, mediante un tipo particular de análisis denominado Mechanical Event Simulation (MES), permite incluir simultáneamente en el análisis: grandes deformaciones, no linealidad de materiales, movimientos y fuerzas originadas por esos movimientos [5, 6]. Tanto la estructura bajo análisis como las influencias exteriores que controlan el evento físico, pueden ser modeladas asumiendo un número mínimo de hipótesis básicas lo cual reduce la posibilidad de errores en los resultados. La simulación de eventos consiste en tres pasos básicos:

a) **Preproceso:** Es la generación del modelo y la configuración del evento. En primer lugar se determinan los tipos de elementos que serán usados para representar de la forma más adecuada tanto la geometría como el tipo de análisis. Se construye la malla de elementos finitos de la estructura en forma manual o automática. Luego se describen los materiales, con propiedades lineales o no lineales, y se aplican las condiciones de borde. Es imprescindible especificar algunos parámetros de análisis tales como el tiempo de observación del evento y la cantidad de registros (tensiones, deformaciones y desplazamientos) a obtener por cada segundo de observación. Otros parámetros son: aceleración de la gravedad, campo de aceleraciones, aceleración angular, desplazamientos iniciales, etc.

Se describen las fuerzas (o presiones) en función del tiempo si se conocen en forma precisa. De lo contrario, las fuerzas serán determinadas por los cambios en el movimiento. Las cargas resultantes de cambios en el movimiento son computadas interna y automáticamente.

b) **Proceso:** Con la ejecución de la simulación se inicia un proceso interactivo del desarrollo del evento. Pueden monitorearse desplazamientos, deformaciones y tensiones a medida que se producen y Observar las velocidades y aceleraciones en distintos puntos del modelo.

c) **Post-proceso:** Es el examen de los resultados incluyendo su historia animada. Se obtienen gráficos de tensiones, movimiento y deformaciones para cada instante del proceso de simulación.

ESTRUCTURA ESTUDIADA

Se analizó un modelo construido en el Laboratorio Central de Estructuras del CEDEX (Figura 3). Se trata de una estructura construida con perfiles de acero A42, tiene planta rectangular de 1.27 m x 0.94 m. Esta formada por dos pisos de 1.29 m de altura cada uno. Para la estructura se utilizaron perfiles L 50x5 y para los arriostramientos diagonales perfiles L 30x3. Las uniones son soldadas y con cartelas rigidizadoras de chapa de 5 mm. Sobre el piso superior se apoya un bloque de hormigón de planta cuadrada con 1.80 m de lado exterior y con un agujero central de 0.90 m de lado. La altura del bloque es de 0.28 m [3]. Teniendo en cuenta las leyes de semejanza que rigen la construcción de modelos a escala, el modelo de laboratorio representa una estructura real que podría ser un deposito elevado. El objetivo que se persigue es estudiar su comportamiento en la mesa sísmica, por consiguiente, en esta etapa del análisis no se realiza la extrapolación de resultados a la hipotética estructura real.

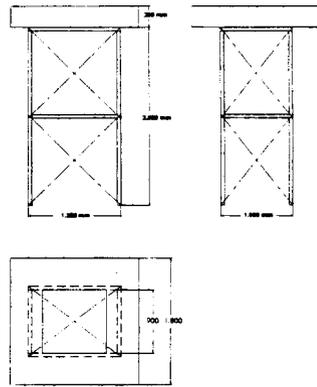


Figura.3: Estructura estudiada.

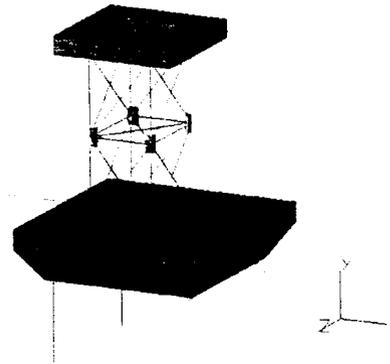


Figura.4: Modelo de elementos finitos.

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

En el modelo de elementos finitos (Figura 4), se han utilizado elementos clásicos formulados en el espacio 3D: **viga** para la estructura metálica, **placa** para las cartelas rigidizadoras y **sólido-elástico** para el bloque de hormigón. Además, para representar algunas características particulares del modelo y el tipo de análisis, fueron empleados otros tipos de elementos no clásicos: **actuadores**, **elementos cinemáticos 3D** y **elementos de contacto**, cuyas características se describen a continuación [5,6].

El mecanismo servohidráulico que imprime el movimiento, fue modelado con un elemento llamado actuador. Es un elemento lineal muy rígido con 6 grados de libertad que reproduce desplazamientos variables controlados a través de curvas de carga. La incorporación de actuadores en el modelo de elementos finitos hace posible simular movimientos en el tiempo en cualquier dirección. Reproducen la extensión y la retracción típica de los cilindros hidráulicos y neumáticos.

Para comprobar el ajuste del modelo se realizaron verificaciones estáticas de desplazamientos y tensiones máximas. Además se obtuvieron las frecuencias naturales y las respectivas formas modales. El bloque de hormigón fue inicialmente modelado con elementos sólido-elásticos 3D, para realizar las verificaciones previas. Luego, fueron reemplazados por elementos cinemáticos 3D. Con ellos se consigue reducir el proceso de cálculo ya que son elementos rígidos que tienen la posibilidad de moverse como los elementos finitos corrientes, pero obviando el cálculo de las tensiones. También con este tipo de elementos y por análogas razones, fue modelada la mesa sísmica sobre la cual se apoya la estructura y sobre la que se aplican los actuadores.

Se utilizaron además elementos de contacto que transmiten solamente fuerza axial, para los actuadores horizontales que permanecieron inactivos durante el ensayo. El soporte estático central, también inactivo, no fue incluido en el modelo de elementos finito.

ACCIONES SOBRE EL MODELO

En el simulador sísmico la estructura se sometió a la acción de las cargas correspondientes al terremoto del Centro (1940). Las componentes horizontal y vertical del movimiento sísmico se aplicaron separadamente y también en forma simultánea. La instrumentación de control de la mesa permite medir el desplazamiento y la aceleración, obteniéndose la velocidad a partir de ellas por un circuito electrónico analógico en tiempo real. Las variables obtenidas numéricamente para cada actuador se comparan con las variables físicas medidas instantáneamente. El conjunto de variables físicas medidas se almacena previa su digitalización. Se especificó un muestreo de 0.001 segundos, tanto en la definición de la señal como en la adquisición. El resultado se ha sometido a un filtro paso alto de 80 Hz de frecuencias de corte. Se garantiza una diferencia de tiempo despreciable entre lecturas de diferentes canales.

Con la información de las acciones ejercidas por los actuadores servohidráulicos sobre la mesa sísmica, se diseñó la acción sobre el modelo de elementos finitos. La excitación se aplica en forma de desplazamientos a través de los elementos actuadores, por medio de curvas de carga que pueden ser independientes para cada uno de ellos. Se analizó en particular la acción de la componente vertical del sismo (Figura 5), por lo tanto, las curvas de carga aplicada a los actuadores verticales fueron los desplazamientos correspondientes a dicha componente (ver Figura 6).

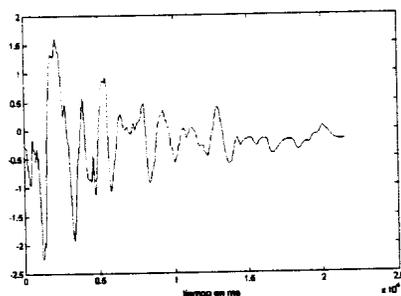


Figura 5: Componente vertical del terremoto de El Centro (20 segundos).

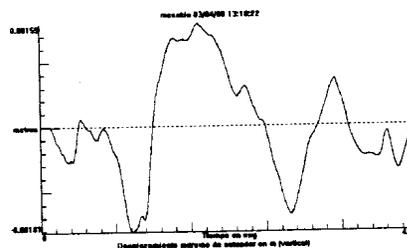


Figura 6: Curva de carga de los actuadores verticales (5 segundos iniciales)

Para una buena definición de la acción a aplicar, es necesario realizar un tratamiento de los registros en el laboratorio, que incluye corrección instrumental, filtrado y corrección de ceros.

Posteriormente, se adecua la curva de desplazamientos de los actuadores de la mesa sísmica, para traducirla en la curva de carga de los elementos actuadores del modelo. Ello se realizó mediante un proceso de filtrado y remuestreo de las curvas a través de un software matemático específico. En la mesa sísmica la duración del ensayo fue aproximadamente de 20 segundos, con un muestreo de 0.001 segundo. La curva de carga para los actuadores se redujo a 2150 puntos pero con un tiempo de muestreo igual al del experimento.

El peso propio del conjunto mesa-estructura-hormigón es la única acción adicional que se consideró en el cálculo.

RESULTADOS

La respuesta del equipo ensayado en la mesa sísmica se obtiene mediante nueve acelerómetros instalados según los ejes coordenados. Se indican sus ubicaciones en la Figura 7, con los números 1 a 8 en horizontal y 9 en vertical. Fueron colocadas además tres bandas extensométricas para medir deformaciones, indicadas con los números 10 al 12..

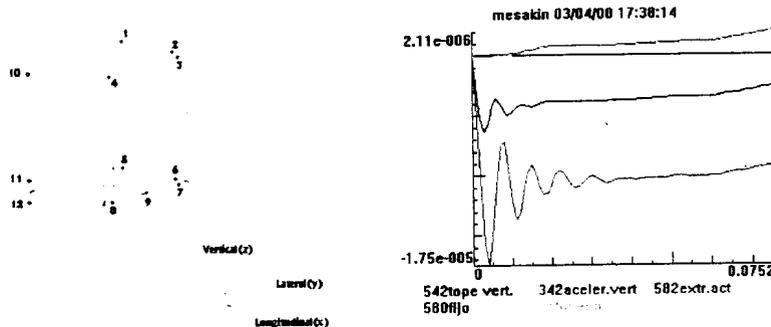


Figura 7: Ubicación de acelerómetros y bandas extensométricas en la estructura ensayada.

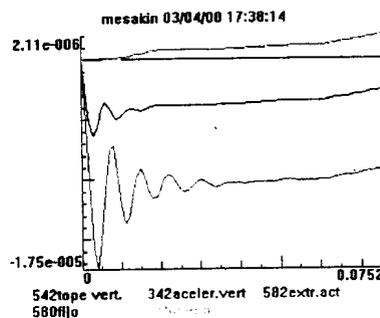


Figura 8: Desplazamientos en distintos nodos del modelo MES en el instante inicial (transitorio debido a la puesta en gravedad).

Se presentan los desplazamientos en un punto de la estructura que corresponde a la posición del acelerómetro identificado con el número 9. El mismo está ubicado en la dirección vertical, en el punto medio de uno de los perfiles a media altura horizontales (Figura 7). La simulación del movimiento de la mesa a través de actuadores en el modelo MES es relativamente fácil de implementar. En la Figura 8 se muestra el instante inicial del ensayo MES, en donde se pone en evidencia el transitorio inicial de la gravedad y las deformaciones relativas entre el bloque superior, el punto intermedio donde se sitúa el acelerómetro 9 y la base de la mesa (o extremo de actuador). La estructura se mueve de forma aproximadamente rígida a lo largo de todo el ensayo.

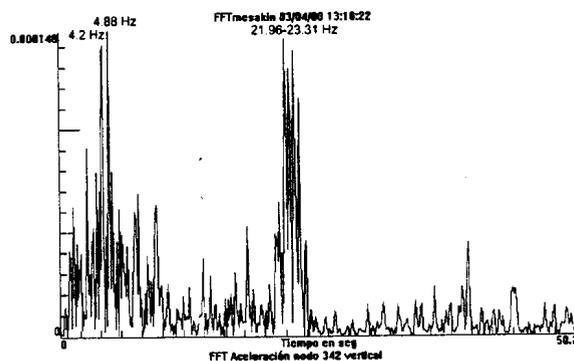


Figura 9: FFT de las aceleraciones en el punto de observación (acelerómetro 9 vertical).

El caudal de información que provee el modelo MES es mayor que el que se obtiene experimentalmente. En el modelo de elementos finitos pueden obtenerse datos de desplazamiento, velocidad, aceleración y tensiones en cualquier punto. La comparación de resultados de desplazamientos y de aceleraciones entre el modelo y la mesa sísmica muestra una concordancia muy estrecha. Desde el punto de vista de las aceleraciones, los resultados obtenidos coinciden muy bien con los máximos observados en el registro del acelerómetro. Con respecto a la información referente a las frecuencias, en la mesa sísmica se realiza un filtrado a priori de frecuencias superiores a 80 Hz. En el análisis con MES se realizó un filtrado similar. En la Figura 9 se muestra la FFT hasta 50 Hz. De este modo se desprecian picos superiores que son debidos a efectos ajenos al problema estudiado.

CONCLUSIONES

Aún cuando la aplicación presentada en este artículo está referida a un prototipo de laboratorio y no a una estructura real, los resultados logrados muestran la validez de la simulación de eventos para analizar los efectos de cargas sísmicas sobre estructuras. Puede decirse que se trata de una poderosa herramienta de cálculo en sí misma y que además constituye una técnica complementaria de gran utilidad para el simulador sísmico y otras técnicas experimentales, especialmente cuando el comportamiento global de la estructura es complejo y no totalmente conocido o predecible. Además, es importante destacar que en la mesa sísmica las dimensiones de la estructura ensayada están limitadas (o escaladas) por las características de la mesa. A los posibles problemas de escala se suman las dificultades atribuibles a los sistemas de control. Por otra parte, el MES ofrece la posibilidad de analizar los efectos de sismos sobre modelos estructurales con un número elevado de grados de libertad y de representar las acciones sísmicas de una manera sencilla. No es necesario estimar complicadas condiciones de contorno, pues el movimiento de la mesa se introduce directamente con actuadores, del mismo modo que en el ensayo real.

Tanto la normativa como los medios de cálculo han evolucionado significativamente en los últimos años y plantean la necesidad de complementar los métodos tradicionales de diseño sísmico [4] con nuevos métodos de cálculo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CEDEX y particularmente al Dr. Manuel Pastor Pérez por su colaboración. Un agradecimiento muy especial al Ing. Francisco Navarro Colom, Jefe de la División de Análisis Experimental del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, por la realización de los ensayos en el simulador sísmico y por sus valiosas sugerencias.

La primera autora es investigadora de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. Su permanencia en Madrid fue financiada por el Proyecto FOMEC del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur (Bahía Blanca, Argentina).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Navarro Colom, F., *Simulador sísmico de seis grados de libertad. Técnicas de compensación analógicas y numéricas*. Ingeniería Civil-CEDEX Nro.100, 1995.
2. Corbaton, V. *Aislamiento dinámico por cimentación suspendida del simulador sísmico del laboratorio central de estructuras y materiales del CEDEX*. Ingeniería Civil-CEDEX Nro.100, 1995.
3. Corbaton, V. *Diseño de un modelo de ensayo para el simulador sísmico del laboratorio central de estructuras y materiales del CEDEX*. Ingeniería Civil-CEDEX Nro.100, 1995.
4. Barbat, A.H., Canet J.M., *Estructuras sometidas a acciones sísmicas. cálculo por ordenador*. Centro Internacional de Métodos Numéricos, Barcelona.
5. *DOCUTECH*, Algor Technical User Documentation, 1999.
6. *ALGOR DESIGN WORLD*, Virtual Prototyping Solutions for Mechanical Engineers, 1999.