

# Diseño y fabricación de mesas vibratorias para el estudio del comportamiento dinámico de modelos estructurales a escala reducida

Jairo Uribe Escamilla<sup>1</sup>, Sandra Rocío Jerez Barbosa<sup>2</sup>, Alexander Pérez Ruiz<sup>3</sup>, Pedro Nel Quiroga Saavedra<sup>4</sup>, Jorge Mario Cueto Báiz<sup>5</sup> y Jaime Eduardo Garzón Moreno<sup>6</sup>

El Grupo de Investigación de Estructuras y Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería (Gimeci) diseñó y fabricó en este proyecto dos mesas vibratorias para el estudio de modelos estructurales a escala reducida, ante sollicitaciones dinámicas causadas por movimientos del suelo como los experimentados en los sismos.

La primera de las mesas se diseñó portátil y de bajo peso, con el fin de poderla llevar a clase para hacer demostraciones con ella. Además, su diseño y fabricación son relativamente sencillos para disminuir su costo y hacerla asequible a cualquier universidad o institución de educación media o técnica. Con ella sólo se pueden aplicar movimientos armónicos sinusoidales, con un motor de corriente continua o manualmente por medio de una manivela.

La segunda de las mesas es estacionaria. Su diseño y fabricación son mucho más complicados, pues su objetivo es poder

simular cualquier clase de movimiento uniaxial. Los modelos propuestos tienen carácter didáctico para demostrar diferencias cualitativas de comportamiento de los diversos sistemas. No cumplen estrictamente con las leyes de similitud, ya que no buscan predecir el comportamiento de prototipos específicos de estructuras reales.

Los planos están a disposición de cualquier universidad interesada para que pueda construir mesas similares a un costo relativamente muy bajo, si se le compara con el de mesas importadas.

**Palabras claves:** mesas vibratorias, modelos estructurales, comportamiento dinámico de estructuras, laboratorios didácticos de estructuras.

The Research group on structures and materials of the Escuela Colombiana de Ingeniería (Gimeci), designed and manufactured two shaking tables for the testing of small scale structural models, under dynamic loading similar to that caused by earthquakes.

The first is a light portable table intended for class demonstrations. It is easy to fabricate and can be operated manually with a crank or with a small electric motor. Its cost is very low which makes the table affordable for any university. With it only sinusoidal movements in one direction can be applied.

The second table is fixed and it is founded on a massive concrete block. Its design and fabrication are more complicated and expensive since with it one should be able to simulate any kind of movement in one direction. The proposed models are of instructional purpose to show qualitatively differences on behavior of the various

structural systems used in common practice. They do not comply strictly with similitude laws since their objective is not to extrapolate the results to predict the behavior of an actual prototype of a real structure.

It is intended in future projects to develop many laboratory practices with students both undergraduate and graduate. It is expected that these practices will help them to obtain a better understanding of the behavior of structures subjected to earthquakes and therefore to design better and safer buildings. The results will be published in technical journals and presented in engineering seminars and conferences. With the plans provided in this document any interested university will be able to manufacture similar tables at a cost substantially much lower than those offered in the market.

**Key words:** shaking tables, structural models, dynamic behavior of structures, laboratories of structures for instructional purposes.

## INTRODUCCIÓN

Se considera fundamental en el campo de la ingeniería estructural que el ingeniero desarrolle criterios para juzgar la bondad de los resultados obtenidos con modelos matemáticos y comprenda sus limitaciones.

En Colombia es de trascendental importancia entender el comportamiento dinámico de los diversos sistemas estructurales mediante el ensayo de modelos a escala reducida en mesas vibratorias, dado que la mayoría de la población del país está asentada en

<sup>1</sup> Ingeniero civil, M.Sc., Ph.D. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Director del Grupo de Investigación de Estructuras y Materiales (Gimeci).

<sup>2</sup> Ingeniera civil, M.IC. Profesora asistente.

<sup>3</sup> Ingeniero Mecánico, M.IE. Profesor asistente.

<sup>4</sup> Ingeniero civil, M.IC., Ph.D. Profesor asociado, director del Grupo de Estudios de Estructuras, Materiales y Transporte de la Escuela.

<sup>5</sup> Ingeniero civil, especialista en estructuras.

<sup>6</sup> Ingeniero civil, especialista en estructuras.



zonas de amenaza sísmica intermedia o alta. Se estima que con ellos se le facilitará al estudiante la comprensión de los fenómenos dinámicos, teniendo en cuenta la complejidad de su análisis matemático.

Se propuso entonces diseñar y construir mesas vibratorias para ensayar modelos simplificados de pórticos, útiles en los primeros niveles del pregrado, y otros más representativos de otros sistemas, para utilizarlos en los cursos de dinámica estructural y de diseño tanto en los cursos de los últimos semestres de pregrado como en el posgrado. Se diseñaron algunas prácticas básicas y se escribieron los correspondientes manuales de laboratorio; la idea es que con esas bases los alumnos den rienda suelta a su imaginación e ideen ellos mismos prácticas que les permitan aclarar sus dudas e inquietudes.

Esta propuesta fue aprobada por el Comité de Investigaciones de la Escuela Colombiana de Ingeniería y apoyada económicamente en forma parcial por Colciencias.

Se presentan acá los resultados del proyecto y se ponen a disposición de todas las universidades interesadas, con la invitación a formar una gran alianza investigativa para trabajar sobre estos temas. Se espera con ello mejorar sustancialmente la calidad de la educación en ingeniería estructural en nuestro país.

## ANTECEDENTES

En el plan de desarrollo de la Escuela Colombiana de Ingeniería se contempló contar con un Laboratorio de Modelos Estructurales que permita realizar docencia e investigación de calidad, con el fin de constituirse en líder en este campo y lograr una formación estructural excelente de los ingenieros civiles de la Escuela. Con la experiencia adquirida por este medio se preten-

de ayudar a otras universidades en el desarrollo de sus propios laboratorios de modelos, con el fin de mejorar la enseñanza de la ingeniería de estructuras en todo el país y contribuir así al bienestar de la nación colombiana.

En una primera etapa de este proyecto se diseñaron y fabricaron marcos de prueba, sistemas de carga y modelos de acero para ensayarlos estáticamente dentro del dominio elástico del material.

Posteriormente, teniendo en cuenta que el material estructural más común de obras civiles en nuestro medio es el concreto reforzado, se empezó a diseñar un Laboratorio de Modelos de Microconcreto que incluía diseño de mezclas, diseño y construcción de un horno para el tratamiento térmico del refuerzo, equipo básico de construcción y de ensayo, y el desarrollo de modelos que permitieran entender el comportamiento ante las diversas solicitaciones de carga a que se ven sometidas las vigas, columnas, pórticos, placas y cascarones de concreto reforzado (Uribe y Rodríguez, refs. 1 y 2; Camacho, Cueto y Serna, ref. 3).

En este estado de la investigación el siguiente paso es estudiar el comportamiento dinámico de los diversos sistemas estructurales mediante el empleo de modelos a escala reducida, utilizando para ello mesas vibratorias.

Esta es una dificultad reconocida en todo el mundo. Recientemente se formó en los Estados Unidos un consorcio de universidades: The University Consortium on Instructional Shake Tables (Ucist), para integrar el estudio de la ingeniería sísmica a los currículos de pregrado de ingeniería civil (Dyke, Truman y Gould, ref. 4). Ellos contrataron a una empresa para que diseñara un equipo que permitiera el análisis dinámico de modelos simplificados de estructuras aperticadas, que infortunadamente resulta demasiado costoso

para universidades de países en desarrollo como el nuestro (hoy en día del orden de \$80.000.000 para un pórtico de un piso y una sola luz y de \$90.000.000 para uno de dos pisos y una sola luz). Adicionalmente, las universidades del consorcio se comprometieron a diseñar y compartir prácticas específicas que utilizan dicho equipo.

Uno de los propósitos de este proyecto fue el diseño y fabricación en Colombia de equipos similares, de menor precio y con la ventaja adicional de poder compartir el diseño con otras universidades del país que tienen recursos similares o menores que los nuestros.

Los modelos que se van a estudiar son modelos para instrucción y su fin principal es entender diferencias de comportamiento, más que extrapolar resultados para aplicárselos al prototipo. Por esto se ha dejado en segundo plano la exigencia de un cumplimiento estricto de las leyes de similitud, ya que éste complicaría innecesariamente su diseño y exigiría equipos costosos que estarían fuera del alcance de la mayoría de nuestras universidades para su aplicación masiva en la enseñanza.

## METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló en las siguientes etapas:

- Se identificaron las asignaturas tanto de pregrado como de posgrado relacionadas con el comportamiento dinámico de estructuras. En general, éstas se suelen denominar *Mecánica estructural*, *Análisis y diseño de estructuras* y *Dinámica estructural*.

- Se identificaron los conceptos de dinámica estructural que requieren el uso de modelos de laboratorio para facilitar su comprensión, como son los de *masa*, *fuerzas inerciales*, *equilibrio dinámico*, *grados de libertad*, *modos de vibración*, *período fundamental*, *rigidez* y *flexibilidad*,



*espectros de desplazamiento, de velocidad y de aceleración de un sismo, y amortiguamiento.*

- Se diseñó y fabricó una mesa vibratoria portátil y sencilla, que puede llevarse a clase para hacer demostraciones con modelos elementales que permiten visualizar algunos de los conceptos básicos ya mencionados. Con ella sólo se pueden producir movimientos armónicos simples.

- Se diseñaron y fabricaron modelos modulares de pórticos de uno y dos pisos, en los cuales es posible variar las rigideces relativas de vigas y columnas para ilustrar su efecto en el comportamiento dinámico de los mismos. Se tomaron algunos videos de la mesa en operación.

- Se diseñó y fabricó una mesa vibratoria fija de mayor capacidad y complejidad, a la que se le puede regular el movimiento para simular, dado el caso, una excitación sísmica predefinida.

- Se diseñó y construyó la cimentación para dicha mesa.

- Se escogieron y compraron tres acelerómetros para registrar la respuesta en la base y en los niveles intermedio y superior de pórticos de dos pisos.

- Se adquirió una tarjeta de computador para programar y controlar el movimiento del motor de esta segunda mesa.

### MESA VIBRATORIA PORTÁTIL

En la fabricación de la mesa vibratoria se utilizaron materiales y accesorios de fácil adquisición y bajo costo para que fuera asequible a muchas de nuestras universidades. Se usaron rodachinas plásticas como sistema de rodamiento y perfiles de aluminio de los utilizados en marquetería o en divisiones de baño como rieles. La caja que encierra el sistema motriz y sirve de soporte para los rieles se construyó con lámina de aluminio, así como la polea utilizada para la excéntrica del mecanismo de movi-

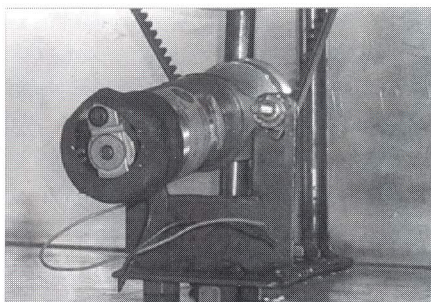


Foto 1. Motor de velocidad variable.

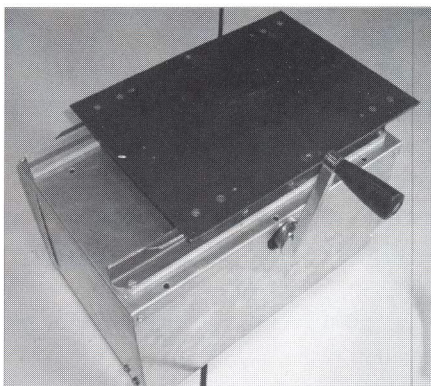


Foto 2. Vista general de la mesa con la manivela.

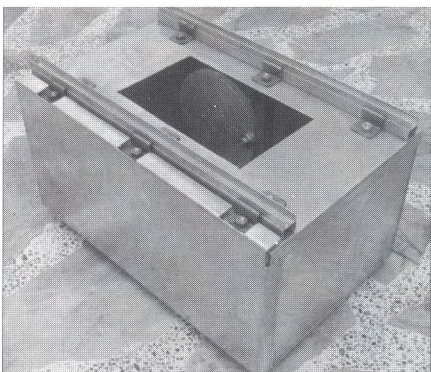


Foto 3. Abertura para que la polea que va unida al eje pueda sobresalir.



Foto 4. Vista general de la mesa con el motor.

miento. Los empalmes se hicieron con tornillos, tuercas y arandelas de presión.

En la mesa original el movimiento se generó con un motor de máquina de coser pero, por no poderse controlar adecuadamente su funcionamiento, se reemplazó por uno de corriente continua, con una caja de reducción mecánica. En este motor la variación de la velocidad se logra cambiando el voltaje que recibe (foto 1).

Alternativamente, la mesa se puede operar en forma manual por medio de una manivela (foto 2).

La construcción de la mesa es relativamente sencilla, ya que consiste simplemente en fijar, por medio de tornillos, los cuatro rodachinas a la parte inferior de la mesa, teniendo especial cuidado en mantener el paralelismo entre las rodachinas, tanto en sentido longitudinal como en sentido transversal. Luego se fijan las canales en aluminio a la base, en forma precisa, para que no se genere gran rozamiento entre las paredes de las canales y las rodachinas a lo largo del recorrido.

En la lámina utilizada como base se debe dejar un vacío para el mecanismo de movimiento (foto 3).

Para una mejor presentación de la caja, ésta se complementa con una tapa lateral unida con una bisagra en la parte inferior que permite abrirla para observar el mecanismo de movimiento en acción (foto 4).

Al ser una mesa cuyo uso será principalmente para demostraciones en clase, uno de los aspectos importantes es el del peso. La construida tiene una masa de aproximadamente 10 kg.

### MESA VIBRATORIA ESTACIONARIA

El objetivo fundamental de la construcción de esta mesa es generar una herramienta que contribuya al mejoramiento de la enseñanza de la dinámica estructural, es decir, del comportamien-



to de estructuras sometidas a cargas dinámicas, tanto en los cursos de pregrado como de posgrado. Por esta razón, el uso que se le dará a la mesa será netamente académico e investigativo y los ensayos previstos serán tanto no destructivos como destructivos sobre modelos a escala reducida, para conocer y analizar su comportamiento.

Los modelos previstos tendrán un tamaño en planta del orden de  $45 \times 60$  cm. Así mismo, se tendrán modelos de uno y dos grados de libertad. Con el fin de analizar modelos estructurales de las tipologías más comunes en el ejercicio de la ingeniería civil, se propone la construcción de modelos de microconcreto, de mampostería (de arcilla y adobe) y de aluminio o acero, al igual que de materiales más flexibles. Los ensayos podrán ser de carácter destructivo o no destructivo. Con base en esta definición, se determinó que la plataforma de la mesa tuviera forma rectangular, con unas dimensiones en planta de  $50 \times 75$  cm.

### Masa estimada

Para cada uno de los modelos previstos se ha calculado una masa estimada, con base en sus dimensiones. El máximo valor obtenido fue 76 kg.

### Selección del motor

La selección del motor tiene como base el tipo de movimiento que quiere reproducirse con la mesa y la masa máxima que se intenta mover. En cuanto al tipo de movimiento, se quieren reproducir básicamente dos clases de señales: armónicas y sísmicas. Esto indica que el motor debe ser capaz de cambiar la dirección y velocidad del movimiento según un registro de señal determinado. Se quieren reproducir frecuencias hasta de 15 Hz y aceleraciones en la base cercanas a 1 g. Con base en la máxima masa de los modelos (76 kg) y estimando que la masa de la pla-

taforma estará cercana a los 40 kg, se establece que la masa máxima que deberá mover el motor es del orden de los 120 kg. Por razones de costo, el objeto de estudio de este proyecto es simular única y exclusivamente movimientos uniaxiales, aunque en la realidad los movimientos telúricos tienen varios grados de libertad.

Una vez definidos el tamaño y pesos máximos de los modelos que se van a probar en la mesa, se procedió a buscar los posibles mecanismos que podrían proveer los movimientos de simulación de los sismos. Estos movimientos se caracterizan por aceleraciones oscilatorias no periódicas dentro del rango de los  $\pm 1$  g (aprox.  $10 \text{ m/seg}^2$ ), que provocan velocidades pequeñas y desplazamientos acumulados que pueden llegar a ser grandes.

Dadas estas particularidades, sistemas sencillos como el de biela manivela que se empleó para la mesa vibratoria portátil, quedan por fuera del espectro de posibilidades ya que sólo pueden brindar movimientos oscilatorios armónicos, con desplazamientos centrados en un punto originario y cuyas características de movimiento están gobernadas por funciones sinusoidales, demasiado simples para simular la fuente de perturbación sísmica.

Para conseguir movimientos repentinos y relativamente fuertes existe la posibilidad de utilizar cilindros o pistones, tanto neumáticos como hidráulicos, o sistemas de transmisión del tipo tuerca-tornillo. Los sistemas neumáticos y los hidráulicos necesitan una fuente de poder adicional: un compresor de aire en el primer caso y una bomba hidráulica en el segundo. Adicionalmente, para poder trabajar de manera adecuada con cualquiera de estos sistemas es necesario contar con válvulas de control de flujo y otros elementos especiales, todo lo cual elevaría significativamente los costos.

El mecanismo de la tuerca y el tornillo es bastante eficiente para proporcionar los movimientos, aunque también tiene inconvenientes; uno de ellos es la gran fricción que se presenta entre los hilos de la rosca del tornillo con la tuerca. Cabe destacar que la gran ventaja de este mecanismo es que con un movimiento rotacional de bajo torque en el tornillo se consigue desplazar con gran fuerza la carga sobre la tuerca; por ello, si se presentara una gran fricción en el deslizamiento de la tuerca sobre el tornillo, rápidamente se convertiría en un sistema poco eficiente. Los fabricantes solucionaron este problema produciendo sistemas de tuerca-tornillo que utilizan la tecnología de los rodamientos de bolas. Ofrecen tornillos con pistas circulares y tuercas con bolas recirculantes, lo cual hace que las fricciones sean bastante bajas y, en algunos casos, incluso despreciables.

Por todo lo anterior se escogió un sistema de esta clase para proveer los movimientos a la mesa vibratoria uniaxial estacionaria. Se importó directamente un servomotor eléctrico trifásico sin escobillas de última generación, relativamente pequeño, capaz de proveer un movimiento confiable con altas eficiencias en la transformación de la energía eléctrica en cinética. Viene con un equipo de control que, una vez configurado correctamente, podrá generar en el motor el movi-

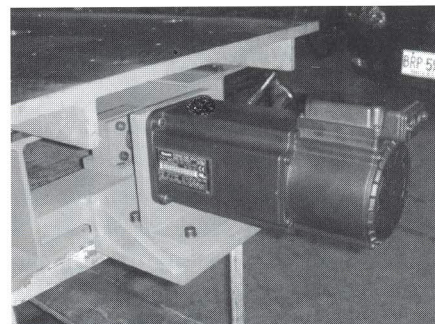


Foto 5. Vista del motor instalado.



miento requerido con alta precisión y exactitud (foto 5).

Una vez escogido el motor, se establecieron los límites y especificaciones que determinaron el diseño de la plataforma.

**Apoyos de la plataforma.** Los patines que sirven como apoyo a la plataforma soportan una carga dinámica máxima de 2.310 N y un momento de 7,9 kN-m en dirección de los rieles y 13,7 kN-m en dirección normal a los mismos. Adicionalmente, estos apoyos no deben tener un desplazamiento relativo vertical en dirección transversal superior a 0,0525 mm y en dirección longitudinal superior a 0,0245 mm.

**Rieles.** La distancia normal entre los rieles no debe sufrir variaciones mayores de 0,004 mm, por requerimientos del fabricante del sistema.

### Diseño de la plataforma

Además de los requerimientos de los rieles, los apoyos y el motor mismo, se necesita que la plataforma tenga una rigidez suficientemente mayor que la de los modelos, con el fin de evitar la resonancia entre el conjunto mesa - modelo, por tener la misma frecuencia, y de evitar también que las deformaciones en la plataforma influyan en la respuesta del modelo, hasta el punto de que se haga necesario medirlas para tenerlas en cuenta en los cálculos.

### Requerimientos por deformaciones de la plataforma

Según los requerimientos de los patines que sirven de apoyo a la plataforma, éstos no deben separarse o acercarse a una distancia mayor de 0,004 mm. Esta condición determinó la deformación unitaria máxima en la plataforma y, por lo tanto, el máximo esfuerzo por desarrollar. Suponiendo una plataforma de acero es:  $\delta_{\text{máx}} = 0,004 \text{ mm}$ ;  $L = 350 \text{ mm}$ ;  $\epsilon_{\text{máx}} = 11,4 \times 10^{-6}$ ;  $\sigma_{\text{máx}} = E \epsilon_{\text{máx}} = (200\ 000) \times (10 \times 10^{-6}) = 2,29 \text{ MPa}$ .

Todos los modelos de plataforma se analizaron bajo el supuesto de que tendrían que mover un modelo de pórtico de microconcreto de dos niveles y 76 kg de masa con una aceleración de 1 g, como el de la figura 1. Éste es el modelo que genera los máximos momentos en la base de la mesa. Adicionalmente se tuvo en cuenta una excentricidad de 20% de la dimensión en planta de cada piso. Se escogió este valor, elevado con respecto a los mínimos especificados por las normas (5%), para poder apreciar mejor los efectos de la torsión.



Figura 1. Modelo de pórtico de microconcreto de dos niveles.

Todos los modelos estudiados se analizaron por elementos finitos utilizando el programa comercial SAP 2000.

Para el diseño se tuvo en cuenta la relación entre costo, funcionalidad y peso. En la búsqueda de una plataforma que estuviera dentro de los límites de peso, que tuviera una rigidez suficiente y cuya fabricación fuera económica, se estudió primero una solución con placa maciza, luego otra con placa aligerada armada con lámina y perfiles rigidizadores soldados, y finalmente se llegó a una placa fundida de acero nodular con nervaduras: dos en la dirección del movimiento, que descansan sobre los patines, y tres en direc-

ción transversal, concentradas en el centro, para brindar la rigidez transversal necesaria para mantener la distancia entre los rieles dentro de las tolerancias exigidas.

A continuación se muestran diversas etapas del proceso de fabricación y montaje (fotos 6 a 13).

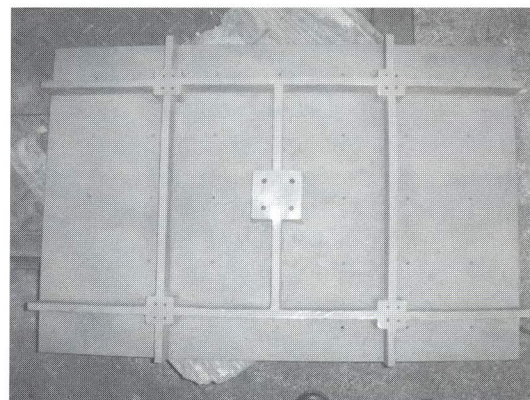


Foto 6. Plataforma vista por debajo.

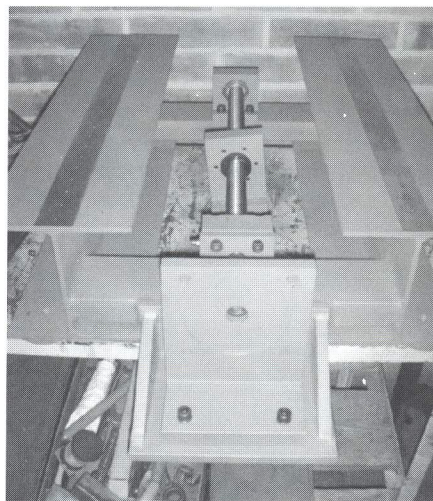


Foto 7. Vigas soporte del motor y la plataforma.

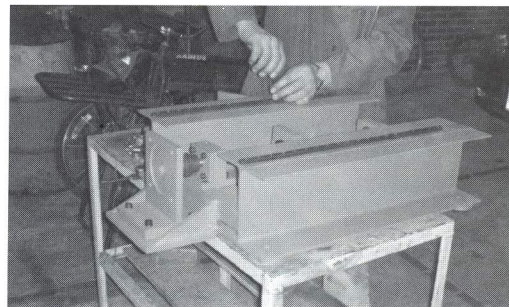


Foto 8. Instalación de los rieles en las vigas soporte.



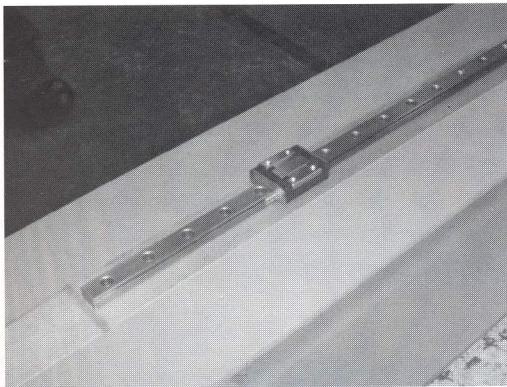


Foto 9. Patín montado en el riel.



Foto 10. Montaje de la plataforma sobre los rieles.

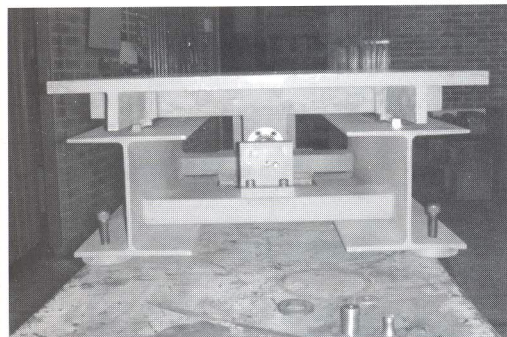


Foto 11. Vista posterior del conjunto.

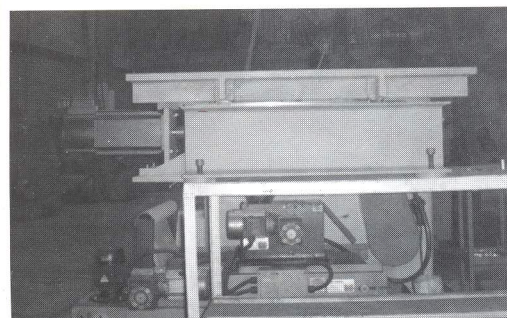


Foto 12. Vista lateral con la plataforma centrada.

### Cimentación

El análisis de la cimentación se basa principalmente en dos problemas de estabilidad:

1. Análisis de volcamiento en condiciones de aceleración máxima, con modelo de masa máxima y excentricidad máxima de la masa respecto a la base de la mesa. Al someter la estructura a la acción de un sismo, la cimentación sobre la cual está apoyada se acelera en la misma forma; la masa de ésta que se encuentra involucrada se acelera en la misma forma; la masa de ésta que se encuentra involucrada corresponde a un valor entre el 30 y 80% del total, según las condiciones de apoyo, el tipo de suelo, la rigidez relativa entre los sistemas y las características de los materiales. Con base en esto se supuso que un 50% de la masa de la cimentación más el peso de la mesa constituyen la masa activa en el movimiento.

2. Análisis de deslizamiento para las mismas condiciones anteriores.

Dadas las dos condiciones anteriores de comportamiento, se decidió realizar el análisis como si fuera la zarpa de un muro de gravedad, en la cual todo el suelo bajo el cimiento debe estar en compresión bajo cargas máximas. Adicionalmente, se debe garantizar un factor de seguridad adecuado contra el deslizamiento del sistema bajo dichas cargas máximas. Se estudiaron diversas alternativas: a) un sistema de celosía que formaba una caja perimetral al apoyo de la mesa; b) otro formado por dos cajas metálicas, una dentro de la otra, y c) un sistema de cimentación con un macizo de concreto. Una vez consideradas las ventajas y desventajas relativas de todos ellos, se optó por la última de ellas.

El análisis se hizo con el programa SAP 2000, con un modelo matemático que consiste en una placa de concreto modelada con elementos finitos, sobre la cual se montó un pórtico de 80 cm de altura. A dicha altura se colo-

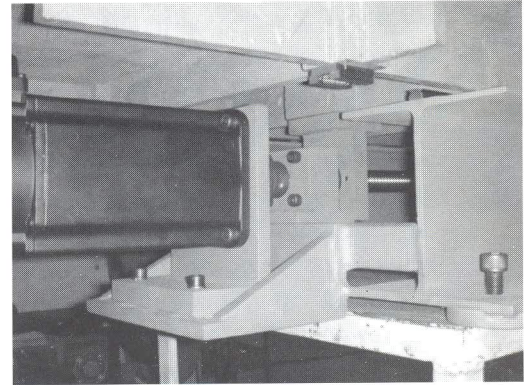
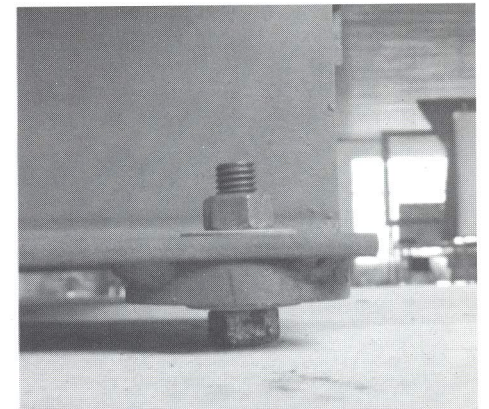


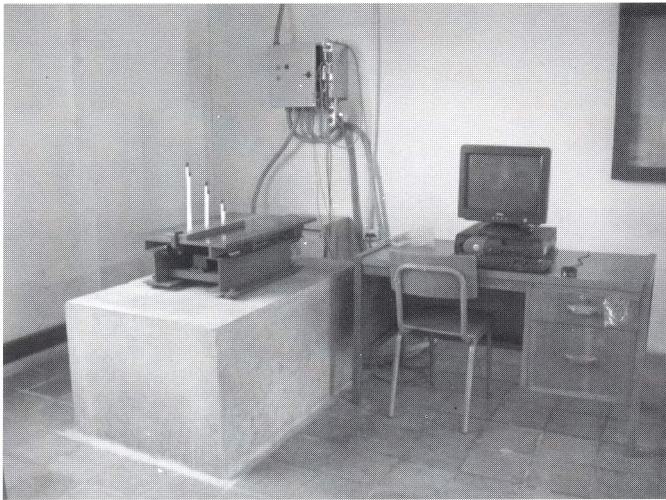
Foto 13. Detalle del patín y sus rodamientos.

có una fuerza de 0,981 kN, más un 30% correspondiente al frenado de la mesa, teniendo en cuenta la recomendación de la dinámica de cuerpos rígidos en condiciones de desaceleración, que corresponde a los 120 kg acelerados a 1 g. En las fotos 14 y 15 se puede apreciar la mesa una vez cimentada en el laboratorio de la Escuela.



Fotos 14 y 15. La mesa, una vez instalada en el laboratorio, y un detalle de los pernos de anclaje y nivelación.





**Foto 16.** Sistema completo: cimentación – mesa – motor – sistema de control.

### Sistema de control

Como sistema de control de movimiento de la mesa estacionaria, el servomotor trifásico cuenta con un controlador EcoDrive que permite, a través de un *software*, establecer con precisión características como la forma (sinusoidal, aleatoria), la velocidad, la amplitud y la aceleración del movimiento.

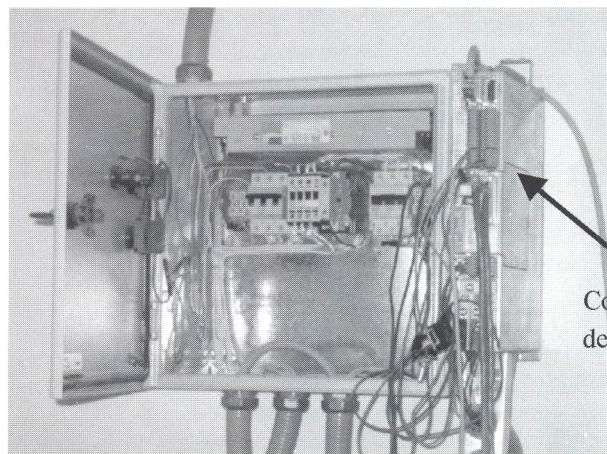
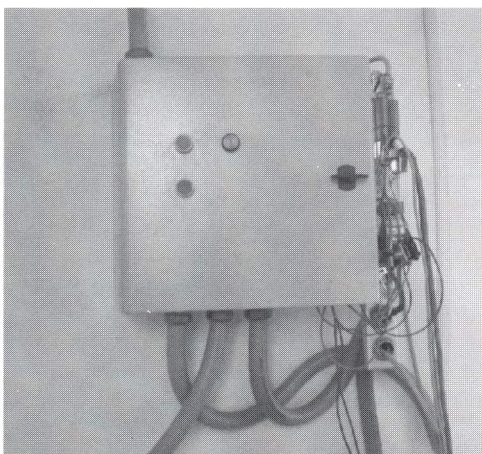
Para obtener un mejor rendimiento del motor fue necesario integrar al sistema un transformador que recibe 220 V y entrega al motor 440 V, que es la especificación para la máxima potencia.

### Instrumentación de los modelos

Con el fin de instrumentar los modelos que se van a analizar en la mesa estacionaria, se pensó en dos mecanismos de medición de respuesta: el registro de desplazamientos y el registro de aceleraciones. Estos registros permitirán al estudiante analizar y comparar resultados experimentales de la respuesta dinámica de un modelo a escala reducida con los calculados teóricamente, siguiendo los fundamentos de la dinámica estructural.

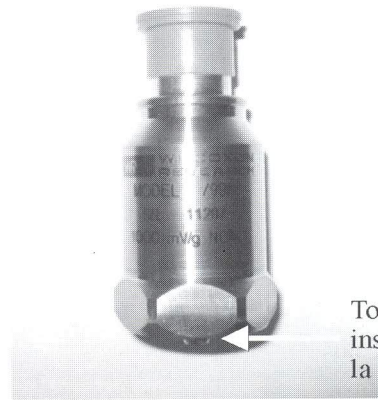
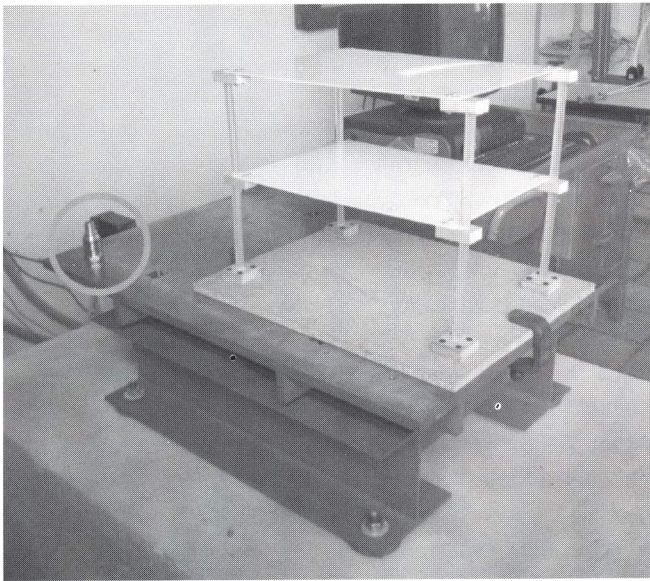
Para el registro de aceleraciones hubo que adquirir tres acelerómetros con el fin de instalar uno en la mesa y los otros dos en cada uno de los niveles de modelos de dos grados de libertad. Estos equipos debían cumplir con tres requerimientos básicos: tener una alta precisión en el rango de las bajas frecuencias (0 – 20 Hz), registrar en forma precisa aceleraciones entre 0 y 1 g, y contar con un peso bajo dado que se utilizarían para instrumentar modelos estructurales.

Las opciones iban desde acelerómetros de alta frecuencia (del orden de varios kHz), que son poco precisos en los rangos requeridos, hasta los de baja frecuencia, ideales en investigación sísmica, pero en general muy pesados para ser utilizados sobre modelos. Una vez estudiadas varias opciones, se encontró una solución acorde con las necesidades y el presupuesto del proyecto, que además no requería la compra de un costoso sistema de adquisición. Se seleccionaron tres acelerómetros de marca Wilcoxon (foto 2), cuya adquisición de datos podía llevarse a cabo mediante una tarjeta LabView.



**Fotos 17 y 18.** Caja de mando y controlador del motor.





Tornillo para instalación sobre la superficie.

**Fotos 19 y 20.** Ubicación del acelerómetro para medir la aceleración en la plataforma y detalle de uno de los acelerómetros.

Para el registro de desplazamientos se empleará, en una próxima etapa, un sistema de adquisición automática de datos existente en el laboratorio de materiales, que cuenta con tres medidores de desplazamiento.

### CONCLUSIONES

Se demostró con el proyecto que sí es posible diseñar y construir en el país mesas vibratorias para enseñar el comportamiento dinámico de las estructuras, a precios muy por debajo de los de las mesas importadas ofrecidas en el mercado. Los materiales y la fabricación costaron cerca de \$30.000.000. En cuanto al rubro de gastos de personal, la dedicación de los investigadores resultó subestimada en por lo menos un 50%, pues no fue fácil identificar los componentes más apropiados para fabricar la mesa estacionaria ni conseguir cotizaciones de sus fabricantes. Además, los trámites de importación resultaron engorrosos y tomaron mucho más tiempo del inicialmente contemplado.

### RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a Colciencias y a la Escuela Colombiana de Ingeniería el apoyo financiero para la ejecución de este proyecto.

Igualmente, aprecian la ayuda prestada por los ingenieros Javier Barona y Alexander Sierra, profesores de la Escuela, y por los laboratoristas de la misma, Alfonso Rada y Adrián Reyes.

### REFERENCIAS

1. Uribe, Jairo y Rodríguez, Carlos Alberto (2001). *Diseño de un laboratorio de modelos de microconcreto para la enseñanza del comportamiento de estructuras de hormigón reforzado*. Memorias, XIV Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia. Bogotá: Sociedad Colombiana de Ingenieros.
2. Uribe, Jairo y Rodríguez, Carlos Alberto (2003). Modelos de microconcreto para la enseñanza del comportamiento de estructuras de hormigón reforzado. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, año 13, N° 50, abril-junio, pp. 23-35.
3. Camacho, Guillermo; Cueto, Jorge, y Serna, Juan Sebastián (2003). *Estudio de modelos de microconcreto para la enseñanza del comportamiento de estructuras de hormigón reforzado*.
4. Dyke, S.J.; Truman, K.Z., y Gould, P.L. (2000). *Current Directions in Earthquake Engineering Education: The University Consortium on Instructional Shake Tables*, Session 1526. St. Louis, Missouri: American Society of Engineering Educators Conference, junio.