

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UP-03-2015

# **EXPERIMENTOS A PEQUEÑA ESCALA USANDO MESA VIBRATORIA Y SU COMPARACIÓN CON PREDICCIONES ANALÍTICAS**

## **Manual del Estudiante**

Preparado por:

**Unidad de Puentes**

Proyecto desarrollado por:

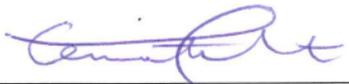
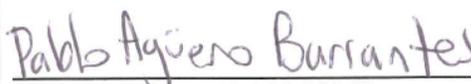
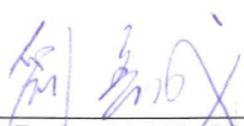
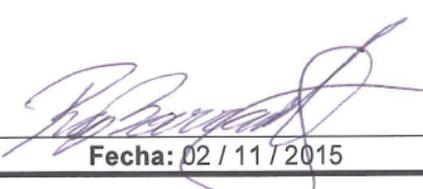
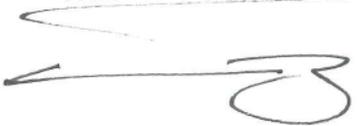
**University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST)**



San José, Costa Rica

Noviembre de 2015

Página intencionalmente dejada en blanco

<b>1. Informe:</b> LM-PI-UP-03-2015		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> EXPERIMENTOS A PEQUEÑA ESCALA USANDO MESA VIBRATORIA Y SU COMPARACIÓN CON PREDICCIONES ANALÍTICAS - Manual del Estudiante		<b>4. Fecha del informe</b> 04 Noviembre 2015
<b>5. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>6. Notas complementarias</b> Ninguna.		
<b>7. Resumen</b> Este manual del estudiante contiene instrucciones para un conjunto de experimentos para ser desarrollados usando la mesa vibratoria del Consorcio de Universidades de Mesas Vibratorias Instructivas (UCIST por sus siglas en inglés). El objetivo final es comparar los resultados obtenidos de una simulación sísmica utilizando la mesa vibratoria del UCIST con resultados analíticos usando el programa SAP2000.		
<b>8. Palabras clave</b> Mesa vibratoria, experimentos, amortiguamiento, factores de escala, registros sísmicos, desplazamiento	<b>9. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>10. Núm. de páginas</b> 34
<b>11. Informe por:</b> Eduardo Montalto Bolaños Asistente Unidad de Puentes  Fecha: 14 / 09 / 2015	<b>12. Revisado por:</b> Ing. Pablo Agüero Barrantes, M. Sc. Unidad de Puentes  Fecha: 18 / 09 / 2015	
<b>13. Revisado por:</b> Ing. Yi-Cheng Liu Kuan. Unidad de Puentes  Fecha: 08 / 10 / 2015	<b>14. Aprobado por:</b> Ing. Roy Barrantes Jiménez. Coordinador, Unidad de Puentes  Fecha: 02 / 11 / 2015	<b>15. Aprobado por:</b> Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph. D. Coordinador General PITRA  Fecha: 04 / 11 / 2015



Laboratorio Nacional de  
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE

Página intencionalmente dejada en blanco



## TABLA DE CONTENIDOS

1. Resumen .....	6
2. Introducción .....	6
3. Equipo del UCIST y especificaciones de la mesa vibratoria .....	7
4. Especificaciones del modelo tridimensional .....	8
4.1 Cómo construir el modelo tridimensional .....	8
4.2 Vistas en planta del modelo tridimensional .....	11
4.3 Esquema del modelo tridimensional .....	13
4.4 Propiedades de los materiales del modelo tridimensional .....	13
4.5 Experimento para determinar las propiedades del modelo tridimensional .....	14
4.6 Experimento para determinar la rigidez .....	18
4.7 Experimento para determinar el amortiguamiento .....	24
5. Determinación de la escala del sismo .....	26
6. Experimentos con la mesa vibratoria del UCIST .....	29
6.1 Experimento de aceleraciones .....	29
6.2 Experimento de desplazamientos .....	30
7. Modelo en SAP2000 .....	32
8. Referencias .....	34



## 1. RESUMEN

Este manual del estudiante contiene instrucciones para un conjunto de experimentos para ser desarrollados usando la mesa vibratoria del Consorcio de Universidades de Mesas Vibratorias Instructivas (UCIST por sus siglas en inglés). El objetivo final es comparar los resultados obtenidos de una simulación sísmica utilizando la mesa vibratoria del UCIST con resultados analíticos usando el programa SAP2000.

## 2. INTRODUCCIÓN

Este manual abarca los pasos necesarios para ejecutar una simulación sísmica en la mesa vibratoria del UCIST y crear el modelo correspondiente en el programa SAP2000. El manual inicia con información básica sobre la mesa vibratoria del UCIST y explica cómo construir el modelo tridimensional que será utilizado en los experimentos. Continúa explicando cómo determinar las propiedades del modelo tridimensional, incluyendo la rigidez y el amortiguamiento. También se incluye una sección sobre la forma de determinar la escala para cada sismo que utiliza la mesa vibratoria del UCIST. Luego se explica cómo determinar las aceleraciones como una función del tiempo para cada piso y el desplazamiento relativo máximo de la planta superior. El manual finaliza con los pasos necesarios para elaborar el modelo analítico con el programa SAP2000.

### 3. EQUIPO DEL UCIST Y ESPECIFICACIONES DE LA MESA VIBRATORIA

La mesa del UCIST (modelo *Shake Table II* desarrollada por la empresa canadiense Quanser) es una mesa vibratoria portátil uniaxial (desplazamiento longitudinal en una dirección), la cual es controlada mediante computadora (ver Figura 1). Esta es efectiva para una amplia variedad de experimentos que incluyen estructuras de ingeniería civil. Las especificaciones técnicas de la mesa se muestran en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Especificaciones técnicas de la mesa vibratoria *Shake Table II* de Quanser

Especificación	Valor
Sobrecarga de diseño a 2,5 g	75,8 N
Aceleración máxima	2,5 g
Rango de frecuencia	0 – 20 Hz
Velocidad pico	664,9 mm/s
Dimensiones de la plataforma de la mesa	457,2 mm x 457,2 mm
Desplazamiento	± 76,2 mm
Peso de la mesa	267,5 N



**Figura 1.** Mesa vibratoria Shake Table II de Quanser

**Fuente:** Quanser, 2014

## 4. ESPECIFICACIONES DEL MODELO TRIDIMENSIONAL

Esta sección explica el proceso para construir el modelo tridimensional, muestra las vistas en planta del modelo, presenta las propiedades de los materiales y explica cómo determinar las propiedades del modelo (masa, dimensiones, rigidez, amortiguamiento). Construir el modelo es un paso necesario para ensayarlo en la mesa del UCIST. La determinación de las propiedades del modelo debe ser realizada antes de crear el modelo computacional en SAP2000.

### 4.1 Cómo construir el modelo tridimensional

#### 4.1.1 Objetivo

Esta sección explica cómo construir el modelo tridimensional que será ensayado en la mesa vibratoria del UCIST.

#### 4.1.2 Materiales

1. Placa de aluminio de 610 mm x 915 mm de 6,60 mm de espesor.
2. 4 barras roscadas de acero de 5 mm de diámetro y 1000 mm de longitud.
3. 16 adaptadores modificados
4. 28 tuercas y 28 arandelas
5. Mesa para ensayos a escala con accesorios

#### 4.1.3 Procedimiento

1. La placa de aluminio se corta en cuatro piezas iguales de 299 x 454 mm.
2. Perfore agujeros con rosca en cada esquina de las placas de 299 x 454 mm para insertar los adaptadores modificados (4 adaptadores por placa). Ver Figura 4 para la ubicación de los agujeros.
3. Perfore cuatro agujeros a cada 63,5 mm centro a centro en las placas para fijar los acelerómetros de Quanser. (Ver Figura 4)

4. Perfore agujeros en la placa de la base a cada 82,6 mm centro a centro para fijarla en la mesa vibratoria. (Ver Figura 5)
5. En el interior de cada adaptador se construye una rosca.
6. Ajuste las barras roscadas en el nivel inferior y apriete las tuercas.
7. Introduzca las tuercas inferiores, luego la placas y finalmente las tuercas superiores de cada nivel. (Ver Figura 2)
8. Ajuste la altura de cada nivel y apriete las tuercas para sostener cada nivel. Cada nivel debe estar espaciado a 327 mm centro a centro.

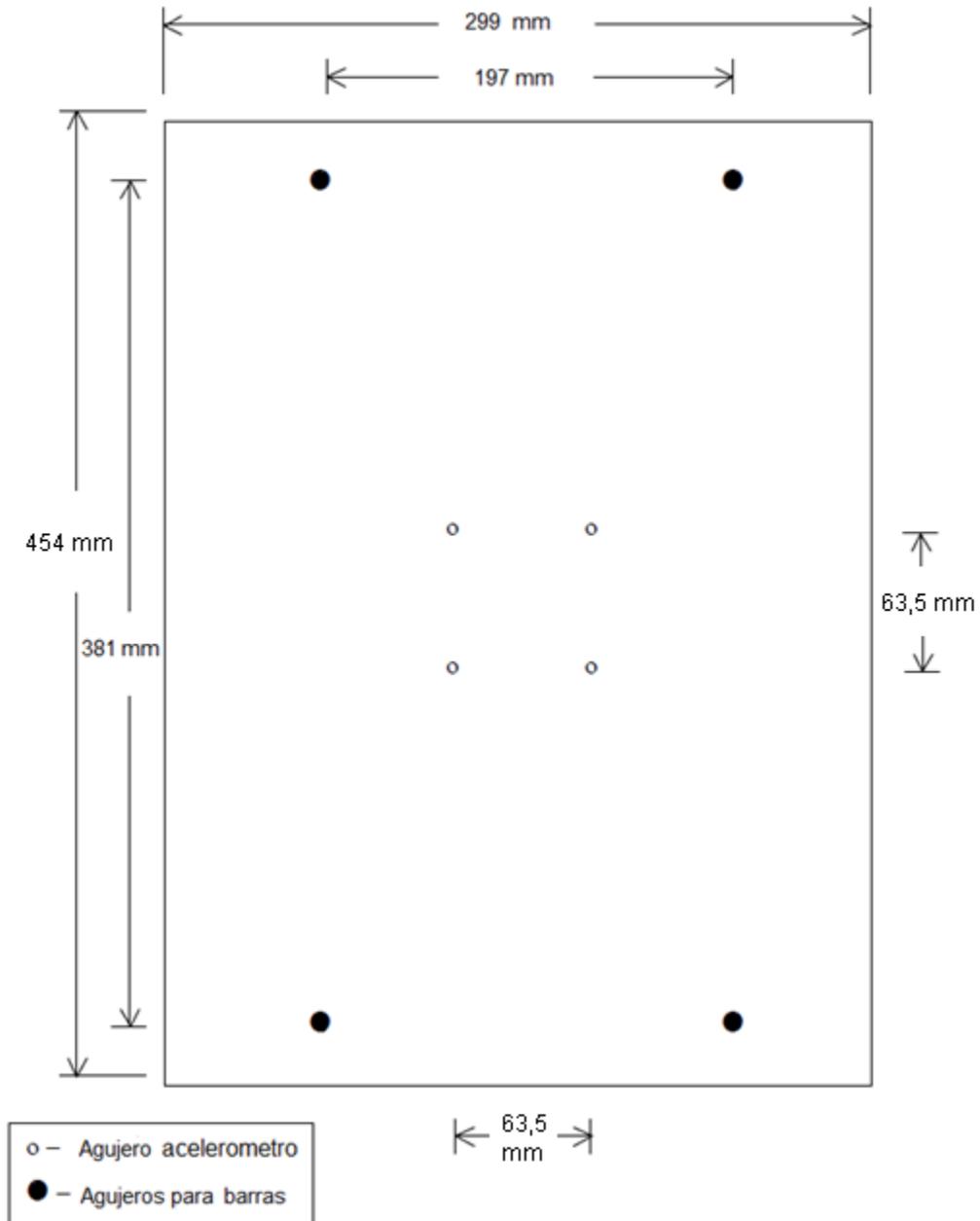


**Figura 2.** Detalle de conexión entre la placa y la barra roscada



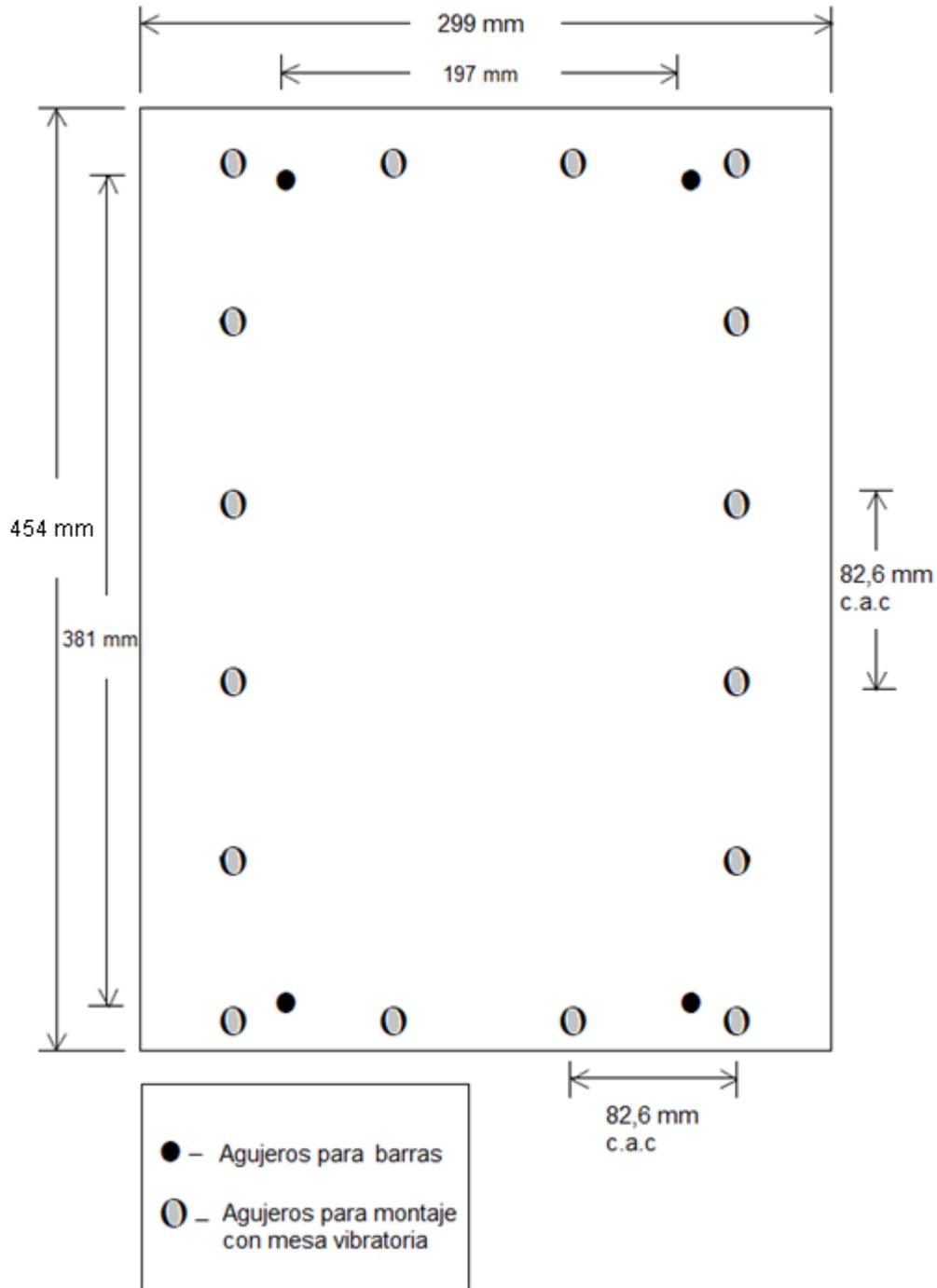
**Figura 3.** Modelo tridimensional anclado a la mesa de pruebas

## 4.2 Vistas en planta del modelo tridimensional



**Figura 4.** Distribución en planta de los niveles 1 – 3 del modelo tridimensional

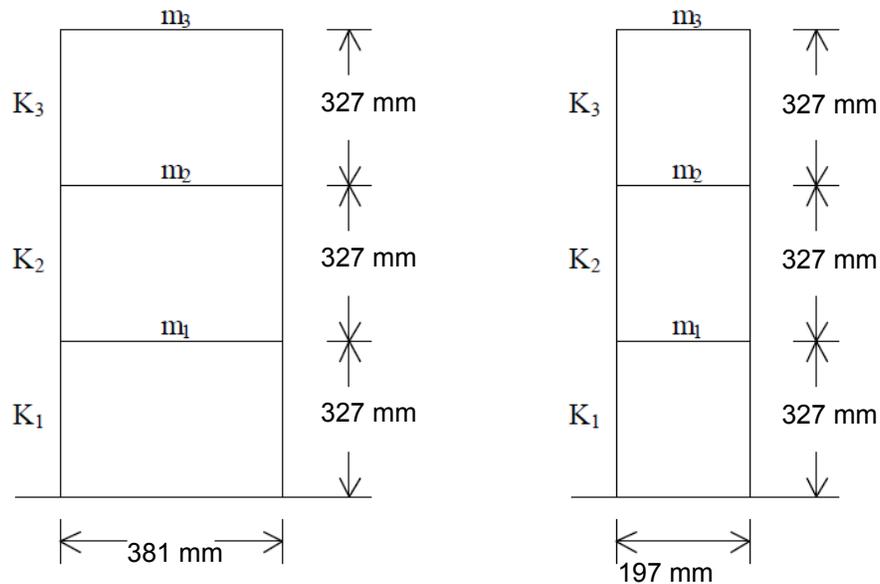
**Fuente:** Miller y Shonkwiler, s.f.



**Figura 5.** Distribución en planta de la base del modelo tridimensional

**Fuente.** Miller y Shonkwiler, s.f.

### 4.3 Esquema del modelo tridimensional



**Figura 6.** Elevación del modelo tridimensional

**Fuente:** Miller y Shonkwiler, s.f.

### 4.4 Propiedades de los materiales del modelo tridimensional

En el Cuadro 2 se muestran las propiedades de los materiales utilizados para la construcción del modelo; se recuerda que las placas de los pisos están hechas de aluminio y las barras que conectan los niveles son de acero.

**Cuadro 2.** Propiedades de los materiales del modelo

Propiedad	Unidad	Acero	Aluminio
Gravedad específica (Y)	kN/m <sup>3</sup>	76,8	26,7
Módulo de elasticidad (E)	MPa	191000	68900
Módulo de cortante (G)	MPa	73500	25900
Módulo de Poisson (ν)	-	0,30	0,33

## 4.5 Experimento para determinar las propiedades del modelo tridimensional

### 4.5.1 Objetivo

El propósito de este ejercicio es determinar la masa y dimensiones del modelo tridimensional. Estas serán requeridas como datos de entrada en el modelo computacional en SAP2000.

### 4.5.2 Equipo

1. Modelo tridimensional
2. Vernier
3. Metro
4. Balanza

### 4.5.3 Procedimiento

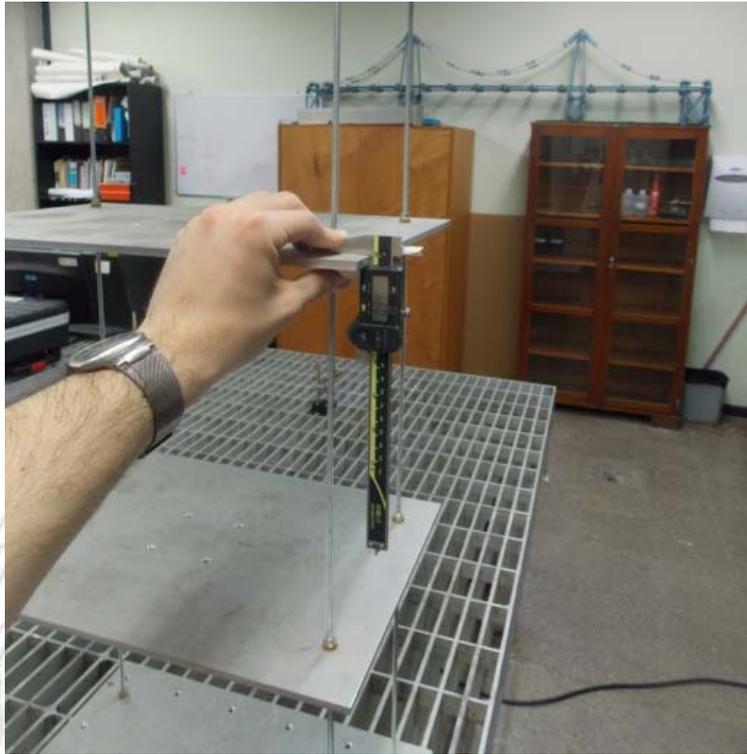
1. Desarme el modelo. Nota: Los adaptadores pueden permanecer adheridos a cada piso.
2. Mida y registre las dimensiones de cada elemento (dimensiones de las placas, barras y espaciamiento).
3. Pese y registre el peso de cada elemento.
4. Ensamble nuevamente el modelo.



**Figura 7.** Medición del espaciamiento entre placas del modelo



**Figura 8.** Medición de las dimensiones de las placas



**Figura 9.** Medición del espesor de las placas del modelo



**Figura 10.** Pesaje de las placas del modelo



## 4.6 Experimento para determinar la rigidez

### 4.6.1 Objetivo

Este experimento fue diseñado para medir la rigidez entre pisos del modelo tridimensional que fue construido como complemento de la mesa vibratoria del UCIST. La rigidez no se introduce directamente en el modelo de SAP2000, pero deber ser revisada para asegurar la exactitud del modelo computacional.

### 4.6.2 Equipo

1. Computadora
2. Modelo tridimensional
3. Mesa de pruebas
4. Cuerdas
5. Conjunto de pesas
6. Pernos y placas para anclaje a mesa
7. Dos columnas de aluminio con placas y pernos
8. Placas para fijación de niveles
9. Transductor de desplazamientos láser
10. Fuente de poder
11. Celda de carga de 450 N y accesorio para anclarla al modelo
12. Sistema de adquisición de datos
13. Amarras plásticas
14. Angular de aluminio con agujeros

### 4.6.3 Procedimiento

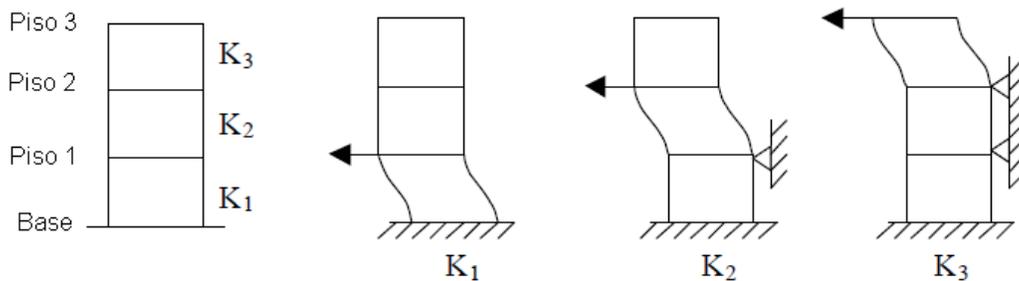
1. Calibre la celda de carga. (Ver Figura 12)
2. Fije una de las columnas de aluminio a la mesa de pruebas.
3. Coloque el modelo tridimensional en la mesa de pruebas. Ajuste la posición del modelo tridimensional de forma tal que los niveles se puedan fijar por medio de las placas conectadas a la columna de aluminio.
4. Utilice los pernos y placas de aluminio para fijar el modelo a la mesa de pruebas.

LM-PI-UP-03-2015	Fecha de emisión: 04 de noviembre de 2015	Página 18 de 34
------------------	---	-----------------

5. Amarre el transductor de desplazamientos láser a la pieza de aluminio que será utilizada como soporte para el sensor. Para ello, utilice las amarras plásticas.
6. Fije la segunda columna de aluminio a la mesa de pruebas a una distancia adecuada para sujetar la base del láser de forma que este pueda medir los desplazamientos de cada nivel. (Ver Figura 13)
7. Conecte el láser al sistema de adquisición de datos y a la fuente de poder.
8. Conecte la celda de carga al sistema de adquisición de datos.
9. Determine K1 (rigidez entre la base y el nivel 1) (Ver Figura 14)
  - a. Posicione el transductor de desplazamientos láser de forma tal que se puedan medir los desplazamientos del primer nivel. Para ello, sujete la pieza de aluminio que sirve de soporte del láser de tal manera que el sensor quede justo sobre el primer nivel del edificio.
  - b. Coloque el angular de aluminio sobre el nivel 1.
  - c. Fije la celda de carga y su accesorio al nivel 1.
  - d. Desplace horizontalmente de manera incremental el nivel 1 halando de la manigueta conectada a la celda de carga.
  - e. Registre los desplazamientos y la fuerza por medio del programa experimento\_rigidez.vi de LabVIEW.
10. Determine K2 (rigidez entre el nivel 1 y 2) (Ver Figura 15)
  - a. Fije la placa de apoyo al nivel 1 del modelo y a la primera columna de aluminio.
  - b. Posicione el transductor de deformaciones láser de forma tal que se puedan medir los desplazamientos del segundo nivel. Para ello, sujete la pieza de aluminio que sirve de soporte del láser de tal manera que el sensor quede justo sobre el segundo nivel del edificio.
  - c. Coloque el angular de aluminio sobre el nivel 2. Puede ser necesario utilizar un blanco de mayor tamaño dependiendo de la ubicación del láser.
  - d. Fije la celda de carga y su accesorio al nivel 2.
  - e. Desplace horizontalmente de manera incremental el nivel 2 halando de la manigueta conectada a la celda de carga.
  - f. Registre los desplazamientos y la fuerza por medio del programa experimento\_rigidez.vi de LabVIEW.
11. Determine K3 (Ver Figura 16)

- a. Fije las placas de apoyo a los niveles 1 y 2 del modelo y a la primera columna de aluminio.
- b. Posicione el transductor de desplazamientos láser de forma tal que se puedan medir los desplazamientos del tercer nivel. Para ello sujete la pieza de aluminio que sirve de soporte del láser de tal manera que el sensor quede justo sobre el tercer nivel del edificio.
- c. Coloque el angular de aluminio sobre el nivel 3. Puede ser necesario utilizar un blanco de mayor tamaño dependiendo de la ubicación del láser.
- d. Fije la celda de carga y su accesorio al nivel 3.
- e. Desplace horizontalmente de manera incremental el nivel 3 halando de la manigueta conectada a la celda de carga.
- f. Registre los desplazamientos y la fuerza por medio del programa experimento\_rigidez.vi de LabVIEW.

12. Desatornille las placas de fijación, desconecte los sensores y guarde el equipo.



**Figura 11.** Esquema del ensamble para la determinación de la rigidez de cada nivel

**Fuente:** Miller y Shonkwiler, s.f.

**Adicionalmente,** se recomienda al estudiante:

- construir analíticamente la ecuación del movimiento del sistema de 3 grados de libertad traslacionales;
- hacer el análisis de valores propios de matriz de 3x3;
- comparar las frecuencias naturales obtenidas analíticamente con las frecuencias obtenidas experimentalmente.



**Figura 12.** Calibración de la celda de carga



**Figura 13.** Colocación del láser y del blanco



**Figura 14.** Colocación del modelo y sensores para medición de K1



**Figura 15.** Colocación del modelo y sensores para medición de K2



**Figura 16.** Colocación del modelo y sensores para medición de K3



## 4.7 Experimento para determinar el amortiguamiento

### 4.7.1 Objetivo

Este experimento está diseñado para determinar el coeficiente de amortiguamiento del modelo tridimensional por medio de una prueba de vibración forzada. El coeficiente de amortiguamiento es un dato de entrada importante para el modelo en SAP2000.

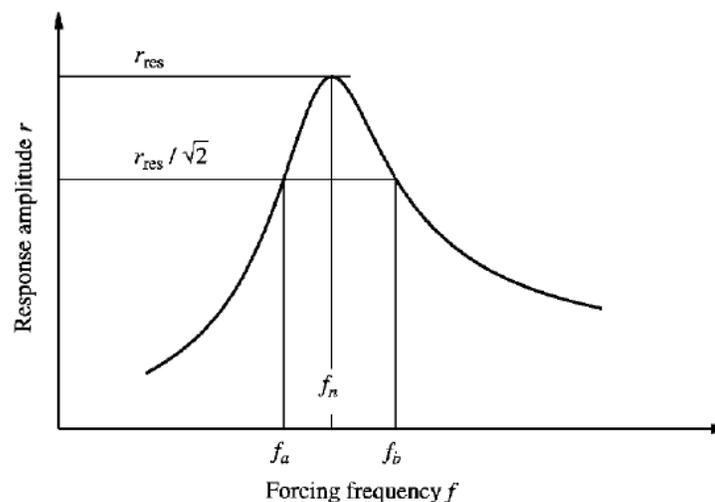
### 4.7.2 Equipo

1. Modelo tridimensional
2. Mesa vibratoria del UCIST (mesa y *Universal Power Module*)
3. Computadora (con QUARC, LabVIEW y Excel)
4. Sistema de adquisición de datos
5. Transductor de desplazamientos láser
6. Columna de aluminio con placas y pernos
7. Mesa de pruebas
8. Placa para sostener el láser
9. Fuente de poder
10. Amarras plásticas
11. Pieza de plexiglás

### 4.7.3 Procedimiento

1. Coloque el modelo tridimensional en la mesa vibratoria.
2. Utilice los tornillos para fijar el modelo a la mesa vibratoria.
3. Fije la columna de aluminio a la mesa de pruebas a una distancia adecuada para sujetar la base del láser de manera que este pueda medir los desplazamientos del tercer nivel.
4. Amarre el transductor de desplazamientos láser a la placa de aluminio que será utilizada como soporte para el sensor. Para ello, utilice las amarras plásticas.
5. Fije la base del láser a la columna de aluminio de forma tal que el sensor quede justo debajo del tercer nivel del edificio.

6. Conecte el transductor de desplazamientos láser al sistema de adquisición de datos y a la fuente de poder.
7. Coloque la pieza de plexiglás debajo del tercer nivel. Es importante verificar que el movimiento del modelo tridimensional quede dentro del rango de medición del transductor de desplazamientos.
8. Registre el movimiento de la estructura por medio del programa experimento\_amortiguamiento.vi de LabVIEW.
9. Inicie el programa *Shake Table II Software*.
10. Corra un movimiento sinusoidal. Espere suficiente tiempo para que se disipe la respuesta transitoria del modelo y permanezca únicamente la respuesta estacionaria.
11. Exporte el gráfico de desplazamientos de LabVIEW a Microsoft Excel. Para ello, en el gráfico seleccione *Export Data to Excel*. Determine el pico del movimiento estacionario del modelo.
12. Corra el movimiento sinusoidal varias veces, manteniendo la amplitud del movimiento de la mesa constante y variando la frecuencia de la señal. En cada caso, determine la amplitud del movimiento estacionario del modelo como se indicó previamente.
13. Grafique la amplitud del movimiento del modelo en función de la frecuencia en Microsoft Excel para determinar  $f_n$ ,  $f_a$  y  $f_b$ .



**Figura 17.** Determinación del amortiguamiento a partir de la curva de respuesta contra frecuencia

**Fuente:** Chopra, 1995

14. Obtenga la razón de amortiguamiento  $\xi = \frac{f_b - f_a}{2f_n}$ .

**Nota:** Se recomienda utilizar frecuencias en el rango de 2 – 3 Hz para determinar el amortiguamiento del primer modo de vibración del modelo. La amplitud del movimiento sinusoidal de la mesa no debe ser mayor a 1 mm, para evitar daños en el modelo.



**Figura 18.** Colocación de sensores para medición de amortiguamiento con vibración forzada

## 5. DETERMINACIÓN DE LA ESCALA DEL SISMO

### 5.1 Objetivo

El objetivo de este ejercicio es determinar el factor de escala que fue utilizado para escalar cada sismo, usando el programa *Shake Table II Software*.

### 5.2 Teoría

Sea  $S$  el factor de escala. Cuando se escala un sismo, los datos de aceleración se escalan a una razón 1:1, mientras que el tiempo es escalado a una razón de  $1:\sqrt{S}$  (Ver Cuadro 3).

### 5.3 Equipo

LM-PI-UP-03-2015	Fecha de emisión: 04 de noviembre de 2015	Página 26 de 34
------------------	---	-----------------

1. Mesa vibratoria del UCIST (mesa y *Universal Power Module*)
2. Computadora (con QUARC, LabVIEW y Excel)

#### 5.4 Procedimiento

1. Seleccione el sismo a utilizar.
2. Inicie el programa *Shake Table II Software*.
3. Seleccione el sismo a utilizar.
4. Detenga el movimiento de la mesa cuando haya concluido el sismo.
5. Exporte el registro de aceleraciones de la mesa a Microsoft Excel. Para ello, en el gráfico seleccione *Export Data to Excel*. Guarde el archivo.
6. Abra el archivo que contiene los datos originales del sismo en Microsoft Excel. Los archivos que contienen los datos originales de los sismos tienen una extensión del tipo .AT2. Guarde el archivo.
7. Grafique la aceleración en función del tiempo del sismo original y del escalado. Las gráficas deberían ser similares. Los valores de aceleración deberían ser de la misma magnitud pero la duración del sismo escalado debería ser menor a la del sismo original.
8. Si hay un periodo de tiempo al principio del sismo donde la aceleración es igual a cero, excluya estos datos del análisis.
9. Encuentre la duración de principio a fin de las aceleraciones para cada conjunto de datos (escalado y original).
10. Use el concepto de que el tiempo está escalado como una función de  $\sqrt{S}$  para calcular el factor de escala,  $S$ .

$$\text{Factor de tiempo} = \sqrt{S}$$

$$\text{Por lo tanto, } S = (\text{Factor de tiempo})^2$$

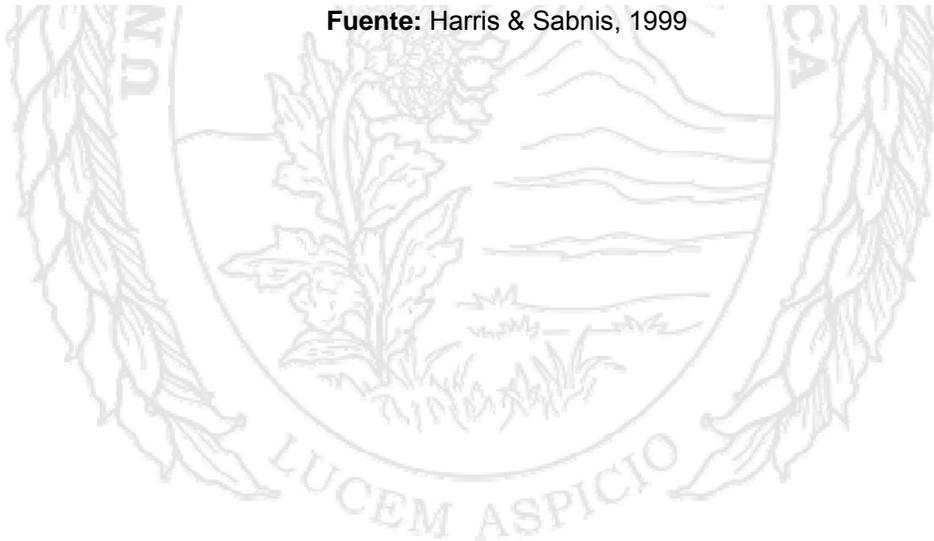
11. Registre el factor de escala como a razón 1: $S$ .

**Cuadro 3.** Resumen de factores de escala para respuesta sísmica de estructuras

(1)	(2)	Dimension (3)	Scale Factors		
			True Replica Model (4)	Artificial Mass Simulation (5)	Gravity Forces Neglected Prototype Material (6)
Loading	Force, $Q$	$F$	$S_E S_l^2$	$S_E S_l^2$	$S_l^2$
	Pressure, $q$	$FL^{-2}$	$S_E$	$S_E$	1
	Acceleration, $a$	$LT^{-2}$	1	1	$S_l^{-1}$
	Gravitational acceleration, $g$	$LT^{-2}$	1	1	Neglected
	Velocity, $v$	$LT^{-1}$	$S_l^{1/2}$	$S_l^{1/2}$	1
	Time, $t$	$T$	$S_l^{1/2}$	$S_l^{1/2}$	$S_l$
Geometry	Linear dimension, $l$	$L$	$S_l$	$S_l$	$S_l$
	Displacement, $\delta$	$L$	$S_l$	$S_l$	$S_l$
	Frequency, $\omega$	$T^{-1}$	$S_l^{-1/2}$	$S_l^{-1/2}$	$S_l^{-1}$
Material properties	Modulus, $E$	$FL^{-2}$	$S_E$	$S_E$	1
	Stress, $\sigma$	$FL^{-2}$	$S_E$	$S_E$	1
	Strain, $\epsilon$	—	1	1	1
	Poisson's ratio, $\nu$	—	1	1	1
	Mass density, $\rho$	$FL^{-4}T^2$	$S_E/S_l$	<sup>a</sup>	1
	Energy, $EN$	$FL$	$S_E S_l^3$	$S_E S_l^3$	$S_l^3$

<sup>a</sup>  $(g\rho l/E)_m = (g\rho l/E)_p$ .

Fuente: Harris & Sabnis, 1999



## 6. EXPERIMENTOS CON LA MESA VIBRATORIA DEL UCIST

Los siguientes dos experimentos están diseñados para recolectar los datos necesarios para la comparación con SAP2000.

### 6.1 Experimento de aceleraciones

#### 6.1.1 Objetivo

El objetivo de este experimento es determinar la respuesta sísmica del modelo tridimensional cuando es sacudido por el sismo escalado de El Centro.

#### 6.1.2 Equipo

1. Mesa vibratoria del UCIST (mesa y *Universal Power Module*)
2. Computadora (con QUARC, LabVIEW y Excel)
3. Modelo tridimensional
4. Acelerómetro
5. Sistema de adquisición de datos

#### 6.1.3 Procedimiento

1. Asegure el modelo tridimensional a la mesa vibratoria del UCIST.
2. Conecte el acelerómetro a uno de los pisos del modelo tridimensional y al sistema de adquisición de datos.
3. Inicie el programa `experimento_aceleraciones.vi` de LabVIEW.
4. Inicie el programa *Shake Table II Software*.
5. Corra el sismo de El Centro (escalado).
6. Exporte el gráfico de aceleraciones de LabVIEW a Microsoft Excel. Para ello, en el gráfico seleccione *Export Data to Excel*. Guarde el archivo.

7. Corra el sismo varias veces para recopilar al menos tres registros de aceleración para cada nivel del modelo (mesa, nivel 1, nivel 2 y nivel 3). Para ello, debe rotar el acelerómetro entre los distintos niveles del modelo.
8. Grafique cada registro de aceleraciones en Microsoft Excel para revisar la consistencia y hacer comparaciones.

## 6.2 Experimento de desplazamientos

### 6.2.1 Objetivo

El objetivo de este experimento es determinar el desplazamiento máximo del piso superior (nivel 3) relativo al piso inferior (mesa) cuando se corre el sismo escalado de El Centro en la mesa vibratoria del UCIST. Los datos obtenidos serán comparados con los resultados en SAP2000.

### 6.2.2 Equipo

1. Mesa vibratoria del UCIST (mesa y *Universal Power Module*)
2. Computadora (con QUARC, LabVIEW y Excel)
3. Modelo tridimensional
4. Mesa de pruebas
5. Sistema de adquisición de datos
6. Transductores de desplazamientos láser
7. Columna de aluminio con placas y pernos
8. Placas para sostener los láser
9. Fuente de poder
10. Amarras plásticas
11. Piezas de plexiglás

### 6.2.3 Procedimiento

1. Asegure el modelo tridimensional a la mesa vibratoria del UCIST.

2. Fije la columna de aluminio a la mesa de pruebas a una distancia adecuada para sujetar las bases de los láser de manera que estos puedan medir los desplazamientos del tercer nivel y de la base.
3. Amarre cada transductor de desplazamientos láser a la placa de aluminio que será utilizada como soporte para el sensor. Para ello, utilice las amarras plásticas.
4. Fije la base del primer láser a la columna de aluminio de forma tal que el sensor quede justo sobre la mesa vibratoria.
5. Fije la base del segundo láser a la columna de aluminio de forma tal que el sensor quede justo debajo del tercer nivel del modelo. (Ver Figura 19)
6. Conecte los transductores de desplazamiento láser al sistema de adquisición de datos y a la fuente de poder.
7. Coloque una lámina de plexiglás sobre la base del modelo. Verifique que el movimiento del modelo tridimensional quede dentro del rango de medición del transductor de desplazamientos.
8. Coloque una lámina de plexiglás en la parte inferior del tercer nivel del modelo. Al igual que en el caso anterior, verifique que el movimiento del modelo tridimensional quede dentro del rango de medición del transductor de desplazamientos láser.
9. Inicie el programa `experimento_desplazamientos.vi` de LabVIEW.
10. Inicie el programa *Shake Table II Software*.
11. Corra el sismo de El Centro (escalado).
12. Exporte ambos gráficos de desplazamientos de LabVIEW a Microsoft Excel. Para ello, en los gráficos seleccione *Export Data to Excel*. Guarde los archivos.
13. Determine  $\delta_{nivel\ 3} - \delta_{mesa}$  a partir de los registros para hallar el desplazamiento relativo.



**Figura 19.** Colocación de los dos láser para medición de desplazamiento relativo

## 7. MODELO EN SAP2000

### 7.1 Objetivo

El objetivo de este ejercicio es generar datos a partir de un análisis computacional (usando un programa de análisis estructural), para poder compararlos con los resultados experimentales obtenidos por medio de la mesa vibratoria del UCIST.

### 7.2 Equipo

1. Computadora
2. SAP2000 o un programa similar

### 7.3 Procedimiento

1. Ingrese la geometría y las propiedades de los materiales del modelo tridimensional. (Ver “4.3 Esquema del modelo tridimensional” y “4.4 Propiedades de los materiales del modelo tridimensional”)
2. Ingrese el sismo escalado de El Centro usando la función de *Time History Analysis*.
3. Corra el modelo de SAP2000.

4. Despliegue e imprima las gráficas de la aceleración en función del tiempo para cada nivel del modelo.
5. Despliegue e imprima la gráfica del desplazamiento relativo en función del tiempo para el nivel superior del modelo. Anote el valor del máximo desplazamiento relativo. Compare esos resultados con los obtenidos con la mesa vibratoria del UCIST. (Ver “6. Experimentos en la mesa vibratoria del UCIST”)



## 8. REFERENCIAS

Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of Structures*. New Jersey: Prentice - Hall, Inc.

Harris, H., & Sabnis, G. (1999). *Structural Modeling and Experimental Techniques*. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC.

Miller, T., & Shonkwiler, B. (s.f.). [Teaching Module]. *Small - Scale Shake Table Experiments and Comparison to Analytical Predictions: Student Manual*. Oregon, Estados Unidos: Oregon State University.

