



Fuente: [https://engineering.purdue.edu/UCIST/publications/publications/EDUquake\\_UCIST\\_final.pdf](https://engineering.purdue.edu/UCIST/publications/publications/EDUquake_UCIST_final.pdf)

## Mesa vibratoria portátil para simular el efecto de sismos sobre estructuras de puentes y edificaciones

Patricia Peralta Abadía

Candidata a Lic. en Ingeniería Civil

Unidad de Puentes, PITRA, LanammeUCR

Ing. Rolando Castillo Barahona, PhD

Coordinador, Unidad de Puentes, PITRA, LanammeUCR

### Introducción

La Unidad de Puentes (UP) del LanammeUCR fue constituida en el 2010 con el objetivo de contribuir a la enseñanza, investigación y difusión del conocimiento en materia de puentes y para cumplir con las responsabilidades asignadas al LanammeUCR por la Ley N° 8114 "Ley de Simplificación y Eficiencia Tributaria" en lo relativo a evaluación de puentes existentes, asesorías al MOPT y capacitación. El tema de puentes es un área de la ingeniería civil que no ha recibido la importancia que realmente merece en Costa Rica y la UP viene realizando acciones para cambiar esta realidad.

Para cumplir con varios de los objetivos antes expuestos, la UP imparte cursos universitarios a nivel de pregrado y posgrado

sobre diseño de puentes. También realiza investigación mediante proyectos de graduación de estudiantes de último año de carrera, imparte cursos de capacitación sobre inspección de puentes y organiza cursos o seminarios con expositores internacionales de reconocida trayectoria para que compartan sus conocimientos y experiencias con el propósito de mejorar, en el corto plazo, la práctica profesional en la materia.

Recientemente la UP viene buscando alternativas para mejorar su práctica docente y dar impulso a la investigación que se realiza en el área del análisis y diseño estructural de puentes. Es por ello que ha impulsado una iniciativa para adquirir una mesa vibratoria de gran capacidad que permita realizar

COMITÉ EDITORIAL  
2013

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD.  
Coordinador General PITRA, LanammeUCR

Ing. Mónica Jiménez Acuña  
Unidad de Materiales y Pavimentos

Daniela Alpízar Gutiérrez  
Diseñadora Gráfica. Unidad de Diseño Gráfico

investigación experimental con modelos a escala natural o reducida de estructuras o elementos de puentes.

Sin embargo, la UP considera prudente que, antes de adquirir una mesa vibratoria con un costo inicial significativo y un costo operativo nada despreciable; más bien se adquiriera una mesa vibratoria portátil (ver Figura 1) de costo accesible pero con la capacidad de simular el efecto de los sismos y otras señales en modelos estructurales a pequeña escala.

Es por lo anterior que este boletín provee información general sobre la mesa vibratoria portátil que la UP ha decidido adquirir con el fin de complementar la docencia e impulsar la investigación mediante ensayos sobre el comportamiento dinámico de modelos estructurales de puentes. La adquisición

Figura 1. Ensamblaje de la mesa vibratoria Shake Table II para la realización de experimentos



Fuente: UCIST [8]

de este equipo es considerado el paso previo a la compra de una mesa vibratoria de gran capacidad.

### ¿Qué es una mesa vibratoria y cuál es su utilidad?

Una mesa vibratoria es un dispositivo que reproduce movimientos sísmicos reales debidamente registrados para investigar el comportamiento dinámico y la respuesta sísmica de modelos estructurales de manera precisa (ver Figura 2) [13]. Además, constituye una herramienta versátil para propósitos demostrativos.

La investigación realizada con mesas vibratorias no es nueva. Más bien este equipo se viene utilizando en distintas universidades y centros de investigación alrededor del mundo desde hace varias décadas.

Con la adquisición de una mesa vibratoria de gran capacidad, la UP pretende complementar la investigación, que actualmente realizan investigadores de la Escuela de Ingeniería Civil, con ensayos experimentales en el área de la dinámica estructural e ingeniería sísmica de puentes. Estudios realizados con este tipo de equipo han permitido a investigadores internacionales profundizar de manera práctica en temas que facilitan el proceso de comprensión del comportamiento sísmico y dinámico de estructuras, validación de modelos y verificación de métodos de análisis [13]. Todo este trabajo también ha ayudado al desarrollo de nuevas técnicas de construcción, verificación o mejoramiento de normativas existentes y a generar propuestas con tecnologías innovadoras.

Figura 2. Modelo de un sistema de puente de dos tramos de concreto reforzado



Fuente: <http://www.arowebite.com>

Por otro lado, la adquisición de una mesa vibratoria portátil también traería grandes beneficios para la docencia y la investigación. En cuanto a la docencia, va a permitir a profesores e instructores complementar la enseñanza de los conceptos fundamentales del comportamiento sísmico de estructuras de puentes y edificaciones mediante ensayos demostrativos o laboratorios. Los estudiantes tendrían la oportunidad de construir sus propios modelos estructurales para su respectivo ensayo, permitiéndoles comprender el comportamiento y la respuesta de estructuras cuando se ven sujetas a desplazamientos inducidos por sismos y a cambios en las propiedades dinámicas de la estructura (ver Figura 3) [6]. En cuanto a la investigación, la mesa permitiría experimentar con señales típicas de sismos y examinar sus efectos sobre diversos modelos estructurales más avanzados.

Figura 3. Demostración de mejores técnicas constructivas con una mesa vibratoria portátil en la conferencia SismoAdobe2005 en Lima, Perú



Fuente: [http://www.dab.uts.edu.au/ebf/conferences/sismoadobe\\_2005/sismoadobe\\_2005\\_02.html](http://www.dab.uts.edu.au/ebf/conferences/sismoadobe_2005/sismoadobe_2005_02.html)

## Investigación sobre mesas vibratorias portátiles disponibles en el mercado

La UP realizó una investigación bibliográfica con el fin de determinar si en el mercado se comercializaba una mesa vibratoria portátil de fácil manejo por parte de académicos e instructores, que requiera de poco mantenimiento y que fuera capaz de simular señales de sismo entre otras. El resultado de dicha investigación nos llevó al trabajo de la Dra. Shirley Dyke, profesora de la Universidad de Purdue, EUA [12], quien había iniciado un proyecto para integrar la ingeniería sísmica y la dinámica de estructuras en los cursos universitarios de ingeniería civil por medio de ensayos experimentales mediante mesas vibratorias portátiles.

## Consortio de Universidades de Mesas Vibratorias Instructivas (UCIST)

El proyecto de la Dra. Dyke inició formalmente en 1999 y tenía como objetivo incentivar el desarrollo de módulos educativos experimentales, utilizando un mismo equipo de mesa vibratoria portátil que garantizara la uniformidad y la reproducibilidad de ensayos, para facilitar la comprensión de la ingeniería sísmica y la dinámica de estructuras [3]. Como parte de este proyecto se creó el Consortio de Universidades con Mesas Vibratorias Instructivas (conocido en inglés como UCIST o *University Consortium on Instructional Shake Tables*), el cual inició con la participación de 23 universidades de los Estados Unidos y contó con el soporte del *National Science Foundation* (NSF) y el *National Network for Earthquake Engineering Simulation* (NEES).

Un trabajo importante que debía realizar este consorcio era seleccionar una mesa vibratoria que cumpliera con varios requisitos mínimos. Estos requisitos eran: que fuera controlada por computadora con una interfaz sencilla, portable, de ensamblaje sencillo, de bajo mantenimiento, resistente al uso continuo por parte de estudiantes, con un precio razonable y además que cumpliera con las especificaciones técnicas mostradas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Requisitos mínimos especificados por el consorcio

Especificación	Valor
Sobrecarga de diseño	11,3 kg (25 lbf)
Aceleración pico	1 g
Rango de frecuencias operacional	0 – 20 Hz
Velocidad pico	508 mm/s (20 in/s)
Dimensiones de la plataforma deslizante	460 mm x 460 mm (18 in x 18 in)
Desplazamiento máximo	150 mm ± 76 mm (6 in ± 3 in)
Peso de la mesa vibratoria	< 45,4 kg (100 lbf)

Fuente. Dyke, Truman, & Goulg, 2000 [3]

Una vez definidos los requisitos del equipo, el consorcio invitó a tres potenciales fabricantes de mesas vibratorias portátiles para que elaboraran un prototipo del equipo que cumpliera con los requerimientos mencionados. Después de analizar los equipos presentados, el consorcio se inclinó por el prototipo fabricado por la firma Quanser Consulting Inc., denominado *Shake Table II*, quienes proporcionaron un paquete bastante completo que brindaba la flexibilidad deseada y permitía la elaboración de los módulos académicos [2 y 3].

Quanser Consulting Inc es una empresa fundada en 1990 líder en el diseño y la fabricación de sistemas avanzados de control en tiempo real los cuales son utilizados en la industria, la educación y la investigación. Dentro del área de la ingeniería sísmica, Quanser ofrece varias soluciones académicas y de investigación que permiten comprender el comportamiento de estructuras sujetas a desplazamientos variables en el tiempo [8].

Luego de más de una década de iniciado el proyecto, el consorcio UCIST cuenta con más de 100 universidades de Norteamérica y alrededor del mundo, además tiene 8 módulos educativos debidamente documentados. Estos módulos



consisten de documentación didáctica (manuales, fotografías y videos) que permiten reproducir los experimentos elaborados por varios miembros del UCIST [12].

### Selección de la mesa vibratoria portátil

Con base en la investigación bibliográfica realizada y la información antes expuesta, la UP decidió adquirir la mesa vibratoria Shake Table II de Quanser. Este equipo es el utilizado y recomendado por el consorcio de universidades UCIST quienes han desarrollado varios ensayos experimentales debidamente documentados que pueden ser replicados para adquirir destreza en el uso del equipo.

### Descripción del sistema de mesa vibratoria Shake Table II

El sistema de mesa vibratoria está compuesto por una fuente de poder (UPM), una tarjeta de adquisición de datos (DAC),

una computadora ejecutando el software de control WinCon y la mesa vibratoria en sí, según se muestra en la Figura 4.

La mesa vibratoria unidireccional del sistema, según se muestra en la Figura 5a, es controlada por computadora por medio de una interfaz sencilla, es portable, de bajo mantenimiento, y de fácil manipulación para prevenir accidentes o daños. Además es de ensamblaje sencillo y requiere de un tiempo mínimo para iniciarse antes de comenzar un experimento [3]. La UP está adquiriendo la configuración bidireccional de la mesa según se muestra en la Figura 5b la cual consiste de una mesa unidireccional a la cual se le acopla una segunda mesa, en sentido perpendicular que permite movimientos en ambos ejes. Ambas mesas son controladas por el programa instalado en una sola computadora.

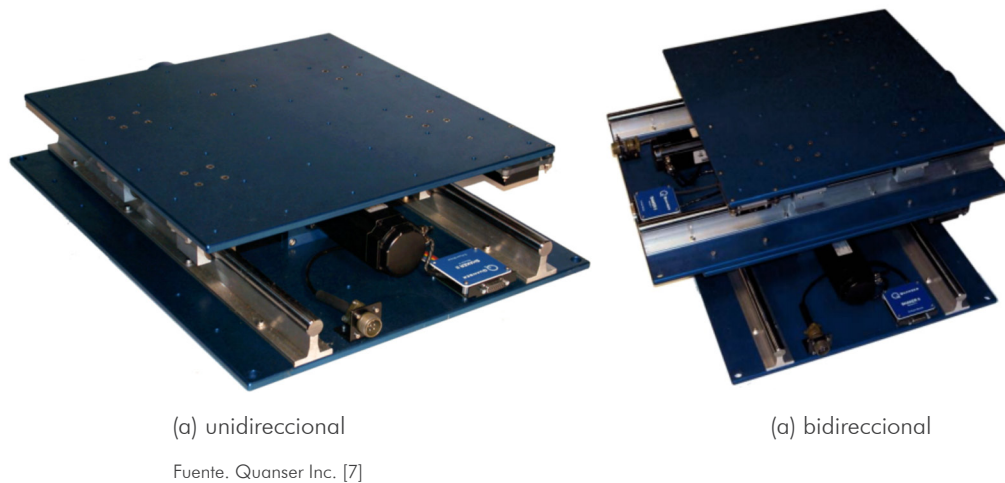
Este sistema de mesa vibratoria tiene un funcionamiento sencillo y amigable con el usuario. El software WinCon, instalado en la computadora, permite al usuario especificar la amplitud y la frecuencia de las ondas a reproducir. La corriente necesaria para mover la mesa es luego calculada por el WinCon y enviada

Figura 4. Componentes principales del sistema



Fuente. Quanser Inc. [7]

Figura 5. Mesa vibratoria Shake Table II de Quanser en su configuración unidireccional y bidireccional



a través del canal de salida análogo del panel de adquisición de datos al dispositivo UPM. El amplificador de poder en el UPM amplifica la corriente y acciona el motor, moviendo la mesa hacia adelante y hacia atrás a la posición y frecuencia de la onda especificada por el usuario. El desplazamiento y la aceleración resultante de la plataforma son medidos por los sensores respectivos, los cuales están conectados a la tarjeta DAC del panel de adquisición de datos y sus señales pueden ser visualizadas y procesadas en detalle por el WinCon [7].

La mesa *Shake Table II* es capaz de reproducir ondas sinusoidales, ondas aleatorias y pulsos, así como registros históricos de sismos, como el terremoto de El Centro de 1940.

En el Cuadro 2 se muestran las especificaciones técnicas de la mesa vibratoria *Shake Table II* en su versión unidireccional.

### ¿Qué se pretende realizar con la mesa vibratoria?

#### *Comportamiento dinámico de modelos estructurales*

En una primera etapa se tiene como prioridad conocer el funcionamiento y la capacidad de la mesa vibratoria *Shake Table II*. Para alcanzar este objetivo, se tiene programado desarrollar los módulos educativos desarrollados por varios autores miembros del consorcio UCIST. A partir de estos ensayos se pretende evaluar la respuesta de las estructuras y verificar los resultados experimentales con los resultados obtenidos a partir de modelos analíticos por computadora.

El Cuadro 3 describe los módulos educativos que se pretende implementar durante esta primera etapa. Estos módulos cubren aspectos fundamentales de la dinámica de estructura como son la determinación de espectro de respuestas, medición de aceleraciones y desplazamientos relativos, entre muchos otros aspectos.

Cuadro 2. Especificaciones de la mesa vibratoria Shake Table II

Especificación	Valor
Sobrecarga de diseño a 2,5 g	15 kg (33 lb)
Aceleración pico	2,5 g
Rango de frecuencia	0 – 20 Hz
Velocidad pico	665 mm/s (26 in/s)
Dimensiones de la mesa	460 mm x 460 mm (18 in x 18 in)
Desplazamiento	150 mm ± 76 mm (6 in ± 3 in)
Peso de la mesa	27,2 kg (60 lb)
Rango del acelerómetro	± 49 m/s <sup>2</sup>
Sensibilidad del acelerómetro	1,0 g/V

Fuente. Quanser Inc. [7]

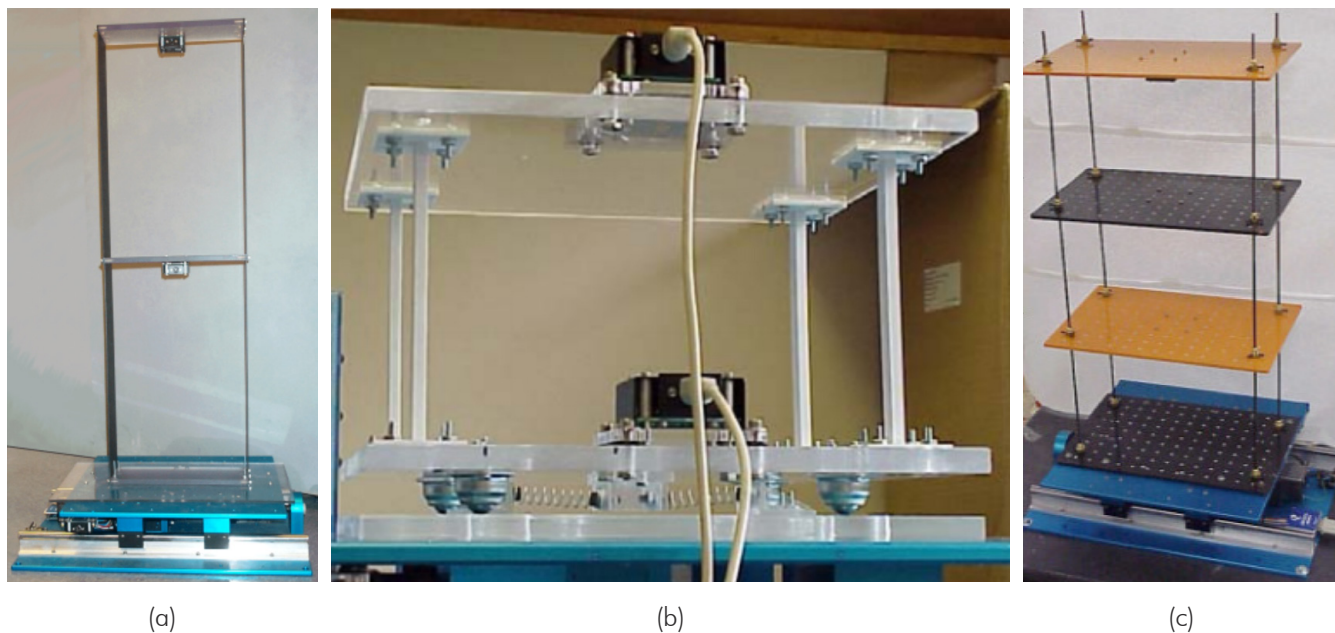
A partir de las experiencias que se pretenden adquirir con la reproducción de los módulos educativos del UCIST, la UP tiene planeado elaborar uno o dos módulos educativos propios, enfocados específicamente a estructuras de puentes, para complementar los ensayos demostrativos desarrollados a partir de los módulos del UCIST. Se espera que estos nuevos módulos sean sometidos para consideración y aprobación por parte del consorcio UCIST para que un producto del LanammeUCR llegue a estar al alcance de la comunidad universitaria internacional.

Cuadro 3. Modulos educativos desarrollados por UCIST que implementará la UP

Ítem	Módulo según UCIST	Autores	Descripción
1	Módulo 1: Introducción a la dinámica de estructuras	Juan Martin Caicedo Sinique Betancourt Dr. Shirley J. Dyke Washington University in Saint Louis	Este experimento introduce los principios de la dinámica de estructuras.
2	Módulo 7: Demostración de la respuesta dinámica de un edificio con base aislada	Stuart Bennion Jason Collins Nat Wongprasert Michael D. Symans Washington State University	Este experimento demuestra la respuesta de edificios con base aislada sujetos a cargas dinámicas.
3	Módulo 8: Experimentos con modelos a pequeña escala y su comparación con predicciones analíticas	Brenda E. Shonkwiler Thomas H. Miller Oregon State University	Este experimento describe los pasos necesarios para realizar una simulación sísmica por medio de un modelo tridimensional de tres niveles.

Nota: Información recopilada de UCIST [11 y 12]

Figura 6. Modelos de estructuras examinados en: (a) módulo 1, (b) módulo 7 y (c) módulo 8

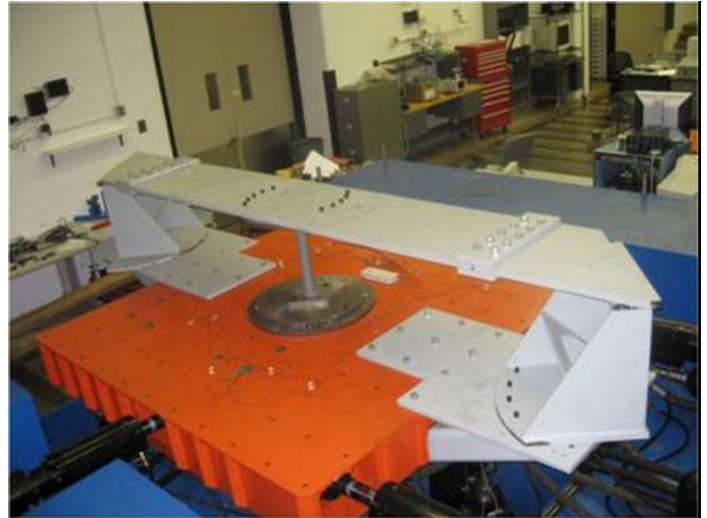


Fuente. UCIST [12]

## *Investigación sobre el comportamiento y la respuesta dinámica de modelos específicos de puentes*

En una segunda etapa, se pretende iniciar la investigación de modelos estructurales más avanzados de puentes, para examinar su comportamiento y respuesta debido al efecto que pueda tener el tipo de apoyo seleccionado, cambios de rigideces en los elementos de la subestructura, el alineamiento y más. Un ejemplo de un modelo que se puede construir para su ensayo sería similar al mostrado en la Figura 7. Este modelo fue desarrollado en la Universidad de Illinois de los EUA para estudiar el efecto del sesgo en la respuesta sísmica del puente.

Figura 7. Modelo estructural de un puente sesgado sobre una mesa bidireccional



Fuente. <http://sstl.cee.illinois.edu>

## Conclusiones

El uso de mesas vibratorias portátiles para la docencia e investigación por parte de universidades y centros de investigación ha ganado mucha popularidad. Este equipo permite comprender el comportamiento sísmico de estructuras, validar modelos y verificar métodos de análisis.

La UP ha decidido adquirir una mesa vibratoria portátil Shake Table II debido a que satisface los requerimientos establecidos por la UP en cuanto capacidad y funcionalidad, es el equipo utilizado por el consorcio de universidades UCIST, quienes han desarrollado varios módulos educativos debidamente documentados que permiten su reproducción, facilitando con ello la adquisición de destrezas en el manejo del equipo.

En el área docente, la mesa vibratoria portátil va a permitir que profesores e instructores de la Escuela de Ingeniería Civil y el LanammeUCR transmitan los conceptos teóricos fundamentales del comportamiento sísmico de estructuras de

puentes y edificaciones mediante ensayos demostrativos. Así los estudiantes podrán comprender y visualizar el comportamiento y la dinámica de estructuras.

En cuanto a la investigación, la mesa vibratoria va a permitir la experimentación con señales típicas de sismos y examinar el efecto de dichas señales sobre diversos modelos estructurales avanzados de puentes.

Se tiene programado desarrollar dos etapas de ensayos: (1) Implementar los módulos educativos del UCIST con el fin de familiarizarse con el equipo, su funcionamiento y los resultados que se obtienen y con ello generar destreza en la fabricación y ensayos de modelos estructurales y (2) Investigar el comportamiento y la respuesta dinámica de modelos avanzados de puentes.

## Referencias Bibliográficas

1. Buckle, I., Itani, A., & Sanders, D. (2011). *Seismic effects on multi-span bridges with high degrees of horizontal curvature*. Recuperado el 14 de enero de 2013, de NEES: University of Nevada: [http://nees.unr.edu/projects/curved\\_bridge.html](http://nees.unr.edu/projects/curved_bridge.html)
2. Dyke, S., Johnson, S., Ranf, R., Caicedo, J., & Soto-Fournier, M. (2002). *Advancing Earthquake Engineering Education Through A Cooperative Effort Based On Instructional Shake Tables. 7th US National Conference on Earthquake Engineering*. Boston.
3. Dyke, S., Truman, K., & Goulg, P. (2000). *Current directions in earthquake engineering education: The University Consortium on Instructional Shake Tables. Reunión Anual ASEE*. St. Louis, Estados Unidos.
4. Ma, Q., & Khan, M. (2008). *Shake Table Tests of a Stepping Bridge Model. 14va Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica*. Beijing, China.
5. Meymand, P. (1998). *Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction In Soft Clay. [Tesis de doctorado]*. California, Estados Unidos.
6. Quanser Inc. (2012). *Earthquake Engineering*. Recuperado el 10 de diciembre de 2012, de Quanser: [http://www.quanser.com/english/html/home/fs\\_homepage.html](http://www.quanser.com/english/html/home/fs_homepage.html)
7. Quanser Inc. (2007). *Shake Table II User Manual*. Recuperado el 14 de enero de 2013, de Quanser: [http://quanser.com/english/downloads/products/Shake\\_Table\\_II\\_manual.PDF](http://quanser.com/english/downloads/products/Shake_Table_II_manual.PDF)
8. Quanser Inc. (2012). *About Quanser*. Recuperado el 21 de enero de 2013, de Quanser: [http://www.quanser.com/english/html/about/fs\\_about\\_splash.htm](http://www.quanser.com/english/html/about/fs_about_splash.htm)
9. Quanser Inc. (2012). *UNIVERSITY CONSORTIUM ON INSTRUCTIONAL SHAKE TABLES: How to enhance civil engineering programs with earthquake simulators*. Recuperado el 16 de marzo de 2013, de Shake Table II - Case Study: [http://www.quanser.com/english/downloads/case\\_studies/case\\_study\\_UCIST.pdf](http://www.quanser.com/english/downloads/case_studies/case_study_UCIST.pdf)
10. Tsai, M.-H., Wu, S.-Y., Chang, K.-C., & Lee, G. (2006). *Shaking table tests of a scaled bridge model with rolling-type seismic isolation bearings*. Recuperado el 10 de diciembre de 2012, de ScienceDirect: <http://www.sciencedirect.com>
11. University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST). (2011). *Instructional Shake Tables*. Recuperado el 10 de diciembre de 2012, de NEESHub: <https://nees.org/groups/benchshaketables/wiki/MainPage>
12. University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST). (s.f.). *University Consortium on Instructional Shake Tables*. Recuperado el 10 de diciembre de 2012, de Purdue University: <https://engineering.purdue.edu/UCIST/default.html>
13. Wikipedia. (16 de diciembre de 2012). *Earthquake shaking table*. Recuperado el 14 de enero de 2013, de Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake\\_shaking\\_table](http://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_shaking_table)

### Programa de Infraestructura del Transporte

#### PITRA

Ing. Luis Guillermo Loría, PhD.  
Coordinador General

Ing. Fabián Elizondo  
Subcoordinador

#### Unidades

##### Unidad de Auditoría Técnica

Ing. Jenny Chaverri, MScE.  
Coordinadora

##### Unidad de Materiales y Pavimentos

Ing. José Pablo Aguiar, PhD.  
Coordinador

##### Unidad de Evaluación de la Red Vial

Ing. Roy Barrantes  
Coordinador

#### Unidad de Gestión Municipal

Ing. Jaime Allen, MSc.  
Coordinador

#### Unidad de Desarrollo y Actualización de Especificaciones Técnicas

Ing. Jorge Arturo Castro  
Coordinador

#### Unidad de Puentes

Ing. Rolando Castillo, PhD.  
Coordinador

#### Unidad de Seguridad Vial y Transporte

Ing. Diana Jiménez, MSc., MBA  
Coordinadora