



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UP-01-2015

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MASA ARTIFICIAL PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES DINÁMICAS DE ESTRUCTURAS DE PUENTES

Preparado por:

Unidad de Puentes

San José, Costa Rica

Octubre, 2015



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE



Página intencionalmente dejada en blanco



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE

1. Informe: LM-PI-UP-01-2015		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MASA ARTIFICIAL PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES DINÁMICAS DE ESTRUCTURAS		4. Fecha del informe 9 de octubre 2015
5. Organización y dirección 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		
6. Notas complementarias Ninguna.		
7. Resumen En esta propuesta de investigación se plantea el desarrollo de una investigación experimental de cuatro etapas: una primera etapa investigativa a partir de la cual se generó el presente informe, dos etapas que implican el uso de modelos conceptuales con un grado de libertad y una última etapa que propone el desarrollo de un trabajo final de graduación a partir del modelo a escala de la pila de un puente prototipo Se introduce el concepto de masa artificial como una solución a la limitación de carga vertical de las mesas vibratorias, incluyendo una revisión de artículos que muestren el uso de modelos a escala reducida con sistemas de masa artificial, los cuales son tomados como base para conocer el tipo de apoyos y demás características que requerirá dicho sistema. Además, se presenta un análisis de los factores de escala a utilizar para modelos a escala reducida a partir del factor de escala para la longitud. .		
8. Palabras clave Masa artificial, modelos a escala, leyes de similitud, modelos elásticos y elastoplásticos; puentes	9. Nivel de seguridad: Ninguno	10. Núm. de páginas 27
11. Informe por: Julissa Gómez Acuña Asistente Unidad de Puentes Fecha: 17 / 09 / 2015	12. Revisado por: Ing. Pablo Agüero Barrantes, M. Sc. Unidad de Puentes Fecha: 17 / 09 / 2015	
13. Aprobado por: Ing. Roy Barrantes Jiménez. Coordinador, Unidad de Puentes Fecha: 09 / 10 / 2015	14. Revisado por: Ing. Guillermo González Beltrán, Ph. D., -. Coordinador General de Laboratorios Fecha: 05 / 10 / 2015	15. Aprobado por: Ing. Guillermo Loria Salazar, Ph. D. Coordinador General PITRA Fecha: 09 / 10 / 2015



Página intencionalmente dejada en blanco

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Importancia y justificación	6
1.2. Planteamiento del problema.....	8
2. OBJETIVO GENERAL.....	9
3. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	9
4. REVISION BIBLIOGRAFICA.....	11
4.1. Modelos a escala	11
4.2. Equipo Disponible	12
4.3. Leyes de similitud.....	13
4.4. Masa artificial	17
5. PLAN DE INVESTIGACIÓN.....	19
5.1. Proyecto de Investigación	19
5.1.1. Etapa 1. Investigación de Casos en los Cuales se ha Requerido el Uso de Masa Artificial Debido a las Relaciones de Leyes de Similitud, en Modelos a Escalas Variables y con base en Prototipos Distintos.	19
5.1.2. Etapa 2. Validación del Uso de Masa Artificial en Modelos Elásticos.....	20
5.1.3. Etapa 3. Validación del Uso de Masa Artificial en Modelos Elastoplásticos.....	21
5.1.4. Etapa 4. Aplicación del uso de masa artificial para el análisis de la pila de un puente prototipo.....	22
5.2. Cronograma	24
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	26
8. REFERENCIAS.....	27

1. INTRODUCCIÓN

Esta propuesta plantea el desarrollo de un sistema de masa artificial para modelos a escala reducida sometidos a desplazamiento lateral en la base, en los cuales se requiere una masa mayor a la capacidad máxima de carga vertical de la mesa vibratoria para cumplir la teoría de leyes de similitud y que la fuerza inercial inducida en los modelos sea representativa del prototipo.

La masa artificial es agregada al modelo estructural mediante una estructura diseñada para aportar dicha masa. La estructura que aporta la masa no debe formar parte del modelo estructural, ni afectar su rigidez ni su comportamiento. Lo anterior se logra mediante conexiones adecuadas entre la estructura que aporta la masa y el modelo estructural, así como apoyos adecuados que eviten que la utilización de la masa artificial introduzca comportamientos distintos a los que el modelo debe representar con base en el prototipo.

La propuesta consta de tres etapas experimentales independientes y progresivas, además de la etapa de investigación inicial: realización de un modelo elástico conceptual de un grado de libertad y una masa menor a la máxima permisible, que permita verificar la concordancia entre los resultados obtenidos con la masa directamente sobre el modelo y con la masa artificial; la realización de un modelo elastoplástico sencillo para estudiar su comportamiento experimental bajo las mismas dos condiciones descritas para el modelo elástico; finalmente, el ensayo de un modelo a escala 1:30 de una pila de un puente existente. En los tres etapas se realizará la comparación de los resultados experimentales con los resultados obtenidos con modelos analíticos. Para dicho fin el LanammeUCR cuenta con licencias de programas como SAP2000, Abaqus y *Perform 3D*.

1.1. Importancia y justificación

El presente proyecto se encentra dentro de las competencias asignadas a la Unidad de Puentes del PITRA LanammeUCR de conformidad con la Ley 8114.

En el análisis de estructuras de concreto el uso de modelos experimentales es utilizado para obtener información que a la fecha es difícil de conseguir mediante modelos analíticos.

Informe No. LM-PI-UP-03-2015	Fecha del emisión: 9 de octubre del 2015	Página 6 de 27
------------------------------	--	----------------

Además, los resultados experimentales aportan información muy valiosa, para calibrar modelos analíticos.

Por otra parte, el uso de modelos conceptuales de uno o más grados de libertad -como los modelos sencillos propuestos en las dos primeras etapas de este proyecto-, o bien de modelos a escala de estructuras prototipo son importantes para la educación en ingeniería estructural, investigación y diseño, ya que permiten analizar el comportamiento de estructuras de forma complementaria al uso de herramientas analíticas y computacionales.

Asimismo, se logra la reducción de costos tanto en cuanto al equipo de carga como en la fabricación del modelo, con respecto de modelos a escala natural. Además, al tener una escala menor a la real permiten responder a las limitaciones de equipos disponibles que restringen las dimensiones de los posibles modelos a analizar.

Por las ventajas mencionadas anteriormente, los modelos a escala son útiles en las etapas iniciales de proyectos de investigación experimental. En el caso específico de la presente investigación se obtendrá una serie de conocimientos que servirán de base para estudios posteriores con factores de escala menores o a escala natural que tengan por objeto de estudio estructuras en voladizo, como por ejemplo la pila de un puente. Igualmente, se creará una base de conocimiento para futuros ensayos de estructuras en general, que utilicen la mesa vibratoria, ya que se generarán conocimiento sobre: instrumentación, el comportamiento de estructuras sometidas a cargas inducidas por sismo y el análisis dimensional a partir de prototipos determinados.

Finalmente, al validar el uso de masa artificial para los modelos a escala, se permite que eventuales investigaciones puedan ser desarrolladas superando el inconveniente de la falta de capacidad de carga vertical de la mesa vibratoria ante el factor de escala que sea desea utilizar.

1.2. Planteamiento del problema

El análisis de estructuras sometidas a cargas laterales mediante ensayos de modelos estructurales a escala reducida, requiere que dichos modelos sean diseñados respetando las leyes de similitud, para lo cual se deben tomar en cuenta las especificaciones del equipo del cual se dispone; en el caso del presente estudio las mesas vibratorias del laboratorio a escala reducida del LanammeUCR presentan limitaciones de tamaño y capacidad de carga vertical.

En cuanto al cumplimiento de las leyes de similitud para modelos estructurales sometidos a carga lateral, se plantean dos retos:

- La reducción en el volumen del modelo (factor de distancia elevado al cubo) por lo general implica el requerimiento de agregar masa adicional al modelo estructural, a veces sobrepasando la capacidad de carga vertical de las mesas vibratorias.
- Al alterarse el contenido de frecuencias de los registros sísmicos, a veces se sobrepasa la capacidad del motor de la mesa.

En el caso del primer reto se plantea como solución el concepto de masa artificial, la cual consiste en la masa adicional requerida para cumplir las leyes de similitud. El segundo reto está fuera del alcance de la presente investigación y se afrontará si el equipo lo permite. El enfoque consiste en analizar experimentalmente estructuras afrontando adecuadamente las limitaciones del equipo, con modelos a escala adecuados.

Las mesas vibratorias del LanammeUCR fueron recibidas en setiembre del 2013 y desde esa fecha se ha trabajado principalmente en el uso de instrumentación con estructuras muy sencillas. No obstante, el uso de masa artificial no ha sido implementado en el país, por lo que es oportuno desarrollar el conocimiento sobre su uso, así como la exactitud que permite alcanzar, tanto para modelos elásticos como elastoplásticos, comparando el comportamiento de un modelo con su masa colocada como parte de este y otro que sea generado con masa artificial.

Informe No. LM-PI-UP-03-2015	Fecha del emisión: 9 de octubre del 2015	Página 8 de 27
------------------------------	--	----------------

Finalmente, el uso de masa artificial ha sido utilizado en el análisis de modelos experimentales de puentes, permitiendo modelar elementos como las pilas del mismo, lo cual se pretende realizar como parte de este proyecto para finalizar con un caso concreto del uso de masa artificial en el análisis de estructuras. Lo anterior no implica que este método experimental esté limitado a estructuras de puentes, por el contrario, se realiza una investigación que permitirá el desarrollo de investigación de modelos de otros componentes estructurales que requieran el uso de masa artificial en otras áreas de la ingeniería estructural.

2. OBJETIVO GENERAL

Implementar y validar el uso de masa artificial en el análisis experimental en estructuras a escala reducida, mediante el análisis de modelos elásticos y elastoplásticos de un grado de libertad; así como su aplicación a un modelo a escala reducida de una pila prototipo de un puente.

3. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a) Investigar y aplicar los conceptos relacionados con leyes de similitud, así como revisar su aplicación en ejemplos concretos de modelos a escala.
- b) Investigar y validar el uso de masa artificial en modelos elásticos de un grado de libertad sometidos a vibraciones en una mesa vibratoria.
- c) Investigar y validar el uso de masa artificial en modelos elastoplásticos de un grado de libertad sometidos a vibraciones en una mesa vibratoria.
- d) Aplicar la teoría de leyes de similitud y el uso de masa artificial en modelos a escala reducida tomando como prototipo la pila del puente sobre el Río Torres en la Ruta 218 y un factor de escala 1:30.

Informe No. LM-PI-UP-03-2015	Fecha del emisión: 9 de octubre del 2015	Página 9 de 27
------------------------------	--	----------------

- e) Extrapolar los resultados obtenidos mediante el modelo a escala 1:30 del puente sobre el Río Torres al comportamiento de la pila en sí a escala natural.
- f) Transferir los conocimientos y experiencias adquiridas mediante programas de capacitación a los investigadores de Lanamme y al estudiantado de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica (UCR).



4. REVISION BIBLIOGRAFICA

4.1. Modelos a escala

Un modelo estructural consiste en cualquier representación física de una estructura o parte de esta, la cual es utilizada para realizar pruebas y extrapolar los resultados al prototipo. Generalmente, los modelos se realizan a escala reducida por las limitaciones existentes de equipo y presupuesto, y deben seguir las leyes de similitud para poder utilizar los resultados correspondientes.

Según *Harris & Sabnis* (1999) los modelos a escala se pueden clasificar, entre otros tipos, como se indica a continuación:

- Modelos elásticos: representan la geometría del prototipo, pero no necesariamente están hechos del mismo material, además se restringe al comportamiento en el rango elástico.
- Modelos indirectos: utilizados para obtener diagramas de influencia, donde la carga aplicada al modelo no tiene correspondencia con las cargas reales del prototipo.
- Modelo directo: es geoméricamente similar al prototipo y las cargas se aplican de la misma manera que al primero. Las mediciones de fuerza, esfuerzo y deformación representan cantidades similares en el prototipo. Modela el comportamiento elastoplástico del prototipo.
- Modelo de fuerza: este modelo predecirá el comportamiento del prototipo para todas las cargas hasta la falla, el principal problema es encontrar los materiales y formas de fabricación adecuadas del modelo. Debe satisfacer las condiciones de similitud.
- Modelos de efectos del viento.

- Modelos dinámicos: utilizados para estudiar los efectos de vibraciones o cargas dinámicas en estructuras, se prueban en mesas vibratorias para análisis de cargas de sismos o en túneles de viento para efectos aeroelásticos.

En la presente investigación se utilizará un modelo de tipo directo tomando como prototipo una pila del puente sobre el Río Torres en la Ruta 218.

4.2. Equipo Disponible

En cuanto al equipo del cual se dispondrá, a la fecha de la redacción de esta propuesta se conoce que la capacidad de equipos adquiridos por la Unidad de Puentes que pueden ser utilizados en el laboratorio a escala reducida es:

- 4 mesas vibratorias uniaxiales, que pueden ser utilizadas como 2 mesas biaxiales.
- 2 computadoras con capacidad para el uso de la mesa.
- 3 sensores laser para medir desplazamiento con capacidad de 200mm.
- 1 fuente de poder de 3 salidas.
- 1 celda de carga de 100 lbf.
- 10 acelerómetros triaxiales Memsic (se utilizan con NI 9219).
- 1 cDAQ con los siguientes módulos:
 - 1 módulo 3237 (4 canales)
 - 2 módulos 9234 (8 canales)
 - 2 módulos 9219 (8 canales)
- 6 acelerómetros triaxiales PCB (se utilizan con NI 9234).
- 33 acelerómetros uniaxiales PCB (se utilizan con NI 9234).

En cuanto a las mesas vibratorias, presenta las siguientes limitaciones:

Informe No. LM-PI-UP-03-2015	Fecha del emisión: 9 de octubre del 2015	Página 12 de 27
------------------------------	--	-----------------

- Dimensiones de plataforma superior: 0,46 x 0,46 m (18 x 18 in)
- Aceleración máxima: 24,5 m/s² (2,5g)
- Desplazamiento desde el punto medio: 76,2 mm (3 in)
- Peso máximo que soporta: 1290N (290 lb)
- Frecuencia máxima: 20Hz.

4.3. Leyes de similitud

Para desarrollar las leyes de similitud que indican las características que debe cumplir cualquier modelo a escala para que represente adecuadamente a su prototipo correspondiente, se exponen dos principios importantes: primero, se definen tres tipos posibles de modelos a escala con base a qué tan fielmente representa el modelo estructural al prototipo, y se indica a qué tipo corresponde el modelo de pila de un puente que se pretende desarrollar como parte de esta investigación; segundo, se describe el teorema de Buckingham como premisa para relacionar el prototipo y el modelo.

En cuanto a qué tan detalladamente representa un modelo estructural al prototipo, Harris & Sabnis (1999) definen tres tipos:

Modelos verdaderos: corresponden a aquellos que mantienen una similitud completa.

Modelos adecuados: mantiene una similitud de “primer orden”, es decir, satisfacen los requisitos más importantes. Por ejemplo, las características de momento flector para un marco rígido serían de primer orden, mientras que la fuerza axial y cortante corresponderían a características de “segundo orden” si lo que se analizan son las deformaciones.

Modelos distorsionados: no satisface una o varias características de primer orden.

Con respecto del teorema de pi de Buckingham, este indica que cualquier ecuación F, dimensionalmente homogénea, de la forma:

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$$

Donde X_i corresponde a las “n” variables dimensionales que la conforman. Puede ser expresada como una ecuación G, en función de m términos adimensionales π_i , productos de las “n” variables dimensionales, donde $m = n - r$ y r corresponde al número de dimensiones fundamentales involucradas:

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0$$

Este principio es fundamental para el desarrollo de las leyes de similitud, ya que para estructuras físicas como un prototipo y su modelo a escala reducida, que difieren solo en las magnitudes de las unidades utilizadas para medir las “n” variables X_i , las funciones G deben ser iguales y con base en dicha igualdad se determinan las relaciones de similitud requeridas (Harris & Sabnis, 1999). Más específicamente, en un modelo verdadero, todos los productos adimensionales son iguales para el prototipo y el modelo.

Para formar los términos “ π_i ” adecuados se debe tomar en cuenta que: todas las variables involucradas deben incluirse, los “m” términos tienen que ser independientes y no existe un único conjunto de términos “ π_i ” que sirvan como solución a un problema en particular.

En el diseño de experimentos a partir de análisis dimensional, primero es necesario identificar las cantidades o variables a tomar en cuenta, como parte de esta etapa inicial, Harris & Sabnis (1999) señalan un dilema importante:

- a) Si una variable física relevante se omite, puede que no se llegue a ningún resultado concreto o bien, se inducirá a error en los resultados obtenidos.
- b) Si no se incluye solo las variables físicas importantes, sino también algunas irrelevantes, la investigación experimental será más difícil de lo necesario.

Entonces, con base en Harris & Sabnis (1999) en el Cuadro 1 se definen cantidades a analizar en un modelo a escala verdadero, tal como el modelo de la pila de un puente que se desarrollará como parte de la presente investigación:

Cuadro 1. Lista Típica de variables o cantidades físicas

	Variable / Cantidad	Unidades
I	Largo	L
Q	Fuerza	F
M	Masa	FL ⁻¹ T ²
σ	Esfuerzo	FL ⁻²
ε	Deformación	-
a	Aceleración	LT ⁻²
δ	Desplazamiento	L
ν	Razón de Poisson	-
E	Módulo de elasticidad	FL ⁻²

Fuente: Harris & Sabnis, 1999

Con base en el Cuadro 1 tomando como variables independientes Q, I y a; se definen las siguientes variables adimensionales:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{Q}{El^2}, & \pi_2 &= \frac{Ma}{El^2} & (1) \\ \pi_3 &= \frac{\sigma}{E}, & \pi_4 &= \varepsilon \\ \pi_5 &= \frac{\delta}{l}, & \pi_6 &= \nu \end{aligned}$$

El modelo a desarrollar en la presente investigación procurará ser un modelo verdadero, por consiguiente, como se indicó, todos los productos adimensionales “ π_i ” serán iguales para el prototipo (π_{ip}) y el modelo (π_{im}). Entonces, si $S_i = i_p/i_m$ corresponde al factor de escala de la variable i, las condiciones de diseño y operación serían:

$$\begin{aligned} \pi_{ip} &= \pi_{im} \\ S_Q &= S_l^2 S_E, & S_M &= \frac{S_l^2 S_E}{S_a} \\ S_\sigma &= S_E, & S_\varepsilon &= 1 & (2) \\ S_\delta &= S_l, & S_\nu &= 1 \end{aligned}$$

Si no se logra la similitud verdadera con el prototipo, $\frac{\pi_{ip}}{\pi_{im}} = \alpha$, donde al ser $\alpha \neq 1$, se generan diferencias llamadas “efectos de tamaño”.

Como base para el modelo a escala que se pretende desarrollar en la cuarta etapa de la presente investigación, el Cuadro 2 indica la relación entre factores de similitud de la dimensión “i” (S_i) para modelos de concreto reforzado, tomado de Harris & Sabnis:

Cuadro 2. Resumen de factores de carga para modelos de concreto reforzado

	Parámetro de diseño	Dimensión	Modelo Verdadero	Modelo verdadero práctico
Propiedades relacionadas al material	Esfuerzo de concreto, σ_c	FL^{-2}	S_σ	1
	Deformación del concreto, ϵ_c	-	1	1
	Módulo del concreto, E_c	FL^{-2}	S_σ	1
	Relación de Poisson, ν_c	-	1	1
	Peso específico, γ_c	FL^{-3}	S_σ/S_l	$1/S_l$
	Esfuerzo de refuerzo, ϵ_r	-	1	1
	Deformación del refuerzo, ϵ_r	-	1	1
	Módulo del refuerzo, E_r	FL^{-2}	S_σ	1
	Esfuerzo de adherencia, u	FL^{-2}	S_σ	1
Geometría	Dimensión lineal, l	L	S_l	S_l
	Desplazamiento, δ	L	S_l	S_l
	Desplazamiento angular, β	-	1	1
	Área de refuerzo, A_r	L^2	S_l^2	S_l^2
Carga	Carga concentrada, Q	F	$S_\sigma S_l^2$	S_l^2
	Carga distribuida, ω	FL^{-1}	$S_\sigma S_l$	S_l
	Presión, q	FL^{-2}	S_σ	1
	Momento, M	FL	$S_\sigma S_l^3$	S_l^3

Fuente: Harris & Sabnis, 1999

4.4. Masa artificial

La masa artificial se utiliza como solución para modelos a escala reducida sometidos a carga lateral que requieren una masa mayor a la capacidad de carga vertical máxima de la mesa para cumplir las leyes de similitud. El modelo se diseña de forma que su masa sea menor o igual a la capacidad de la mesa y se vincula a una masa adicional, que se utiliza para restablecer el nivel de esfuerzo adecuado, la cual se conoce como masa artificial.

Dicha masa adicional influye en las cargas de gravedad y en la fuerza de inercia inducida sísmicamente, pero sin afectar las dimensiones del modelo ni su rigidez o esfuerzo lateral. Esto último se logra mediante el uso de uniones adecuadas entre la estructura que aporta la masa artificial y el modelo a escala, así como con el tipo de apoyo a utilizar.

Por ejemplo, Erochko, Christopoulos, Tremblay y Kim (2013) analizaron un marco de acero vinculado a un marco de masa artificial mediante vigas rígidas tipo HSS (secciones estructurales huecas), las cuales contenían una celda de carga para poder medir directamente la inercia aplicada horizontalmente y con esto la cortante en los pisos.

En cuanto a los apoyos, el Cuadro 2 señala los tipos de apoyo que se utilizaron en cinco investigaciones diferentes.

Para el caso de las pruebas a realizar en esta investigación se optó por el uso de masa artificial porque la capacidad máxima de carga vertical de las mesas de Quanser es de 1275 N lo cual limita el diseño de modelos experimentales a escala reducida. Por ejemplo el estudio de un puente sesgado a escala 1:30 para las dimensiones, con un factor de escala de 1 para el módulo de elasticidad, aceleración, esfuerzo y deformación y un factor de $(1/30)^2$ para la masa, implicó la adición de 750 kg de masa adicional por la diferencia entre el factor de masa y de dimensiones (Chegini & Palermo, 2014).

Cuadro 2. Resumen de cinco investigaciones diferentes en las se utilizó masa artificial

Título	Autor(es)	Descripción del sistema de masa artificial
Pruebas de mesas vibratorias para simular la respuesta ante sismos de estructuras de control pasivo (<i>Shaking table tests to simulate earthquake responses of passive control structures</i>)	Yamaguchi, M., Yamada, S., Nakashima, M. & Wada, A.	La masa de colgó de forma similar a un péndulo utilizando cuerdas de alambre.
Pruebas experimentales de modelos estructurales a gran escala y componentes utilizando una mesa vibratoria innovadora, simulación híbrida en tiempo real y técnicas multidireccionales de carga (<i>Experimental testing of large scale structural models and components using innovative shake table, dynamic, real-time hybrid simulation and multi-directional loading techniques</i>)	Tremblay, R., Léger, P., Rogers, C., Bouaanani, N., Massicotte, B., Khaled, A. & Lamarche, C.-P.	Los apoyos del marco de masa artificial con el suelo consistieron en rodillos. Para evitar rigidez lateral, se utilizaron apoyos cilíndricos similares a los de una mecedora (<i>rockers</i>) entre las columnas y las placas metálicas de cada piso del marco de masa artificial.
Pruebas en mesa vibratoria de dos modelos a escala de cuatro pisos de marcos de acero resistentes al momento (<i>Shaking table collapse tests of two scale models of a 4-story moment resisting steel frame</i>)	Lignos, D.G., Krawinkler, H., & Whittaker, A.S.	Se diseñó el marco de masa artificial como un mecanismo de modo que no poseyera resistencia lateral si se desvinculaba del marco de prueba al cual estaba unido por goznes que permitan rotación libre.
Pruebas en mesa vibratoria de un marco de acero pos-tensado y autocentrado (<i>Shake Table Testing of a Self-Centering Post-Tensioned Steel Frame</i>)	Wang, D. & Filiatrault, A.	Apoyos tipo mecedora en la base que funcionaron como apoyos de pines en la dirección del desplazamiento.
Pruebas en mesa vibratoria y simulación numérica de un marco auto-centrado y con arriostres disipadores de energía (<i>Shake table testing and numerical simulation of a self-centering energy dissipative braced frame</i>)	Erochko, J., Christopoulos, C., Tremblay, R. & Kim, H.-J.	Las placas de acero de cada piso del marco de masa artificial estaban unidas a las columnas mediante balancines libres de fricción. En la base, las columnas se montaron sobre un marco horizontal de acero que a su vez se apoyaba en rodillos de baja fricción, este marco contaba con elementos horizontales que lo vinculaban a la mesa vibratoria para que el marco fuese “capaz de imponer fuerzas laterales P-Delta consistentes con el marco de ensayo” (Erochko et al, 2013).

Fuente: Gómez, 2015

5. PLAN DE INVESTIGACIÓN

5.1. Proyecto de Investigación

La presente investigación se divide cuatro etapas: una etapa previa de investigación, dos etapas independientes que buscan validar el uso de de masa artificial para modelos elásticos y elastoplásticos, así como una etapa final para su aplicación en el análisis de una pila de un puente prototipo. A continuación se describe cada una de las etapas a ejecutar.

5.1.1. Etapa 1. Investigación de Casos en los Cuales se ha Requerido el Uso de Masa Artificial Debido a las Relaciones de Leyes de Similitud, en Modelos a Escalas Variables y con base en Prototipos Distintos.

Objetivo 1: Revisar la literatura y bibliografías disponibles sobre los conceptos relacionados con leyes de similitud, así como su aplicación en ejemplos concretos de modelos a escala.

Tiempo de ejecución: Junio 2015 – Agosto 2015

Alcance: Se determinarán las relaciones de escala que deben tener las variables físicas del modelo (carga, geometría, propiedades del material y diseño), según indican las leyes de similitud con base en el factor de escala de la dimensión lineal.

Objetivo 2: Revisar bibliografías disponibles sobre ejemplos concretos del uso de masa artificial en modelos a escala reducida, para determinar el tipo de vínculos modelo a escala - sistema de masa artificial que utilizan, así como los apoyos que usa dicho sistema.

Tiempo de ejecución: Junio 2015 – Agosto 2015

Alcance: Como parte de la recopilación bibliográfica para la presente investigación, se identificaron los tipos de apoyos que utilizan casos concretos de sistemas de masa artificial, para disminuir al máximo el aporte de estos en la rigidez o esfuerzo lateral del modelo, y se muestran en un cuadro resumen, con base en lo cual se determinó el tipo de apoyo más oportuno a utilizar en los modelos a ejecutar en el presente estudio.

Objetivo 3: Redacción de propuesta de investigación.

Tiempo de ejecución: Junio 2015 – Agosto 2015

Informe No. LM-PI-UP-03-2015	Fecha del emisión: 9 de octubre del 2015	Página 19 de 27
------------------------------	--	-----------------

Alcance: Se redacta la presente propuesta para formalizar el proyecto y destinar recursos de la Ley 8114 en investigación relacionada con infraestructura vial.

5.1.2. Etapa 2. Validación del Uso de Masa Artificial en Modelos Elásticos

Objetivo 1: Analizar el comportamiento de un modelo elástico de un grado de libertad sometido a vibraciones con la totalidad de su masa vinculada directamente a éste.

Objetivo 2: Analizar el comportamiento de un modelo elástico de un grado de libertad sometido a vibraciones con parte de su masa añadida como masa artificial.

Objetivo 3: Validar el uso de masa artificial en modelos elásticos de un grado de libertad sometidos a vibraciones en una mesa vibratoria

Tiempo de ejecución: Setiembre 2015 a Diciembre 2015

Alcance: Se utilizará un modelo de un grado de libertad de material acrílico para lograr un comportamiento elástico (ver Figura 1).

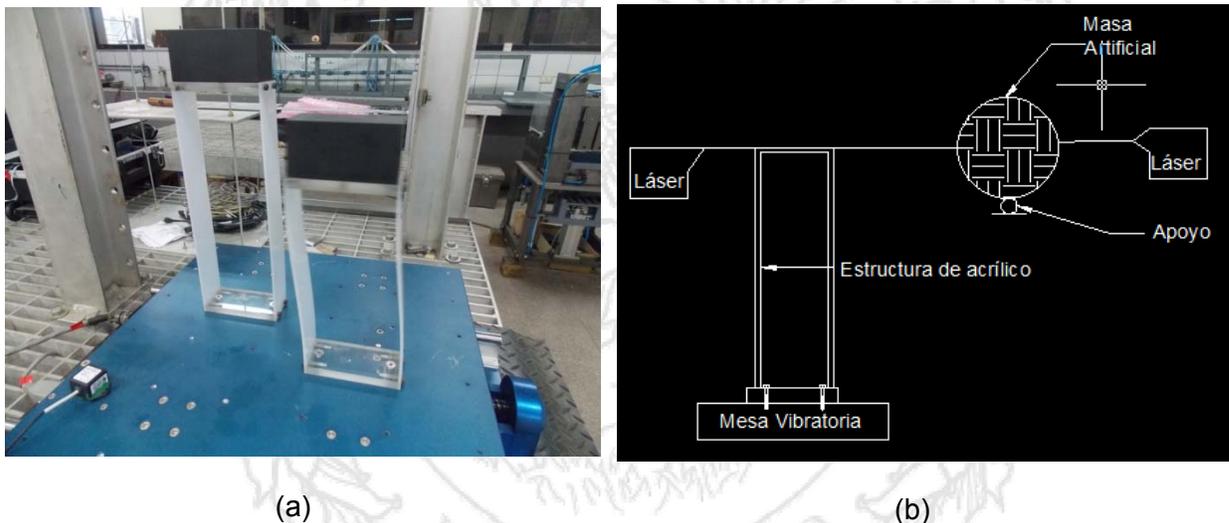


Figura 1. Representación del modelo elástico de un grado de libertad a analizar a) con la totalidad de su masa como parte del mismo b) con el uso de masa artificial

Se realizará una comparación entre el comportamiento de un modelo elástico de un grado de libertad sometido a vibraciones, si tiene el total de su masa colocada de forma convencional

Informe No. LM-PI-UP-03-2015	Fecha del emisión: 9 de octubre del 2015	Página 20 de 27
------------------------------	--	-----------------

como parte del modelo y su comportamiento si parte de la masa es añadida como masa artificial. El uso de masa artificial podrá ser validado en modelos elásticos si se obtiene como resultado comportamientos similares en ambos casos.

5.1.3. Etapa 3. Validación del Uso de Masa Artificial en Modelos Elastoplásticos

Objetivo 1: Analizar el comportamiento de un modelo elastoplástico simple de un grado de libertad sometido a vibraciones con la totalidad de su masa como parte de este.

Objetivo 2: Analizar el comportamiento de un modelo elastoplástico simple de un grado de libertad sometido a vibraciones con parte de su masa añadida como masa artificial.

Objetivo 3: Validar el uso de masa artificial en modelos elastoplásticos de un grado de libertad sometidos a vibraciones en una mesa vibratoria

Tiempo de ejecución: Enero 2016 a Marzo 2016

Alcance: El modelo será una estructura en voladizo de acero o PVC, ya que al ser un material dúctil se logra un comportamiento elástico-plástico (ver figura 2). Se realizará una comparación entre el comportamiento de un modelo elastoplástico de un grado de libertad sometido a vibraciones, si tiene el total de su masa colocada de forma convencional como parte del modelo y su comportamiento si parte de la masa es añadida como masa artificial. Se validará el uso de masa artificial en modelos elastoplásticos si se obtiene como resultado comportamientos similares en ambos casos.

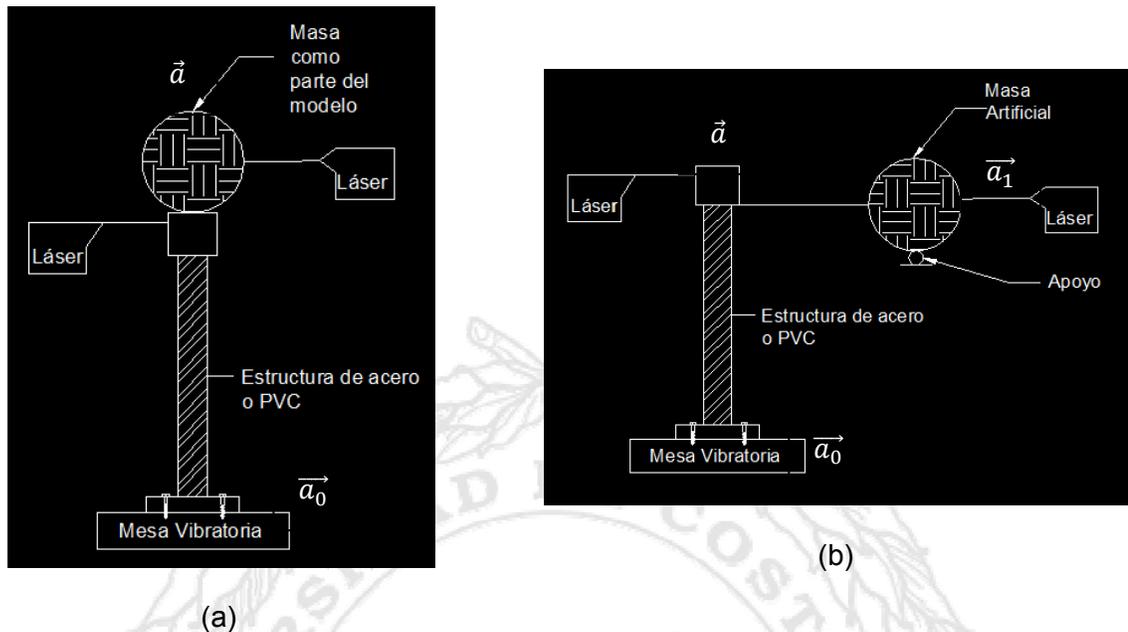


Figura 2. Representación del modelo elastoplástico de un grado de libertad a analizar a) con la totalidad de su masa como parte del mismo b) con el uso de masa artificial
 Fuente: Gómez, 2015

5.1.4. Etapa 4. Aplicación del uso de masa artificial para el análisis de la pila de un puente prototipo

Objetivo 1: Aplicar la teoría de leyes de similitud en modelos a escala reducida tomando como prototipo la pila del puente sobre el Río Torres en la Ruta 218 y un factor de escala 1:30.

Tiempo de ejecución: Marzo 2016 a Mayo 2016

Alcance: Se determinarán las condiciones de diseño y operación (valores de carga, geometría y propiedades del material) del modelo a elaborar, a partir de las leyes de similitud y el factor de escala 1:30 para la dimensión lineal.

Objetivo 2: Validar que los agregados, el cemento, el diseño de mezcla y el acero de refuerzo cumplan con las condiciones de diseño y operación que han sido determinadas por leyes de similitud

Tiempo de ejecución: Mayo 2016 a Julio 2016

Informe No. LM-PI-UP-03-2015	Fecha del emisión: 9 de octubre del 2015	Página 22 de 27
------------------------------	--	-----------------

Alcance: Se verificará el cumplimiento de las condiciones de diseño y operación por parte de los materiales mediante pruebas específicas para cada uno de ellos.

Objetivo 3: Utilizar masa artificial en el modelo a escala reducida que toma como prototipo la pila del puente sobre el Río Torres en la Ruta 218 y un factor de escala 1:30.

Objetivo 4: Analizar el comportamiento del modelo a escala 1:30 de la pila del puente sobre el Río Torres en la Ruta 218, ante vibraciones sinusoidales y simulaciones de sismos ocurridos en el territorio nacional.

Objetivo 5: Extrapolar los resultados obtenidos mediante el modelo a escala 1:30 de la pila del puente sobre el Río Torres, al comportamiento de la pila en sí a escala natural.

Tiempo de ejecución: Julio 2016 a Diciembre 2016

Alcance: Se construirá un modelo a escala 1:30 de la pila del puente sobre el Río Torres en la Ruta 218 (ver figura 3), el cual será sometido a vibraciones en la mesa vibratoria Shake Table II (Quanser ®) para analizar su comportamiento en un grado de libertad ante cargas sísmicas, con base en simulaciones de sismos que se han presentado en el territorio nacional. Los resultados obtenidos se extrapolarán para lograr estimar el comportamiento de la pila como tal.

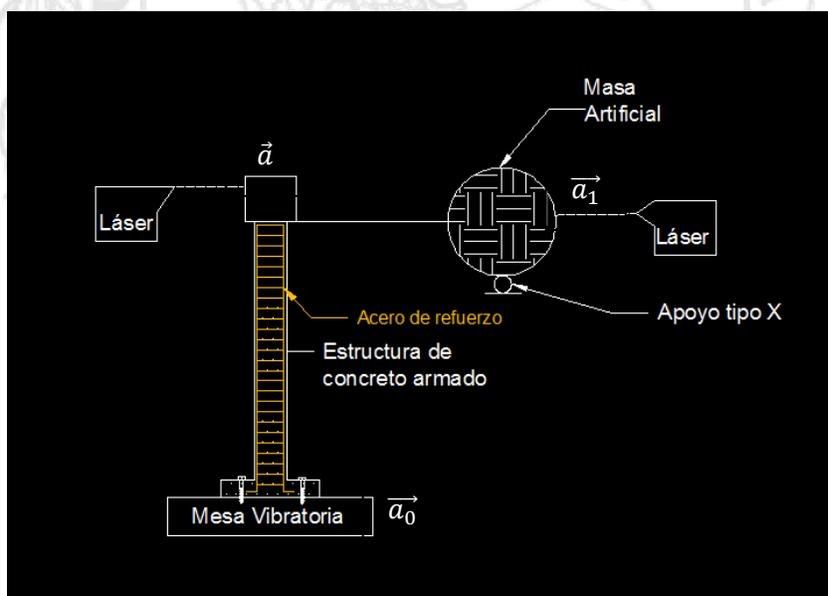


Figura 3. Diagrama del modelo de la pila del puente sobre el Río Torres. Fuente: Gómez, 2015

5.2. Cronograma

Año		2015						2016												
Mes		Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etapa 1		■	■	■																
Etapa 2					■	■	■	■												
Etapa 3									■	■	■									
Etapa 4	Objetivo 1										■	■	■							
	Objetivo 2												■	■	■					
	Objetivo 3-5														■	■	■	■	■	■



6. RECURSO HUMANO

Debido a que la presenta propuesta plantea la validación y uso de masa artificial en modelos a escala reducida enfocado al uso de estructuras de puentes como prototipos, será desarrollado primordialmente por representantes de la Unidad de Puentes (UP) del LanammeUCR y sus competencias asignadas mediante la Ley 8114.

Durante las cuatro etapas de la investigación se contará con la guía y coordinación del Ing. Pablo Agüero de la Unidad de Puentes. Para la primera etapa de investigación y redacción de la propuesta y para las etapas experimentales dos y tres, se contará con asistentes de la Unidad de Puentes, en concreto, Julissa Gómez, quien se encargará igualmente de la toma y procesamiento de datos a realizar en el laboratorio.

Posteriormente, la cuarta etapa se espera que sea utilizada para el desarrollo de una tesis de grado de la escuela de ingeniería civil de la Universidad de Costa Rica, por lo que se involucrará también algún estudiante interesado en el desarrollo de la investigación a manera de trabajo final de graduación.

Informe No. LM-PI-UP-03-2015	Fecha del emisión: 9 de octubre del 2015	Página 25 de 27
------------------------------	--	-----------------

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- a) El LanammeUCR adquirió las mesas vibratorias para ensayos a escala reducida en setiembre del 2013, desde entonces y durante los últimos dos años, los investigadores de la Unidad de Puentes del LanammeUCR se han concentrado en utilizarlas para adquirir conocimiento en el uso de sensores y de programación de adquisición de datos.
- b) El uso de masa artificial es una técnica que se utiliza en diferentes centros de investigación cuando el modelo requiere una masa superior a la capacidad de carga vertical máxima de la mesa vibratoria, por lo que se vuelve importante de estudiar como modo de hacerle frente a las limitaciones de capacidad de las mesas vibratorias adquiridas por el LanammeUCR.
- c) La Unidad de Puentes del LanammeUCR tiene como parte de sus objetivos el estudio y análisis de estructuras de puentes representativas de la realidad, lo cual conlleva continuamente nuevos retos como lo es la implementación de las técnicas de masa artificial.
- d) La investigación aquí propuesta plantea un tema poco desarrollado en el país, por lo que es preciso y oportuno la divulgación de los resultados obtenidos para que la validación del uso de masa artificial sea efectivo y sirva para futuras investigaciones con otro tipo de prototipos estructurales, es por eso que se plantea la culminación del proyecto con un trabajo final de graduación para el título de grado de la escuela de ingeniería civil de la Universidad de Costa Rica.

8. REFERENCIAS

1. Agüero, P & Castillo, R., (2014), *Programa De Instrumentación Y Monitoreo De Puentes A Escala Reducida, Congreso de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros Civiles: Costa Rica*
2. Chegini, Z. & Palermo, A. (2014) Investigation of the behaviour of small-scale bridge models using shake table tests, Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda
3. Erochko, J., Christopoulos, C., Tremblay, R. & Kim, H.-J., (2013) “*Shake table testing and numerical simulation of a self-centering energy dissipative braced frame*” International Association of earthquake engineerings.
4. Harris, H. G. & Sabnis, G. M. (1999). “Structural Modeling and Experimental Techniques ”. CRC Press LLC. Florida, Estados Unidos.
5. Lignos, D.G., Krawinkler, H., & Whittaker, A.S. (2008) “*Shaking table collapse tests of two scale models of a 4-story moment resisting steel frame*” 14ª conferencia mundial de Ingeniería Sísmica, Beijing, China.
6. Tremblay, R., Léger, P., Rogers, C., Bouaanani, N., Massicotte, B., Khaled, A. & Lamarche, C.-P., (n.d.), “Experimental testing of large scale structural models and components using innovative shake table, dynamic, real-time hybrid simulation and multi-directional loading techniques”, Ecole Polytechnique de Montreal.
7. Unidad de Puentes (2013). “Adquisición de mesas vibratorias para la docencia e investigación sobre el comportamiento dinámico de estructuras de puentes”. Informe LM-PI-UP-04-2013. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). San José, Costa Rica. Febrero 2013.
8. Wang, D. & Filiatrault, a. (2008). “Numerical and Experimental Studies of Self-Centering Post-Tensioned Steel Frames. University at Buffalo, New York.
9. Yamaguchi, M., Yamada, S., Nakashima, M. & Wada, A., (n.d.) “*Shaking table tests to simulate earthquake responses of passive control structures*”, Yokohama & Kyoto, Japón.