



“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE AISLADORES SÍSMICOS TIPO PÉNDULO DE
FRICCIÓN (FPS)”

LUIS ROBERTO JAIMES RODRIGUEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2014

“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE AISLADORES SÍSMICOS TIPO PÉNDULO DE
FRICCIÓN (FPS)”

PROYECTO DE GRADO
Modalidad de investigación para optar al título de
Ingeniero Civil

LUIS ROBERTO JAIMES RODRIGUEZ

Director de proyecto:
OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO
Ingeniero Civil, PhD

Co-director de proyecto:
RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ
Ingeniero Civil, PhD

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2014

DEDICATORIA

A ella, mi persona favorita

TABLA DE CONTENIDO

	<i>Pág.</i>
INTRODUCCIÓN	13
1 METODOLOGIA	14
1.1 Análisis dinámico de la estructura	14
1.2 Elaboración de los Modelos a Escala	14
1.3 Prueba Experimental	14
1.4 Análisis de los Resultados	15
2 RESULTADOS	15
2.1 Análisis Dinámico de la Estructura	16
2.1.1 Método de las masas concentradas	16
2.2 Diseño de los aisladores	18
2.2.1 Parámetros de diseño FPS	19
2.2.2 Construcción de los aisladores	20
2.3 Montaje experimental	22
2.4 Resultados obtenidos en el laboratorio	23
2.4.1 Estructura sin aisladores	24
2.4.1.1 Primer modo de vibración	24
2.4.1.2 Segundo modo de vibración	24
2.4.2 Estructura con aisladores	24
2.4.2.1 Primer modo de vibración	25
2.4.2.2 Segundo modo de vibración	25
2.4.3 Comparación de lo obtenido en laboratorio	25
3 CONCLUSIONES	26
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Características del acero utilizado</i>	15
Tabla 2 <i>Frecuencias de vibración de la estructura</i>	16
Tabla 3 <i>Modos de vibración</i>	16
Tabla 4 <i>Matriz de modos normalizados</i>	17
Tabla 5 <i>Periodos y frecuencias SAP2000 v15</i>	17
Tabla 6 <i>Porcentaje de error entre las frecuencias halladas por los 2 métodos.</i>	17
Tabla 7 <i>Posibles radios para los aisladores</i>	18
Tabla 8 <i>Parámetros péndulos de fricción</i>	20
Tabla 9 <i>Frecuencias de vibración halladas en la mesa sísmica</i>	23
Tabla 10 <i>Porcentaje de error entre las frecuencias halladas teórica y experimentalmente</i>	23
Tabla 11 <i>Máximas aceleraciones registradas para la estructura a una frecuencia de 1.4 Hertz sin aislamiento con los FPS</i>	24
Tabla 12 <i>Máximas aceleraciones registradas para la estructura a una frecuencia de 4.7 Hertz sin aislamiento con los FPS</i>	24
Tabla 13 <i>Máximas aceleraciones registradas para la estructura a una frecuencia de 1.4 Hertz con aislamiento con los FPS</i>	25
Tabla 14 <i>Máximas aceleraciones registradas para la estructura a una frecuencia de 1.4 Hertz con aislamiento con los FPS</i>	25
Tabla 15 <i>Comparación de amplitudes de aceleración con y sin aisladores para una frecuencia de 1.4 Hertz</i>	26
Tabla 16 <i>Comparación de amplitudes de aceleración con y sin aisladores para una frecuencia de 4.7 Hertz</i>	26

LISTA DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
Figura 1 <i>Diagrama esquemático de un Sistema de Péndulo de Fricción.</i>	13
Figura 2 <i>Modelo estructural del pórtico objeto de la prueba experimental</i>	15
Figura 3 <i>Vista en planta del pórtico a analizar, sobre la mesa sísmica.</i>	16
Figura 4. <i>Modos de vibración de la estructura. Izquierda modo 2. Derecha Modo 1 (fundamental).</i>	17
Figura 5. <i>Modos de vibración de la estructura en la dirección de análisis. Izquierda primer modo de vibración. Derecha segundo modo de vibración.</i>	17
Figura 6 <i>FPS del puente Benicia Martínez en California, Estados Unidos</i>	18
Figura 7 <i>Espectro de diseño para la ciudad de Bucaramanga considerando un suelo tipo A según la NSR 10</i>	18
Figura 8 <i>Modelo bilineal péndulo de fricción</i>	19
Figura 9 <i>Diagrama cuerpo libre, péndulo de fricción desplazado</i>	19
Figura 10 <i>Dimensiones para fabricación de los aisladores</i>	20
Figura 11 <i>Superficie cóncava esférica.</i>	21
Figura 12 <i>Deslizador de forma lenticular.</i>	21
Figura 13 <i>Vista en planta de 1 aislador construido.</i>	21
Figura 14 . <i>Aislador terminado (Superficie cóncava y deslizador)</i>	21
Figura 15 . <i>Montaje final de los 4 aisladores</i>	21
Figura 16 . <i>Pórtico metálico de 2 pisos sobre la mesa sísmica.</i>	22
Figura 17 Acelerómetro <i>instalado en la estructura</i>	22
Figura 18 <i>Tarjeta de adquisición de datos.</i>	22

Figura 19 <i>Cable coaxial</i>	22
Figura 20 <i>Mesa sísmica provista en el laboratorio de estructuras</i>	23
Figura 21 <i>Unidad de potencia hidráulica para mesa sísmica</i>	23
Figura 22 <i>Tarjera de manejo de señales para mesa sísmica</i>	23
Figura 23 <i>Amplitudes de aceleración registradas por los acelerómetros para una frecuencia de 1.4 Hertz</i>	24
Figura 24 <i>Amplitudes de aceleración registradas por los acelerómetros para una frecuencia de 4.7 Hertz</i>	24
Figura 25 <i>Amplitudes de aceleración registradas para la estructura sísmicamente aislada por los acelerómetros para una frecuencia de 1.4 Hertz</i>	25
Figura 26 <i>Amplitudes de aceleración registradas para la estructura sísmicamente aislada por los acelerómetros para una frecuencia de 4.7 Hertz con aisladores</i>	25

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE AISLADORES SÍSMICOS TIPO
PÉNDULOS DE FRICCIÓN¹

AUTORES: LUIS ROBERTO JAIMES RODRÍGUEZ**

PALABRAS CLAVES: Aislamiento Sísmico, Sistema de Péndulos de Fricción,
Sismo resistencia, Aislamiento de base, Prueba experimental,
Modelamiento SAP 2000

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de esta investigación fue evaluar la respuesta dinámica de un modelo a escala de una estructura metálica a la cual se le adicione el sistema de aislamiento de base conocido como péndulo de fricción (FPS, por sus siglas en inglés) diseñado de forma que pudiera ser instalado al pórtico ya existente de 2 pisos. La evaluación experimental de la respuesta dinámica de la estructura equipada con el FPS y sin este dispositivo se realizó ante señales periódicas realizando un barrido de frecuencias para hallar las más críticas para la estructura, estas fueron 1.4 Hertz y 4.7 Hertz, con estas se hicieron pruebas de 15 segundos con y sin los aisladores en la estructura por medio de acelerómetros provistos por el grupo de investigación IMNE se tomaron aceleraciones en diferentes puntos de la estructura para los 2 modos de vibración con y sin los aisladores y fueron registrados para realizar el debido tratamiento de estos. Los resultados muestran que, en este caso, se pueden obtener reducciones del 45% de los desplazamientos cuando se emplea el FPS. Este trabajo pertenece a una línea de trabajos con los cuales se planea probar de forma experimental los diferentes tipos de aislamiento sísmico para ver cuál es el más beneficioso para este tipo de estructuras.

¹Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo ingeniero civil, PhD. Co-director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández ingeniero civil, PhD.

ABSTRACT

TITLE: EXPERIMENTAL ANALYSIS EVALUATION OF OF FRICTION
PENDULUM TYPE SEISMIC INSULATORS²

AUTHORS: LUIS ROBERTO JAIMES RODRÍGUEZ **

KEY WORDS: Seismic Isolation, Friction Pendulum System, Earthquake
resistance, Insulation base, Experimental Testing, Modeling SAP2000

DESCRIPTION:

The objective of this research was to evaluate the dynamic response of a scale model of a metal structure to which was added the base isolation system known as friction pendulum. Designed so that it could be installed to the existing 2-floor porch. Experimental evaluation of the dynamic response of the structure equipped with FPS without this device was performing periodic signals with a frequency sweep to find the most critical for the structure, these were 1.4 and 4.7 Hertz, these tests were 15 seconds without the insulators in the structure by means of accelerometers provided by the research group IMNE accelerations were taken at different points of the structure for the 2 modes of vibration with and without insulators and were recorded to the proper treatment of these . The results show that , in this case , one can obtain reductions of 45% of the displacement when the FPS is used . This work belongs to a line of work with which it plans to test experimentally different types of seismic isolation to see which is most beneficial for this type of structures.

²Work Degree

** Faculty of Physicist – Mechanics, School of Civil Engineering, Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, PhD. Co-Director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández, PhD.

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE AISLADORES SÍSMICOS TIPO PÉNDULOS DE
FRICCIÓN**

LUIS ROBERTO JAIMES RODRÍGUEZ

Autor de Proyecto Código estudiante: 2070121
beto.jaimes@hotmail.com
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Industrial de Santander

OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO

Ingeniero Civil, M. Sc., PhD.
Director de Proyecto de Grado
ojbegam@uis.edu.co
Universidad Industrial de Santander

RICARDO ALFREDO CRUZ HERNANDEZ

Ingeniero civil, PhD.
Co-director de Proyecto de Grado
racruz@uis.edu.co
Universidad Industrial de Santander

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar la respuesta dinámica de un modelo a escala de una estructura metálica a la cual se le adiciono el sistema de aislamiento de base conocido como péndulo de fricción (FPS, por sus siglas en ingles). La evaluación experimental de la respuesta dinámica de la estructura equipada con el FPS y sin este dispositivo se realizó ante señales periódicas. Los resultados muestran que, en este caso, se pueden obtener reducciones del 45% de los desplazamientos cuando se emplea el FPS.

PALABRAS CLAVE: Aislamiento Sísmico, Sistema de Péndulos de Fricción, Sismo resistencia, Aislamiento de base, Prueba experimental, Modelamiento SAP 2000.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the dynamic response of a scale model of a metal structure, which was added the base isolation system know as friction pendulum (FPS). Experimental evaluation of the dynamic response of the structure equipped with FPS without this device was to periodic signals. The results show that, in this case, it can obtain 50% reduction of the acceleration when the FPS is used.

KEYWORDS: Seismic Isolation, Friction Pendulum System, Earthquake resistance, Insulation base, Experimental Testing, Modeling SAP2000

INTRODUCCIÓN

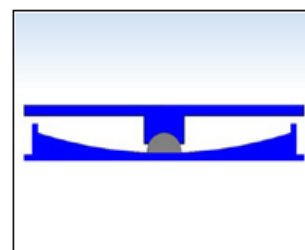
Colombia es un país que por su ubicación geográfica está localizado dentro de una de las zonas sísmicas más activas de la tierra, denominada el Anillo Circumpacífico, donde se ha identificado en el país la existencia de por lo menos 32 fallas geológicas activas [1], lo cual establece un contexto de riesgo de sismicidad para las obras civiles que se construyan, que con alta probabilidad serán exigidas por movimientos telúricos que imprimen movimientos dinámicos que deben ser absorbidos y tolerados exitosamente sin que conlleven afectaciones estructurales que comprometan su integridad estructural.

Así, en el diseño de estructuras civiles que puedan llegar a ser solicitadas dinámicamente se busca que las estructuras respondan de manera favorable dentro de ciertos límites de seguridad y desempeño para disminuir al máximo posible daños estructurales e incluso posibles pérdidas de vidas humanas. Estos límites se manifiestan en el diseño, condicionando los desplazamientos máximos, las dimensiones mínimas y definiendo el refuerzo requerido. [2] Entre las distintas opciones que se han ideado para dar respuesta a ello, se ha propuesto el uso de un sistema de péndulo de fricción (FPS, por sus iniciales en inglés: *Friction Pendulum System*), desarrollado y patentado por la empresa americana (San Francisco, California) *Earthquake Protection Systems Inc*

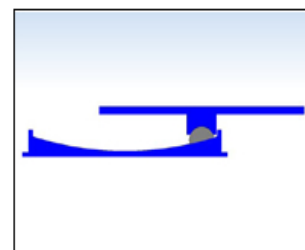
(www.earthquakeprotection.com). el cual consiste en un aislador sísmico conformado por una superficie esférica cóncava que permite el desplazamiento pendular de un deslizador de forma lenticular (Figura 1).

Luego, durante un evento sísmico el patín esférico se desliza a través de la superficie esférica simulando un movimiento de péndulo, con esto la estructura tiende a vibrar como elemento rígido ante el incidente telúrico y así las fuerzas de movimiento generadas por el sismo, al ser transmitidas a la estructura se reducen considerablemente.

Figura 1 Diagrama esquemático de un Sistema de Péndulo de Fricción.



Single Pendulum Bearing
Center Position



Single Pendulum Bearing
Maximum Credible Earthquake

Fuente:

www.earthquakeprotection.com/triple_vs_single_pendulum.html

De hecho, la investigación [3] ha permitido precisar que las funciones principales de los péndulos de fricción son:

1. Transmitir la carga vertical de la estructura hacia la cimentación.
2. Aislar la parte apoyada sobre el sistema introduciendo flexibilidad en el plano horizontal o limitando el cortante horizontal que puede ser transmitido.
3. Suministrar la rigidez suficiente para cargas como viento, carga vivía y sismos menores
4. Introducir amortiguamiento adicional al sistema.

Con ello y en términos del diseño, el uso de este tipo de aislador se simplifica debido a que el periodo y la capacidad de desplazamiento de la estructura se seleccionan de manera independiente.

En Colombia, para satisfacer estas exigencias, los elementos estructurales se proyectan de acuerdo a los procedimientos detallados en la NSR-10 [4] y muy pocas veces se recurre a su uso, debido a la falta de directrices y de experiencia en la aplicación de dispositivos externos a la estructura.

La práctica de implementar estos elementos al ser incorporados al sistema estructural ayuda a absorber y disipar la energía contenida en la excitación de origen telúrico (aumentan el amortiguamiento de la estructura) y disminuyen, en gran proporción, las fuerzas y movimientos laterales que son transmitidos al sistema. [5] Adicionalmente, estos dispositivos pueden modificar la frecuencia natural de la estructura con el fin de alejarla de las

frecuencias de excitación. [6]

En tal contexto, se propone en este trabajo diseñar y construir un aislador tipo FPS y realizar un análisis experimental de su comportamiento en un modelo a escala de un pórtico metálico de dos pisos sometido a excitaciones, siguiendo la experiencia ya reportada por Santamaría y Chaparro [7] en la que tal pórtico fue utilizado para analizar el uso de un amortiguador tipo disipador de columna líquida sintonizada (TLCD, por su nombre en inglés: *Tuned liquid column dampers*).

1. METODOLOGIA

Para efectos de lograr los objetivos propuestos y probar las hipótesis del estudio, se desarrolló el siguiente plan de acción.

1.1 Análisis dinámico de la estructura

Para determinar los parámetros modales de la estructura se llevó a cabo un análisis dinámico por el método de masas concentradas y un modelo numérico con el programa SAP2000 v15.

1.2 Elaboración de los Modelos a Escala

Con el fin de realizar el ensayo experimental, se elaboró el diseño y se hizo la construcción de un modelo a escala del aislador sísmico, según las características determinadas del pórtico en estudio.

1.3 Prueba Experimental

Mediante la utilización una mesa sísmica provista en el laboratorio del grupo de investigación INME de la Facultad de

Ingeniería de la UIS, se reprodujo una señal que fue aplicada al modelo a escala del pórtico con y sin el dispositivos aislador sísmico tipo péndulo de fricción, y mediante los acelerómetros se tomó el registro de las aceleraciones en diferentes puntos de la estructura.

1.4 Análisis de los Resultados

A partir de los resultados registrados por los acelerómetros durante el ensayo, se realizó el debido proceso de conversión de las valoraciones efectuadas, de manera que se obtuviesen los valores de aceleraciones, como parámetros de comparación entre los dos modelos ensayados.

2 RESULTADOS

El pórtico metálico a utilizar es el mismo utilizado por Santamaría y Chaparro [7] el cual está hecho de acero grado 60-ASTM A615 de $\frac{1}{4}$ " (ver tabla 1) de diámetro para los elementos estructurales como se muestra en la figura 2, en el primer y segundo piso se adicionaron unas masas a la estructura de 6.6535 [kg] y 6.7137 [kg] respectivamente, con el fin de aumentar la masa del sistema.

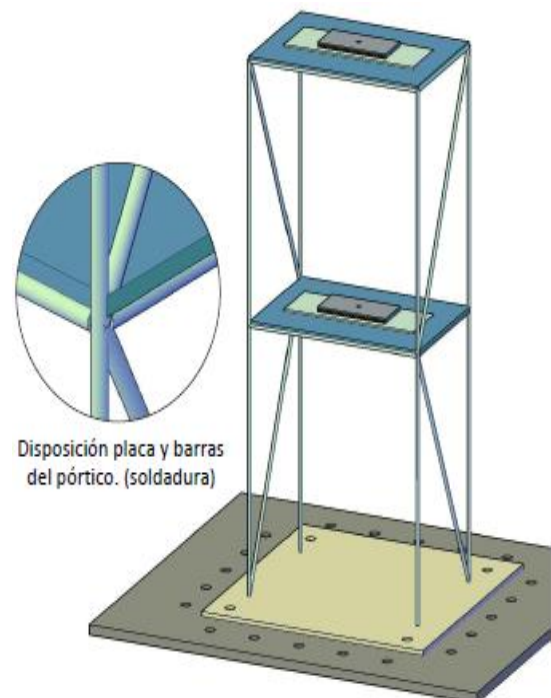
Cabe resaltar que este trabajo hace parte de una serie de proyectos realizados al interior del grupo IMNE en los cuales se busca evaluar experimentalmente los diferentes tipos de aisladores sísmicos, por esta razón se tomó el pórtico de la figura 2 para realizar los ensayos

Tabla 1. Características del acero utilizado

Características Acero grado 60-ASTM A615		
Diámetro equivalente	0.00635	m
Densidad	7850	kg/m ³
Módulo de Elasticidad	2.05E+11	Pa

El pórtico metálico tiene una altura por cada piso de 0.55 [m] para una altura total de 1.1 [m], sus dimensiones en planta son: en dirección Y 0.45 [m] y en dirección X 0.30 [m], medidas entre los ejes de los elementos estructurales

Figura 2 Modelo estructural del pórtico objeto de la prueba experimental

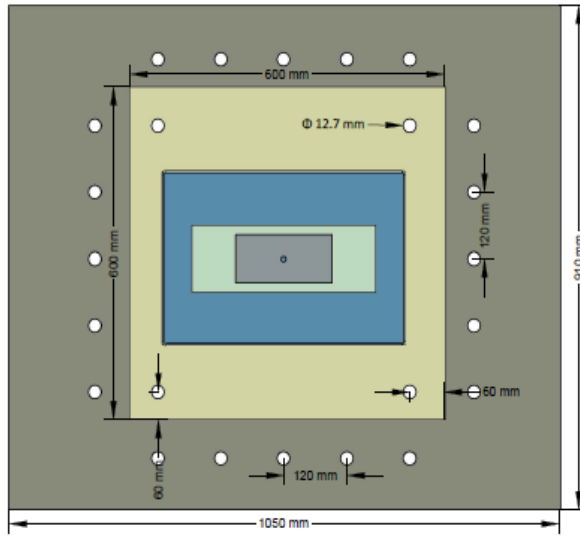


Fuente: CHAPARRO TARAZONA y SANTAMARÍA ARIZA (2012).

El pórtico fue soldado sobre una lámina de acero HR de calibre 4.5 cuadrada, de 60

[cm] de lado con perforaciones para poder ser fijado a la mesa sísmica (ver figura 3)

Figura 3 Vista en planta del pórtico a analizar, sobre la mesa sísmica.



Fuente: CHAPARRO TARAZONA y SANTAMARÍA ARIZA (2012).

2.1 Análisis Dinámico de la Estructura

2.1.1 Método de las masas concentradas

Dada la uniformidad del pórtico se realizó un análisis dinámico de masas concentradas, y con este se asume que los pisos son infinitamente rígidos en comparación a las columnas de la estructura, las masas se concentran en los entrepisos y las deformación de la estructura son independientes de las fuerzas axiales en las columnas [8]. Dadas estas condiciones, hallamos la matriz de rigidez condensada (1) y la matriz de masa de la estructura (2), las cuales quedan de la siguiente forma:

$$[K] = \begin{vmatrix} 8161.7124 & -3608.2060 \\ -3608.2060 & 2829.7232 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} N \\ m \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[M] = \begin{vmatrix} 14.508 & 0 \\ 0 & 14.287 \end{vmatrix} [Kg] \quad (2)$$

Con la ecuación (3) se despejó la frecuencia angular ω^2

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (3)$$

Tabla 2. Frecuencias de vibración de la estructura

Mod o	ω^2 (rad^2/s^2)	ω (rad/s)	F (Hertz)	T (s)
1	690.196	26.27	4.181	0.239
2	70.433	8.392	1.336	0.749

Reemplazando los valores de frecuencia angular en la ecuación (4) se hallaron los diferentes modos de vibración [8], en este caso de estudio serán 2 en dirección Y, esto debido a que la mesa sísmica solo maneja un grado de libertad

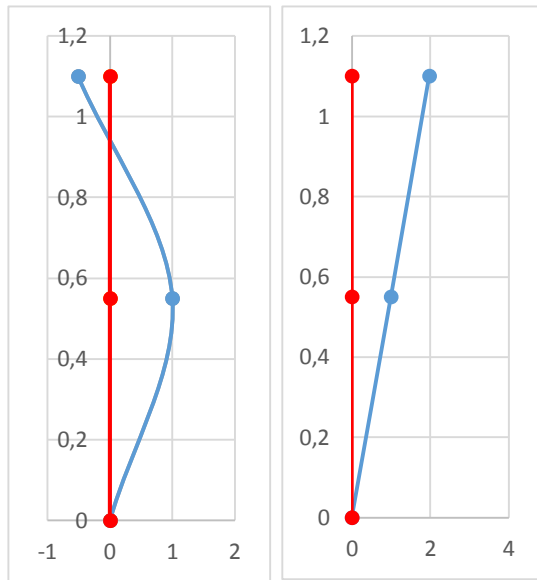
$$|[K] - \omega^2[M]|\{a\} = 0 \quad (4)$$

Tabla 3. Modos de vibración

	modo 1	modo 2
1er piso	1	1
2do piso	1.978786	-0.5131776

Con esto ya se pudo graficar los 2 modos de vibración que se podían obtener en la dirección de estudio de la estructura (ver figura 4)

Figura 4 Modos de vibración de la estructura. Izquierda modo 2. Derecha Modo 1 (fundamental).



$$\Phi_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=j}^n m_k a_{kj}^2}} \quad (5)$$

Tabla 4. Matriz de modos normalizados

Φ	modo 2	modo 1
1er piso	0.233950943	0.119140441
2do piso	0.120058373	0.235753447

Luego, se comprobaron las propiedades de ortogonalidad (ecuación 6 y 7), donde:

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = [I] \quad (6)$$

$$[\Phi]^T [K] [\Phi] = \begin{bmatrix} 690.196 & 0 \\ 0 & 70.433 \end{bmatrix} = [\omega^2] \quad (7)$$

Para realizar una comparación de este método se realizó un modelo en el programa SAP2000 v15. El cual arrojó para la dirección de estudio (figura 5) de

este trabajo los siguientes resultados:

Tabla 5. Periodos y frecuencias SAP2000 v15

Modo	T	F	ω	ω^2
	s	1/s	rad/s	(rad ² /s ²)
1	0.72698	1.376	8.643	74.698
2	0.24431	4.093	25.718	661.41

En la tabla 6 se muestra el porcentaje de error obtenido entre el método de las masas concentradas y el modelo matemático realizado en el programa de cálculo.

Figura 5 Modos de vibración de la estructura en la dirección de análisis. Izquierda primer modo de vibración. Derecha segundo modo de vibración.

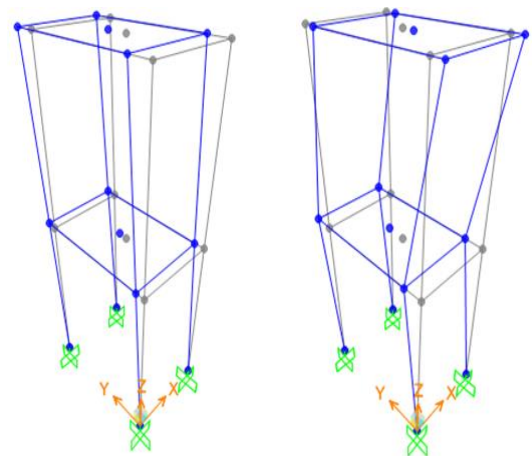


Tabla 6. Porcentaje de error entre las frecuencias halladas por los 2 métodos

Modo	M. concentradas	SAP2000	% Error
1	1.336	1.376	2.994
2	4.181	4.093	2.105

2.2 Diseño de los aisladores

El sistema de péndulo de fricción (FPS: *Friction Pendulum System*) es un aislador sísmico el cual consiste de una superficie esférica cóncava por la cual se desplaza un deslizador de forma lenticular (ver figura 6). Durante un sismo el patín esférico se desliza a través de la superficie esférica simulando un movimiento de péndulo a la estructura, con esto la estructura tiende a vibrar como elemento rígido ante el sismo y con esto las fuerzas transmitidas por el sismo se reducen considerablemente. El diseño de este tipo de aislador se simplifica debido a que el periodo y la capacidad de desplazamiento se seleccionan de manera independiente.

Figura 6 FPS del puente Benicia Martínez en California, Estados Unidos



El diseño de este tipo de aislador es sencillo debido a que características como, el periodo del aislador, la capacidad de carga vertical y el desplazamiento de diseño pueden seleccionarse de manera independiente.

El periodo del aislador se halla de acuerdo a la ecuación (8)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (8)$$

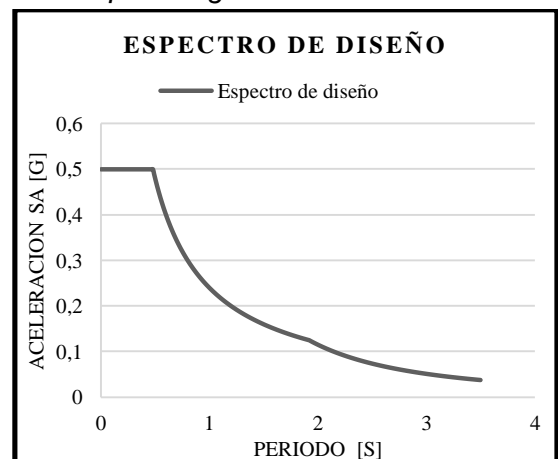
Donde R corresponde al radio de curvatura de la superficie esférica del péndulo de fricción y g corresponde al valor de la gravedad.

Para tomar un periodo de diseño para los aisladores se tuvo en cuenta en que región del espectro de diseño para la ciudad de Bucaramanga (figura 7), y se buscó un periodo que estuviese por encima de los periodos de vibración de la estructura previamente hallados, para esto se consideraron 4 posibles radios representados en la tabla 7.

Tabla 7. Posibles radios para los aisladores

Radio [m]	Periodo [s]
0.12	0.69492188
0.14	0.75060142
0.16	0.80242667
0.18	0.85110201

Figura 7 Espectro de diseño para la ciudad de Bucaramanga considerando un suelo tipo A según la NSR 10

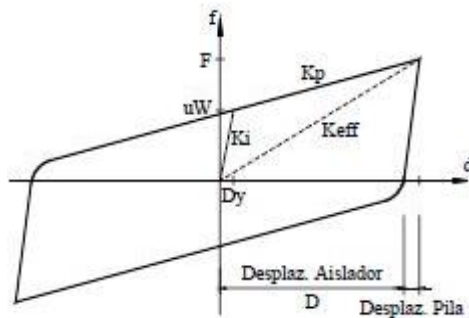


Dado lo anterior se decidió tomar como radio de diseño el de 18 cm ya que proporcionará un mayor periodo a la estructura y con esto menores aceleraciones a la estructura.

2.2.1 Parámetros de diseño FPS

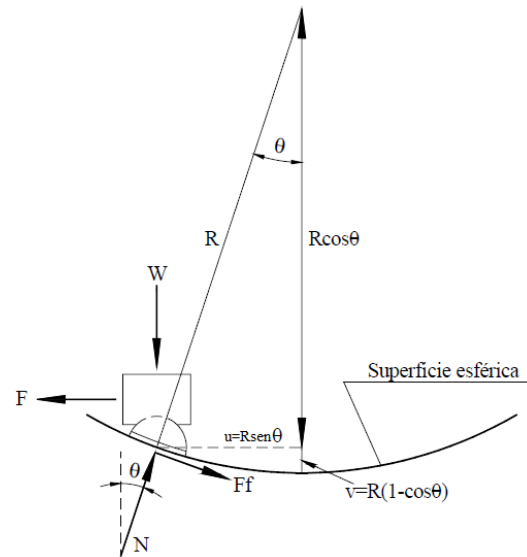
Las ecuaciones aquí presentadas muestran los parámetros que definirán el comportamiento de los aisladores tipo FPS. Estas son halladas a partir de un diagrama de histéresis del aislador o modelo bilineal de un péndulo de fricción (figura 8)

Figura 8 Modelo bilineal péndulo de fricción



A partir de la figura 8 y con un diagrama de cuerpo libre de un péndulo de fricción (figura 9) desplazado, se pueden obtener las siguientes ecuaciones [9]:

Figura 9 Diagrama cuerpo libre, péndulo de fricción desplazado



Fuente: MORENO LUNA, Daniel Mauricio; YAMIN, Luis; REYES ORTIZ, Juan Carlos [3]

- Fuerza característica de un péndulo de fricción

$$Q = \mu_s P_c \quad (9)$$

Donde: P_c corresponde a la fuerza aplicada sobre cada aislador y μ_s coeficiente de fricción [9].

- Coeficiente de fricción dinámico

$$\mu_s = f_{m\acute{a}x} - (f_{m\acute{a}x} - f_{m\acute{i}n})e^{-\xi|\dot{D}|} \quad (10)$$

Donde: ξ representa la inversa de deslizamiento características, algunos autores sugieren un valor de 2.54 s/in y \dot{D} representa la velocidad del aislador [9]

- Rigidez post-fluencia para un péndulo de fricción

$$k_p = \frac{P_c}{R} \quad (11)$$

Donde R representa el radio de curvatura del péndulo de fricción

- Rigidez elástica

$$k_e = 100k_p \quad (12)$$

- Desplazamiento de diseño

$$D_y = \frac{Q}{k_e - k_p} \cong \frac{\mu_s R}{100} \quad (13)$$

- Rigidez efectiva de un péndulo de fricción

$$k_{eff} = P_c \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu_s}{D_D} \right) \quad (14)$$

Donde: D_D es el desplazamiento de diseño

- Energía disipada por el péndulo de fricción

$$E_D = 4Q(D_D - D_y) \approx 4QD_D$$

$$E_D = 4\mu_s P_c D \quad (15)$$

- Amortiguamiento efectivo del péndulo de fricción

$$\beta_{eff} = \frac{E_D}{2\pi k_{eff} D^2} = \frac{2\mu_s}{\pi \left(\frac{D_D}{R} + \mu_s \right)} \quad (16)$$

- Fuerza en el aislador

$$F = \mu W + \left(\frac{W}{R} \right) D \quad (17)$$

Con las ecuaciones 9 a la 17 se hallaron los parámetros del péndulo de fricción para la curvatura seleccionada del aislador mostrados en la tabla 8, tomando en cuenta que el peso de la estructura cambia y se adicionó el peso de la placa metálica sobre la que está soldado el pórtico

Tabla 8. Parámetros péndulos de fricción

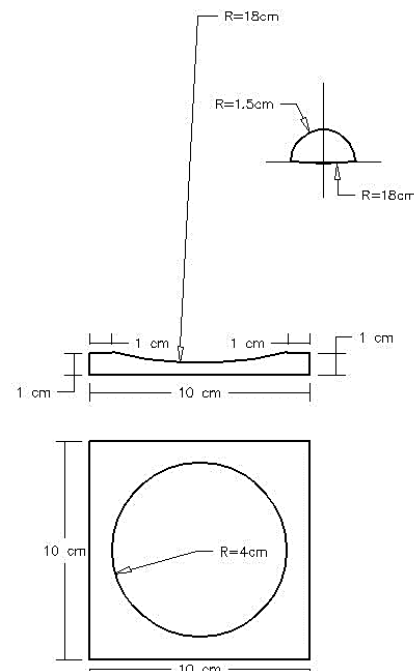
Diámetro disco deslizante	30	mm
R. curvatura	180	mm
W	579.45708	N
P_c	144.86427	N
$f_{m\acute{a}x}$	0.12	
$f_{m\acute{i}n}$	0.08	

ξ	2.54	s/in
\bar{D}	0.1	m/s
μ_s	0.12	
Q	17.38344933	N
k_p	0.8048015	N/mm
k_e	80.48015	N/mm
D_y	0.215996731	mm
D_D	15	mm
k_{eff}	1.964	N/mm
E_D	1043.007	
F_y	17.557	N
β_{eff}	37.571	%
Rigidez vertical	981.849	N/mm

2.2.2 Construcción de los aisladores

Con la información obtenida en la sección anterior se decidió tomar las siguientes dimensiones para la construcción final de los 4 aisladores que serán instalados a la estructura:

Figura 10 Dimensiones para fabricación de los aisladores



Fuente: Autor del proyecto

Los aisladores fueron construidos en acero A36 y luego fueron instalados sobre una lámina de acero HR de 3.5 mm de espesor para poder fijarlos a la mesa sísmica, adicional a esto se le instalaron unas láminas para limitar el movimiento y que el deslizador no excediera el desplazamiento máximo de diseño (ver figura 15). Adicional a esto se instalaron unos apoyos tubulares para soportar el pórtico.

En las figuras 11 a 14 se presentan los aspectos más relevantes de los péndulos diseñados para este trabajo.

Figura 11 Superficie cóncava esférica.



Figura 12 Deslizador de forma lenticular.



Figura 13 Vista en planta de 1 aislador construido.



Figura 14. Aislador terminado (Superficie cóncava y deslizador)



Figura 15. Montaje final de los 4 aisladores



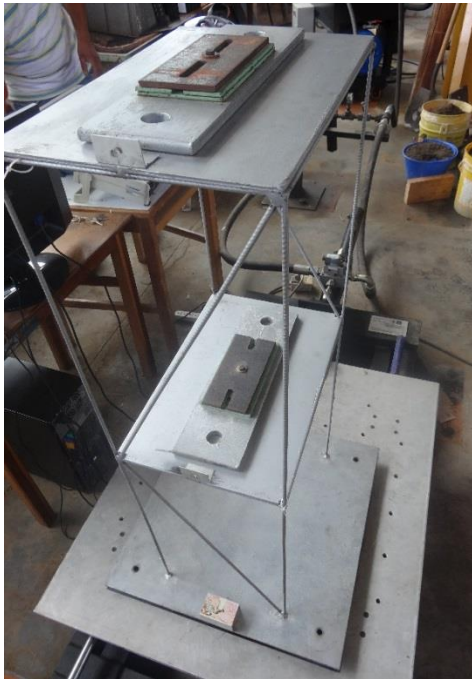
2.3 Montaje experimental

En el laboratorio se hallaron las frecuencias de vibración de la estructura haciendo un barrido de frecuencias a la estructura con una amplitud constante igual a 1.5 [cm] para los 2 montajes, con y sin aisladores.

Para el montaje experimental fueron necesarios los siguientes equipos (mostrados en las figuras 16 a 22)

- Pórtico metálico de 2 pisos (ver figura 16)

Figura 16. Pórtico metálico de 2 pisos sobre la mesa sísmica.



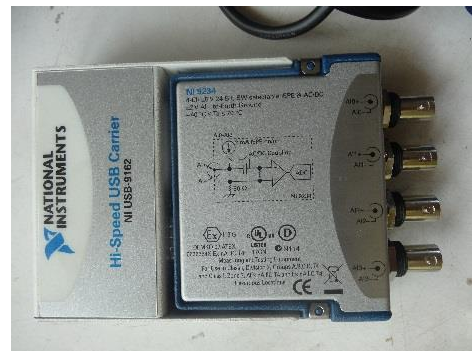
- 3 acelerómetros piezoeléctricos modelo 352C33 (ver figura 17)

Figura 17 Acelerómetro instalado en la estructura



- Tarjeta de adquisición de datos NI-USB 9234† con 4 canales, cada uno de los cuales soporta la conexión de un acelerómetro a través de un cable coaxial [7] (ver figura 18)

Figura 18 Tarjeta de adquisición de datos.



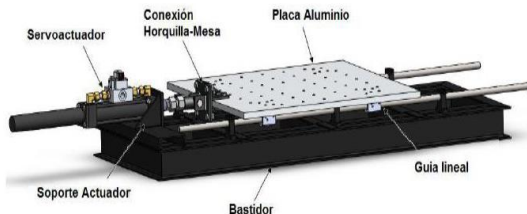
- Cable coaxial (ver figura 19)

Figura 19 Cable coaxial



- 1 mesa sísmica (ver figura 20)

Figura 20 Mesa sísmica provista en el laboratorio de estructuras



Fuente: Santamaría y Chaparro 2011 [7]

- Unidad de potencia hidráulica (ver figura 21)

Figura 21 Unidad de potencia hidráulica para mesa sísmica



- Tarjeta de manejo de señales para mesa sísmica (ver figura 22)

Figura 22 Tarjetera de manejo de señales para mesa sísmica



2.4 Resultados obtenidos en el laboratorio

Se realizaron mediciones haciendo un barrido de frecuencias a una amplitud constante de 1.5 [cm] durante 15 segundos por cada toma de datos buscando los modos de vibración de la estructura. Estas frecuencias se registran en la tabla 9.

Tabla 9. Frecuencias de vibración halladas en la mesa sísmica

Modo	Frecuencia [Hertz]
1	1.4
2	4.7

Se puede observar que hay cierta diferencia entre el modelo numérico y el experimental, los errores están registrados en la tabla 10

Tabla 10. Porcentaje de error entre las frecuencias halladas teórica y experimentalmente

Modo	M. concentradas	Mesa sísmica	% Error
1	1.336	1.4	4.7904
2	4.181	4.7	12.4133

Estas variaciones se pueden presentar debido a que puede existir una diferencia entre las propiedades de los elementos que fueron utilizados y las características con las que fueron hechos los modelos numéricos

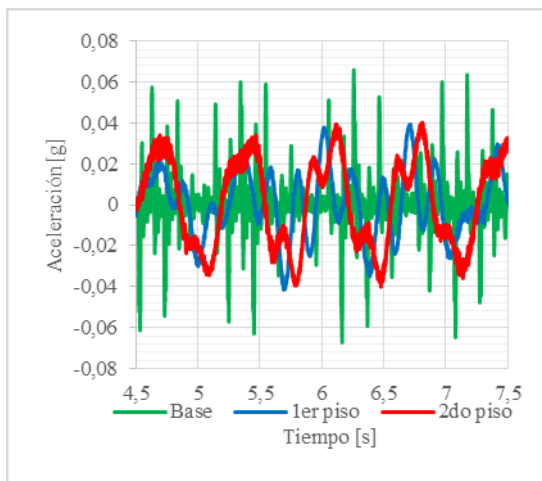
Las Usando estas dos frecuencias en la mesa sísmica por medio de los acelerómetros se obtuvo lo siguiente:

2.4.1 Estructura sin aisladores

2.4.1.1 Primer modo de vibración

Para la estructura sin el aislamiento de base con los FPS se obtuvo lo registrado en las figuras 23 y 24

Figura 23 Amplitudes de aceleración registradas por los acelerómetros para una frecuencia de 1.4 Hertz



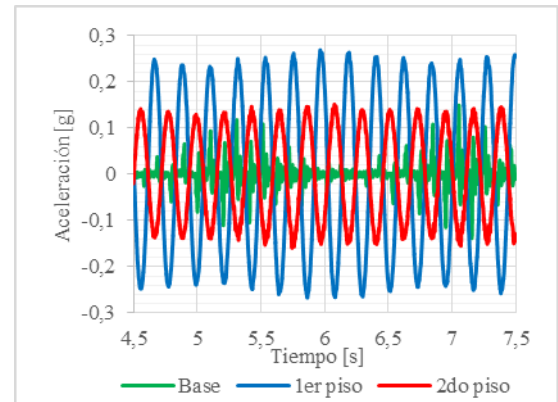
Los máximos obtenidos para esta condición de excitación se registraron en la tabla 11.

Tabla 11. Máximas aceleraciones registradas para la estructura a una frecuencia de 1.4 Hertz sin aislamiento con los FPS

Máxima amplitud	Aceleración [g]
base	0.06726444
1er piso	0.0414037
2do piso	0.04023993

2.4.1.2 Segundo modo de vibración

Figura 24 Amplitudes de aceleración registradas por los acelerómetros para una frecuencia de 4.7 Hertz



Los máximos obtenidos para esta condición de excitación se registraron en la tabla 12

Tabla 12. Máximas aceleraciones registradas para la estructura a una frecuencia de 4.7 Hertz sin aislamiento con los FPS

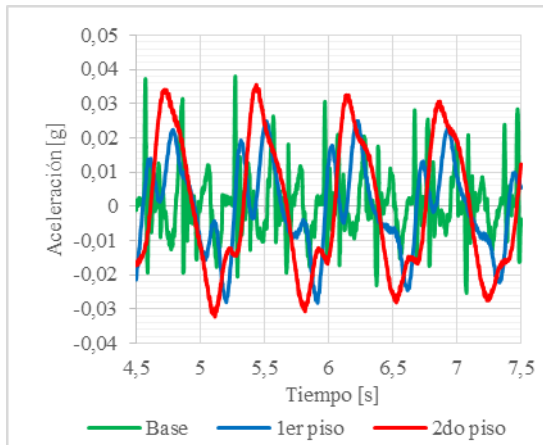
Máxima amplitud	Aceleración [g]
base	0.14973557
1er piso	0.26956342
2do piso	0.15894879

2.4.2 Estructura con aisladores

En esta parte se repetirá el procedimiento de la sección anterior pero esta vez la estructura estará equipada con los aisladores sísmicos tipo FPS y se obtuvo lo registrado en las figuras 25 y 26

2.4.2.1 Primer modo de vibración

Figura 25 Amplitudes de aceleración registradas para la estructura sísmicamente aislada por los acelerómetros para una frecuencia de 1.4 Hertz



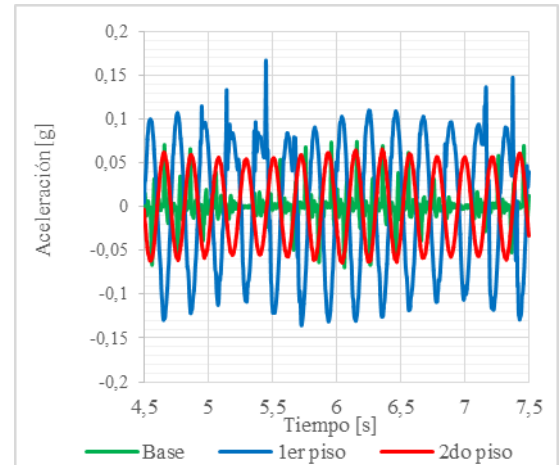
Los máximos obtenidos para esta condición de excitación se registraron en la tabla 13

Tabla 13. Máximas aceleraciones registradas para la estructura a una frecuencia de 1.4 Hertz con aislamiento con los FPS

Máxima amplitud	Aceleración [g]
base	0.03798515
1er piso	0.02825743
2do piso	0.03553025

2.4.2.2 Segundo modo de vibración

Figura 26 Amplitudes de aceleración registradas para la estructura sísmicamente aislada por los acelerómetros para una frecuencia de 4.7 Hertz con aisladores



Los máximos obtenidos para esta condición de excitación se registraron en la tabla 14

Tabla 14. Máximas aceleraciones registradas para la estructura a una frecuencia de 1.4 Hertz con aislamiento con los FPS

Máxima amplitud	Aceleración [g]
base	0.074562104
1er piso	0.167483621
2do piso	0.066045059

2.4.3 Comparación de lo obtenido en laboratorio

En las tabla 15 y 16 se registran las reducciones obtenidas en el laboratorio al instalar los aisladores sísmicos tipo FPS para las frecuencias de 1.4 [Hertz] y 4.7 [Hertz] respectivamente

Tabla 15. Comparación de amplitudes de aceleración con y sin aisladores para una frecuencia de 1.4 Hertz

	Acel. sin FPS [g]	Acel. con FPS [g]	% reducción Aceleraciones
Base	0.067	0.03799	43.52863118
1er piso	0.0414	0.0283	31.75143767
2do piso	0.0402	0.0355	11.7039965

Tabla 16. Comparación de amplitudes de aceleración con y sin aisladores para una frecuencia de 4.7 Hertz

	Acel. sin FPS [g]	Acel. con FPS [g]	% reducción Aceleraciones
base	0.1497	0.07456	50.20414722
1er piso	0.2696	0.1675	37.86856503
2do piso	0.1589	0.0660	41.55115556

Dado esto se ve que los aisladores disminuyeron las aceleraciones de la estructura entre un 11% a un 50% para una señal periódica a unas frecuencias de 1.4 y 4.7 [Hertz]

3 CONCLUSIONES

Se realizó un análisis dinámico de un pórtico metálico de dos pisos, por medio de un modelo analítico y uno numérico arrojando un error inferior al 3% lo cual permitió conocer las frecuencias de vibración de la estructura para hallarlas de forma experimental y esto arrojó un error del 12% esto debido a que posiblemente las características de modelamiento variaban de las características de los materiales utilizados en el modelo experimental

Se llevó a cabo la construcción de un juego de 4 péndulos de fricción de forma que pudieran ser instalados en el pórtico de estudio, este diseño se realizó de acuerdo a los parámetros mencionados en el capítulo 3.2.1

Las pruebas de laboratorio se realizaron en el laboratorio de estructuras de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander con equipos provistos por el grupo de investigación INME, las medidas se tomaron a determinadas frecuencias las cuales son las más críticas para la estructura

Los aisladores de base tipo péndulo de fricción funcionaron de manera correcta al ser instalados a la estructura, estos lograron reducciones en las aceleraciones del orden de 43% para el primer modo de vibración y hasta del 50% para el segundo modo vibración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BUSTAMANTE HUERTAS Edgar y SOTELO E. Javier. Conceptos básicos de sismo resistencia. Monografias.com. (2013). Documento en Internet. [En red]. [Consulta octubre de 2013]. Disponible en Web site: <<http://www.monografias.com/trabajos96/conceptos-basicos-sismo-resistencia/conceptos-basicos-sismo-resistencia.shtml#ixzz2izb1mzcw>>
- [2] GOMEZ Daniel, MARULANDA Johannio, THOMSON Peter. Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas. Universidad del valle, Cali, 2007.

[3] MORENO LUNA, Daniel Mauricio; YAMIN, Luis; REYES ORTIZ, Juan Carlos. Estudio experimental de aisladores sísmicos tipo péndulo de fricción en modelos a escala reducida. Universidad de los Andes. Trabajo de grado. Bogotá. 2006.

[4] REPUBLICA DE COLOMBIA MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente. NSR-10. Diario Oficial 26 de marzo de 2010. Documento en Internet. [En red]. [Consulta octubre de 2013]. Disponible en Web site: <http://camacol.co/sites/default/files/secciones_internas/NSR-10_diario_oficial_26marzo10.pdf>

[5] ORDÓÑEZ O. DANIEL. Estudio Comparativo de la respuesta estructural inelástica de edificios sismo resistentes con Aislamiento de Base. Tesis Magister. Revista Bit septiembre 2000.

[6] ROJAS R. Rafael, JARA G. José M. Aplicación de aisladores de base en la reducción de daños sísmicos. Ciencia Nicolaita. No. 30, Diciembre de 2004.

[7] CHAPARRO TARAZONA Andrea Carolina y SANTAMARÍA ARIZA Mónica PATRICIA. Evaluación experimental de un TLCD en un modelo a escala. Universidad Industrial de Santander. Trabajo de grado. Bucaramanga, 2012. Documento en Internet. [En red]. [Consulta octubre de 2013]. Disponible en Web site: <<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/2283/2/143333.pdf>>

[8] MALDONADO RONDÓN Esperanza, CHIO CHO Gustavo. Análisis sísmico e edificaciones. Universidad Industrial de Santander 2004.

[9] RICO PRADILLA Leocadio. Análisis del uso de aisladores de base para

mejorar el comportamiento sísmico en puentes de concreto simplemente apoyados. Caso de estudio: Viaducto La Flora. Universidad Industrial de Santander. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Civil. Bucaramanga, 2011.