

**DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO DE FLUIDO  
VISCOSO CON COMPORTAMIENTO LINEAL**

**CARLOS FELIPE ORDUZ SUÁREZ  
JENNY ALEXANDRA PUENTES TAMAYO**

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

**2015**

**DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO DE FLUIDO  
VISCOSO CON COMPORTAMIENTO LINEAL**

**CARLOS FELIPE ORDUZ SUÁREZ  
JENNY ALEXANDRA PUENTES TAMAYO**

**Trabajo de Grado para optar por el título de  
Ingeniero Civil**

**Director:**

**OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO  
Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D.**

**Co-Director:**

**RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ  
Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D.**

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

**2015**

“A mis fans”

Carlos Felipe Orduz Suárez

“A Dios que en toda su grandeza me permitió el privilegio de soñar con este gran logro; a mis padres que trabajaron inalcanzablemente por permitirme la posibilidad de luchar por este sueño; a mi familia que nunca dejó de creer en que alcanzaría la meta; a mis compañeros que permanecieron inquebrantables conmigo en este proceso; a la vida porque me permitió llegar a este momento a través de un camino lleno de aventura y experiencias que convierten esta etapa culminada en una de las más importantes en mi existencia, dejando entrever un futuro lleno de éxitos y nuevas metas por alcanzar”

Jenny Alexandra Puentes Tamayo

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Oscar Javier Begambre, de la Escuela de Ingeniería Civil, por su gran trabajo como docente durante el pregrado y su acompañamiento en la ejecución del proyecto.

Al profesor Ricardo Alfredo Cruz, de la Escuela de Ingeniería Civil, por su colaboración en el desarrollo del proyecto y el préstamo de los equipos usados en los ensayos.

Al profesor Carlos Borrás, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su colaboración en el desarrollo de los ensayos.

Al señor Fidel Núñez por su colaboración en la construcción del sistema de amortiguamiento.

Al señor Jaime Cadena Pardo, del Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil, por su colaboración en el desarrollo del ensayo de caracterización del sistema de amortiguamiento.

A los estudiantes Juan Carlos Núñez, Raphael Tortello y Carlos Andrés Reales, de la Escuela de Ingeniería Civil, por su colaboración en la construcción del sistema de amortiguamiento y el desarrollo de los ensayos.

A los estudiantes Diego Fernando Camacho y Daniel Felipe Verano, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su colaboración en el desarrollo de los ensayos.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN.....	16
1. MARCO TEÓRICO.....	18
1.1. BALANCE DE ENERGÍA EN UN SISTEMA CON UN GRADO DE LIBERTAD .....	18
1.1.1. Ecuación de movimiento.....	18
1.1.2. Ecuación de balance de energía. ....	19
1.2. SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA .....	21
1.2.1. Sistemas pasivos de protección sísmica.....	21
1.2.2. Sistemas activos de protección sísmica. ....	31
1.2.3. Sistemas semi-activos de protección sísmica.....	31
1.2.4. Sistemas híbridos de protección sísmica.....	32
2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	33
2.1. INTRODUCCIÓN.....	33
2.2. MODELO DEL PÓRTICO METÁLICO DE DOS PISOS.....	33

2.3.	DISEÑO DEL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO .....	35
2.3.1.	Diseño de acuerdo con el FEMA 450. ....	35
2.3.2.	Diseño de acuerdo con el FEMA 356. ....	35
2.4.	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO .....	38
2.5.	CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO .....	40
2.6.	MONTAJE EXPERIMENTAL DEL MODELO .....	42
3.	RESULTADOS .....	44
3.1.	ACELERACIONES DEL MODELO SIN EL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO .....	44
3.2.	ACELERACIONES DEL MODELO CON EL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO .....	45
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	46
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	46
4.2.	PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE LAS ACELERACIONES MÁXIMAS	46
4.3.	PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE LA MEDIAS CUADRÁTICAS DE LAS ACELERACIONES (RMS) .....	47
5.	CONCLUSIONES.....	48
	BIBLIOGRAFÍA.....	49

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Sistema con un grado de libertad (a) componentes del sistema; (b) diagrama de cuerpo libre. ....	18
Figura 2 Esquema de funcionamiento de un sistema pasivo de protección sísmica. ....	22
Figura 3 Aislador elastomérico.....	23
Figura 4 Aislador de péndulo de fricción FPS. ....	23
Figura 5 Amortiguador histerético TADAS. ....	24
Figura 6 Amortiguador viscoelástico. ....	25
Figura 7. Amortiguador de fluido viscoso. ....	26
Figura 8 Fuerza de amortiguamiento como función de la velocidad del pistón para diferentes valores de $\alpha$ .....	27
Figura 9 Desfase entre el desplazamiento y la velocidad para carga armónica. ....	28
Figura 10 (a) Edificio La Torre Mayor; (b) amortiguadores instalados en la edificación....	29
Figura 11 Esquema de una estructura con un sistema de amortiguamiento de masa sintonizada. ....	30
Figura 12 Esquema de funcionamiento de una estructura con un sistema activo de protección sísmica. ....	31
Figura 13 Pórtico metálico de dos pisos utilizado en los ensayos. ....	34
Figura 14 Esquema de instalación de un amortiguador. ....	37
Figura 15 (a) Amortiguador de fluido viscoso; (b) pistón; (c) cabeza del pistón; (d) retenedor plástico; (e) tapón superior del cilindro; (f) tapón inferior del cilindro.....	39
Figura 16 Montaje del amortiguador en el banco de carga 810 Material Testing System. ....	40
Figura 17 Fuerza aplicada por el banco de carga contra velocidad del pistón. ....	41
Figura 18 Montaje experimental del modelo con el sistema de amortiguamiento.....	42
Figura 19 Acelerómetro 352c33 de PCB Piezotronics.....	43
Figura 20 Aceleraciones del modelo antes de la instalación del sistema de amortiguamiento (a) 0,90 Hz; (b) 1,35 Hz; (c) 2,85 Hz; (d) 3,80 Hz; (e) 6,00 Hz. ....	44

Figura 21 Aceleraciones del modelo después de la instalación del sistema de amortiguamiento (a) 0,90 Hz; (b) 1,35 Hz; (c) 2,85 Hz; (d) 3,80 Hz; (e) 6,00 Hz. .... 45

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Frecuencias y periodos para los primeros dos modos de vibración del modelo. .	34
Tabla 2 Aceleraciones máximas del modelo antes (a) y después (b) de la instalación del sistema de amortiguamiento y porcentajes de reducción de la aceleración. ....	46
Tabla 3 Aceleraciones RMS del modelo antes (a) y después (b) de la instalación del sistema de amortiguamiento y porcentajes de reducción de la aceleración. ....	47

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO DE FLUIDO VISCOSO CON COMPORTAMIENTO LINEAL\*

**AUTORES:** CARLOS FELIPE ORDUZ SUÁREZ  
JENNY ALEXANDRA PUENTES TAMAYO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Diseño sismo resistente, disipación de energía, sistema de protección sísmica, sistema pasivo, sistema de amortiguamiento de fluido viscoso.

**DESCRIPCIÓN:** El propósito del diseño sismo resistente tradicional consiste en crear estructuras capaces de disipar la energía de un sismo por medio del daño en elementos estructurales y no estructurales que no comprometan su estabilidad. De esta forma, aunque se requiera su posterior demolición, se espera que la estructura no colapse debido a un sismo. Por otra parte, existen edificaciones de atención a la comunidad para las que este enfoque no es suficiente, pues además de garantizar su supervivencia se deben reducir los daños causados por sismos. Es por esto que se han desarrollado sistemas para la protección sísmica de edificaciones. Uno de estos sistemas es el de amortiguamiento de fluido viscoso, que reduce los desplazamientos de una estructura sin generar en ella esfuerzos adicionales. El objetivo de este estudio consistió en evaluar la respuesta dinámica de un modelo a escala de un pórtico metálico de dos pisos antes y después de la instalación de un sistema de amortiguamiento de fluido viscoso con comportamiento lineal diseñado y construido por los autores. Se utilizó una mesa vibratoria para generar un movimiento armónico en la base del modelo y se registraron las aceleraciones de ambos pisos. Los resultados de los ensayos arrojaron reducciones de hasta 78,03% de las aceleraciones en el modelo debido a la instalación del sistema de amortiguamiento.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo. Co-director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández.

## ABSTRACT

**TITLE:** EXPERIMENTAL DESIGN OF A FLUID VISCOUS DAMPING SYSTEM WITH LINEAR BEHAVIOR\*

**AUTHORS:** CARLOS FELIPE ORDUZ SUÁREZ  
JENNY ALEXANDRA PUENTES TAMAYO\*\*

**KEYWORDS:** Seismic resistant design, energy dissipation, seismic protection system, passive system, viscous fluid damping system.

**DESCRIPTION:** The purpose of the traditional seismic resistant design consists in creating structures which can dissipate the energy from an earthquake through the damage of structural and non structural elements without compromising its stability. On this way, although it is required its later demolition, it is expected that the structure does not collapse due to an earthquake. On the other hand, there are community attention edifications for which this approach is not enough, because in addition to guarantee its stability it is necessary to reduce the damages due to earthquakes. For this reason systems for the seismic protection of edifications have been developed. One of these systems is the fluid viscous damping system, which allows to reduce the displacements of a structure without generating additional stresses. The objective of this research was to evaluate the dynamic response of a two-floor metallic frame model before and after the installation of a fluid viscous damping system with linear behavior designed and built by the authors. A vibrating table was used to generate an harmonic movement in the base of the model and they were recorded both of the floors accelerations. The results obtained in the tests show reductions of up to 78,03% of the accelerations in the model by the installations of the damping system.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physics-Mechanics Engineering. Civil Engineering School. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo. Co-director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente en el territorio colombiano las edificaciones se deben diseñar y construir de acuerdo con los requisitos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10<sup>1</sup>. El diseño a partir de estos requisitos consiste en proveer a la estructura de una combinación de rigidez y ductilidad que garantice un comportamiento adecuado ante las cargas de diseño. Para sismos leves se espera que la estructura permanezca en el rango elástico, sin embargo, para sismos severos es posible que se supere este límite<sup>2</sup>. Por esta razón los ingenieros se apoyan en las propiedades de los materiales, de manera que la edificación pueda sufrir daños estructurales y no estructurales sin comprometer su estabilidad<sup>3</sup>. Es decir, aunque pueda quedar inutilizable, se espera que luego de un sismo la edificación se mantenga en pie. Sin embargo, existen edificaciones para las que este enfoque no es suficiente, pues deben permanecer en servicio después de un evento sísmico (como las edificaciones de atención a la comunidad, por ejemplo)<sup>4</sup>. Por esta razón es importante el desarrollo de mecanismos que, además de evitar el colapso de la estructura, le provean de medios de defensa ante sismos importantes. Esto se puede lograr por medio de los sistemas de protección sísmica que, aunque es un tema poco estudiado en Colombia, en países como Chile con el NCh 2745<sup>5</sup> y los Estados Unidos de América con el FEMA 450<sup>6</sup> (entre otros) se ha reglamentado su uso en edificaciones.

---

<sup>1</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 926 (19, marzo, 2010). Modificado por el Decreto Nacional 092 de 2011. Por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismo resistentes NSR-10. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2010.

<sup>2</sup> CONSTANTINO, Michael C.; DARGUSH, Gary F.; SOONG, Tsu T. Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit. Buffalo: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1998.

<sup>3</sup> PARDO VERDUGO, Juan Pablo. Control de respuesta dinámica de estructuras mediante el uso de disipadores de energía de fluido viscoso del tipo lineal. Trabajo de grado Ingeniero Civil en Obras Civiles. Valdivia: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles, 2007.

<sup>4</sup> CONSTANTINO, Michael C.; DARGUSH, Gary F.; SOONG, Tsu T. Op. cit.

<sup>5</sup> INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (Chile). Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica. NCh 2745. Santiago: El instituto, 2013.

<sup>6</sup> FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for the new buildings and other structures. FEMA 450. 2003 Edition. Washington D.C.: Building Seismic Safety Council, 2004.

El objeto de este estudio se enmarca dentro del tema de la protección sísmica de edificaciones y consistió en realizar un análisis experimental por medio del diseño y la construcción de un sistema de amortiguamiento de fluido viscoso con comportamiento lineal, con el fin reducir las aceleraciones de un modelo a escala de un pórtico metálico de dos pisos sometido a un movimiento armónico de base.

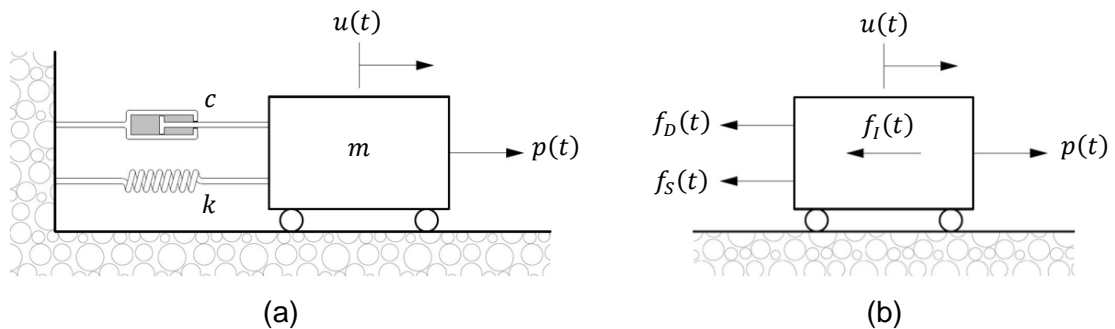
Este documento se compone de cinco partes: en la primera parte se abordan los sistemas con un grado de libertad, el concepto de energía en estructuras y los sistemas de protección sísmica; en la segunda parte se presenta el procedimiento de diseño del sistema de amortiguamiento y la metodología experimental; en la tercera parte se muestran los resultados obtenidos en los ensayos del modelo; en la cuarta parte se presenta el análisis de los resultados y en la quinta parte se presentan las conclusiones del estudio.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. BALANCE DE ENERGÍA EN UN SISTEMA CON UN GRADO DE LIBERTAD

En la Figura 1.(a) se muestra un sistema con un grado de libertad. Este sistema consiste en un bloque con masa  $m$ , un resorte con rigidez  $k$  y un amortiguador viscoso con constante de amortiguamiento  $c$ . El bloque se apoya sobre rodillos que solo le permiten moverse en dirección de  $u(t)$ . La fuerza  $p(t)$  representa todas las cargas externas que actúan sobre el sistema<sup>7</sup>. Las fuerzas sobre el bloque se muestran en la Figura 1(b).

Figura 1 Sistema con un grado de libertad (a) componentes del sistema; (b) diagrama de cuerpo libre.



Fuente: CLOUGH y PENZIEN. Dynamics of structures. 2003<sup>8</sup>.

**1.1.1. Ecuación de movimiento.** A partir del diagrama de cuerpo libre en la Figura 1(b), de acuerdo con la segunda ley de Newton se tiene<sup>9</sup>:

$$f_i(t) + f_D(t) + f_S(t) = p(t) \quad (1)$$

<sup>7</sup> CLOUGH, Ray W.; PENZIEN, Joseph. Dynamics of structures. 3 edición. Berkeley: Computers and Structures, Inc., 2003.

<sup>8</sup> Ibid.

<sup>9</sup> Ibid.

donde  $f_I(t)$  es la fuerza de inercia de acuerdo con el principio de D'Alambert:

$$f_I(t) = m\ddot{u}(t) \quad (2)$$

$f_D(t)$  es la fuerza de amortiguamiento para un amortiguador viscoso:

$$f_D(t) = c\dot{u}(t) \quad (3)$$

y  $f_S(t)$  es la fuerza elástica según la ley de Hooke:

$$f_S(t) = ku(t) \quad (4)$$

Reemplazando las ecuaciones (2) a (4) en la ecuación (1) se tiene la ecuación de movimiento del sistema con un grado de libertad<sup>10</sup>:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p(t) \quad (5)$$

donde  $\ddot{u}(t)$  y  $\dot{u}(t)$  son la aceleración y la velocidad de la estructura, respectivamente.

**1.1.2. Ecuación de balance de energía.** Para garantizar su supervivencia, una estructura debe disipar la totalidad de la energía que ingresa en ella durante un evento sísmico. La ecuación de balance de energía de la estructura se obtiene integrando cada uno de los términos de la ecuación (5) como se presenta a continuación<sup>11</sup>:

$$E_K + E_D + E_S = E_T \quad (6)$$

donde  $E_K$  es la energía cinética:

$$E_K = \int m\dot{u}(t)du \quad (7)$$

---

<sup>10</sup> Ibid.

<sup>11</sup> DARGUSH, G. F.; SOONG, T. T. Passive energy dissipation and active control. Buffalo: State University of New York, 1999.

$E_D$  es la energía de amortiguamiento natural:

$$E_D = \int c\dot{u}(t)du \quad (8)$$

$E_S$  es la energía de deformación elástica:

$$E_S = \int ku(t)du \quad (9)$$

y  $E_T$  es la energía de entrada del sismo:

$$E_T = \int p(t)du \quad (10)$$

La ecuación (6) es válida para estructuras en el rango elástico. Sin embargo, cuando la energía de entrada del sismo supera la capacidad de disipación de energía de la estructura, aparecen deformaciones inelásticas. Por esta razón la rigidez de la estructura no es más una constante y la fuerza elástica en la ecuación (1) se reemplaza por una función más general,  $g_S(t)$ , que incorpora efectos histeréticos<sup>12</sup>. De esta forma la ecuación (9) se modifica como sigue:

$$E_S = \int g_S(t)du = E_{SE} + E_{SP} \quad (11)$$

donde  $E_{SE}$  representa la energía de deformación elástica recuperable y  $E_{SP}$  representa la energía de deformación plástica disipada.

Finalmente, reemplazando la ecuación (11) en la ecuación (6), se obtiene la ecuación de balance de energía para estructuras en el rango plástico<sup>13</sup>:

$$E_K + E_D + E_{SE} + E_{SP} = E_T \quad (12)$$

---

<sup>12</sup> Ibid.

<sup>13</sup> Ibid.

## 1.2. SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

El diseño sísmo resistente tradicional consiste en proveer a la estructura de una combinación de rigidez y ductilidad, de manera que parte de la energía que entra durante un sismo se disipe a través del daño en elementos estructurales y no estructurales sin comprometer la estabilidad de la estructura<sup>14</sup>. Este enfoque no es suficiente cuando se requiere que una edificación permanezca en funcionamiento luego de un evento sísmico de gran magnitud. Por esta razón, desde hace algunos años, se ha comenzado a incorporar sistemas de protección sísmica en las estructuras. Un sistema de protección sísmica consiste en una serie de dispositivos que se encargan de disipar parte de la energía que entra a la estructura durante un sismo. De esta forma se disminuye la demanda de capacidad de disipación de energía de la estructura.

En la actualidad se ha desarrollado un gran número de sistemas de protección sísmica, aplicados con éxito en diferentes proyectos alrededor del mundo. Ejemplos de esto son la central de emergencia Fire Command and Control Facility, en Los Ángeles, construida con un sistema de aislamiento de base y el edificio Kyobashi Seiwa, en Tokio, que cuenta con un sistema activo de protección sísmica<sup>15</sup>.

Los sistemas de protección sísmica se clasifican en cuatro grupos: los pasivos, los activos, los semi-activos y los híbridos<sup>16</sup>.

**1.2.1. Sistemas pasivos de protección sísmica.** Los sistemas pasivos de protección sísmica son dispositivos principalmente mecánicos que no requieren de una fuente externa de energía para su funcionamiento. En estos sistemas las fuerzas que contrarrestan el efecto del sismo se producen en los puntos de unión entre los elementos del sistema y la estructura, debido al movimiento de esos puntos durante el sismo<sup>17</sup>. En la Figura 2 se muestra el esquema de funcionamiento de un sistema pasivo de protección sísmica.

---

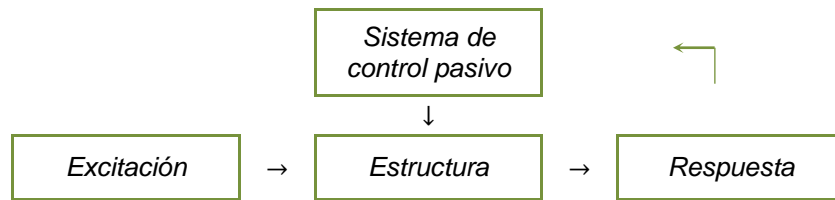
<sup>14</sup> PARDO VERDUGO. Op. cit.

<sup>15</sup> Ibid.

<sup>16</sup> Ibid.

<sup>17</sup> CONSTANTINO, Michael C.; DARGUSH, Gary F.; SOONG, Tsu T. Op. cit.

Figura 2 Esquema de funcionamiento de un sistema pasivo de protección sísmica.



Fuente: CONSTANTINO, Michael C.; DARGUSH, Gary F.; SOONG, Tsu T. Energy dissipation systems for structural design and retrofit, 1998<sup>18</sup>.

Los sistemas pasivos de protección sísmica se clasifican en tres grupos: los de aislamiento de base, los de disipación de energía y los de masa sintonizada<sup>19</sup>.

**1.2.1.1. Sistemas de aislamiento de base.** Los sistemas de aislamiento de base reducen la energía de entrada del sismo, desacoplando parcialmente la fundación de la estructura y el suelo de soporte. Estos sistemas disipan energía en forma de calor, generado por la fricción entre sus componentes<sup>20</sup>. Ejemplos de estos sistemas son los aisladores elastoméricos y los de péndulo de fricción FPS, por sus siglas en inglés: Friction Pendulum System.

Un aislador elastomérico está compuesto generalmente por láminas de neopreno y acero intercaladas, con espesores entre 8 mm y 20 mm para el neopreno y entre 2 mm y 4 mm para el acero. Algunos aisladores elastoméricos son reforzados con un núcleo de plomo. En la Figura 3 se muestra un aislador elastomérico.

Un aislador FPS consiste en un deslizador articulado recubierto de teflón, ubicado sobre una superficie de acero inoxidable<sup>21</sup>. En la Figura 4 se muestra un aislador FPS.

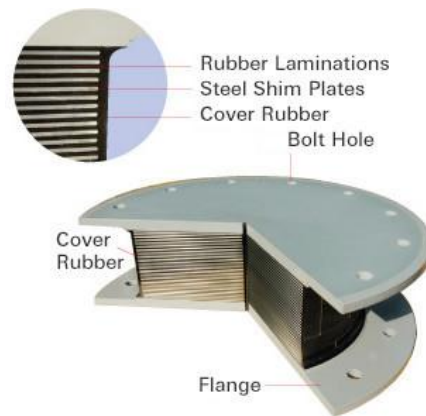
<sup>18</sup> Ibid.

<sup>19</sup> PARDO VERDUGO. Op. cit.

<sup>20</sup> Ibid.

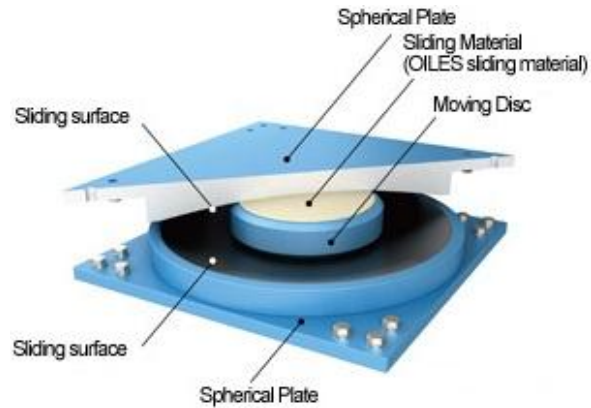
<sup>21</sup> RICO PRADILLA, Leocadio. Análisis del uso de aisladores de base para mejorar el comportamiento sísmico en puentes de concreto simplemente apoyados. Trabajo de grado Magister en Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Ingeniería Civil, 2011.

Figura 3 Aislador elastomérico.



Fuente: BRIDGESTONE CORPORATION. Seismic isolator for buildings. Multi rubber bearing, 2008<sup>22</sup>.

Figura 4 Aislador de péndulo de fricción FPS.



Fuente: OILES CORPORATION. FPS Sliding pendulum type seismic isolation device friction pendulum system<sup>23</sup>.

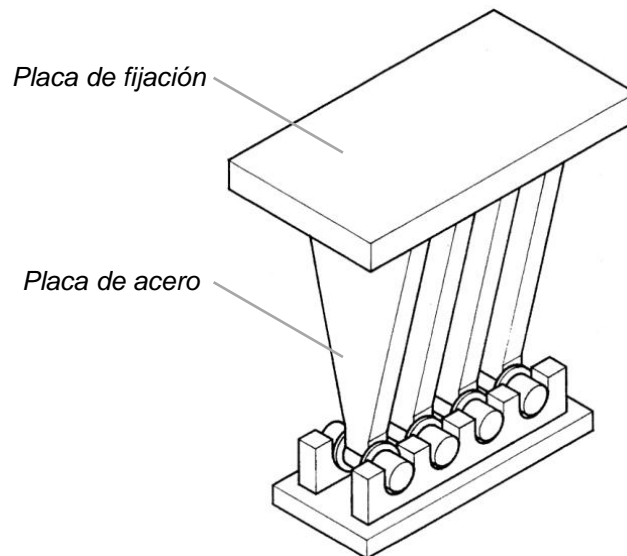
<sup>22</sup> BRIDGESTONE CORPORATION. Seismic isolator for buildings. Multi rubber bearing. [En línea]. Bridgestone Corporation. [Tokio, Japón]. Bridgestone Corporation, 2008. [Consultado en marzo de 2015]. Disponible en internet: [http://global-infrastructure-for-cdn.bridgestone.com/products/diversified/antiseismic\\_rubber/product.html](http://global-infrastructure-for-cdn.bridgestone.com/products/diversified/antiseismic_rubber/product.html)

<sup>23</sup> OILES CORPORATION. FPS Sliding pendulum type seismic isolation device friction pendulum system. [En línea]. Oiles Corporation. [Fujisawa-shi, Japón]. Oiles Corporation. [Consultado en marzo 2015] Disponible en Internet: <http://www.oiles.co.jp/en/menshin/building/menshin/products/fps/>

**1.2.1.2. Sistemas de disipación de energía.** Los sistemas de disipación de energía trabajan en paralelo con la estructura para disipar la totalidad de la energía de entrada del sismo. Estos sistemas se clasifican en tres grupos: los hysteréticos, los viscoelásticos y los de fluido viscoso<sup>24</sup>.

Un amortiguador hysterético es un dispositivo, por lo general de acero, que se pone en regiones específicas en una edificación para que en un evento sísmico de gran magnitud se plastifique y disipe energía. La respuesta de un amortiguador hysterético depende únicamente del desplazamiento de la estructura. En la Figura 5 se muestra un amortiguador hysterético TADAS, por sus siglas en inglés: Triangular-plate Added Damping and Stiffness.

Figura 5 Amortiguador hysterético TADAS.



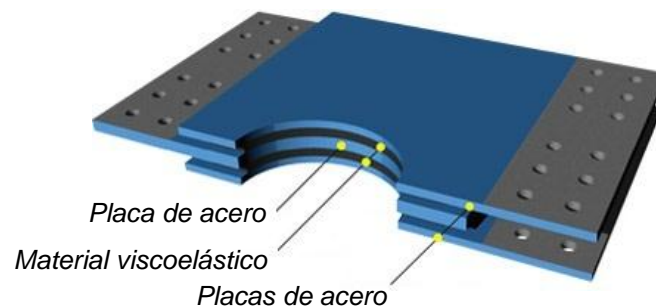
Fuente: NATIONAL SCIENCE COUNCIL. Seismic energy dissipation device. Inventores: TSAI, Keh-Chyuan; LI, Jeng-We, 1996<sup>25</sup>.

<sup>24</sup> PARDO VERDUGO. Op. cit.

<sup>25</sup> NATIONAL SCIENCE COUNCIL (Estados Unidos de América). Seismic energy dissipation device. Inventores: TSAI, Keh-Chyuan; LI, Jeng-We. Int. CL.: US 08/350,043. Fecha de solicitud: 29, noviembre, 1994. Estados Unidos de América. US5533307 A. 9, julio, 1996.

Los amortiguadores viscoelásticos están formados por placas metálicas unidas por finas capas de material viscoelástico. Estos amortiguadores funcionan de forma similar a los amortiguadores histeréticos, con la diferencia que su respuesta depende simultáneamente del desplazamiento y la velocidad de la estructura<sup>26</sup>. En la Figura 6 se muestra un amortiguador viscoelástico.

Figura 6 Amortiguador viscoelástico.



Fuente: CONSTEC ENGI, CO. Viscoelastic damper CST30<sup>27</sup>.

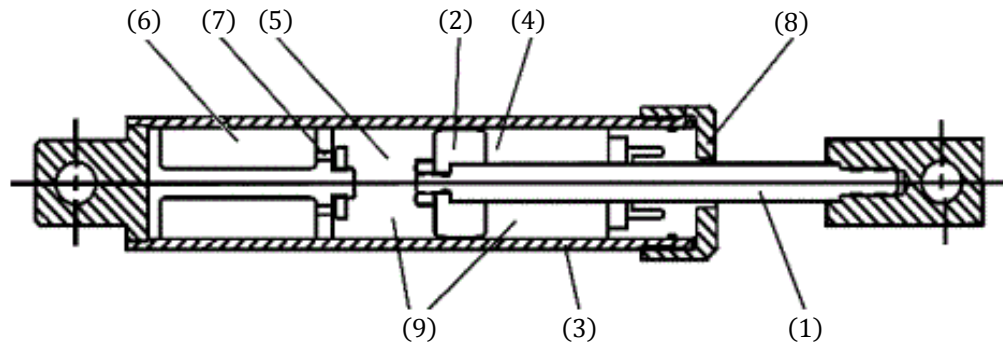
Un amortiguador de fluido viscoso es similar a los amortiguadores de los sistemas de suspensión de los autos, pero con mayores dimensiones y rangos de fuerza. Un amortiguador de fluido viscoso consiste básicamente en un cilindro hueco, por lo general de acero inoxidable, con un fluido no inflamable en su interior y un pistón, también de acero inoxidable, con agujeros en su cabeza. La cabeza del pistón divide el interior del cilindro en dos cavidades llamadas cámaras. Adicionalmente, dentro del cilindro hay una tercera cavidad, llamada cámara de acumulación, cuya función es compensar la expansión y contracción térmica del fluido<sup>28</sup>. En la Figura 7 se muestran los componentes de un amortiguador de fluido viscoso.

<sup>26</sup> PARDO VERDUGO. Op. cit.

<sup>27</sup> CONSTEC ENGI, CO. Viscoelastic damper CST30. [En línea]. Constec Engi, Co. [Osaka, Japón]. Constec Engi, Co. [Consultado en marzo de 2015]. Disponible en: <http://www.constec.co.jp/en/seismic/seismic01.html>

<sup>28</sup> TAYLOR DEVICES, INC. Earthquake protective system for buildings, bridges, and other structures. [En línea]. Taylor Devices, Inc. [North Tonawanda, Estados Unidos de América]. Taylor Devices, Inc. [Consultado en noviembre de 2014]. Disponible en: <http://taylordevices.com/literature.html>

Figura 7. Amortiguador de fluido viscoso.



- |                              |                                  |
|------------------------------|----------------------------------|
| (1) <i>Cuerpo del pistón</i> | (6) <i>Cámara de acumulación</i> |
| (2) <i>Cabeza del pistón</i> | (7) <i>Válvula de control</i>    |
| (3) <i>Cilindro</i>          | (8) <i>Retenedor</i>             |
| (4) <i>Cámara 1</i>          | (9) <i>Fluido</i>                |
| (5) <i>Cámara 2</i>          |                                  |

Fuente: TAYLOR, Douglas P. History, design, and applications of fluid dampers in structural engineering<sup>29</sup>.

Cuando un sismo solicita una estructura con un sistema de amortiguamiento de fluido viscoso se produce un desplazamiento entre los extremos del amortiguador. Debido a esto el pistón se desplaza y obliga al fluido en el interior del cilindro a pasar por los orificios en su cabeza de una cámara a la otra. Es así como el amortiguador disipa energía por el calor generado por la fricción entre el fluido y el pistón. A su vez, cuando esto ocurre, la válvula de control libera parte del fluido hacia la cámara de acumulación, para evitar el rebote del pistón<sup>30</sup>.

La energía disipada por el amortiguador,  $E(t)$ , es:

$$E(t) = \int |F(t)| dx \quad (13)$$

<sup>29</sup> TAYLOR, Douglas P. History, design, and applications of fluid dampers in structural engineering. [En línea]. Taylor Devices, Inc. [North Tonawanda, Estados Unidos de América]. Taylor Devices, Inc. [Consultado en noviembre de 2014]. Disponible en: <http://taylordevices.com/literature.html>

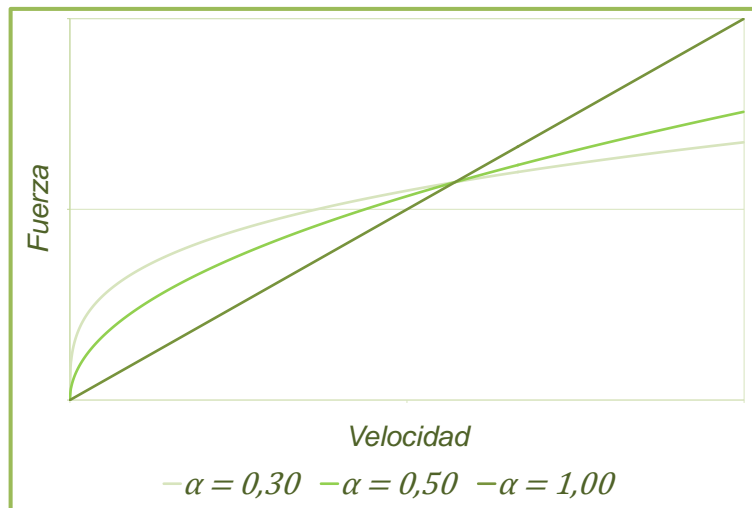
<sup>30</sup> PARDO VERDUGO. Op. cit.

donde  $F(t)$  es la fuerza de amortiguamiento, de la siguiente forma:

$$F(t) = c\dot{u}(t)^\alpha \quad (14)$$

donde el valor del exponente de la velocidad,  $\alpha$ , depende de la forma de la cabeza del pistón y por lo general se encuentra entre 0,3 y 1,0<sup>31</sup>. Cuando  $\alpha$  es igual a la unidad, se tiene un sistema de amortiguamiento de fluido viscoso con comportamiento lineal y cuando  $\alpha$  tiene un valor distinto a la unidad, se tiene un sistema de amortiguamiento de fluido viscoso con comportamiento no lineal<sup>32</sup>. En la Figura 8 se muestra la relación entre la fuerza de amortiguamiento y la velocidad para diferentes valores de  $\alpha$ .

Figura 8 Fuerza de amortiguamiento como función de la velocidad del pistón para diferentes valores de  $\alpha$ .



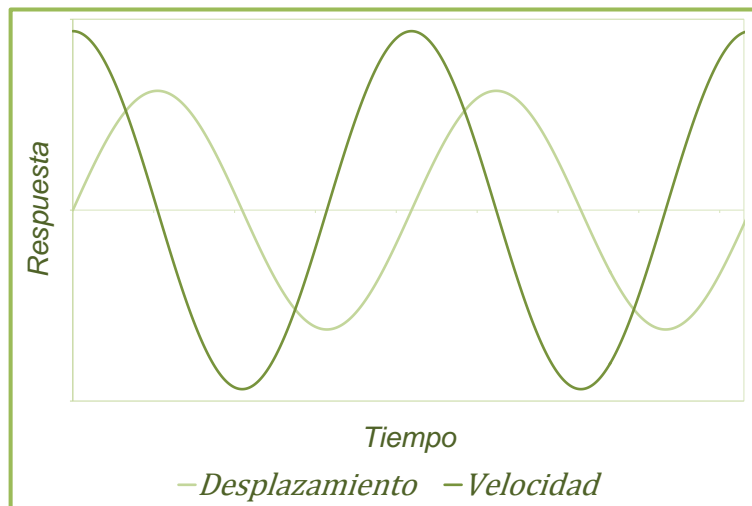
Los amortiguadores de fluido viscoso son los únicos dispositivos capaces de reducir los desplazamientos de una estructura sin producir en ella esfuerzos adicionales. Esto es posible debido a que la fuerza de amortiguamiento depende únicamente de la velocidad,

<sup>31</sup> TAYLOR DEVICES, INC, Earthquake protective system for buildings, briges, and other structures, Op. cit.

<sup>32</sup> PARDO VERDUGO. Op. cit.

por lo que está en todo momento desfasada con respecto al desplazamiento<sup>33</sup>. El desfase entre el desplazamiento y la velocidad para una carga armónica se muestra en la Figura 9. Cuando el desplazamiento de la estructura es máximo y se presentan los mayores esfuerzos por flexión en las columnas, la velocidad del pistón es nula, al igual que la fuerza de amortiguamiento. Luego, cuando la estructura pasa por su posición de equilibrio, los esfuerzos por flexión en las columnas son nulos y la velocidad del pistón y la fuerza de amortiguamiento son máximas<sup>34</sup>.

Figura 9 Desfase entre el desplazamiento y la velocidad para carga armónica.



Aunque el desarrollo de los amortiguadores de fluido viscoso en su comienzo se limitó a la industria militar de los Estados Unidos de América, en la década de los noventa el gobierno de ese país eliminó esa restricción. Gracias a esto, más de doscientas estructuras se han diseñado, construido y reforzado con amortiguadores de fluido viscoso<sup>35</sup>. Un ejemplo de esto es el edificio La Torre Mayor en Ciudad de México. Fue diseñado por la firma de arquitectos Zeidler Roberts Partnership y su construcción terminó

<sup>33</sup> TAYLOR DEVICES, INC, Earthquake protective system for buildings, brigdes, and other structures, Op. cit.

<sup>34</sup> Ibid.

<sup>35</sup> TAYLOR, Douglas P. Op. cit.

en 2003. Tiene una altura de 225 m en cincuenta y siete pisos y un área total construida de 129.885 m<sup>2</sup>. Cuenta en total con noventa y ocho amortiguadores de fluido viscoso Taylor Devices Inc. instalados entre los pisos trece y cincuenta y siete. Se usaron setenta y cuatro amortiguadores con capacidad de 280 ton y  $\pm 50$  mm de excursión máxima y veinticuatro amortiguadores con capacidad de 570 ton y  $\pm 50$  mm de excursión máxima. La tecnología implementada para La Torre Mayor actualmente está siendo usada en edificaciones en Estados Unidos, Japón, Taiwán y China<sup>36</sup>. En la Figura 10(a) se muestra el edificio La Torre Mayor, en Ciudad de México y en la Figura 10(b) se muestra una atractiva mujer junto a algunos amortiguadores instalados en La Torre Mayor.

Figura 10 (a) Edificio La Torre Mayor; (b) amortiguadores instalados en la edificación.



(a)



(b)

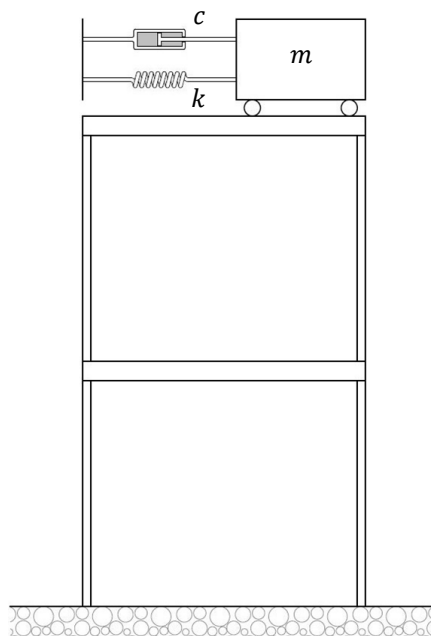
Fuente: KATZ, Israel; TAYLOR, Douglas P. Seismic protection with fluid viscous dampers for the Torre Mayor, a 57-story Office Tower in Mexico City, Mexico<sup>37</sup>.

<sup>36</sup> KATZ, Israel; TAYLOR, Douglas P. Seismic protection with fluid viscous dampers for the Torre Mayor, a 57-story office tower in Mexico City, Mexico. [En línea]. Taylor Devices, Inc. [North Tonawanda, Estados Unidos de América]. Taylor Devices, Inc. [Consultado en marzo de 2015]. Disponible en: <http://taylordevices.com/literature.html>

<sup>37</sup> Ibid.

**1.2.1.3. Sistemas de masa sintonizada.** Un sistema de amortiguamiento de masa sintonizada, TMD (por sus siglas en inglés: Tuned Mass Damper), es un dispositivo de un grado de libertad constituido por una masa, un elemento de restitución y un mecanismo de disipación de energía. Usualmente es instalado en la parte superior de la estructura. Estos sistemas suplementarios se utilizan para reducir vibraciones causadas por viento, sismos u otras condiciones de carga dinámica. Se conocen como sintonizados porque las frecuencias naturales de estos dispositivos son cercanas a la de la estructura en la que se instalan<sup>38</sup>. En la Figura 11 se muestra el esquema de una estructura con un sistema de TMD.

Figura 11 Esquema de una estructura con un sistema de amortiguamiento de masa sintonizada.



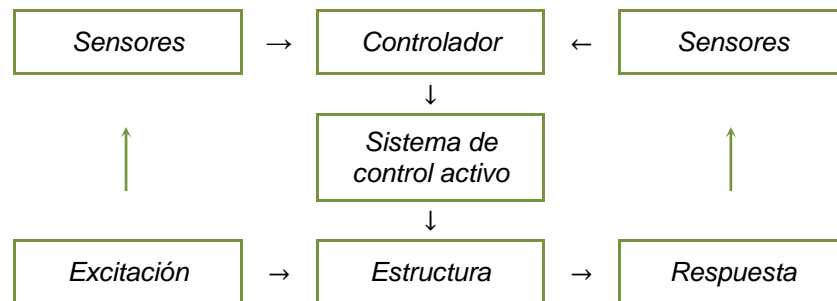
Fuente: PARDO VERDUGO. Control de respuesta dinámica de estructuras mediante el uso de disipadores de energía de fluido viscoso del tipo lineal, 2007<sup>39</sup>.

<sup>38</sup> CHAPARRO Tarazona, Andrea Carolina; SANTAMARÍA Ariza, Mónica Patricia. Evaluación experimental de un TLCD en un modelo a escala. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil, 2012.

<sup>39</sup> PARDO VERDUGO. Op. cit.

**1.2.2. Sistemas activos de protección sísmica.** Los sistemas activos de protección sísmica modifican el comportamiento de la estructura por medio de la acción de un sistema de control que requiere un suministro externo de energía. En un sistema activo la dirección y magnitud de las fuerza que contrarrestan el efecto del sismo se producen mediante un algoritmo a partir de información suministrada por sensores que hacen parte del sistema<sup>40</sup>. En la Figura 12 se muestra un esquema de funcionamiento de una estructura con un sistema activo de protección sísmica.

Figura 12 Esquema de funcionamiento de una estructura con un sistema activo de protección sísmica.



Fuente: DARGUSH y SOONG. Passive energy dissipation and active control, 1999<sup>41</sup>.

**1.2.3. Sistemas semi-activos de protección sísmica.** Un sistema semi-activo de protección sísmica se origina a partir de un sistema pasivo modificado para permitir el ajuste de las propiedades mecánicas con base en la excitación<sup>42</sup>. Estos sistemas funcionan de forma similar a los sistemas activos, aunque su respuesta se obtiene a partir de dispositivos de carácter reactivo con características mecánicas controlables. Ejemplos de estos sistemas son dispositivos con fricción variable o amortiguadores con fluidos con viscosidad controlable a partir de campos eléctricos o magnéticos<sup>43</sup>.

<sup>40</sup> CHAPARRO y SANTAMARÍA. Op. cit.

<sup>41</sup> DARGUSH y SOONG. Op. cit.

<sup>42</sup> CHAPARRO y SANTAMARÍA. Op. cit.

<sup>43</sup> PARDO VERDUGO. Op. cit.

**1.2.4. Sistemas híbridos de protección sísmica.** En un sistema híbrido de protección sísmica se emplean dispositivos activos y pasivos. El control de la respuesta de la estructura se hace por medio de dispositivos pasivos. Esto supone una ventaja con respecto a los sistemas activos, porque la energía requerida para su funcionamiento es menor y porque en ausencia de esa energía, el sistema pasivo continua funcionando<sup>44</sup>. Un ejemplo de estos sistemas es el amortiguador híbrido, HMD (por sus siglas en inglés: Hybrid Mass Damper), que resulta de combinar un TMD y un actuador de control activo. La capacidad de este sistema depende principalmente del TMD. El control activo solo se encarga de mejorar su desempeño<sup>45</sup>.

---

<sup>44</sup> CHAPARRO y SANTAMARÍA. Op. cit.

<sup>45</sup> PARDO VERDUGO. Op. cit.

## 2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Se diseñó y construyó un sistema de amortiguamiento de fluido viscoso para su instalación en un modelo a escala de un pórtico metálico de dos pisos. El sistema consistió en dos amortiguadores de fluido viscoso. Inicialmente se calculó el valor teórico de la constante de amortiguamiento a partir de la NSR-10<sup>46</sup> y después de su construcción se determinaron experimentalmente las propiedades de los amortiguadores. Luego se realizó el ensayo del modelo, mediante la aplicación de un movimiento armónico en la base para diferentes frecuencias y se registraron las aceleraciones de los dos pisos del modelo.

### 2.2. MODELO DEL PÓRTICO METÁLICO DE DOS PISOS

El modelo utilizado en los ensayos corresponde al pórtico metálico de dos pisos en la Figura 13. Este modelo fue elaborado por Chaparro y Santamaría<sup>47</sup> y está compuesto por barras de acero corrugado grado 60-ASTM A615 de 1/4 in de diámetro. El acero tiene densidad de 7.850 kg/m<sup>3</sup> y módulo de elasticidad de 200 GPa<sup>48</sup>. El modelo se construyó con dos placas de acero de 6,65 kg y 6,71 kg en el primer y segundo piso, respectivamente. Su altura total es de 1,10 m y su base es de 0,45 m en dirección de  $x$  y 0,30 m en dirección de  $y$ . Todas las medidas son entre los ejes de los elementos.

En la Tabla 1 se muestran las frecuencias y periodos para los dos primeros modos de vibración del modelo en dirección de  $x$ . Estos parámetros fueron determinados por Chaparro y Santamaría<sup>49</sup>.

---

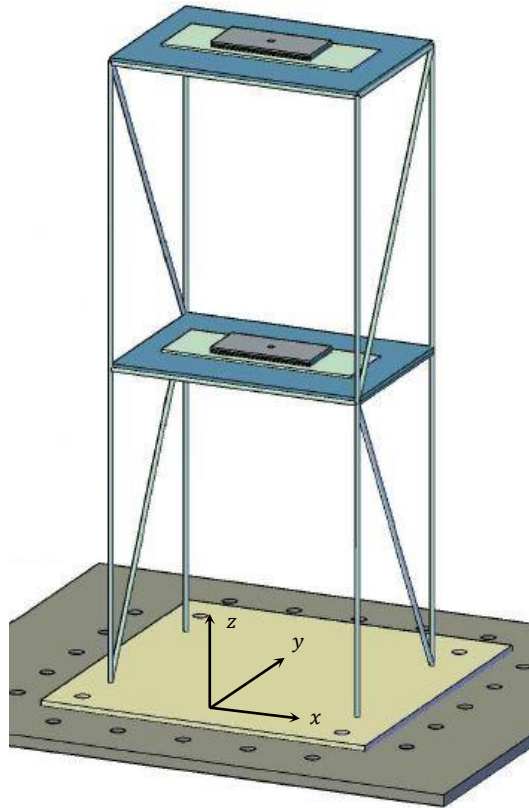
<sup>46</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Op. cit.

<sup>47</sup> CHAPARRO y SANTAMARÍA. Op. cit.

<sup>48</sup> Ibid.

<sup>49</sup> Ibid.

Figura 13 Pórtico metálico de dos pisos utilizado en los ensayos.



Fuente: CHAPARRO y SANTAMARÍA. Evaluación experimental de un TLCD en un modelo a escala, 2012<sup>50</sup>.

Tabla 1 Frecuencias y periodos para los primeros dos modos de vibración del modelo.

<i>Propiedades dinámicas del modelo</i>			
<i>Modo</i>	$\omega$ [rad/s]	$f$ [Hz]	$T$ [s]
1	8,39	1,34	0,75
2	26,27	4,18	0,24

Fuente: CHAPARRO y SANTAMARÍA. Evaluación experimental de un TLCD en un modelo a escala, 2012<sup>51</sup>.

<sup>50</sup> Ibid.

<sup>51</sup> Ibid.

### 2.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO

De acuerdo con la NSR-10<sup>52</sup>, en su título A, se permite el uso de elementos disipadores de energía siempre y cuando se cumplan en su totalidad los requisitos al respecto del NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings - provisions and commentary (FEMA 450<sup>53</sup>) de la Federal Emergency Management Agency (FEMA) o el Minimum design loads for building and other structures (ASCE/SEI 7 - 05) del Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI). A continuación se presenta el procedimiento de diseño de acuerdo con el FEMA 450<sup>54</sup>.

**2.3.1. Diseño de acuerdo con el FEMA 450.** El FEMA 450<sup>55</sup> propone un procedimiento para el cálculo del valor de la constante de amortiguamiento de un sistema de amortiguamiento de fluido viscoso. Una alternativa a este procedimiento se propone en el Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356<sup>56</sup>). A continuación se presenta el procedimiento de diseño propuesto por el FEMA 356<sup>57</sup>.

**2.3.2. Diseño de acuerdo con el FEMA 356.** De acuerdo con el FEMA 356<sup>58</sup> en su capítulo 9 para edificaciones con comportamiento lineal elástico y cuya razón de amortiguamiento después de incluir un sistema de disipación de energía no supere el 30% del amortiguamiento crítico de la estructura para el modo fundamental, el amortiguamiento efectivo,  $\beta_{eff}$ , se determina por medio de la siguiente expresión<sup>59</sup>:

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum_j W_j}{4\pi W_k} \quad (15)$$

---

<sup>52</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Op. cit.

<sup>53</sup> FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for the new buildings and other structures. FEMA 450. Op. cit.

<sup>54</sup> Ibid.

<sup>55</sup> Ibid.

<sup>56</sup> FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA 356. 2003 Edition. Washington D.C.: American Society of Civil Engineers, 2000.

<sup>57</sup> Ibid.

<sup>58</sup> Ibid.

<sup>59</sup> Ibid.

donde  $\beta$  es el amortiguamiento natural de la estructura,  $W_j$  es el trabajo del dispositivo  $j$ , y  $W_k$  es la máxima energía de deformación en la estructura.  $W_j$  se calcula como sigue<sup>60</sup>:

$$W_j = \frac{2\pi^2}{T} c_j \delta_{rj}^2 \quad (16)$$

donde  $T$  es el periodo fundamental de la estructura,  $c_j$  es la constante de amortiguamiento del dispositivo  $j$  y  $\delta_{rj}$  es el desplazamiento relativo entre los extremos del mismo dispositivo a lo largo de su eje.  $W_k$  se calcula de la siguiente forma<sup>61</sup>:

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i \delta_i \quad (17)$$

donde  $F_i$  es la fuerza inercial en el piso  $i$  y  $\delta_i$  es el desplazamiento del piso  $i$ .

El cálculo de  $\beta_{eff}$  se puede hacer de manera alternativa a la ecuación (15) por medio de la expresión que se presenta a continuación<sup>62</sup>:

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{T \sum_j c_j \cos^2 \theta_j \varphi_{rj}^2}{4\pi \sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \varphi_i^2} \quad (18)$$

donde  $\theta_j$  es el ángulo de inclinación del dispositivo  $j$  con respecto a la horizontal,  $\varphi_{rj}$  es el desplazamiento relativo entre los extremos del dispositivo  $j$  en dirección horizontal para el modo fundamental,  $w_i$  es el peso del piso  $i$ ,  $g$  es el valor de la gravedad y  $\varphi_i$  es el desplazamiento del piso  $i$  para el modo fundamental. Los valores de  $\theta_j$  y  $\varphi_i$  en la ecuación (18) se determinan como se muestra en la Figura 14.

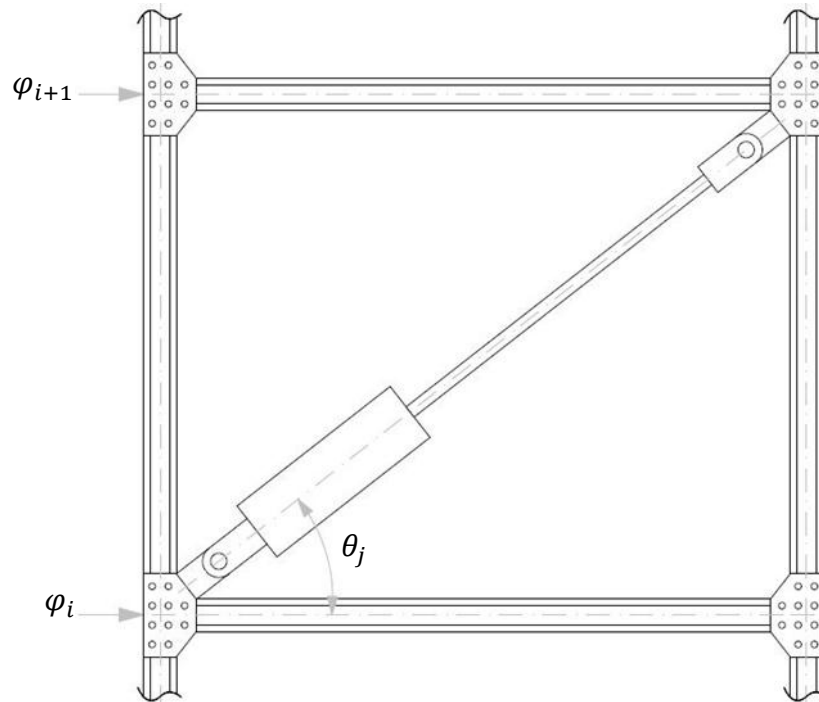
---

<sup>60</sup> Ibid.

<sup>61</sup> Ibid.

<sup>62</sup> Ibid.

Figura 14 Esquema de instalación de un amortiguador.



Fuente: CONSTANTINO, Michael C.; DARGUSH, Gary F.; SOONG, Tsu T. Energy dissipation systems for structural design and retrofit, 1998<sup>63</sup>.

Se realizó el cálculo del valor teórico de la constante de amortiguamiento,  $c_{teo}$  para el sistema de amortiguamiento en dirección de  $x$  del modelo. Se asumió un amortiguamiento efectivo de 30% y un amortiguamiento natural de 5%, el ángulo de inclinación de los amortiguadores es de  $50,71^\circ$ , las masas del primer y segundo piso son 14,51 kg y 14,29 kg, respectivamente, y la matriz de modos de vibración normalizados es<sup>64</sup>:

$$[\varphi] = \begin{bmatrix} 0,12 & -0,23 \\ 0,24 & 0,12 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Reemplazando los parámetros del modelo en la ecuación (18), se determinó un valor teórico de la constante de amortiguamiento,  $c_{teo}=737,24 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ .

<sup>63</sup> CONSTANTINO, Michael C.; DARGUSH, Gary F.; SOONG, Tsu T. Op. cit.

<sup>64</sup> CHAPARRO y SANTAMARÍA. Op. cit.

## 2.4. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO

En la Figura 15 se muestran las dimensiones de los amortiguadores y se detallan las partes que los componen.

El cilindro se construyó con tubería de PVC. Se usó este material por su bajo peso, su resistencia a las altas presiones y su fácil manipulación. Se utilizó un diámetro de 1 in para facilitar el llenado con el fluido y para acceder fácilmente al interior del cilindro. Se escogió una longitud de 180 mm para crear una cámara de acumulación, sin limitar el rango de movimiento del pistón. Los extremos del cilindro se sellaron con tapones para tubería, también de PVC. En el lado de la cámara de acumulación se usó soldadura líquida para fijar el tapón (tapón superior) al cilindro y en el otro extremo simplemente se presionó el tapón (tapón inferior), para poder abrir el cilindro en caso de que fuera necesario. Se hizo un agujero de 1/4 in de diámetro en el tapón superior para permitir el desplazamiento del pistón. Dentro del cilindro se utilizó un retenedor plástico de 1 in de diámetro y 5 mm de espesor para crear la cámara de acumulación de 45 mm de longitud.

El pistón del amortiguador se construyó con acero liso grado 60-ASTM A615. Se utilizó una barra de 1/4 in de diámetro y 500 mm de longitud para el cuerpo y una platina de 3/4 in de diámetro y 5 mm de espesor para la cabeza. La longitud del pistón se escogió de tal forma que los extremos del amortiguador se pudieran conectar en diagonal, entre los vértices opuestos de la base y el primer piso del modelo. Se escogió para la cabeza del pistón un diámetro menor que el del interior del cilindro para permitir el paso del fluido a través del espacio entre ambas piezas. Se usaron dos tuercas del mismo material del pistón para sujetar la cabeza del pistón a su cuerpo.

Para el fluido se usó aceite para transmisiones manuales Spirax S2 G 80W-90 de Shell. Este aceite tiene densidad a 15°C de 904 kg/m<sup>3</sup> y viscosidad cinemática a 40°C de 146 mm<sup>2</sup>/s<sup>65</sup>.

---

<sup>65</sup> SHELL GLOBAL. Shell Spirax S2 G 80W-90. High quality, GL-5 axle oil. [En línea]. Shell Global. [The Hage, Países bajos]. Shell Global, 2014. [Consultado en noviembre de 2014]. Disponible en internet <http://www.epc.shell.com/>

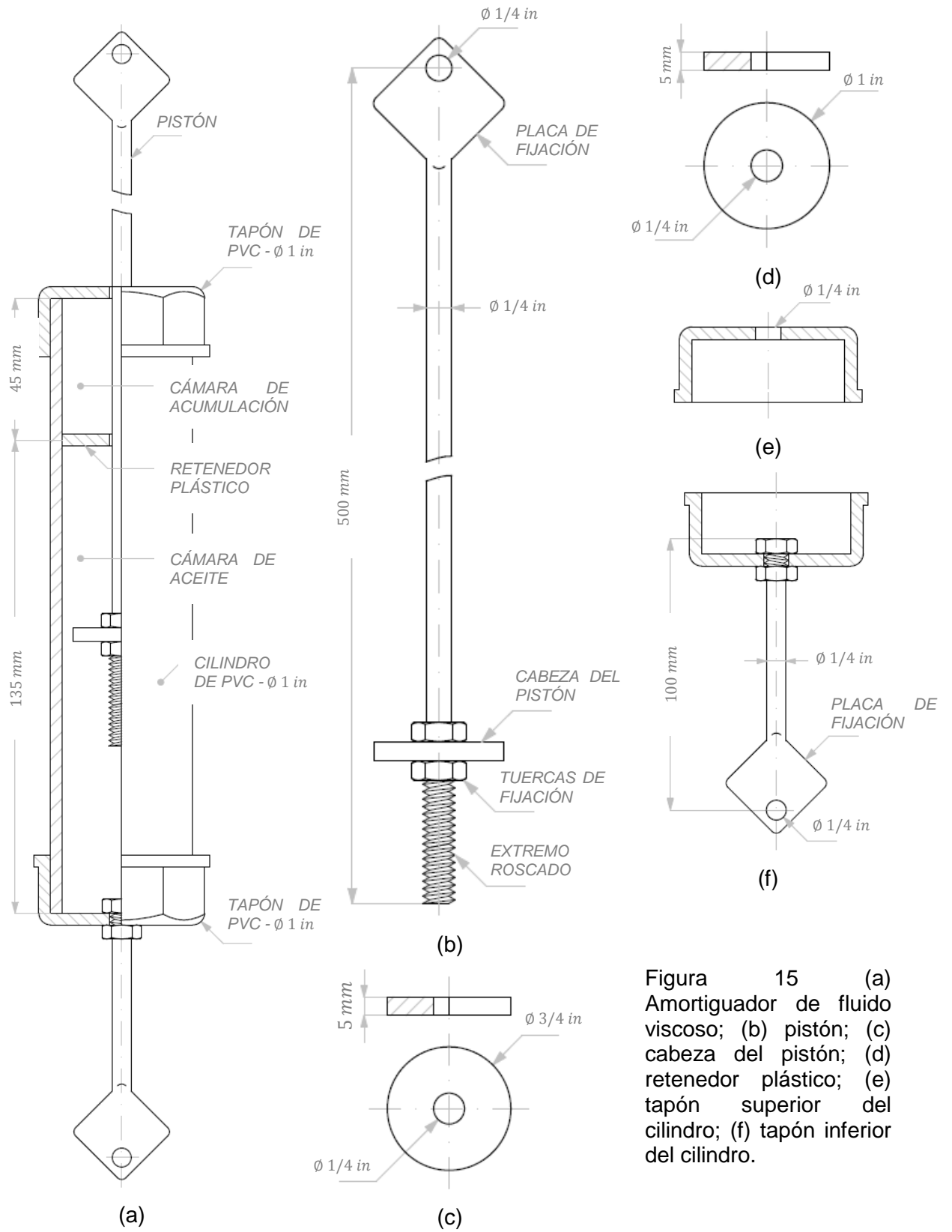


Figura 15 (a) Amortiguador de fluido viscoso; (b) pistón; (c) cabeza del pistón; (d) retenedor plástico; (e) tapón superior del cilindro; (f) tapón inferior del cilindro.

## 2.5. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO

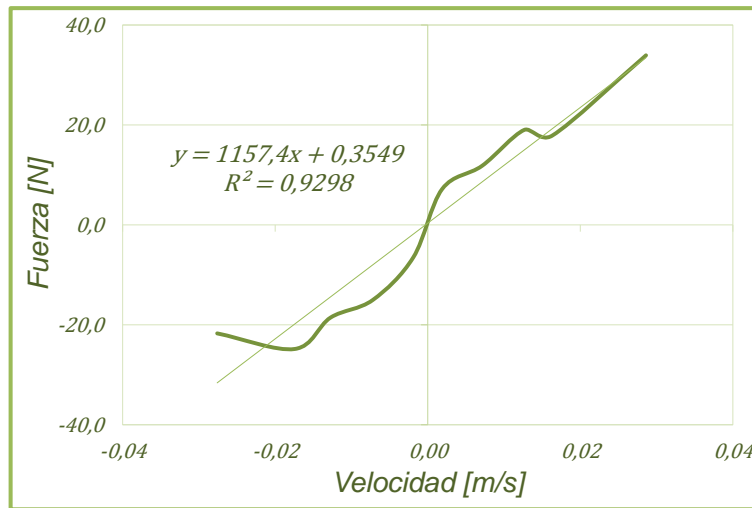
Para la caracterización de los amortiguadores se utilizó un banco de carga servo hidráulico 810 Material Testing System de MTS como se muestra en la Figura 16. Se aplicaron ciclos consecutivos de tracción y compresión con un desplazamiento máximo del pistón de  $\pm 25$  mm y se registraron su desplazamiento y la fuerza aplicada sobre él cada 0,5 s, durante 180 s para frecuencias de 0,01; 0,025; 0,05; 0,10; 0,25; 0,50; 1,00 y 2,00 Hz.

Figura 16 Montaje del amortiguador en el banco de carga 810 Material Testing System.



A partir de los datos obtenidos en el ensayo se calcularon las velocidades del pistón y se realizó la gráfica en la Figura 17, donde se relaciona la fuerza en el pistón y su velocidad.

Figura 17 Fuerza aplicada por el banco de carga contra velocidad del pistón.



Se hizo el ajuste de la curva en la Figura 17 a una recta. De esta forma se obtuvo la ecuación presentada a continuación:

$$F(\dot{u}(t)) = 1.157,40\dot{u}(t) + 0,3549 \quad (20)$$

con un factor de determinación  $R^2=0,9298$ .

El valor del factor de determinación permite asumir que la ecuación (20) es una buena aproximación a la curva en la Figura 15. Con base en esto se determinó que los amortiguadores construidos presentan una respuesta lineal de la fuerza de amortiguamiento en función de la velocidad del pistón. Esto es, el valor del exponente de la velocidad,  $\alpha$ , en la ecuación (14) es igual a 1,0. De la ecuación (20) se determinó la constante de amortiguamiento experimental como  $c_{exp}=1.157,40$  N·s/m. Este resultado presenta un error de 36,30% con respecto al valor teórico calculado de acuerdo con el FEMA 356<sup>66</sup>.

<sup>66</sup> FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA 356. Op. cit.

## 2.6. MONTAJE EXPERIMENTAL DEL MODELO

Se realizó el ensayo dinámico del modelo antes y después de la instalación del sistema de amortiguamiento. Se usó una mesa vibratoria para generar un movimiento armónico en la base del modelo con frecuencias de 0,90; 1,35; 2,85; 3,80 y 6,00 Hz, con el fin de incluir las frecuencias de los dos primeros modos de vibración del modelo. En la Figura 18 se muestra el montaje experimental del modelo sobre la mesa vibratoria con el sistema de amortiguamiento.

Figura 18 Montaje experimental del modelo con el sistema de amortiguamiento.



La respuesta de la estructura se midió mediante acelerómetros 352c33 de PCB Piezotronics. Se pusieron acelerómetros en la base y los dos pisos de la estructura,

conectados a una tarjeta de adquisición de datos NI USB-9234 de National Instruments. Para el registro y almacenamiento de los datos se usó el software NI LabVIEW Signal Express junto con el Toolkit Sound and Vibration Assistant de LabVIEW. En la Figura 19 se muestra uno de los acelerómetros instalado en el modelo.

Figura 19 Acelerómetro 352c33 de PCB Piezotronics.



Fuente: CHAPARRO y SANTAMARÍA. Evaluación experimental de un TLCD en un modelo a escala, 2012<sup>67</sup>.

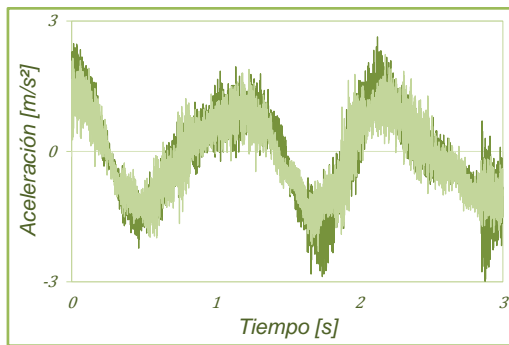
---

<sup>67</sup> CHAPARRO y SANTAMARÍA. Op. cit..

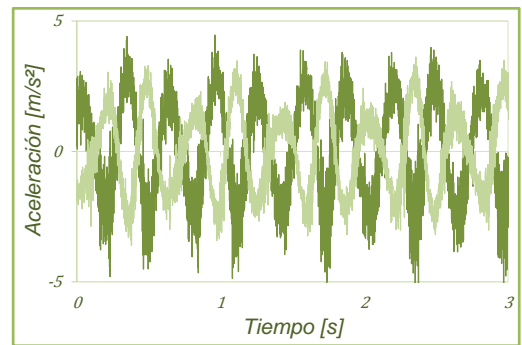
### 3. RESULTADOS

#### 3.1. ACELERACIONES DEL MODELO SIN EL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO

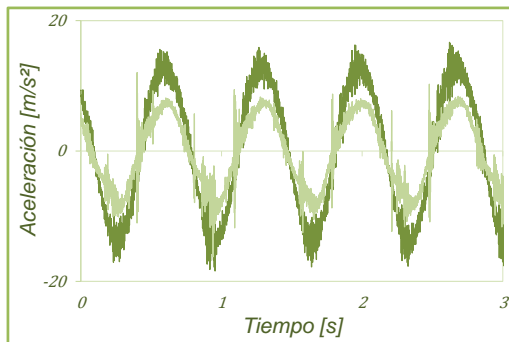
En la Figura 20 se muestra el registro de las aceleraciones del modelo antes de la instalación del sistema de amortiguamiento para las diferentes frecuencias ensayadas.



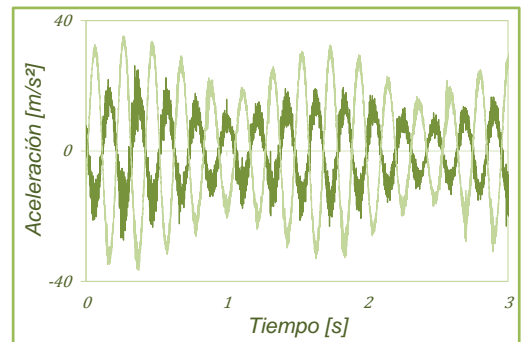
(a)



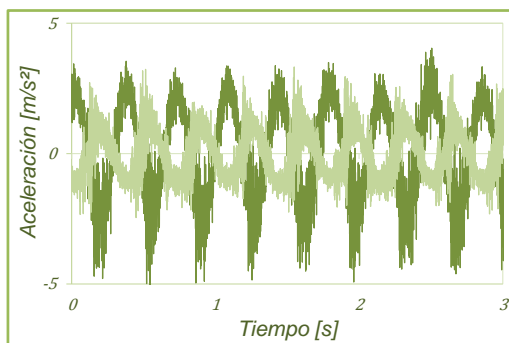
(d)



(b)



(e)

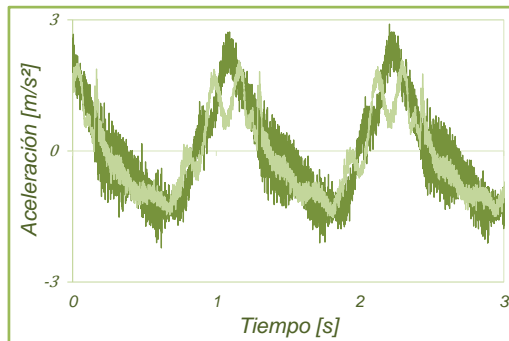


(c)

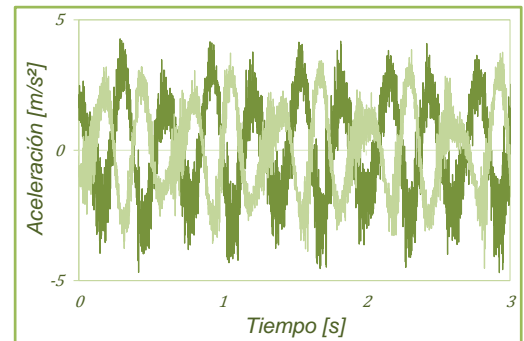
Figura 20 Aceleraciones del modelo antes de la instalación del sistema de amortiguamiento (a) 0,90 Hz; (b) 1,35 Hz; (c) 2,85 Hz; (d) 3,80 Hz; (e) 6,00 Hz.

### 3.2. ACELERACIONES DEL MODELO CON EL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO

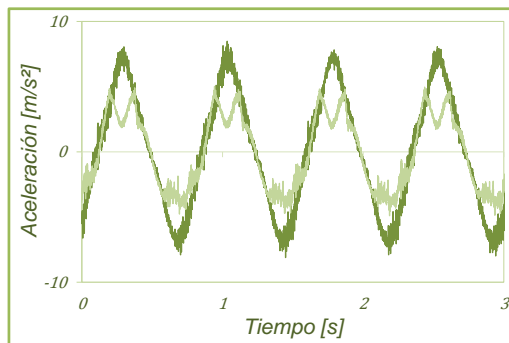
En la Figura 21 se muestra el registro de las aceleraciones del modelo después de la instalación del sistema de amortiguamiento para las diferentes frecuencias ensayadas.



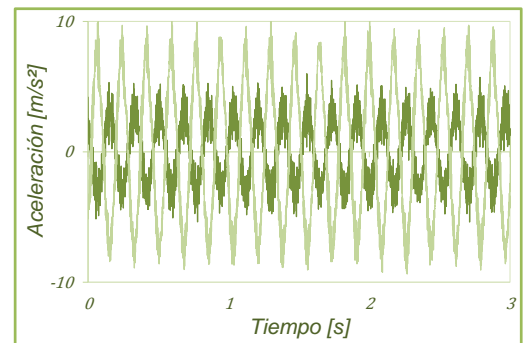
(a)



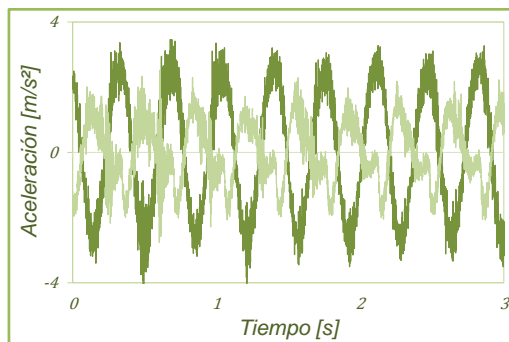
(d)



(b)



(e)



(c)

Figura 21 Aceleraciones del modelo después de la instalación del sistema de amortiguamiento (a) 0,90 Hz; (b) 1,35 Hz; (c) 2,85 Hz; (d) 3,80 Hz; (e) 6,00 Hz.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Se comparó la respuesta dinámica del modelo antes y después de la instalación del sistema de amortiguamiento. Se calcularon los porcentajes de reducción de las aceleraciones del modelo para ambas condiciones para cada una de las frecuencias ensayadas.

### 4.2. PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE LAS ACELERACIONES MÁXIMAS

Se tomaron los valores máximos de las aceleraciones del modelo para cada frecuencia, antes y después de la instalación del sistema de amortiguamiento, y se calcularon sus porcentajes de reducción. En la Tabla 2 se muestran los resultados.

Tabla 2 Aceleraciones máximas del modelo antes (a) y después (b) de la instalación del sistema de amortiguamiento y porcentajes de reducción de la aceleración.

<i>f [Hz]</i>	<i>Aceleración máxima en el primer piso</i>			<i>Aceleración máxima en el segundo piso</i>		
	<i>(a) [m/s<sup>2</sup>]</i>	<i>(b) [m/s<sup>2</sup>]</i>	<i>Reducción (%)</i>	<i>(a) [m/s<sup>2</sup>]</i>	<i>(b) [m/s<sup>2</sup>]</i>	<i>Reducción (%)</i>
0,90	2,3001	1,7528	23,79	2,9894	2,4196	19,06
1,35	16,2194	5,0230	69,03	18,4093	8,4847	53,91
2,85	3,3233	2,7588	16,99	5,2958	4,3645	17,59
3,80	4,5284	3,9318	13,17	4,6945	4,0396	13,95
6,00	36,5810	10,6829	70,80	27,3415	5,9939	78,08

### 4.3. PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE LA MEDIAS CUADRÁTICAS DE LAS ACELERACIONES (RMS)

Se calcularon las medias cuadráticas, RMS por sus siglas en inglés: Root Mean Square, de las aceleraciones del modelo para cada frecuencia, antes y después de la instalación del sistema de amortiguamiento y se calcularon sus porcentajes de reducción. En la Tabla 3 se muestran los resultados.

Tabla 3 Aceleraciones RMS del modelo antes (a) y después (b) de la instalación del sistema de amortiguamiento y porcentajes de reducción de la aceleración.

<i>f [Hz]</i>	<i>Aceleración (RMS) en el primer piso</i>			<i>Aceleración (RMS) en el segundo piso</i>		
	<i>(a) [m/s<sup>2</sup>]</i>	<i>(b) [m/s<sup>2</sup>]</i>	<i>Reducción (%)</i>	<i>(a) [m/s<sup>2</sup>]</i>	<i>(b) [m/s<sup>2</sup>]</i>	<i>Reducción (%)</i>
0,90	0,8736	0,7961	8,88	1,0137	0,9656	4,74
1,35	5,4405	2,7989	48,55	9,5035	4,4470	53,21
2,85	1,1620	0,9787	15,78	2,1328	1,8821	11,75
3,80	1,5357	1,5160	1,29	1,9672	1,9300	1,89
6,00	5,3145	1,8069	66,00	2,3407	0,9984	57,35

## 5. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un sistema de amortiguamiento de fluido viscoso con comportamiento lineal para su instalación en un modelo a escala de un pórtico metálico de dos pisos. Se determinó de forma experimental el valor de la constante de amortiguamiento de los amortiguadores. El resultado obtenido fue de 1.157,40 N·s/m.

Se realizó un ensayo dinámico del modelo de pórtico metálico antes y después de la instalación del sistema de amortiguamiento de fluido viscoso. Se utilizó una mesa vibratoria para generar un movimiento armónico en la base del modelo, con frecuencias entre 0,90 Hz y 6,00 Hz. Durante el ensayo se registraron las aceleraciones del modelo.

El sistema de amortiguamiento desarrollado en este estudio redujo efectivamente las aceleraciones del modelo para el rango de frecuencias utilizado. Las mayores reducciones de las aceleraciones se produjeron para las frecuencias de 1,35 Hz y 6,00 Hz, con valores de hasta 69,03% y 78,08% respectivamente.

## BIBLIOGRAFÍA

CHAPARRO Tarazona, Andrea Carolina; SANTAMARÍA Ariza, Mónica Patricia. Evaluación experimental de un TLCD en un modelo a escala. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil, 2012.

CHIO CHO, Gustavo; MALDONADO RONDÓN, Esperanza. Análisis sísmico de edificaciones. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2004.

CHOPRA, Anil K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

CLOUGH, Ray W.; PENZIEN, Joseph. Dynamics of structures. 3 edición. Berkeley: Computers and Structures, Inc., 2003.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 926 (19, marzo, 2010). Modificado por el Decreto Nacional 092 de 2011. Por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismo resistentes NSR-10. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2010.

CONSTANTINO, Michael C.; DARGUSH, Gary F.; SOONG, Tsu T. Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit. Buffalo: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1998.

DARGUSH, G. F.; SOONG, T. T. Passive energy dissipation and active control. Buffalo: State University of New York, 1999.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for the new buildings and other structures. FEMA 450. 2003 Edition. Washington D.C.: Building Seismic Safety Council, 2004.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA 356. 2003 Edition. Washington D.C.: American Society of Civil Engineers, 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica. NCh 2745. Santiago: El instituto, 2013.

GARCÍA REYES, Luis E. Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico. Segunda impresión. Bogotá: Universidad de Los Andes, 1999.

JAIMES RODRÍGUEZ, Luís Roberto. Análisis experimental de aisladores sísmicos tipo péndulos de fricción. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil, 2014.

LAMA CHONG, Waleón Fernando. Análisis y diseño de estructuras de acero con disipadores visco elásticos para la ciudad de Guayaquil. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil, 2013.

KATZ, Israel; TAYLOR, Douglas P. Seismic protection with fluid viscous dampers for the Torre Mayor, a 57-story office tower in Mexico City, Mexico. [En línea]. Taylor Devices, Inc. [North Tonawanda, Estados Unidos de América]. Taylor Devices, Inc. [Consultado en marzo de 2015]. Disponible en: <http://taylordevices.com/literature.html>

PARDO VERDUGO, Juan Pablo. Control de respuesta dinámica de estructuras mediante el uso de disipadores de energía de fluido viscoso del tipo lineal. Trabajo de grado Ingeniero Civil en Obras Civiles. Valdivia: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la ingeniería. Escuela de ingeniería civil en Obras Civiles, 2007.

RICO PRADILLA, Leocadio. Análisis del uso de aisladores de base para mejorar el comportamiento sísmico en puentes de concreto simplemente apoyados. Trabajo de grado Magister en Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Ingeniería Civil, 2011.

TAYLOR DEVICES, INC. Earthquake protective system for buildings, bridges, and other structures. [En línea]. Taylor Devices, Inc. [North Tonawanda, Estados Unidos de América]. Taylor Devices, Inc. [Consultado en noviembre de 2014]. Disponible en: <http://taylordevices.com/literature.html>

TAYLOR, Douglas P. History, design, and applications of fluid dampers in structural engineering. [En línea]. Taylor Devices, Inc. [North Tonawanda, Estados Unidos de América]. Taylor Devices, Inc. [Consultado en noviembre de 2014]. Disponible en: <http://taylordevices.com/literature.html>