



## **RESPUESTA LATERAL DEL SISTEMA ESTRUCTURAL MARCO PLATAFORMA CON INCORPORACIÓN DE DISPOSITIVOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA COMBINADOS CON MECANISMOS AMPLIFICADORES DE DESPLAZAMIENTO**

### **LATERAL RESPONSE OF LIGHT FRAME WALL WITH INCORPORATION OF ENERGY DISSIPATION DEVICES COMBINED WITH MECHANISM DISPLACEMENT AMPLIFIERS**

*Guindos, Pablo<sup>1</sup>; Araya, Raúl<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>PUC, Chile;*

*<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile*

#### **Resumen**

Hoy en día el diseño sísmico de edificaciones de madera de mediana altura está basado en proporcionar la suficiente rigidez lateral a la estructura, la cual proviene esencialmente por la rigidez de los muros del sistema estructural, es así que cada edificación requiere una densidad de muros según la demanda sísmica de diseño. En caso la densidad de muros no sea suficiente o se requiere mejorar el desempeño dinámico ante eventos sísmicos, una alternativa de diseño es la incorporación de dispositivos de disipación de energía. El presente artículo estudia teóricamente y experimentalmente la inclusión de disipadores de energía de tipo friccional activados por desplazamiento capaces de desarrollar grandes deformaciones, los cuales están conectados a un mecanismo de amplificación de desplazamientos denominado Eccentric Lever Arm System (ELAS). El trabajo está dividido en tres partes: (1) Funcionamiento y cinemática del mecanismo de amplificación, para establecer la eficiencia de amplificación del mecanismo. (2) Obtención de la capacidad de rigidez y amortiguamiento equivalente de los disipadores y sistema de amplificación requeridos para limitar la deformación elástica relativa de entrepiso de 0.0025. (3) Análisis numérico de una edificación de seis niveles con y sin protección sísmica con el fin de observar la diferencia de la respuesta en ambos casos.

*Palabras-clave: Marco plataforma, disipadores, amplificadores sísmicos*

#### **Abstract**

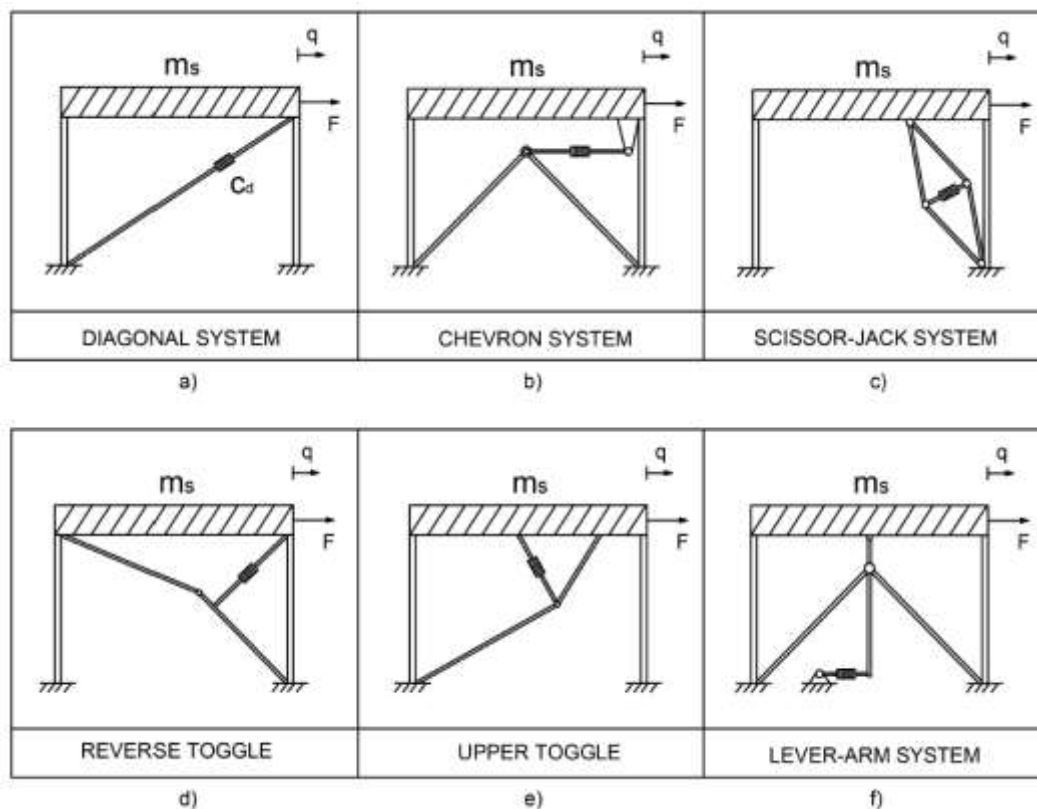
Nowadays, the seismic design of medium rise timber buildings is based on providing sufficient lateral stiffness to the structural system, the structural stiffness comes from wall essentially, so each building requires a density of walls according to the design seismic demand. In case the wall density is not enough for the building, or it requires to improve the dynamic performance against seismic events, an alternative is to incorporate energy dissipation devices. This article studies theoretically and experimentally the inclusion of frictional-type energy dissipation devices activated by displacement and capable to develop large deformations, these are connected to a displacement amplification mechanism known as Eccentric Lever Arm System (ELAS). The work is divided into three parts: (1) Functioning and kinematics of the amplification mechanism, to define the amplification efficiency of the mechanism. (2) Equivalent stiffness and damping capacity of UFP devices and amplification system. (3) Numerical analysis of a six-level building with and without seismic protection in order to observe the difference in response in both cases.

*Keywords: Light timber wall, energy dissipating devices, amplification mechanism*



## 1. INTRODUCCIÓN

La inclusión de dispositivos de disipación de energía en estructuras se ha convertido en una práctica extendida, debido a que conlleva al mejor desempeño dinámico de las edificaciones sujetas a excitaciones sísmicas y/o fuerzas de viento. La efectividad de los dispositivos de disipación sísmica es más notoria en edificaciones flexibles, el cual no es el caso de los sistemas de edificaciones de madera tipo marco plataforma, el cual está constituido por muros compuestos de madera, los mismos que proveen de alta rigidez al sistema y no se observa suficiente deformaciones para el funcionamiento de los disipadores. De esta manera se observa que los disipadores sísmicos activados por desplazamiento podrían no ser muy efectivos para la reducción de la respuesta estructural del sistema ante cargas excitaciones externas que conlleven a deformaciones laterales relativas de entrepiso. La Figura 1a y 1b muestran esquemáticamente la disposición de disipadores de energía dispuestas de forma tradicional conocidas como Diagonal o Chevron respectivamente.



*Figura 1: Representación esquemática de disposición de disipadores de energía; a) y b) Configuraciones tradicionales; y c) al f) Configuraciones con sistema de amplificación de desplazamientos*

Por otro lado, para sobrellevar este problema se han propuesto diferentes configuraciones mecánicas de amplificación de desplazamientos que permitan mejorar la efectividad de los disipadores de energía. Las figuras 1c al 1f muestran opciones de amplificación de desplazamiento. En este artículo, se estudia una variación del sistema Lever-Arm System (LAS) (Figura f) denominada Excentric Lever-Arm System (ELAS) (Figura 02) propuesto por Almazán y Tapia, 2015.

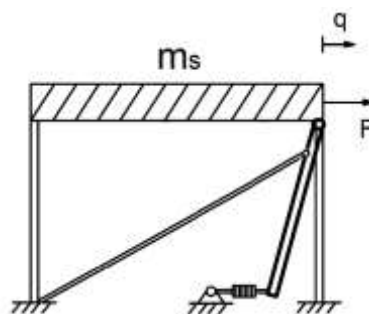


Figura 2: Representación esquemática de sistema de amplificación tipo ELAS

En el presente artículo se presenta la eficiencia de incorporar dispositivos de disipación de energía del tipo U-Shape Flexural Plate (UFP) conectados al sistema ELAS dentro de un sistema estructural marco plataforma de 6 niveles sujeto a acciones sísmicas.

## 2. DISPOSITIVO UFP Y SISTEMA DE AMPLIFICACIÓN DE DSPLAZAMIENTO TIPO ELAS

El análisis dinámico de la estructura requiere caracterizar la cinemática, rigidez equivalente y fuerza de fluencia fluencia equivalente del sistema de amplificación sísmica.

### 2.1. Caracterización del dispositivo tipo U-Shape Flexural Plate (UFP)

El dispositivo metálico de disipación de energía tipo UFP (Figura 03) es activado por desplazamiento, y disipa energía a través de la deformación plástica debido a la flexión de sus placas.

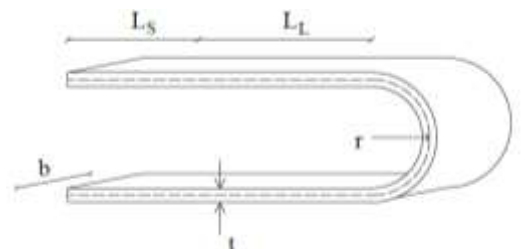


Figura 3: Variables geométricas del disipador de energía tip UFP

Debido al efecto de amplificación de desplazamientos, el dispositivo planteado es de gran nivel de desplazamiento, además para evitar el cambio de geometría circular a triangular al extremo de la placa se considera apropiado considerar Sistema de Restricción Interna - SRI, el mismo que fue estudiado por Almazán y Arizaga, 2019.

#### 2.1.1. Fuerza máxima y rigidez inicial.

La fuerza proporcionada por un UFP fue derivada analíticamente por Kelly en 1972 al relacionar el corte de acoplamiento del UFP con el momento plástico.

$$F_p = \frac{\sigma_y b t^2}{4r} \quad (1)$$

Donde  $\sigma_y$  es el esfuerzo de fluencia del material de las placas del dispositivo UFP,



La rigidez inicial que determina el desplazamiento de activación del dispositivo es determinado analíticamente según el segundo teorema de Castigliano, siendo así:

$$k_o = \frac{8Ebt^3}{27\pi r^3} \quad (2)$$

Donde  $E$  es el módulo de elasticidad del material de las placas del dispositivo UFP.

## 2.2. Equivalencia del sistema de amplificación (ELAS)

Una simplificación para el análisis es considerar un sistema equivalente a un sistema convencional, considerando una rigidez del dispositivo equivalente para una actuación conjunta de la barra y palanca, asimismo la fuerza horizontal transmitida por el dissipador UFP a través de la palanca.

Se define el factor de amplificación teórica  $\alpha = b/a$  como la relación entre longitudes definidas por el punto de pivot (Figura 4).

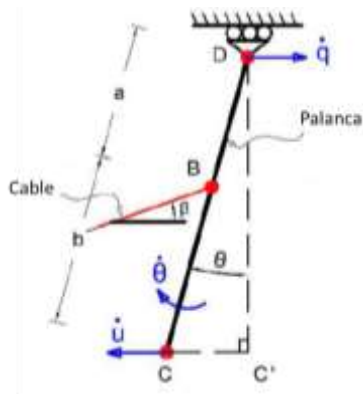


Figura 4: Diagrama de cuerpo libre del sistema de amplificación

Se define el factor de amplificación de velocidades como:

$$\alpha_{tg} = -\frac{\dot{u}}{\dot{q}} = (\alpha + 1) \frac{\cos \theta \cos \beta}{\cos(\theta + \beta)} - 1$$

Según Almazán y Baquero (2015) la rigidez del sistema ELAS se infiere a partir de compatibilidad de deformaciones a nivel del dissipador considerando desplazamiento ideal, la flexibilidad a flexión de la palanca y deformación horizontal de la barra. Siendo la rigidez equivalente del sistema:

$$k_{al} = \frac{k_d k_l}{(\alpha + 1)^2 k_l + k_d} \quad (3)$$

Siendo  $k_d$  la rigidez a desplazamiento horizontal del sistema en el punto pivot, y  $k_l$  la rigidez flexural de la palanca.

$$k_d = \frac{(\alpha + 1)f_d}{\Delta_d} \quad (4)$$

$$k_l \approx \frac{3EIJ_l}{\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)b^3} \quad (5)$$

Donde  $f_d$  es la fuerza efectuada por el dispositivo UFP,  $J_l$  momento de inercia de la sección de palanca, y  $\Delta_d$  la deformación horizontal permitida en el punto pivot.



A su vez, la equivalencia del sistema ELAS considerando un dispositivo viscoelástico (Elemento Maxwell):

$$k_{eq} = \alpha_{tg}^2 k_{dl} \quad (6)$$

$$c_{eq} = \alpha_{tg}^2 c_d \quad (7)$$

Por otro lado, considerando un dispositivo elastoplástico, la relación constitutiva equivalente del sistema ELAS puede expresarse como:

$$k_{eq} = \alpha_{tg}^2 k_{dl} \quad (8)$$

$$Q_{\mu} = \alpha_{tg} f_{\mu} \quad (9)$$

### 3. ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

En esta sección se analiza la respuesta de un sistema estructural de 6 niveles, en el cual la rigidez de cada nivel está dada por pórtico conformado por dos muros de dimensiones 2.4x4.8m (Figura 5). La rigidez del muro considera el aporte a la flexibilidad por flexión, corte y alargamiento del anclaje (Automatic Tensioning System – ATS).

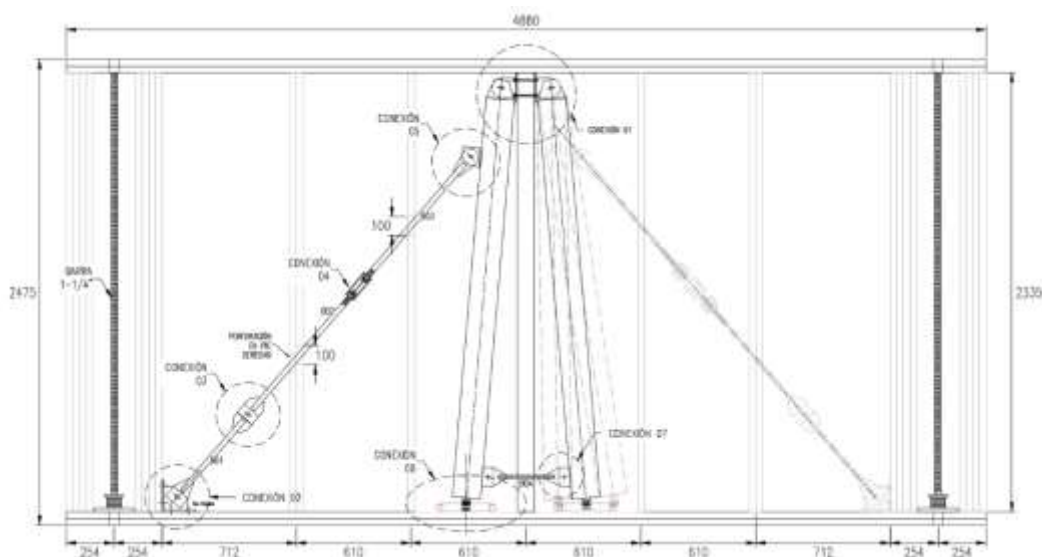


Figura 5: Muro del sistema estructural marco plataforma con disipadores UFP y amplificación de desplazamientos tipo ELAS.

La tabla 01 se muestra las características geométricas y elementos que componen el muro de corte. A partir de los cuales se obtiene la rigidez lateral de cada muro.

Tabla 1 Geometría y propiedades mecánicas de componentes del muro.

Muro	E tonf/cm <sup>2</sup>	E <sub>ATS</sub> tonf/cm <sup>2</sup>	b cm	h cm	t <sub>diafragma</sub> cm	#PPDD E	#PPDD I	G <sub>a</sub> tonf/cm	D <sub>ATS</sub> cm
M101	102	2100	488	244	33.8	4	4	7.5	3.49
M201	102	2100	488	244	33.8	4	4	7.5	2.86
M301	102	2100	488	244	33.8	4	4	5.0	2.54
M401	102	2100	488	244	33.8	4	4	5.0	2.22
M501	102	2100	488	244	33.8	4	4	5.0	1.91
M601	102	2100	488	244	33.8	4	4	3.9	0.95



### 3.1. Diseño convencional de estructuras marco plataforma

La práctica usual para el diseño de sistemas estructurales marco plataforma utiliza el método de análisis modal espectral, el mismo que aquí se aplica para mostrar que para edificaciones de 6 niveles en ciertas ocasiones no es aplicable bajo ciertas condiciones de emplazamiento según la norma NCh433 “Diseño sísmico de Edificios” Of.1996 Mod. 2012/DS-61.

Considerando las deformaciones que componen el muro según las Special Design Provisions for Wind and Seismic (SDPW):

$$\delta = \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{vh^3}{EAb} \right)_{Flexión} + \left( \frac{vh}{G_a} \right)_{Corte} + \left( \frac{h\Delta_a}{b} \right)_{Volcamiento} \quad (10)$$

Donde:

$h$  : Altura del muro (m).

$b$  : Largo del muro (m).

$E$  : Módulo de elasticidad de los pies derechos de borde (tonf/m<sup>2</sup>).

$A$  : Área transversal de los pies derechos de borde de un extremo del muro (m<sup>2</sup>).

$v$  : Corte por unidad de largo del muro (tonf/m).

$G_a$  : Módulo de corte aparente del muro (tonf/m).

$\Delta_a$  : Deformación total vertical del anclaje (m).

Asimismo dado que las deformaciones componen un sistema en serie, la rigidez del muro cuando el ATS se encuentra activado, se define como:

$$K = \left( \frac{1}{K_{flexión}} + \frac{1}{K_{corte}} + \frac{1}{K_{volcamiento}} \right)^{-1} \quad (11)$$

La rigidez del sistema considerando el sistema ATS inactivo es utilizada para la obtención de distribución de fuerzas de inercia sobre la estructura, de ese modo:

$$K = \left( \frac{1}{K_{flexión}} + \frac{1}{K_{corte}} \right)^{-1} \quad (11)$$

A partir de lo mencionado se obtiene la siguiente matriz de rigidez sin aporte de flexibilidad del ATS (tonf/cm):

$$K_{inactivo} = \begin{vmatrix} 115.01 & -55.93 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ -55.93 & 108.13 & -52.20 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & -52.20 & 88.81 & -36.61 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & -36.61 & 64.83 & -28.23 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & -28.23 & 42.54 & -14.32 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -14.32 & 14.32 \end{vmatrix}$$

Asimismo, la matriz de masa sísmica (tonf-s<sup>2</sup>/cm) está definida como:

$$M = \begin{vmatrix} 1.63 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.63 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.63 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.63 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.63 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.22 \end{vmatrix}$$



El periodo fundamental definido por K y M es de 0.46seg. De acuerdo a un análisis modal espectral propuesto por Rossi et al. (2015), el cual considera la flexibilidad lateral producido por el giro acumulado de los muros, se ha obtenido los desplazamientos relativos de entrepiso, la matriz de rigidez en ese caso está definida como se muestra:

$$K_{\text{activo}} = \begin{pmatrix} 100.74 & -55.56 & 0.75 & 0.71 & 1.07 & 0.48 \\ -44.84 & 82.99 & -38.93 & 0.25 & 0.37 & 0.17 \\ 0.00 & -31.03 & 66.59 & -38.05 & 1.72 & 0.77 \\ 0.00 & 0.00 & -29.43 & 63.01 & -35.31 & 1.73 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & -26.88 & 42.76 & -15.88 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -12.08 & 12.08 \end{pmatrix}$$

Utilizando como referencia la norma NCh433 “Diseño sísmico de Edificios” Of.1996 Mod. 2012/DS-61 y considerando Zona Sísmica 3 y tipo de suelo B. Los resultados son obtenidos en la Figura 6.

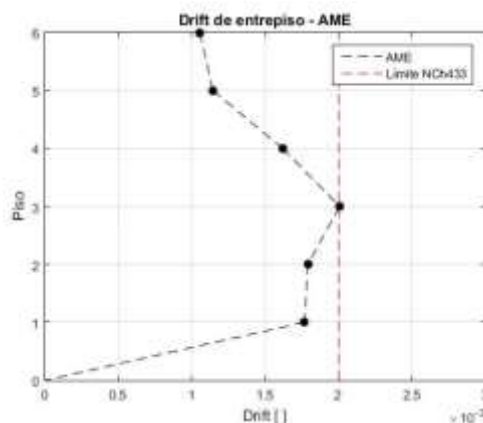


Figura 6: Derivas de entrepiso Análisis Modal Espectral

Dado que el desempeño observado se encuentra al límite de lo establecido, se propone incluir disipadores de energía de tipo UFP dentro del sistema ELAS. El sistema será analizado mediante análisis tiempo historia considerando una matriz de rigidez constante con sistema ATS activado para la caracterización del muro y constitutiva no lineal del sistema elasto-plástico equivalente del ELAS.

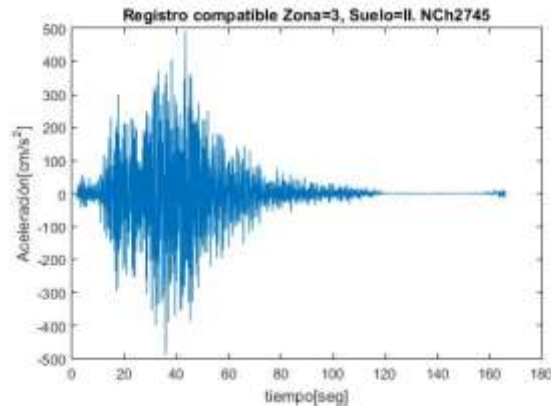
### 3.2. Análisis tiempo historia lineal de estructura sin disipación

Se evalúa la respuesta ante un registro sísmico compatible para el espectro de respuesta definido por la Norma NCh2745 “Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica” considerando Zona Sísmica 3 y suelo tipo II. Ver Figura 7.

La matriz de rigidez del sistema considera el sistema ATS activado durante la acción del sismo, por lo que la matriz de rigidez queda definida como sigue:

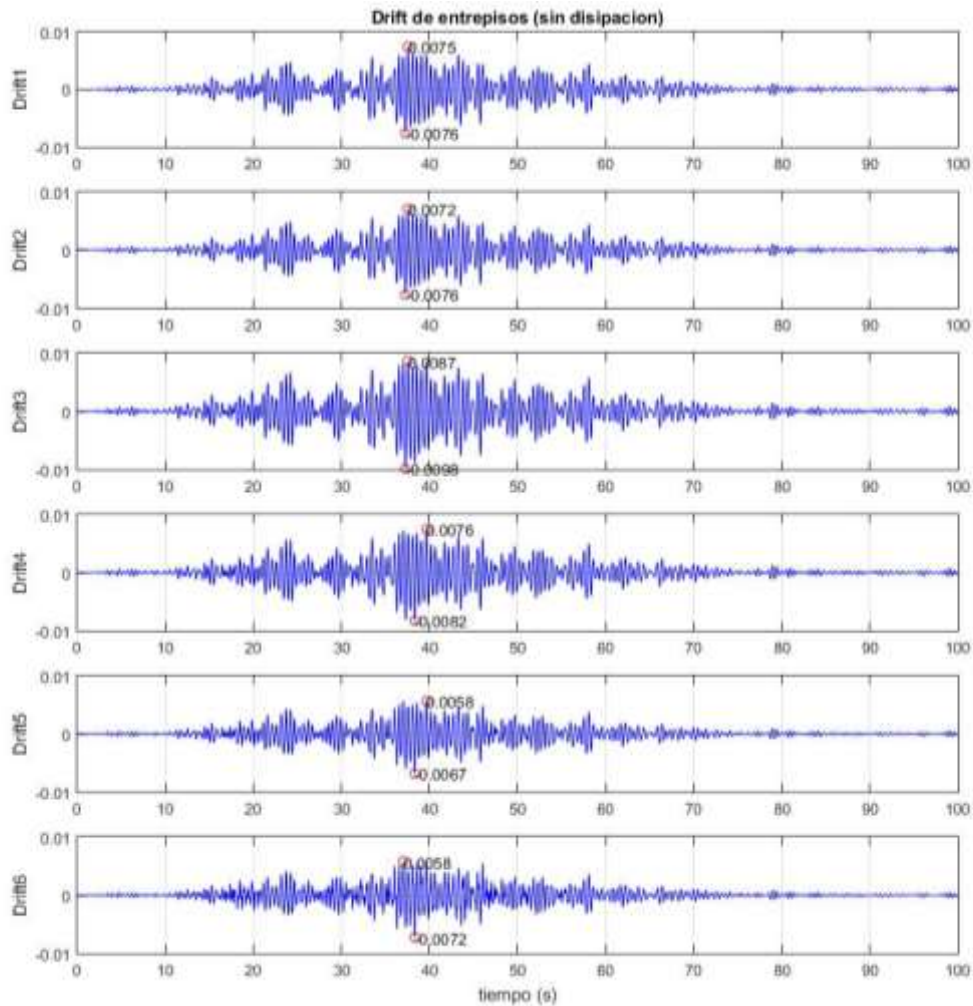
$$K_{\text{activo}} = \begin{pmatrix} 98.72 & -48.02 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ -48.02 & 81.03 & -33.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & -33.01 & 64.72 & -31.71 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & -31.71 & 61.27 & -29.56 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & -29.56 & 44.23 & -14.66 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -14.66 & 14.66 \end{pmatrix}$$

Asimismo, para el análisis se considera un amortiguamiento inherente de la estructura de 5% en consecuencia a las sugerencias realizada por Pino et al (2010) para estructuras de madera con sistema estructural marco plataforma.



*Figura 7: Registro sísmico*

Para la obtención de la solución dinámica se he implementado una rutina utilizando MATLAB. Los resultados del sistema sin disipación se muestran a continuación:



*Figura 8: Drift de entresiso – Estructura sin disipación*





### 3.3. Análisis tiempo historia lineal de estructura con disipación

Al igual que el ítem anterior se considera una matriz de rigidez constante, amortiguamiento inherente de 5%. El sistema ELAS está compuesto por una barra roscada de 1" y una palanca de acero de dimensiones 100x150x5mm conectado a un disipador tipo UFP con fuerza de activación de 300kg. El factor de amplificación  $\alpha = 200/20 = 10$ .

Para el análisis se ha distribuido 2 disipadores UFP en cada muro, tal como muestra la Figura 1. Para la obtención de la respuesta dinámica se ha implementado una rutina en MATLAB, considerando un modelo numérico tipo Buoc Wen para el modelamiento elasto-plástico del dispositivo UFP. En la figura 9 se observa la historia de *drift* de entrepiso del sistema con disipación de energía.

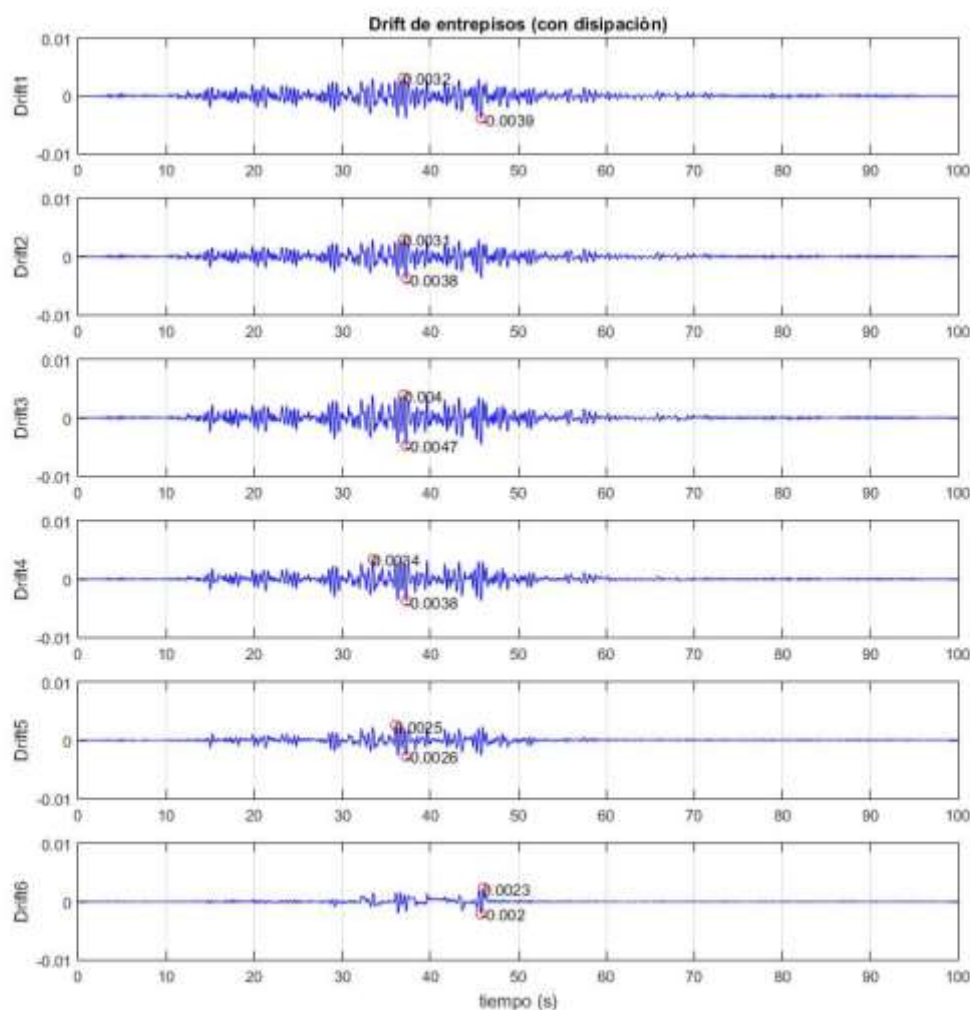
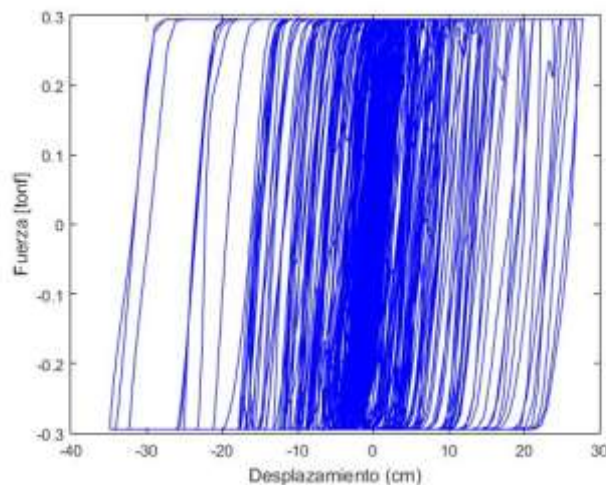


Figura 9: *Drift* de entresijos – Estructura con disipación

A partir de las figuras 8 y 9 se observa una reducción de 51% del *drift* más solicitado (3er nivel). La Figura 10 muestra la historia histerética de un dispositivo ubicado en el tercer nivel.



*Figura 10: Fuerza vs Desplazamiento del dispositivo UFP más solicitado*

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del proyecto FONDECYT N° 11170863 en el cual se encuentra enmarcado el tema presentado en este artículo. El primer autor está muy agradecido por la guía y paciencia brindada especialmente por sus tutores del proyecto de investigación Ph.D. Pablo Guindos y Ph.D. José Luis Almazán, al igual que M. Eng. Jairo Montaña quien viene siendo soporte y guía en el proceso de investigación experimental.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Wood Council. Special, Design Provisions for Wind and Seismic 2015 Edition. AWC/ANSI, USA, 2015.

Instituto Nacional de Normalización. (2009). Norma chilena oficial NCh 433.Of1996 Modificada en 2009. NCh433.Of1996 Modificada en 2009.

Lopez García, D. (2001). A simple method for the design of optimal damper configurations in MDOF structures. Earthquake spectra.

MATLAB version 8.1.604 (R2013a). The MathWorks Inc., Natick - Massachusetts 2013

S. Rossi et al., Seismic elastic analysis of light timber-frame multi-storey buildings: Proposal of an iterative approach, Constr. Build. Mater. (2015).

Sebastián Baquero, José Luis Almazán and Nicolás Tapia. Amplification System for Concentrated and Distributed Energy Dissipation Devices, John Wiley & Sons Ltd, 1997.

Rafael Arizaga. Estudio Experimental de Dispositivos de Disipación de Energía Tipo UFP Sin y Con Sistema de Restricción Interna. Disertación de Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Yuri Ribakov and Andrei M. Reinhorn. Design of Amplified Structural Damping Using Optimal Considerations. Journal of Structural Engineering, 129(October):1422–1427, 2003.