

## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DE MARCOS DE MADERA CON CONEXIONES SEMIRRÍGIDAS

**O. Muñoz Bustamante<sup>1</sup>, N. Maureira Carsalade<sup>2</sup>, E. Behrens Rincón<sup>3</sup>**

### RESUMEN

En esta investigación, se realizaron análisis dinámicos no lineales en marcos de madera de 3, 6, 9 y 12 pisos sometidos a registros sísmicos. En todos los cuadros, se analizaron dos casos: considerando conexiones rígidas y considerando conexiones semirrígidas con capacidad de disipación de energía. Esto con la finalidad de determinar la capacidad de las conexiones para reducir las solicitaciones sísmicas en la estructura al disipar parte de la energía impuesta por el terremoto. Las conexiones fueron caracterizadas utilizando un modelo no-lineal ideado por el profesor guía de esta tesis, el que fue validado experimentalmente (Padilla, 2018). La conexión es capaz de comportarse como rígida mientras no se supere su momento flector de apertura. Una vez alcanzado el umbral anterior la conexión se abre disipando energía con incrementos marginales en el momento flector transmitido entre elementos conectados. Además, tiene la capacidad de auto centrarse, recuperando su forma original sin quedar con deformaciones plásticas permanentes.

Se escogió un arquetipo de marco compuesto por dos ejes de columnas unidos por vigas. Las columnas fueron consideradas como elementos continuos en toda la altura del marco, con conexiones en su base a las fundaciones y en encuentro de vigas y columnas. Se asignaron masas al marco considerando peso de losa y sobrecargas sísmicas en un ancho tributario igual a la separación de las columnas. Para definir las dimensiones de los elementos se realizó un análisis modal espectral asumiendo conexiones rígidas, definiendo secciones cuadradas para columnas y rectangulares para vigas. Las secciones de columna se diseñaron escalonadas, esto es, más grandes en la base y más pequeñas en pisos superiores. Las vigas se consideraron de altura fija, pero de mayor ancho en la base, reduciéndose en altura. El diseño de secciones se realizó para el marco de 12 pisos, siendo definidos los demás marcos de menos pisos analizados, a partir de los últimos pisos del marco de 12 pisos.

Las propiedades de las conexiones fueron definidas en base a las capacidades de los elementos conectados. Como criterio se consideró que al alcanzar la solicitación que genera el inicio de la apertura de la conexión, ninguno de los elementos superase su capacidad admisible, considerando un factor de seguridad dado.

Los resultados de los análisis mostraron que, a excepción de casos puntuales, los marcos con conexiones semirrígidas tuvieron menores aceleraciones de piso y corte basal que la misma estructura con conexiones rígidas. Sin embargo, los desplazamientos laterales y derivas de piso o drift, fueron en la mayoría de los casos superiores en los marcos con conexiones semi-rígidas. Lo anterior permite concluir que la conexión estudiada permite reducir las cargas en la estructura al aumentar su ductilidad, con un costo en el incremento de las deformaciones.

**PALABRAS CLAVE:** Conexión auto-centrante; disipación de energía; corte basal; desplazamientos de piso.

### ABSTRACT

In this research, dynamic nonlinear analyzes were carried out on wooden frames of 3, 6, 9 and 12 floors subjected to seismic records. In all frames, two cases were analyzed: considering rigid connections and considering semirigid connections with energy dissipation capacity. The above in order to determine the capacity of the connections to reduce seismic stresses in the structure by dissipating part of the energy imposed by the earthquake. The connections were characterized using a non-linear model devised by the professor advisor of this thesis, which

<sup>1</sup>Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [omunoz@ing.ucsc.cl](mailto:omunoz@ing.ucsc.cl).

<sup>2</sup>Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [nmaureira@ucsc.cl](mailto:nmaureira@ucsc.cl).

<sup>3</sup>Profesor Adjunto, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [ebehrens@ucsc.cl](mailto:ebehrens@ucsc.cl).

was validated experimentally (Padilla, 2018). The connection is capable of behaving as rigid until certain bending moment threshold is exceeded. Once the previous threshold has been reached, the connection opens, dissipating energy with marginal increments in the bending moment transmitted between connected elements. The connection has self-centering capacity, recovering its original shape without remaining with plastic deformations.

A framework archetype composed of two axes of columns joined by beams was chosen for the analyzes. The columns were considered as continuous elements throughout the height of the frame, with connections in their base to the foundations and in meeting of beams and columns. Masses were assigned to the framework considering slab weight and seismic overloads in a tributary width equal to the separation of the columns. To define the dimensions of the elements, a spectral modal analysis was carried out assuming rigid connections. Square sections were defined for columns and rectangular sections for beams. The column sections were designed staggered, that is, larger in the pass and smaller in the upper floors. The beams were considered with fixed height, but with greater width in the base, reducing in height. The design of sections was made for the 12-story frame, with the other frames of less floors being defined chosen the elements of the last floors of the 12-story frame.

The properties of the connections were defined based on the capacities of the connected elements. As a criterion, it was considered that upon reaching the request generated by the start of the connection opening, none of the elements exceeded its admissible capacity, considering a given safety factor.

The results of the analyzes showed that, with the exception of specific cases, frames with semi-rigid connections had lower accelerations of floor and base shear loading than the same structure with rigid connections. However, the lateral displacements of floor and drift were in most cases superior in frames with semi-rigid connections. The above allows to conclude that the use of the studied connection can to reduce the loads in the structure by increasing its ductility, with a cost in the increase of the deformations.

**KEYWORDS:** Self-centering connection; energy dissipation; base shear load; floor displacements.

## 1. INTRODUCCIÓN

Chile es uno de los países de mayor riesgo sísmico a nivel mundial. En él se han registrado los sismos de mayor intensidad a nivel mundial, tal es el caso del terremoto de Valdivia de 1960 ( $M_w=9.5$ ), y el terremoto del Maule de 2010 ( $M_w=8.8$ ). Lo anterior hace que sea importante estudiar métodos que permitan reducir el posible daño en estructuras ante la ocurrencia de eventos sísmicos severos.

Los modelos estructurales analizados en esta tesis son marcos de secciones de madera tanto en columnas como vigas. Se analizaron modelos de 3, 6, 9 y 12 pisos, a los cuales se les añadió conexiones semirrígidas en las uniones con el fin de reducir la demanda sísmica en los marcos. Referente a la elección de este material es importante destacar que una de las motivaciones de este estudio es promover el uso de la madera, ya que a pesar de que el país posee abundantes recursos forestales, según el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, de entre las 90 y 120 mil viviendas nuevas que se construyen al año, apenas un 14% usa la madera como material predominante, esto se debe principalmente al desconocimiento de los beneficios que tiene el uso de la madera como material constructivo y a la falta de especialistas capaces de construir con madera además de la restricciones impuestas en la normativa vigente para materiales poco estudiados en el país como este (NCh 433 Of. 2010). Los sismos a los que fueron sometidos los modelos se ajustan al espectro definido en la normativa chilena de análisis y diseño de edificios con aislación sísmica (NCh 2745 Of. 2013).

Previamente en otras investigaciones ya se han realizado estudios sobre el impacto del uso de las conexiones semirrígidas ideadas por el profesor guía de esta tesis en estructuras de madera, (Orellana, 2016), y también ha sido validado experimentalmente a través de una maqueta (Padilla, 2018).

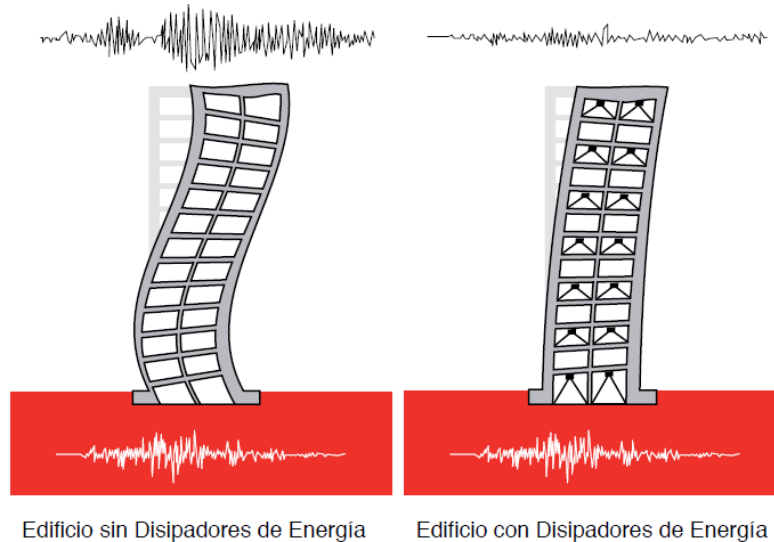
Las propiedades de la madera fueron definidas según la normativa vigente para las construcciones en madera (NCh 1198 Of. 2014). La configuración de los elementos se realizó para el marco de 12 pisos, para luego definir el resto de los edificios eliminando los tres primeros pisos para el marco de 9 pisos, lo mismo se hizo con los marcos de 6 y 3 pisos, las cargas sobre cada piso se definieron según la normativa vigente (NCh 1537 Of. 2009), en tanto a rigidez y masa de la estructura se utilizó las matrices de rigidez y masas consistente de Euler-Bernoulli y para la resolución del modelo numérico se usó el software MATLAB.

Este estudio pretende demostrar el aporte de las conexiones semirrígidas, las cuales permiten disipar energía durante la acción de un evento sísmico, reduciendo así el impacto producido por las fuerzas dinámicas de estos eventos. Para verificar este efecto se realizó la comparación del corte basal, aceleración de piso, derivas de piso o drift y la disipación de energía en las estructuras con y sin estas conexiones semirrígidas.

A continuación, se muestra un extracto del documento técnico: “Protección sísmica de estructuras” (CDT, 2012), a modo de introducción al tema de los disipadores de energía.

Los sistemas de protección sísmica de estructuras utilizados en la actualidad incluyen diseños relativamente simples hasta avanzados sistemas totalmente automatizados. Los sistemas de protección sísmica se pueden clasificar en tres categorías: Sistemas activos, sistemas semi-activos y sistemas pasivos. Los sistemas activos de protección sísmica son sistemas complejos que incluyen sensores de movimiento, sistemas de control y procesamiento de datos, y actuadores dinámicos. Los sistemas semi-activos de protección sísmica, al igual que los activos, cuentan con un mecanismo de monitoreo en tiempo real de la respuesta estructural. Sin embargo, a diferencia de los sistemas activos no aplican fuerzas de control directamente sobre la estructura. Los sistemas pasivos son los dispositivos de protección sísmica más comúnmente utilizados en la actualidad. A esta categoría corresponden los sistemas de aislación sísmica de base y los disipadores de energía, tal como el estudiado en este documento.

Es importante mencionar que los disipadores de energía, a diferencia de los aisladores sísmicos, no evitan que las fuerzas y movimientos sísmicos se transfieran desde el suelo a la estructura. Estos dispositivos son diseñados para disipar la energía entregada por los sismos, (aunque también se puede dar por fenómenos de viento fuerte u otras sollicitaciones de origen dinámico), protegiendo y reduciendo los daños en elementos estructurales y no estructurales. En la Figura 1 se puede observar una comparación de un edificio con y sin disipadores de energía.



**Figura 1:** Comparación de edificio sin disipadores y edificio con disipadores de energía. (Fuente: CDT, 2012)

Los sistemas pasivos de disipación de energía pueden ser clasificados en cuatro categorías, según sean estos activados por desplazamientos, velocidades, por una combinación de desplazamientos y velocidades, o por movimiento (fuerzas inerciales). A continuación, se detalla brevemente las características generales de los disipadores activados por desplazamiento.

Estos se activan por medio de los desplazamientos relativos de los extremos del dispositivo, inducidos por los movimientos de la estructura durante un terremoto. Estos dispositivos disipan energía a través de la deformación plástica de sus componentes o mediante la fricción entre superficies especialmente diseñadas para estos fines. Bajo esta clasificación se encuentran los dispositivos metálicos, friccionales, de extrusión de materiales y los sistemas autocentrantes.

Los disipadores metálicos disipan energía por medio de la fluencia de metales sometidos a esfuerzos de flexión, corte, torsión, o una combinación de ellos. Los disipadores metálicos presentan, en general, un comportamiento predecible, estable, y confiable a largo plazo. En general, estos dispositivos poseen buena resistencia ante factores ambientales y temperatura.

Los disipadores friccionales disipan energía por medio de la fricción que se produce durante el desplazamiento relativo entre dos o más superficies en contacto. Estos disipadores son diseñados para activarse una vez que se alcanza un determinado nivel de carga en el dispositivo. Mientras la solicitación no alcance dicha carga, el mecanismo de disipación se mantiene inactivo.

Los disipadores de extrusión de materiales basan su comportamiento en la extrusión de materiales (típicamente plomo) a través de perforaciones.

Los disipadores autocentrantes basan su comportamiento en los ciclos histeréticos que se producen en conexiones o elementos pretensionados. Algunos disipadores autocentrantes pueden ser fabricados utilizando materiales con memoria de forma o SMA (por sus siglas en inglés para Shape Memory Alloys). Estos dispositivos utilizan las propiedades de los elementos que los componen, por ejemplo, acero, y de la geometría de su configuración para disipar energía y, una vez finalizada la carga, regresar a su posición inicial. De esta forma, los disipadores autocentrantes permiten controlar gran parte de los desplazamientos residuales de la estructura luego de un terremoto.

## 2. SIMBOLOGIA

En esta sección se define el significado de la simbología usada en el documento.

$M(\theta, \dot{\theta})$  : Momento que la conexión es capaz de transmitir ante un sismo.

$\theta$  : Giro en la rótula plástica.

$M_E^o$  : Momento elástico inicial.

$M_R$  : Momento friccional.

F.S. : Factor de seguridad.

$M_{ADM}$  : Momento admisible.

$K_\theta$  : Rigidez aportada por las conexiones semirrígidas.

N : Numero grande y positivo en la función Tanh.

$u, \dot{u}, \ddot{u}$  : Desplazamiento, velocidad y aceleración de la estructura relativa al suelo, respectivamente.

$\ddot{u}_g$  : Aceleración del suelo producto de un sismo.

$M_v$  : Matriz de masa consistente de elementos tipo barra de Euler-Bernoulli.

M : Matriz de masas ensamblada.

$K_v$  : Matriz de rigidez de elementos tipo barra de Euler-Bernoulli.

K : Matriz de rigidez ensamblada.

$\underline{u}$  : Grados de libertad de la estructura ensamblada.

- $\nu$  : Grados de libertad de elementos desensamblados.
- L : Matriz de relación cinemática.
- $L_{NL}$  : Matriz de relación cinemática de elementos no lineales.
- C : Matriz de amortiguamiento.
- $\xi$  : Razón de amortiguamiento crítico.
- $F_{NL}$  : Fuerzas internas no lineales correspondiendo a los momentos en las rotulas.
- $r_g$  : Vector de unos en grados de libertad laterales.
- $\Phi$  : Formas modales de la estructura.
- $\Omega$  : Frecuencia de la estructura.
- c : Dimensión de la sección de la columna.
- h : Alto de la viga.
- b : Ancho de la viga.
- $L_e$  : Longitud del elemento (viga o columna).
- E : Modulo de elasticidad de la madera.
- $\rho$  : Densidad de la madera.
- A : Área de la sección transversal del elemento (viga o columna).
- I : Inercia de la sección de madera.
- $E_d^{vis}$  : Energía disipada por el amortiguamiento interno de la estructura.
- $E_d^{his}$  : Energía disipada por las rotulas en la estructura.
- C.R. : Conexión rígida.
- C.S.R. : Conexión semirrígida.
- $Q_0^{C.S.R.}$  : Corte basal de la estructura con conexiones semirrígidas.
- $Q_0^{C.R.}$  : Corte basal de la estructura con conexiones rígidas.
- $FM_{Q_0}$  : Factor de modificación del corte basal máximo al incorporar conexiones semirrígidas.
- $FM_{DM}$  : Factor de modificación del drift máximo al incorporar conexiones semirrígidas.
- $FM_{AAM}$  : Factor de modificación de la aceleración absoluta máxima al incorporar conexiones semirrígidas.

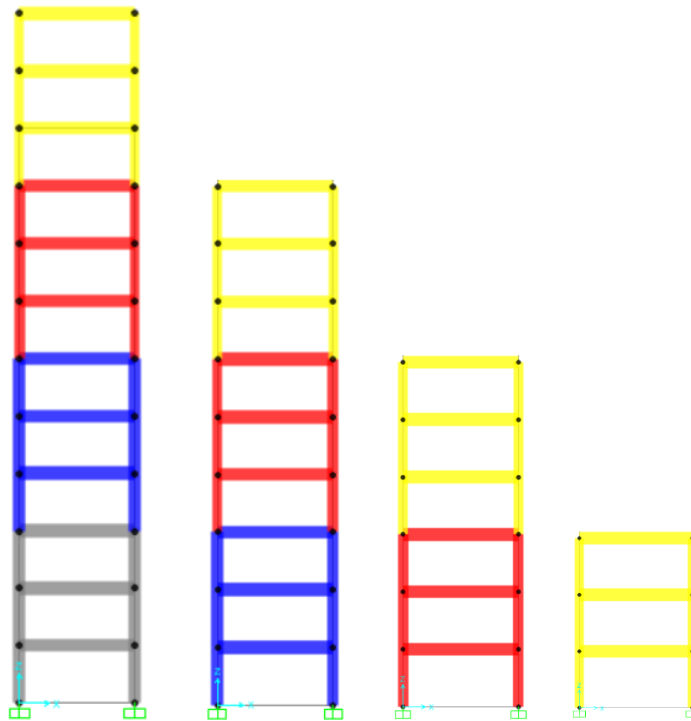
### 3. METODOLOGÍA

En las últimas dos décadas ha ganado aceptación entre la comunidad profesional el uso de sistemas de protección sísmica en estructuras. Entre ellos, se encuentra los dispositivos de disipación de energía, como el que se estudia en este documento. Estos sistemas de disipación de energía, si bien no evitan el ingreso de energía a la estructura, permiten que la disipación de energía se concentre en dispositivos especialmente diseñados para esos fines, reduciendo sustancialmente la porción de la energía que debe ser disipada por la estructura. El uso de disipadores de energía reduce la respuesta estructural, disminuyendo el daño de la estructura.

#### 3.1 Modelos de las estructuras analizadas

El objeto de estudio consiste en edificios compuestos por marcos de 3,6,9 y 12 pisos con y sin la incorporación de conexiones semirrígidas, el modelo inicial corresponde al de 12 pisos. Los modelos tienen la misma configuración de vigas y columnas cada 3 pisos, esto quiere decir que los pisos 1,2 y 3 poseen las mismas dimensiones tanto en las vigas como en las columnas, lo mismo sucede con los pisos 4,5 y 6 y así sucesivamente hasta formar el edificio de 12 pisos, para la configuración del siguiente edificio, es decir el de 9 pisos se eliminaron los tres primeros pisos, de la misma forma se armaron los edificios de 6 y 3 pisos.

La verificación del edificio de 12 pisos se realizó en el software SAP2000, mediante el cual se aplicó un sismo y se verificó que cumpliera con las solicitaciones de desplazamiento de pisos de la NCh433 y también se verificó que las secciones cumplieran con lo requerido en la norma de Construcciones en madera NCh1198. Los modelos de los edificios en el software se pueden observar en la Figura 2. Posterior a esto se realizaron algunas modificaciones para el planteamiento del modelo numérico en el software MATLAB.



**Figura 2:** Modelos de 12, 9, 6 y 3 pisos en software SAP2000.

En la Figura 2 se puede apreciar las secuencias de la configuración de los edificios, a los cuales se les quitaba 3 pisos conservando los superiores, esto hasta el edificio de 3 pisos.

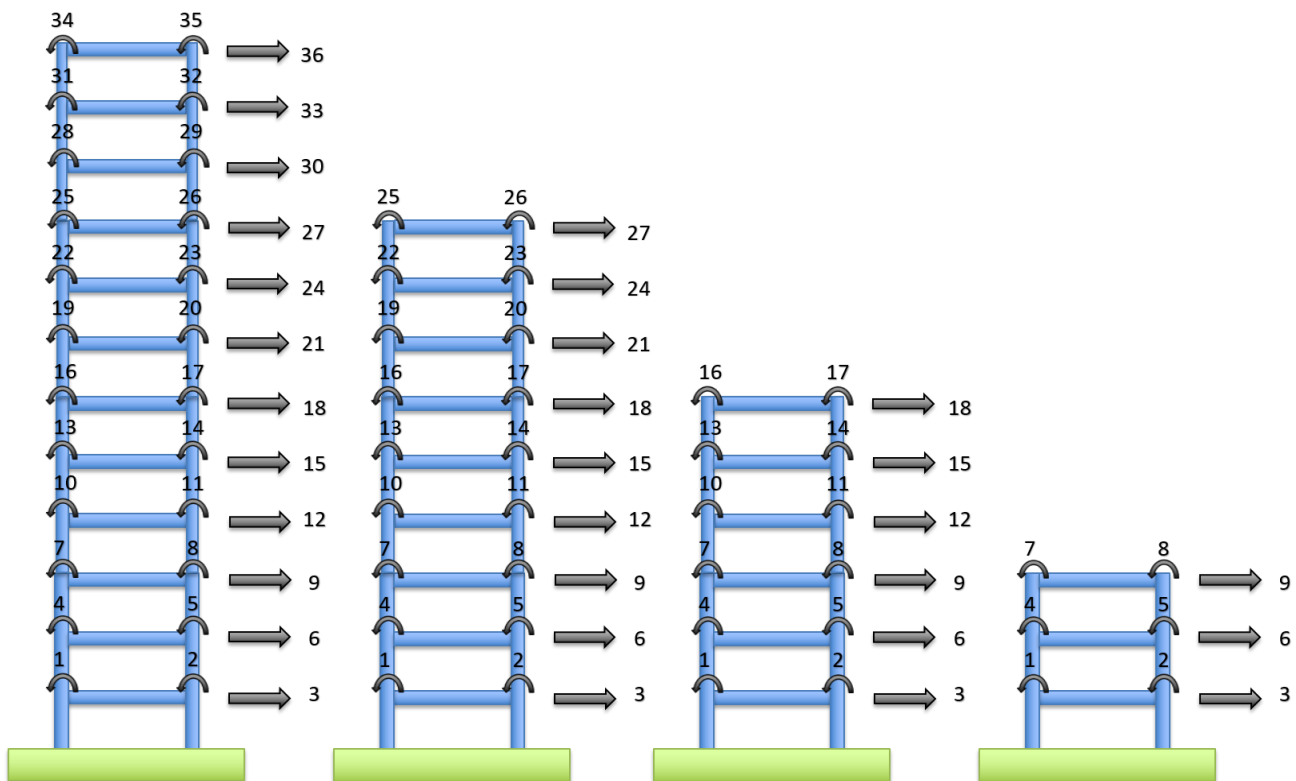
Para aclarar lo antes mencionado, a continuación, en la Tabla 1, se presenta la distribución de los elementos en cada piso correspondiente a cada edificio, los cuales poseen columnas cuadradas iguales cada 3 pisos, lo mismo pasa con las vigas a excepción de su altura, ya que esta es constante en todos los pisos.

**Tabla 1:** Distribución de vigas y columnas de los edificios.

Columna	Viga		Edificio			
			12 Pisos	9 Pisos	6 Pisos	3 Pisos
c (cm)	h (cm)	b (cm)	Pisos			
55	55	55	1,2,3			
50	55	50	4,5,6	1,2,3		
45	55	45	7,8,9	4,5,6	1,2,3	
40	55	40	10,11,12	7,8,9	4,5,6	1,2,3

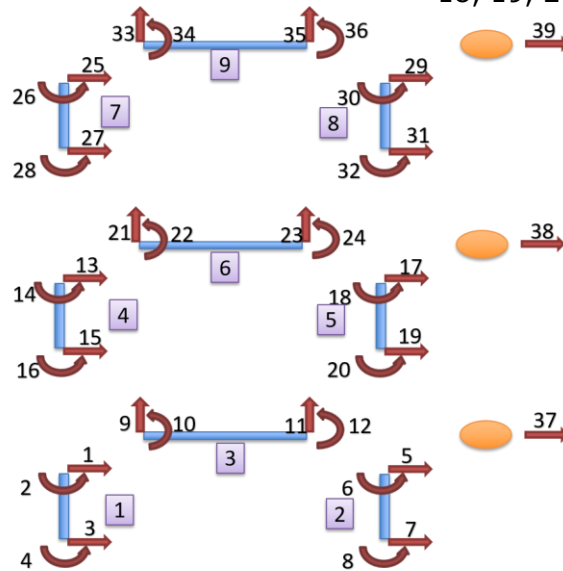
Para dimensionar el marco es necesario definir espaciamiento entre columnas y altura de piso. Para lo anterior, se utilizaron valores típicos para marcos, estos son de 2,5 metros de altura de piso para las columnas y 5 metros de largo para las vigas. También se definió un ancho tributario para poder considerar la masa tributaria en las vigas, esto para poder considerar el aporte de masa de la losa y su sobrecarga en los análisis, este ancho es de 5 metros, por lo que el área tributaria sería de  $25 m^2$ . Las sobrecargas se obtuvieron de la norma NCh 1537.

El marco de madera con conexiones rígidas cuenta con grados de libertad globales de giro en las uniones viga-columna y horizontales en todas las vigas, esto se puede ver en la Figura 3, para este estudio no se consideraron grados de libertad verticales ya que se considera que las columnas son axialmente rígidas.



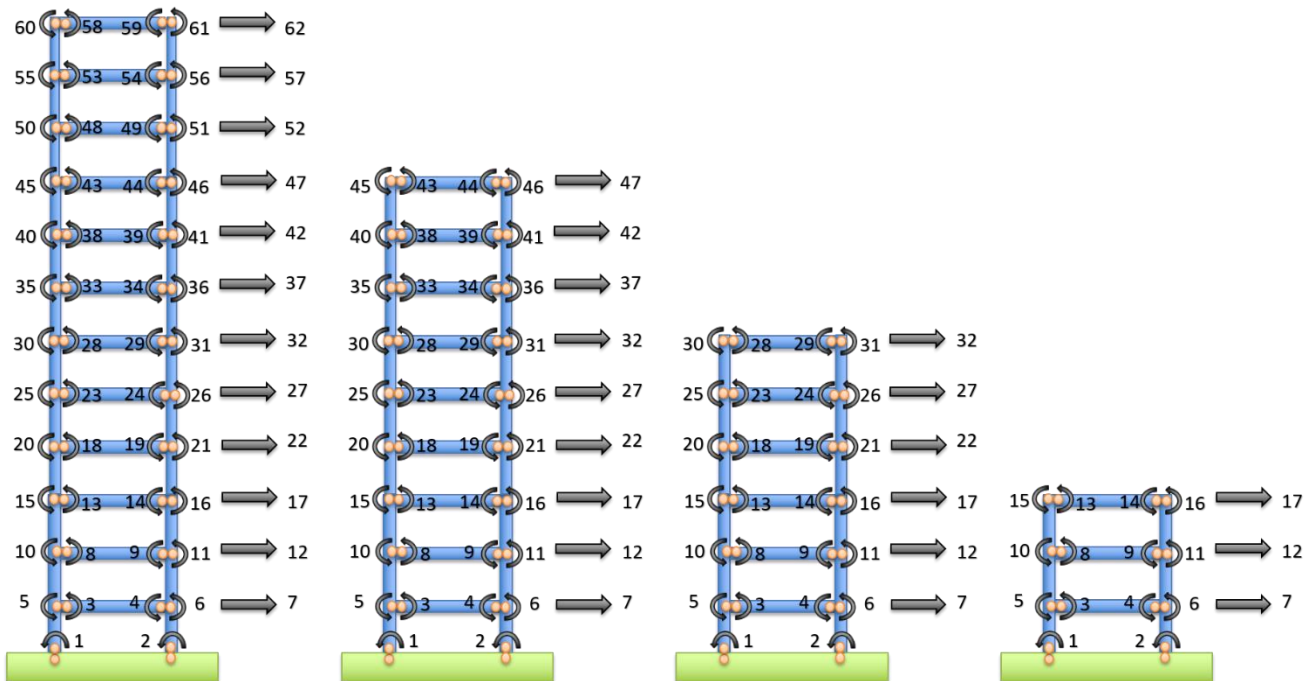
**Figura 3:** Modelos de edificios con conexiones rígidas, con grados de libertad de la estructura ensamblada (u).

A continuación, se presenta la configuración de los grados de libertad locales para el edificio con conexiones rígidas de 3 pisos, siendo los elementos lineales numerados del 1 al 9. Se consideró un grado de libertad local horizontal en cada viga para considerar el peso de la viga más su sobrecarga en el análisis de los marcos.



**Figura 4:** Grados de libertad de elementos desensamblados ( $\underline{v}$ ) del edificio de 3 pisos con conexiones rígidas.

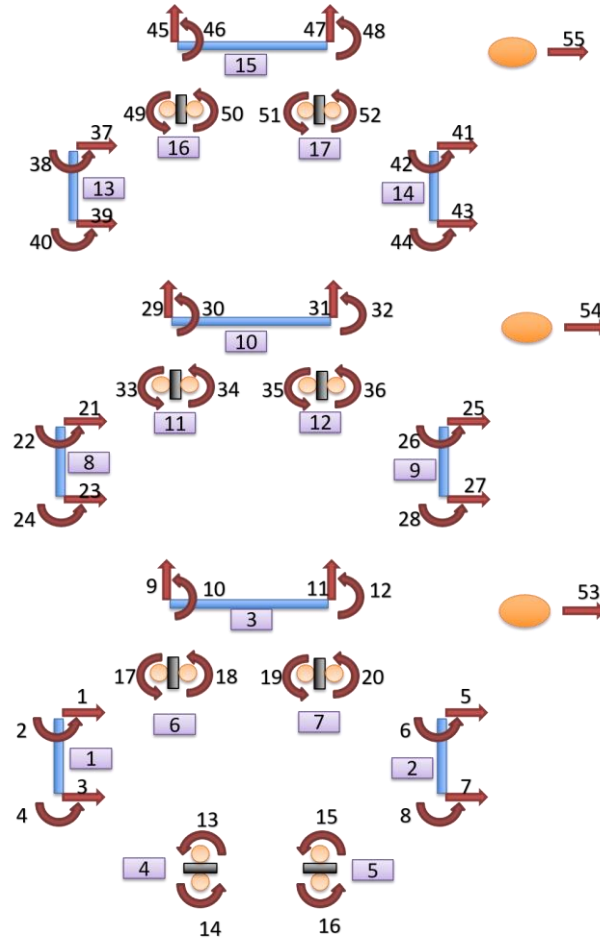
El modelo con respuesta plástica sigue la misma configuración de vigas y columnas y se le agrego conexiones semirrígidas en las uniones viga-columna y en la base del edificio, por lo que se consideran grados de libertad de giro en la base del edificio y dos giros por cada conexión, uno para la viga y otro para la columna.



**Figura 5:** Modelo de edificio con conexiones semirrígidas, con grados de libertad de la estructura ensamblada ( $\underline{u}$ ).

La configuración de grados de libertad locales del edificio de 3 pisos con conexiones semirrígidas agrega los giros en la base y en las uniones columna-viga. Donde los elementos lineales corresponden a los números 1, 2, 3, 8, 9,

10, 13, 14 y 15 y los elementos no lineales corresponden a los elementos con los números 4, 5, 6, 7, 11, 12, 16 y 17 en el modelo de 3 pisos presentado a continuación.



**Figura 6:** Grados de libertad de elementos desensamblados ( $\underline{v}$ ) del edificio de 3 pisos con conexiones semirrígidas.

### 3.2 Modelo analítico de conexión semirrígidas

El modelo de la rótula plástica consiste en una conexión semirrígidas autocentrante que limita el momento que la conexión puede transmitir.

Las conexiones semirrígidas se activan por medio de los desplazamientos relativos de los extremos del dispositivo, inducidos por los movimientos de la estructura durante un terremoto. Estas conexiones disipan energía a través de la deformación plástica y de la fricción de sus componentes.

El momento en la rótula se presenta en la Ec (1).

$$M(\theta, \dot{\theta}) = M_E^o \cdot \text{Sign}(\theta) + K_\theta \cdot \theta + M_R \cdot \text{Sign}(\dot{\theta}) \quad (1)$$

$$M_E^o + M_R \leq \frac{1}{F.S.} \cdot M_{ADM} \quad (2)$$

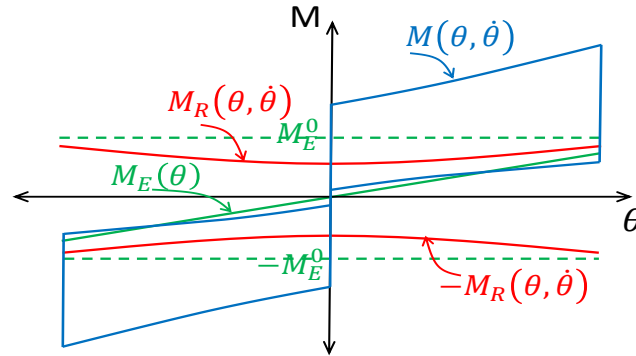
$$M_R = 0,9 \cdot M_E^o \quad (3)$$

De la Ec (2) y la Ec (3) se obtiene el valor del momento elástico.

$$M_E^0 = \left( \frac{1}{F.S.} \cdot M_{ADM} \right) \frac{1}{1,9} \quad (4)$$

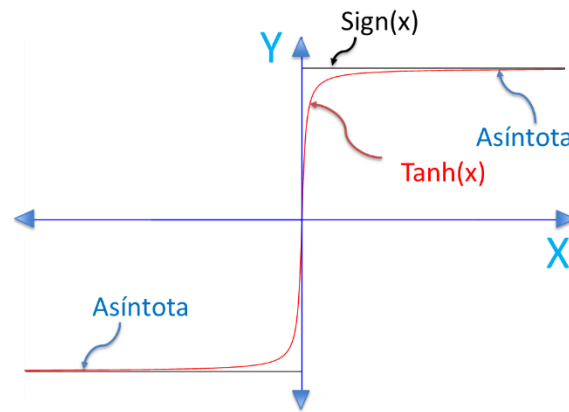
El factor de seguridad considerado es 2.

Donde el momento admisible corresponde a el momento admisible de la columna en la base, al mínimo entre momento admisible de la viga y a la suma de los momentos admisibles de las columnas entre pisos, y al mínimo entre el admisible de la viga y la columna para el caso del techo.



**Figura 7:** Componentes teóricos del momento según el modelo analítico. (Fuente: Padilla, 2018)

Para el caso de la resolución numérica, la convergencia se dificulta, esto porque la función  $Sign(x)$  es discontinua. Para solucionar este problema se cambia esta función por la función  $Tanh(N \cdot x)$ , esto se observa en la Figura 8.



**Figura 8:** Aproximación de función  $Sign(x)$  por  $Tanh(N \cdot x)$ , con N grande.

### 3.3 Formulación del Equilibrio Dinámico

La ecuación diferencial del movimiento (EDM) utilizada en este estudio se presenta a continuación en la Ec (5).

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u + L_{NL}^T \cdot F_{NL} = -M \cdot r_g \cdot \ddot{u}_g \quad (5)$$

Para el caso los edificios con conexiones rígidas el término  $F_{NL}$  es igual 0.

Despejando  $\ddot{u}$  de la Ec (5).

$$\ddot{u} = -M^{-1} \cdot K \cdot u - M^{-1} \cdot C \cdot \dot{u} - M^{-1} \cdot L_{NL}^T \cdot F_{NL} - r_g \cdot \ddot{u}_g \quad (6)$$

Realizando el cambio de variable  $Y = \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \end{bmatrix}$  y reemplazando en (6) se obtiene:



$$\dot{Y} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1} \cdot K & -M^{-1} \cdot C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -r_g \end{bmatrix} \cdot \ddot{u}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1} \cdot L_{NL}^T \cdot F_{NL} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para la resolución de la EDM se utilizó el software MATLAB, el cual dispone de varias funciones para resolver mediante procedimientos numéricos ecuaciones diferenciales, en este caso en particular se usó el comando ode45.

Para la rigidez de las vigas y columnas se considera la matriz de rigidez de Euler-Bernoulli, la cual se presenta a continuación.

$$K_v = \frac{E \cdot I}{L_e^3} \cdot \begin{bmatrix} 12 & 6L_e & -12 & 6L_e \\ 6L_e & 4L_e^2 & -6L_e & 2L_e^2 \\ -12 & -6L_e & 12 & -6L_e \\ 6L_e & 2L_e^2 & -6L_e & 4L_e^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Siendo la madera pino radiata grado MGP 12, con un módulo de elasticidad de 12700 MPa.

Se realizó el ensamble de matrices usando relaciones cinemáticas, esta relación se presenta en la Ec (9).

$$\underline{v} = L \cdot \underline{u} \quad (9)$$

A través de relaciones cinemáticas se obtiene la matriz de rigidez de los marcos estudiados, esto se presenta en la Ec (10).

$$K = L^T \cdot K_v \cdot L \quad (10)$$

Para la masa de las vigas y columnas se considera la matriz de masas consistente de Euler-Bernoulli, la cual se presenta en la Ec (11).

$$M_v = \frac{\rho \cdot A \cdot L_e}{420} \cdot \begin{bmatrix} 156 & 22L_e & 54 & -13L_e \\ 22L_e & 4L_e^2 & 13L_e & -3L_e^2 \\ 54 & 13L_e & 156 & 22L_e \\ -13L_e & -3L_e^2 & 22L_e & 4L_e^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Siendo la densidad de la madera de pino radiata de 476 Kg/m<sup>3</sup>.

Se agregó el peso de la viga más su sobrecarga en un grado de libertad horizontal en cada piso, para efecto de considerar estas masas en el análisis.

Las masas de las estructuras corresponden a: masa de vigas y columnas, masa de cada losa de madera=2976 Kg más 5 cm de hormigón=3125 Kg, carga viva=1593 Kg y carga de tabiquería=2548 Kg.

A través de relaciones cinemáticas se obtiene la matriz de masa de los marcos estudiados, tal como se muestra en la Ec (12).

$$M = L^T \cdot M_v \cdot L \quad (12)$$

Para la obtención del amortiguamiento se consideró como hipótesis que la matriz modal  $\phi$  diagonaliza a la matriz de amortiguamiento C. De este modo, dicha matriz puede ser construida a partir de las razones de amortiguamiento modales,  $\xi$ , y las frecuencias naturales de la estructura,  $\Omega$ .

$$\phi^T \cdot M \cdot \phi = I \quad (13)$$

$$\phi^T \cdot K \cdot \phi = \Omega^2 \quad (14)$$

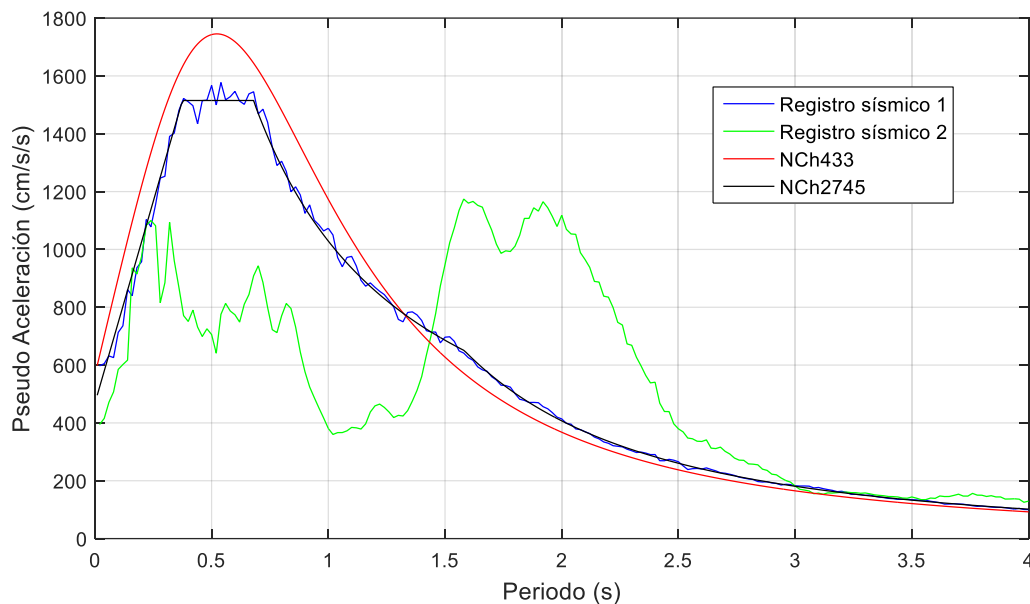
$$\phi^T \cdot C \cdot \phi = 2 \cdot \xi \cdot \Omega \quad (15)$$

De la Ec (15) se despeja el amortiguamiento C, además se considera una razón de amortiguamiento  $\xi=2\%$ .

$$C = \phi^{-T} \cdot (2 \cdot \xi \cdot \Omega) \cdot \phi^{-1} \quad (16)$$

### 3.4 Selección de solicitaciones sísmicas

Se utilizaron 2 registros sísmicos para este estudio, el registro sísmico 1 es para un suelo tipo D, en una zona 3, para un edificio de categoría 3 y con una razón de amortiguamiento del 5%, este registro se modificó en el dominio de la frecuencia con el objetivo de hacer coincidir su pseudo aceleración con el de la norma NCh2745, el registro sísmico 2 corresponde a las aceleraciones registradas durante el sismo del 27 de febrero de 2010. En la Figura 9 se pueden observar los pseudo espectros de aceleraciones de los registros 1 y 2 junto con los de las normas NCh2745 y NCh433.



**Figura 9:** Pseudo espectros de aceleraciones de diseño y de respuesta.

### 3.5 Definición de respuestas de interés

Luego de ejecutar el código programado en MATLAB, este nos entrega los desplazamientos relativos al suelo y las velocidades de la estructura, para obtener las aceleraciones se utilizó la Ec (7), conociendo ya la velocidad y el desplazamiento.

El corte basal en la estructura con conexiones rígidas está dado por la ecuación (17) y para la estructura con conexiones semirrígidas está dado por la Ec (18) y la relación entre ambos está dada en la Ec (19).

$$Q_0 = r_g \cdot M \cdot (\ddot{u} + r_g \cdot \ddot{u}_g) \quad (17)$$

$$Q_0 = -r_g \cdot (K \cdot u + C \cdot \dot{u}) \quad (18)$$

$$FM_{Q_0} = \frac{\max|Q_0^{C.S.R.}|}{\max|Q_0^{C.R.}|} \quad (19)$$

A continuación, se presentan las integrales de la energía disipada en la estructura.

$$E_d^{vis} = \int_0^t (C \cdot \dot{u})^T \cdot \dot{u} \, dt \quad (20)$$

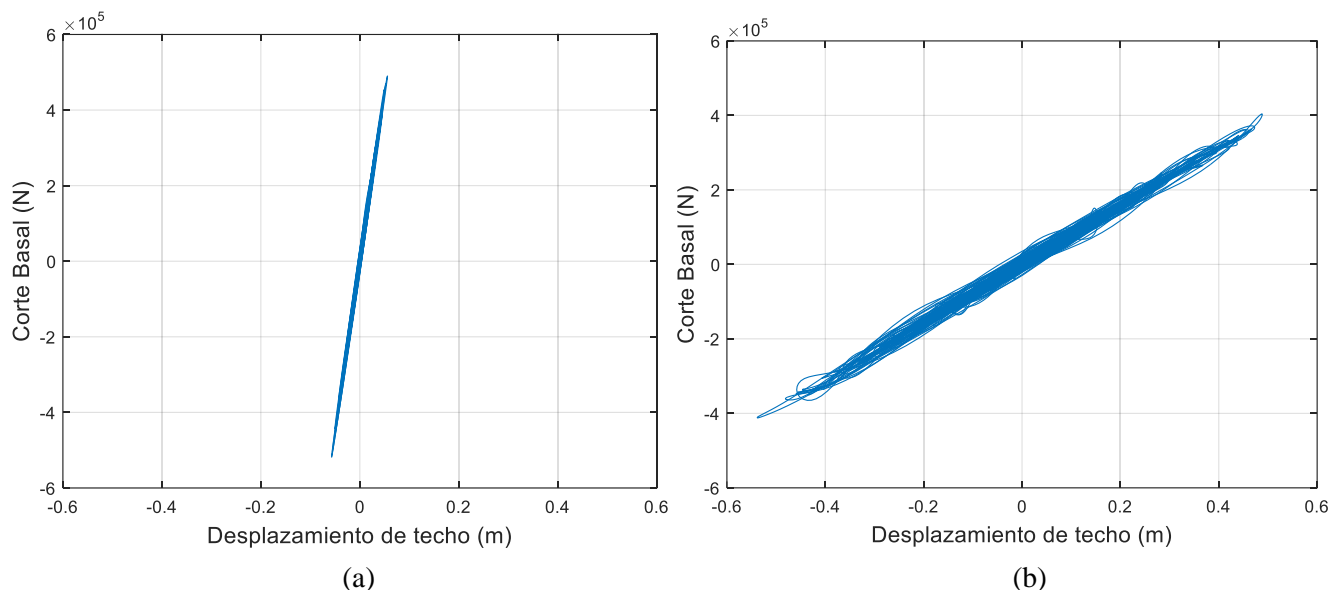
$$E_d^{his} = \int_0^t F_{NL}^T(\theta, \dot{\theta}) \cdot \dot{\theta} \, dt \quad (21)$$

En la estructura con conexiones rígidas solo se considera la Ec (20) y para el caso de los modelos con conexiones semirrígidas se le suma la componente histórica de la Ec (21).

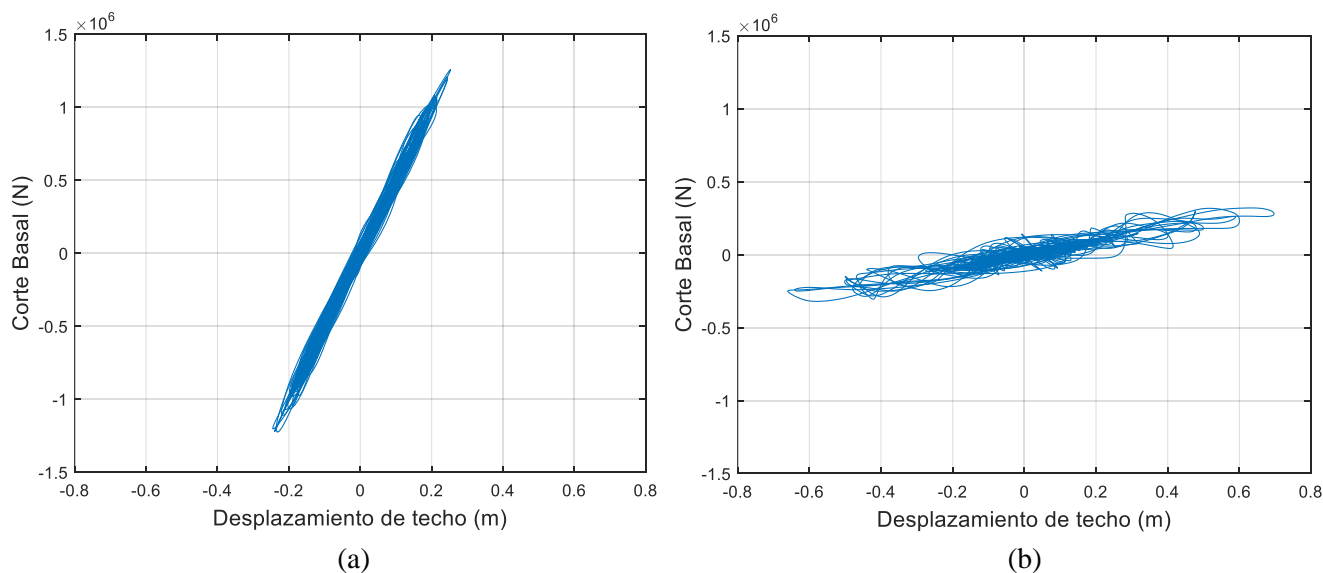
## 4. RESULTADOS

### 4.1 Registro sísmico 1

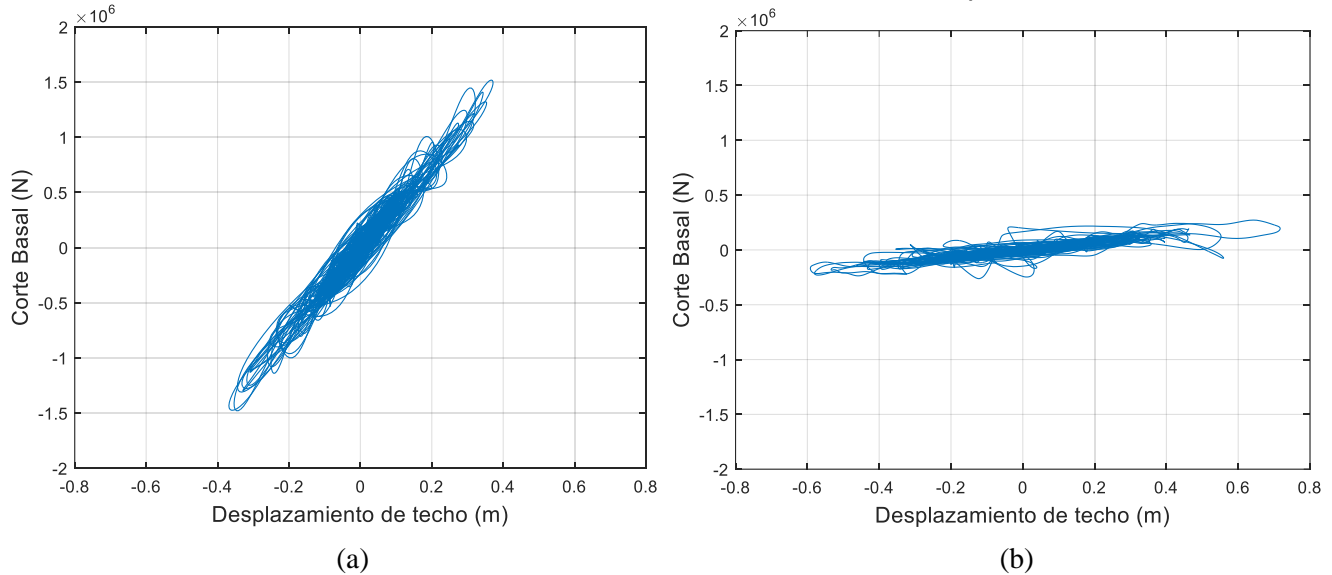
A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis numérico del primer registro sísmico utilizado, mediante el uso del software MATLAB, en las figuras 10, 11, 12 y 13 se presenta una comparación del corte basal y el desplazamiento de techo de los edificios con y sin conexiones semirrígidas.



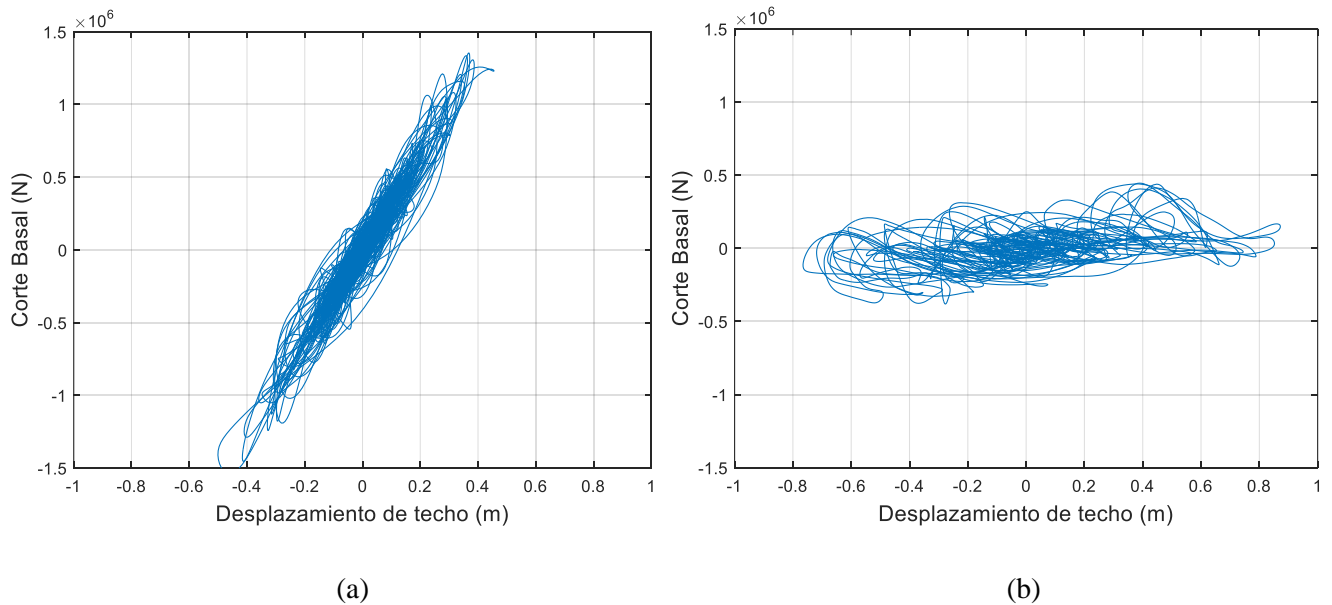
**Figura 10:** Relación del corte basal y el desplazamiento de techo del edificio de 3 pisos: (a) Edificio con conexiones rígidas. (b) Edificio con conexiones semirrígidas con capacidad de disipación.



**Figura 11:** Relación del corte basal y el desplazamiento de techo del edificio de 6 pisos: (a) Edificio con conexiones rígidas. (b) Edificio con conexiones semirrígidas con capacidad de disipación.

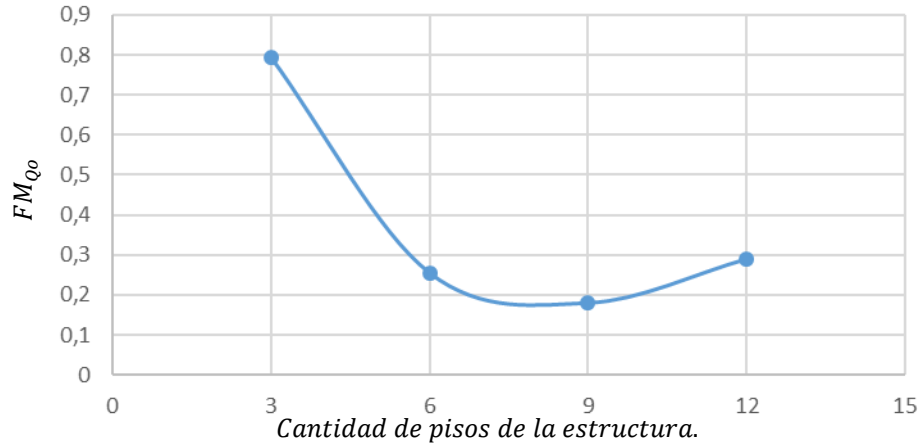


**Figura 12:** Relación del corte basal y el desplazamiento de techo del edificio de 9 pisos: (a) Edificio con conexiones rígidas. (b) Edificio con conexiones semirrígidas con capacidad de disipación.



**Figura 13:** Relación del corte basal y el desplazamiento de techo del edificio de 12 pisos: (a) Edificio con conexiones rígidas. (b) Edificio con conexiones semirrígidas con capacidad de disipación.

De los resultados mostrados en las Figuras 10 a la 13, se puede observar que en todas las estructuras analizadas el corte basal en los casos con conexiones rígidas alcanza valores máximos superiores al caso con conexiones semirrígidas; sin embargo, los desplazamientos de techo máximos alcanzados son mayores en el segundo caso. Además, las curvas de los casos con conexiones rígidas son más compactas a diferencia de las correspondientes a conexiones semirrígidas que son más anchas. Esto permite concluir que en los casos con conexiones semirrígidas efectivamente se disipó más energía que en igual estructura con conexiones rígidas, con beneficio en la reducción del corte basal, pero con costo en el incremento del desplazamiento lateral.



**Figura 14:** Factor de modificación del corte basal máximo al incorporar conexiones semirrígidas.

De la Figura 14 se puede observar que el corte basal máximo se redujo en todos los edificios analizados al cambiar las conexiones rígidas por semirrígidas con capacidad de disipación de energía. El edificio de 3 pisos mostró la menor reducción de dicha respuesta con un 20%, correspondiendo la mayor reducción al edificio de 9 pisos con un 82%. La tendencia al incremento de la reducción de la respuesta con el incremento de la altura se altera al pasar de 9 a 12 pisos, teniendo esta última estructura una reducción menor que la anterior, siendo de un 71%.

Para el caso del edificio de 3 pisos la reducción del corte basal máximo por el cambio a conexiones semirrígidas fue bastante bajo en comparación con el resto de los edificios. Sin embargo, la incorporación de las conexiones semirrígidas tuvo un gran impacto en la reducción del corte basal en los modelos de 6, 9 y 12 pisos.

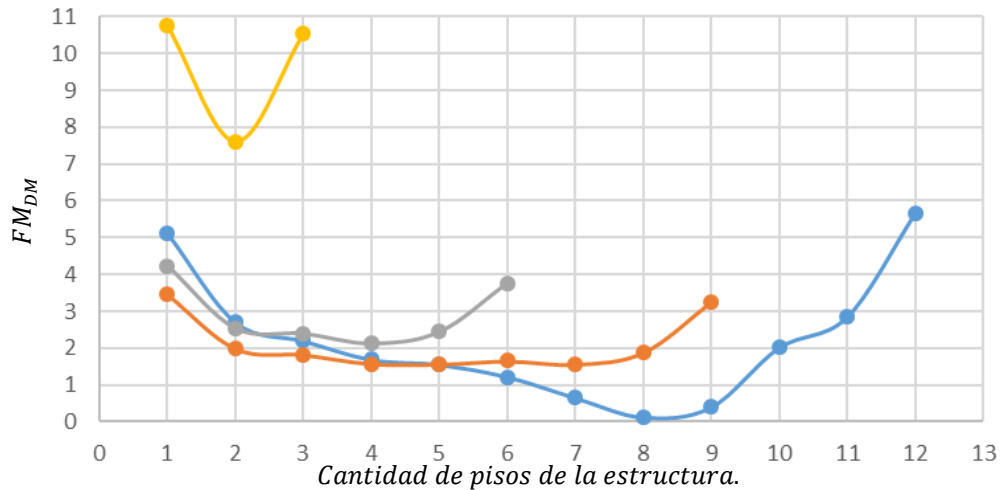
A continuación, en la tabla 2 se indican los periodos de los edificios con conexiones rígidas y el rango del periodo para las conexiones semirrígidas.

**Tabla 2:** Periodos de los edificios con C.R. y con C.S.R.

Edificio	C.R.	C.S.R	
	T (s)	Rango T (s)	
3 Pisos	0,32	0,32	1,47
6 Pisos	0,57	0,57	2,57
9 Pisos	0,80	0,80	3,61
12 Pisos	1,00	1,00	4,63

De la Tabla 2 se puede ver que la estructura de 3 pisos con conexiones rígidas posee un periodo fundamental de 0,32 s por lo que se encuentra al lado izquierdo del peak del espectro de aceleraciones de la NCh2745 de la Figura 9 y el modelo con conexiones semirrígidas tiene un periodo fundamental en el rango de 0,32 s y 1,47 s, por lo que, aunque la estructura se volvió más flexible y aumentó su periodo, la reducción de la demanda sísmica fue baja ya que al cruzar del lado izquierdo del peak al lado derecho no se generó una gran variación de la demanda sísmica.

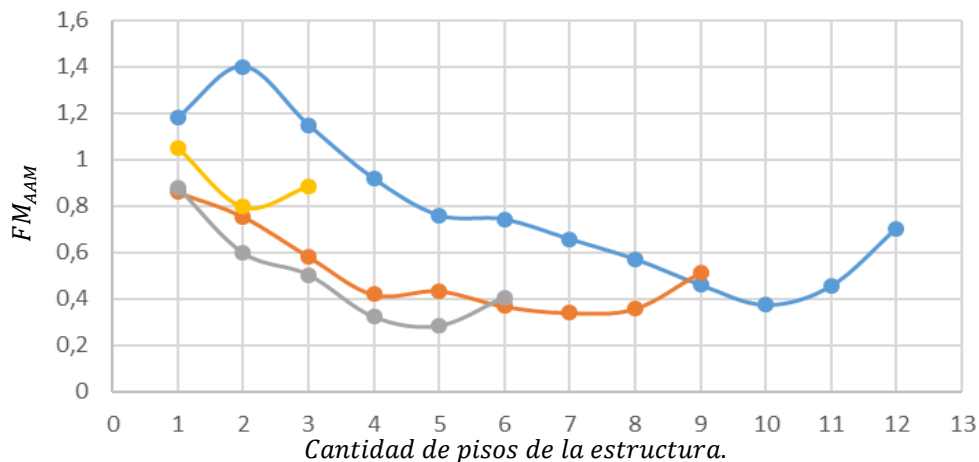
En los últimos casos donde el edificio de 9 pisos tuvo una reducción del corte basal en un 82% y el de 12 pisos tuvo una reducción menor de un 71% se debe a que en el caso del edificio de 9 pisos el periodo fundamental del modelo con conexiones semirrígidas varía entre 0,8 s y 3,61 s que es en donde se encuentra la mayor pendiente en el espectro ahora en el caso del edificio de 12 pisos con conexiones semirrígidas varía entre 1 s y 4,63 s que si bien también posee una pendiente pronunciada es menor a la del inicio del rango del periodo del edificio de 9 pisos. Por lo que se puede mencionar que, para edificios más grandes, con más masa, el aporte de las conexiones semirrígidas no sería tan significativo, esto debido a que el espectro posee una menor pendiente en su lado derecho.



**Figura 15:** Factor de modificación del drift máximo de marcos con conexiones semirrígidas en relación a misma respuesta de marco con conexión rígida, en cada piso de las estructuras analizadas.

De la Figura 15 se puede observar que en todos los edificios analizados hay amplificaciones de los desplazamientos relativos, únicamente en pisos 7, 8 y 9 del edificio de 12 pisos se registró reducción de ellos. Al comparar el desplazamiento relativo entre pisos obtenido en estructuras con conexiones semirrígidas en relación a la misma estructura con conexiones rígidas aumentó hasta casi 11 veces más en la estructura de 3 pisos en los pisos 1 y 3. La estructura de 6 pisos vio aumentado sus desplazamientos en casi 4 veces en el piso 1 y 4 veces en piso 6. En el caso de la estructura de 9 pisos sus desplazamientos aumentaron un poco más del triple en los pisos 1 y 9 y cercano al doble en el resto de los pisos. El modelo de 12 pisos tuvo el comportamiento más variado en relación al aumento del desplazamiento, siendo el aumento del piso uno en casi 5 veces, disminuyendo hasta el piso 8 donde el aumento fue casi 0 para luego aumentar hasta el piso 12 donde llegó a incrementarse casi 6 veces.

Como ya se observó anteriormente, el corte basal disminuyó en todos los modelos y esto se tradujo en mayores desplazamiento producto de la disipación de energía, los cuales se concentran en las conexiones semirrígidas,

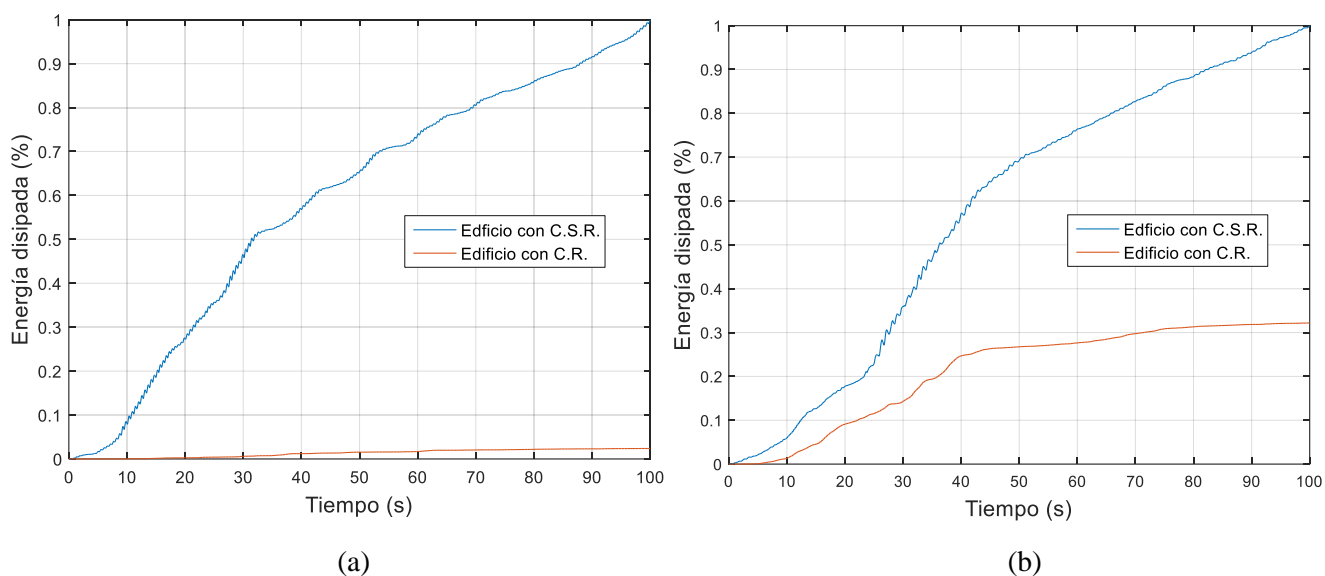


**Figura 16:** Factor de modificación de la aceleración absoluta máxima al incorporar conexiones semirrígidas.

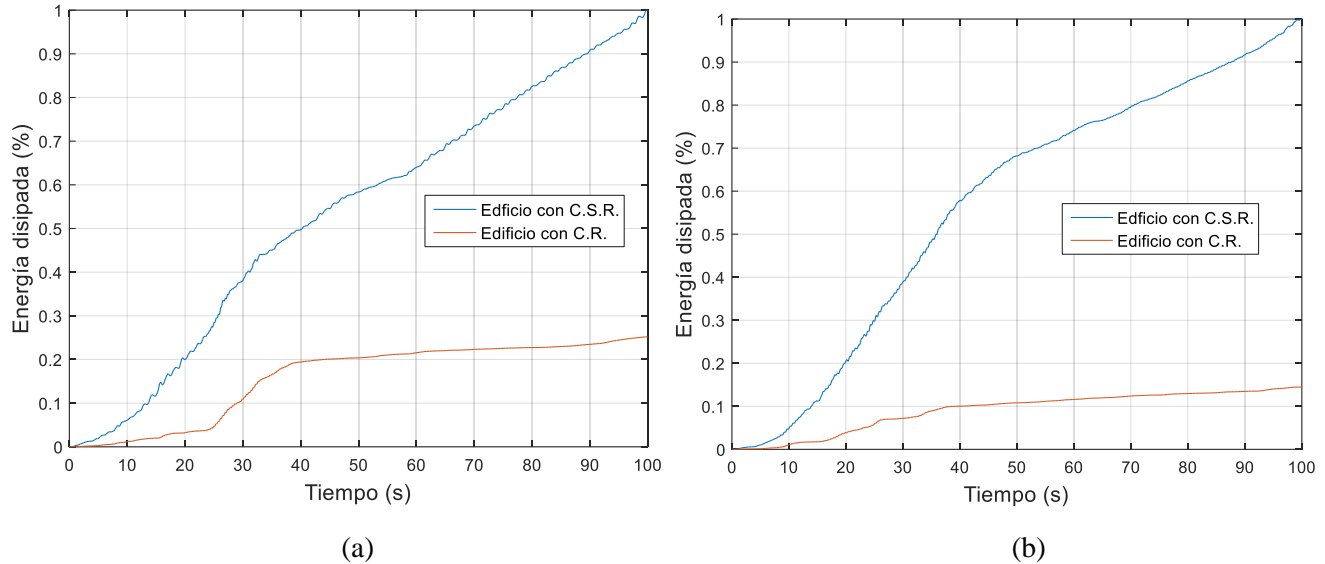
En general, las aceleraciones absolutas máximas de piso disminuyeron en todos los edificios analizados, con excepción del primer piso del edificio de 3 pisos y de los pisos 1, 2 y 3 de la estructura de 12 pisos, en donde dicha respuesta se incrementó en un margen entre 12 y 44% aproximadamente. El edificio de 6 pisos fue el que tuvo las mayores disminuciones de aceleración de piso.

Como se ha podido constatar en los resultados antes mostrados, la disipación de energía proporcionada a las estructuras por las conexiones semirrígidas ha tenido, en general, efecto favorable en la reducción del corte basal y de la aceleración absoluta de piso. Sin embargo, ha tenido un efecto negativo en los desplazamientos relativos de piso, los que se han visto incrementados en hasta 10 veces respecto de misma estructura con conexiones rígidas. Lo anterior se explica por el hecho de que para disipar energía las conexiones semirrígidas requieren desarrollar rotaciones relativas en sus extremos. Ocurrido lo anterior, la estructura cambia su rigidez, volviéndose más flexible y susceptible a tener grandes desplazamientos laterales. Al reducir su rigidez se alargan sus períodos naturales, trasladando a la estructura, en la mayoría de los casos, a una zona de menor demanda sísmica. Esto último sumado a la disipación de energía potencia la reducción del corte basal. Por otra parte, aun cuando las oscilaciones de los pisos tengan amplitudes grandes, por tratarse de movimientos lentos debido al alargamiento de los períodos naturales, las aceleraciones de piso se reducen, particularmente en los pisos más altos. Los pisos cercanos al suelo tienen menores reducciones de aceleración de piso debido a que la base está fija y, tanto en las estructuras con conexiones rígidas como con conexiones semirrígidas, las aceleraciones laterales absolutas tienden a la aceleración del suelo en la medida de que el punto considerado se acerca al nivel basal.

La disipación de energía proporcionada por las conexiones semirrígidas es uno de los factores clave que determinan la reducción del corte basal y de las aceleraciones de piso, se determinó la energía disipada acumulada durante toda la duración del ensayo para ambas condiciones de conexiones en todas las estructuras. Los resultados se muestran en las Figuras 17 y 18 y permiten comparar la magnitud relativa de la energía disipada por cada estructura con conexiones semirrígidas en comparación con la misma estructura con conexiones rígidas.



**Figura 17:** Comparación porcentual de la energía disipada acumulada durante el sismo, en estructuras con conexiones rígidas y semirrígidas: (a) Edificio de 3 pisos. (b) Edificio de 6 pisos.

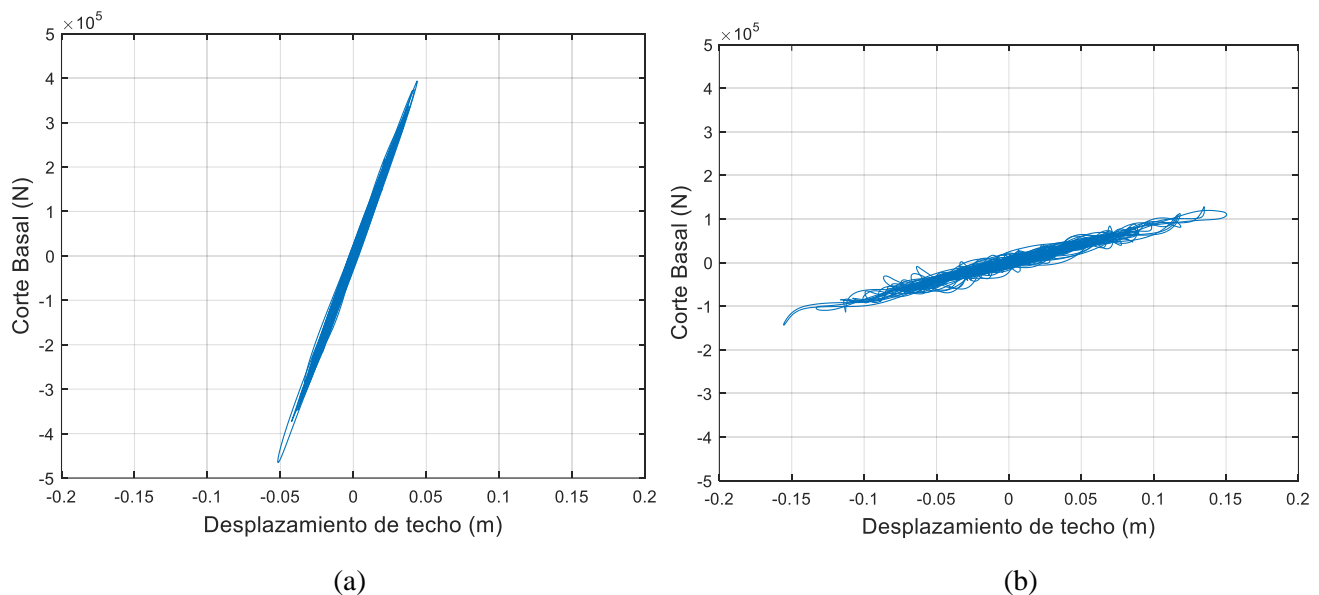


**Figura 18:** Comparación porcentual de la energía disipada acumulada durante el sismo, en estructuras con conexiones rígidas y semirrígidas: (a) Edificio de 9 pisos. (b) Edificio de 12 pisos.

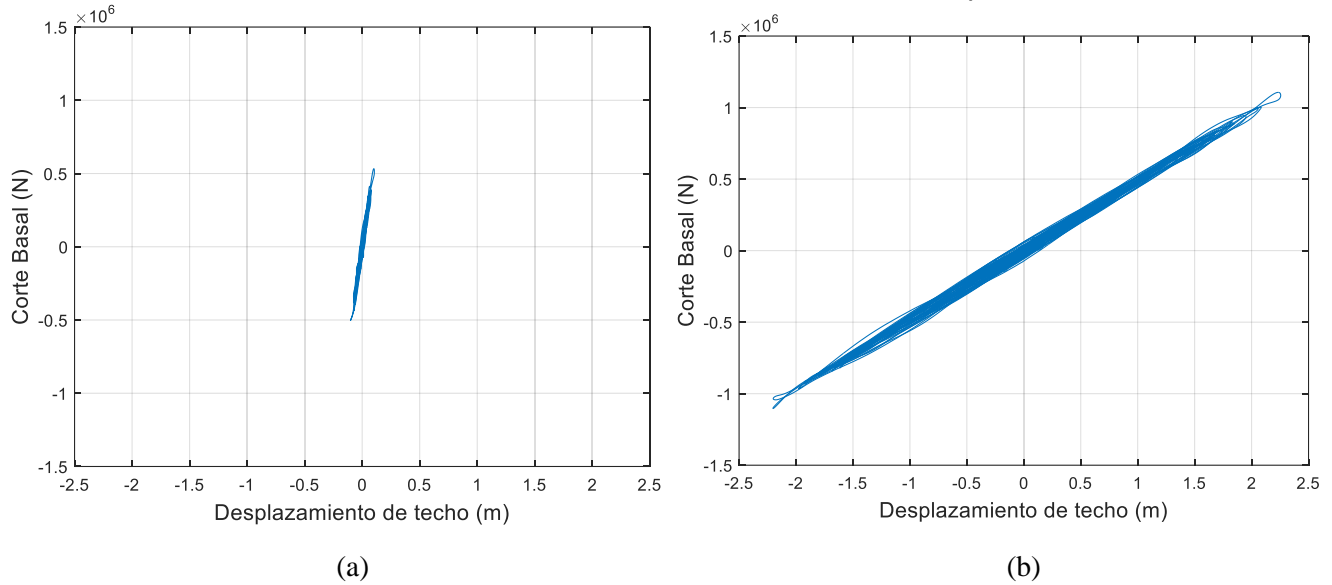
Tal como se observa en las figuras 17 y 18 se presenta una mayor disipación de energía en los edificios con conexiones semirrígidas producto de estas mismas, en comparación con en el mismo edificio con conexiones rígidas.

## 4.2 Registro sísmico 2

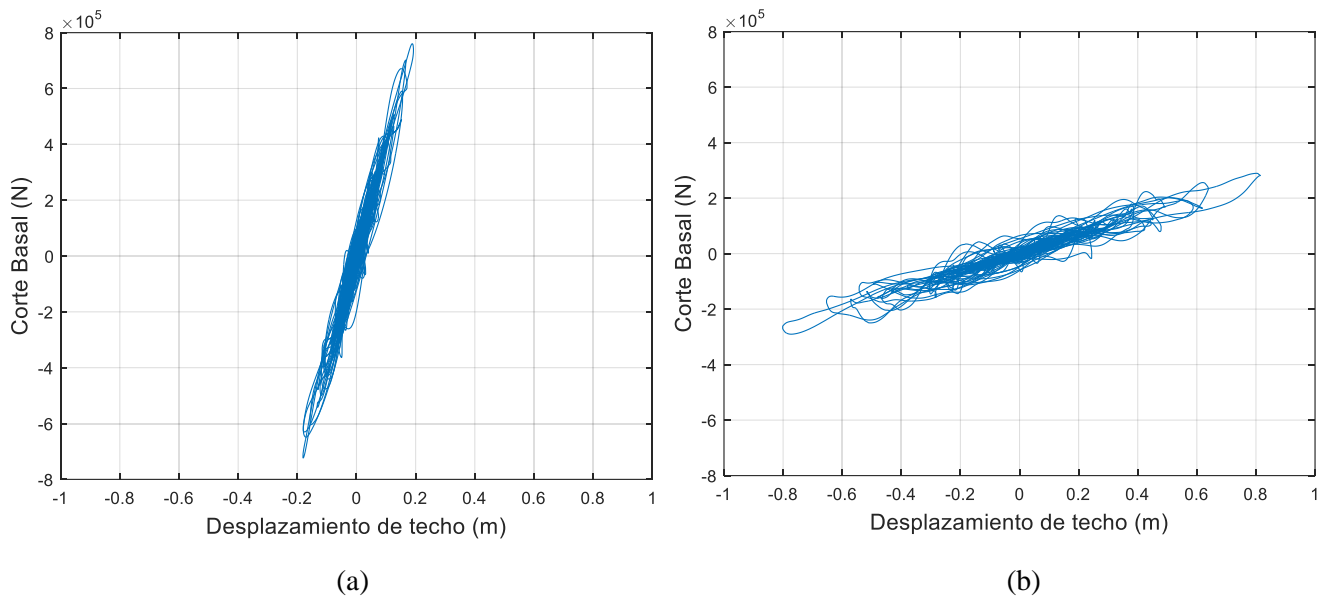
A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis numérico del registro sísmico 2 utilizado en este estudio. Vale la pena mencionar que este registro corresponde a las aceleraciones registradas durante el sismo del 27 de febrero de 2010.



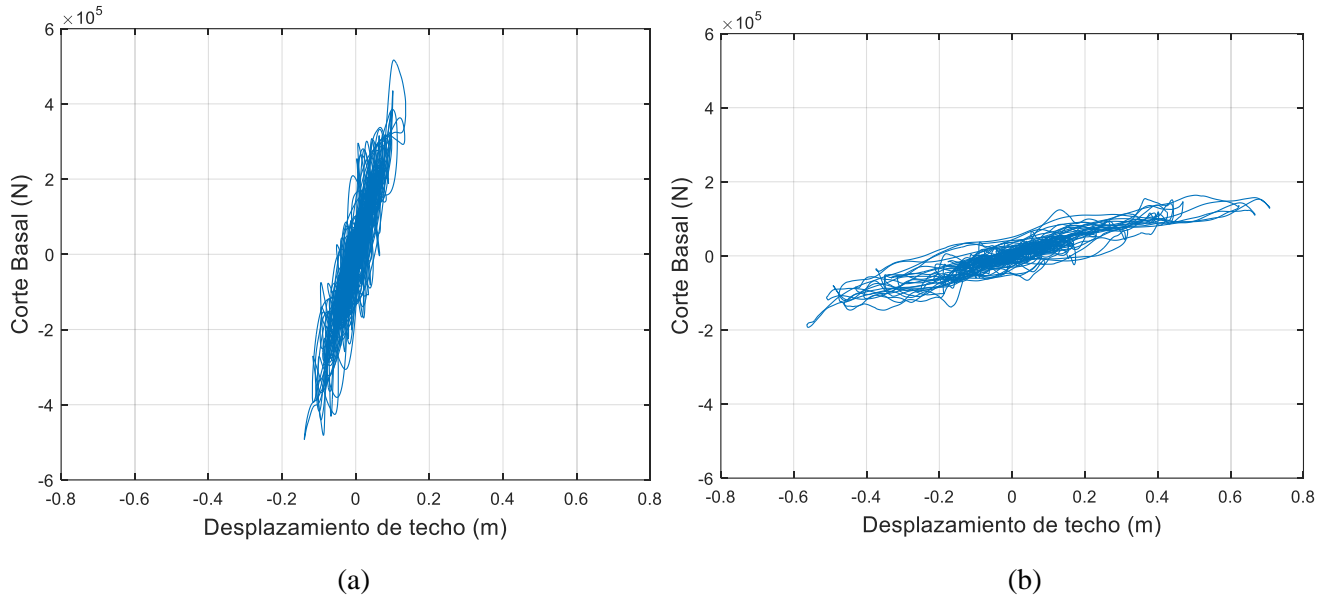
**Figura 19:** Relación del corte basal y el desplazamiento de techo del edificio de 3 pisos: (a) Edificio con conexiones rígidas. (b) Edificio con conexiones semirrígidas con capacidad de disipación.



**Figura 20:** Relación del corte basal y el desplazamiento de techo del edificio de 6 pisos: (a) Edificio con conexiones rígidas. (b) Edificio con conexiones semirrígidas con capacidad de disipación.



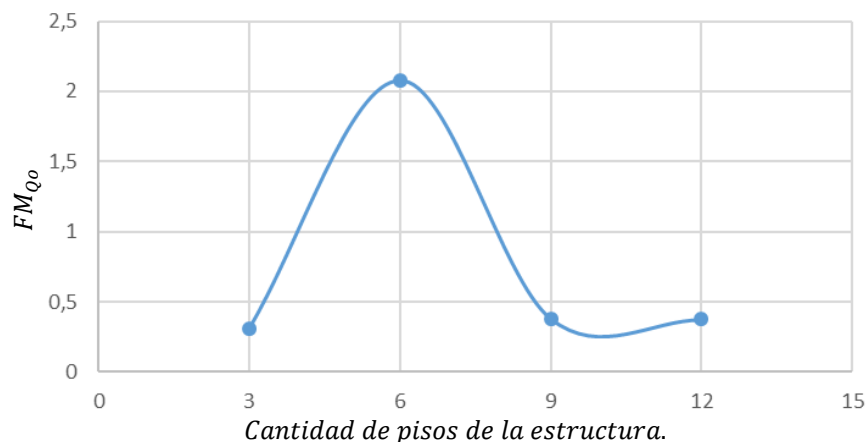
**Figura 21:** Relación del corte basal y el desplazamiento de techo del edificio de 9 pisos: (a) Edificio con conexiones rígidas. (b) Edificio con conexiones semirrígidas con capacidad de disipación.



**Figura 22:** Relación del corte basal y el desplazamiento de techo del edificio de 12 pisos: (a) Edificio con conexiones rígidas. (b) Edificio con conexiones semirrígidas con capacidad de disipación.

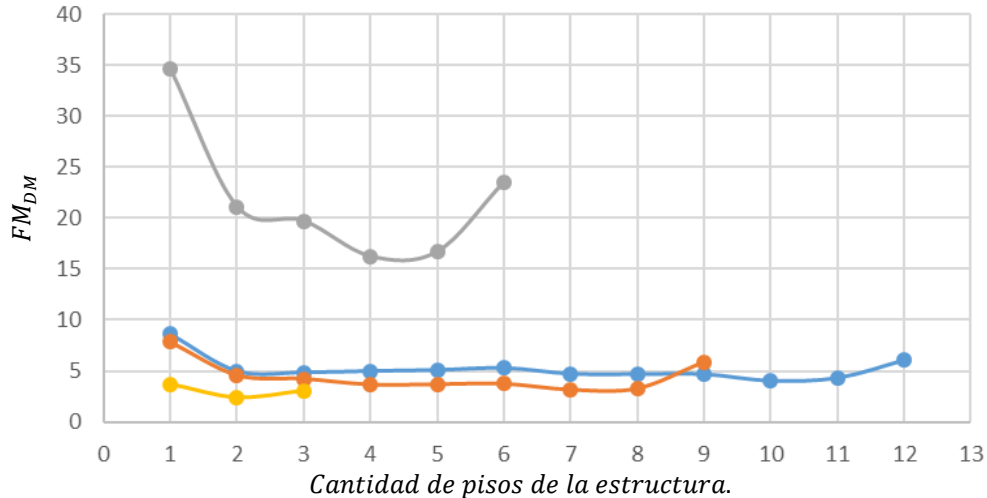
De las Figuras 19 a la 22 se observó que, en los edificios de 3, 9 y 12 pisos se obtuvo el comportamiento esperado y visto con el registro sísmico 1, pero en el edificio de 6 pisos se observó un comportamiento desfavorable ya que aumentó el corte basal en el modelo con conexiones semirrígidas.

A continuación, se presenta la comparación del corte basal en los edificios.



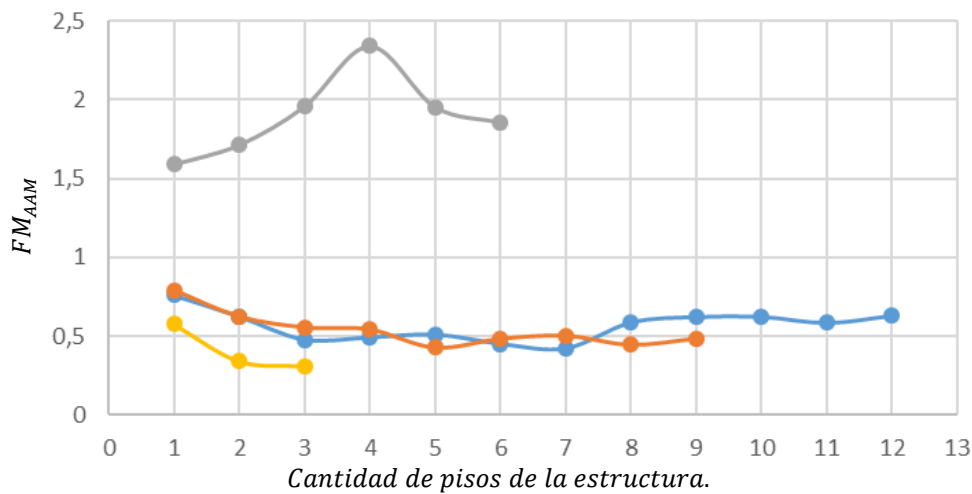
**Figura 23:** Corte basal CR/SR Vs Edificio.

La reducción del corte basal en el edificio de 3 pisos fue de un 70%, en el de 9 pisos fue de un 62% y en el edificio de 12 pisos fue de un 62% y en el caso del edificio de 6 pisos, el modelo con conexiones semirrígidas duplicó el valor del corte basal del modelo con conexiones rígidas. Esto último puede suceder debido a que el rango del periodo del modelo de 6 pisos con conexiones semirrígidas está entre 0,57 s y 2,57 s, que es donde se encuentra el peak del espectro de este registro (1,5 s y 2 s aproximadamente).



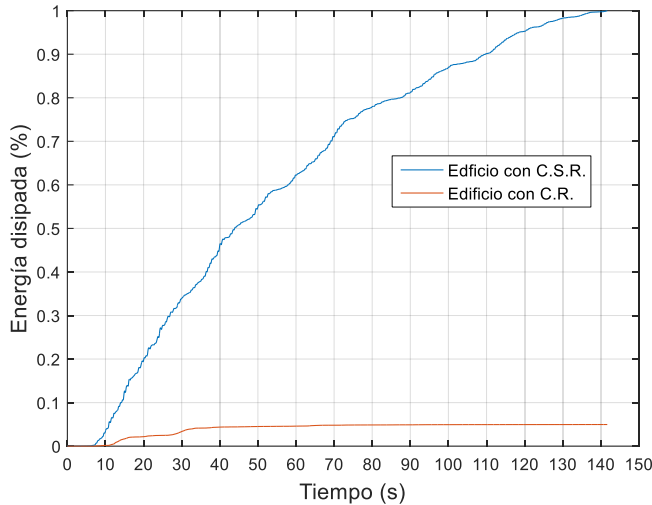
**Figura 24:** Factor de modificación del drift máximo de marcos con conexiones semirrígidas en relación a misma respuesta de marco con conexión rígida, en cada piso de las estructuras analizadas.

De la Figura 24 se puede observar que en todos los edificios analizados hay amplificaciones de los desplazamientos relativos, en el caso del edificio de 3 pisos el aumento fue menor a 5 veces su valor, para los casos de los edificios de 9 y 12 pisos el comportamiento fue bastante similar siendo su aumento cercano en la mayoría los pisos a 5 veces su valor. El caso del edificio de 6 pisos fue el que tuvo los mayores aumentos, siendo el del piso 1 cercano a 35 veces su valor, aun siendo este edificio el caso en el que aumentó el valor del corte basal.

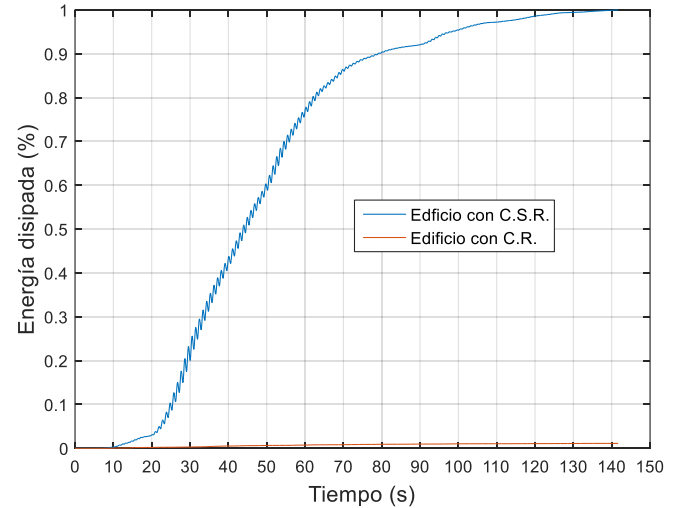


**Figura 25:** Factor de modificación de la aceleración absoluta máxima al incorporar conexiones semirrígidas.

Las aceleraciones absolutas máximas de piso disminuyeron en los edificios de 3, 9 y 12 pisos en todos sus pisos. En el caso del edificio de 6 pisos estas aumentaron en todos sus pisos, y en particular hasta en casi 2,5 veces su valor en el piso 4.

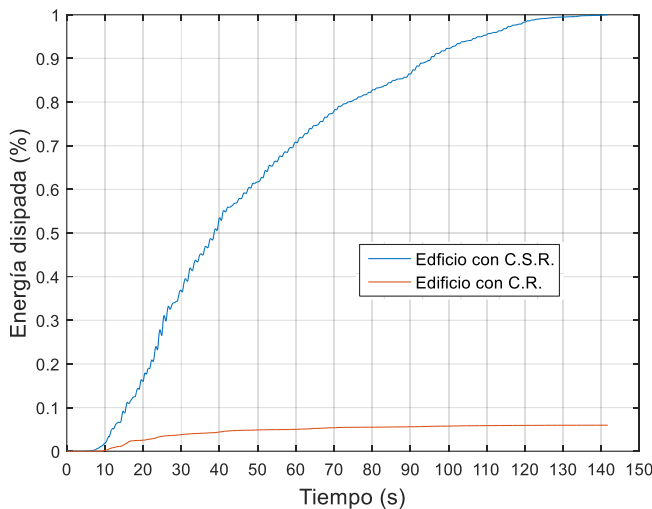


(a)

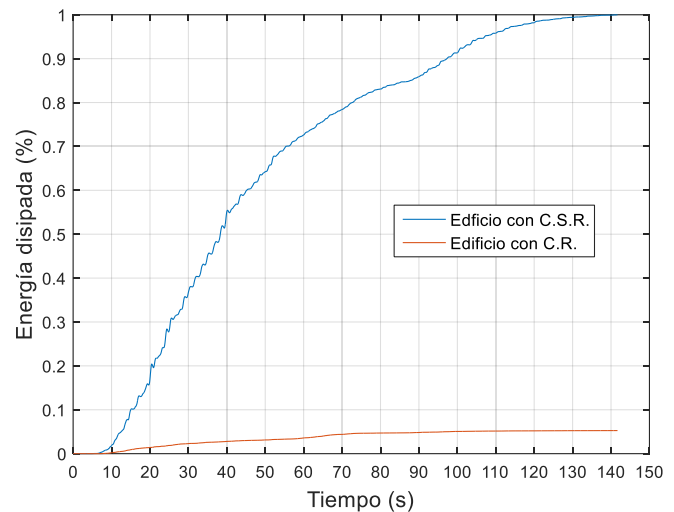


(b)

**Figura 26:** Comparación porcentual de la energía disipada acumulada durante el sismo, en estructuras con conexiones rígidas y semirrígidas: (a) Edificio de 3 pisos. (b) Edificio de 6 pisos.



(a)



(b)

**Figura 27:** Comparación porcentual de la energía disipada acumulada durante el sismo, en estructuras con conexiones rígidas y semirrígidas: (a) Edificio de 9 pisos. (b) Edificio de 12 pisos.

Se puede observar en las figuras 26 y 27 que, al finalizar el sismo, cerca de los 130 s, la disipación de energía se estabiliza, esto no se visualiza tan detallado ya que el registro sísmico se detiene abruptamente. También se destaca que se presenta una mayor disipación de energía en los edificios con conexiones semirrígidas, tal como se esperaba, pero, aunque en el edificio de 3 pisos se observa un considerable aumento de la disipación de energía, esta no fue suficiente para contrarrestar el efecto que se produce debido al aumento de la demanda sísmica, esto debido a que la estructura se vuelve más flexible, lo que aumenta su periodo llegando al peak del espectro

## 5. CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología con la cual se confeccionaron los modelos de análisis dinámico de edificios compuestos por marcos de madera de 3, 6, 9 y 12 pisos con conexiones rígidas y con conexiones semirrígidas formulando la ecuación del movimiento respectivas para realizar el análisis tiempo historia.

Mediante el algoritmo utilizado se pudo verificar el potencial que tienen las conexiones semirrígidas para reducir la respuesta de estructuras de marcos de madera sometidas a inputs sísmicos. Se logró reducir el corte basal de manera significativa en la gran mayoría de los casos, a excepción del modelo de 6 pisos con el registro sísmico 2. En general, se pudo reducir la aceleración absoluta de piso, a excepción de algunos casos muy particulares, como en el primer piso del edificio de 3 pisos y pisos 1, 2 y 3 de la estructura de 12 pisos. En estos últimos casos dicha respuesta se incrementó al incorporar conexiones semirrígidas en un margen que fue entre 20% y 40% aproximadamente en el análisis con el primer registro sísmico en el edificio de 12 pisos. En el edificio de 6 pisos con el registro sísmico 2 se observó aumentos de la aceleración absoluta de pisos en todos sus pisos en márgenes entre un 60% y 130%. En todos los casos la incorporación de conexiones semirrígidas no ayudó a reducir los desplazamientos de piso. Esto debido a las particularidades de la conexión semirrígidas, la que requiere de deformación relativa para disipar energía, lo que flexibiliza a la estructura y aumenten por lo tanto los desplazamientos.

La incorporación de las conexiones semirrígidas en los marcos resultó ser beneficiosa en términos de la reducción del corte basal y de las aceleraciones absolutas en todos los casos analizados al utilizar el registro sísmico cuyo espectro se ajusta al de la NCh2745. El beneficio también se observa, aunque no en todos los casos, al usar el registro sísmico real cuyo espectro no se ajusta al espectro de la norma. En general los beneficios obtenidos en la reducción del corte basal y aceleraciones absolutas de piso tienen un costo, este es el aumento de los desplazamientos de piso, por lo que la conexión propuesta es desfavorable para controlar las deformaciones en la estructura.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Corporación de Desarrollo Tecnológico, Cámara Chilena de la Construcción (2012). Documentos Técnicos edición 29: Protección Sísmica de Estructuras, Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía. Santiago, Chile.
- Chopra, A.K. (2011). Dynamics Of Structures: Theory And Applications To Earthquake Engineering, Fourth Edition. New York City, United States of America: Prentice-Hall.
- Instituto Nacional de Normalización (2009): Diseño estructural de edificios – cargas permanentes y sobrecargas de uso, NCh 1537 Of. 2009. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (1996): Diseño sísmico de edificios, NCh 433 Of. 1996 Modificada en 2012. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (2013): Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica, NCh 2745 Of. 2013. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (2014): Madera – Construcciones en madera – Cálculo, NCh 1198 Of. 2014. Santiago, Chile.
- León Torres, J. Quinde Martínez, P. (2010). Estudio comparativo de diferentes procedimientos de aglutinamiento de matrices de masas para pórticos bidimensionales. Cuenca, Ecuador.
- Orellana Isla, F. (2016). Análisis paramétrico de pusch-over en marcos de madera con rotulas plásticas autocentrantes. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil. Concepcion, Chile.
- Padilla Reyes, J. Maureira Carsalade, N. Orellana Isla, F. (2017). A new Self-Centring dissipative conection for glued laminated timber structures. 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile.



**UCSC**

Simposio de Habilitación Profesional  
Departamento de Ingeniería Civil  
18, 19, 20 y 21 de Diciembre de 2018

Padilla Reyes, J. Maureira Carsalade, N. San Martín, J. Chávez, M. (2018). A Self-Centring semi-rigid connection with energy dissipation for wooden frames. WCTE 2018, World Conference on Timber Engineering. Seoul, Republic of Korea.