

## ANÁLISIS NUMÉRICO NO LINEAL DE RACKS DE ALMACENAMIENTO INDUSTRIAL, BENEFICIOS DEL USO AISLAMIENTO BASAL

O. Álvarez Figueroa<sup>1</sup>, N. Maureira Carsalade<sup>2</sup>, F. Sanhueza Espinoza<sup>3</sup>

### RESUMEN

En esta investigación se evalúa la efectividad del uso de un dispositivo cinemático de aislamiento basal en racks de almacenamiento industrial sometidos a un input sísmico actuando en la dirección longitudinal de la estructura. El registro sísmico considerado está basado en el terremoto de Lolleo del 3 de marzo de 1985, escalado en el dominio de la frecuencia para hacer coincidir su espectro de respuesta con el espectro de diseño de la NCh2745 para zona sísmica 3, suelo tipo III y categoría de edificio B.

Se realizan análisis numéricos tiempo-historia para tres tipos de racks con diferentes condiciones de borde: de base fija con conexiones rígidas, de base fija con conexiones semi-rígidas y con aislamiento basal y conexiones semi-rígidas. Los análisis paramétricos se realizaron por medio de un algoritmo formulado en el software MATLAB.

Como respuestas de interés se consideró el desplazamiento relativo máximo de piso, la aceleración absoluta máxima y el corte basal máximo. Esto el fin de cuantificar la efectividad del uso de aislamiento basal al determinar en qué proporción se reducen las respuestas máximas de interés. Los resultados mostraron la efectividad del uso del dispositivo cinemático de aislamiento basal al reducir las tres respuestas de interés en hasta un orden de magnitud.

**PALABRAS CLAVE:** Aislador cinemático, disipación friccional, análisis tiempo-historia.

### ABSTRACT

In this research, the effectiveness of the use of a kinematic base isolation device in industrial storing racks in reducing their seismic response is evaluated. The seismic input was considering acting in the longitudinal direction of the structure.

It is based on the Lolleo earthquake recorded on March 3, 1985, scaled in the frequency domain to match its response spectrum with the design spectrum of NCh2745 for seismic zone 3, ground type III and category of building B.

Numerical time-history analyzes were performed for three types of racks with different support and connections conditions: fixed at the base with rigid connections, fixed at the base with semi-rigid connections and with base isolation and semi-rigid connections. Parametric analyzes were performed using an algorithm formulated in the software MATLAB.

As responses of interest, the maximum relative displacement of the floor, the maximum absolute acceleration and the maximum basal shear load were considered. This is in order to quantify the

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

<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 Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [franksanhueza@ucsc.cl](mailto:franksanhueza@ucsc.cl)

effectiveness of the use of base isolation by determining in what proportion the maximum responses of interest can be reduced. The results showed the effectiveness of the use of the kinematic base isolation device by reducing the three responses of interest by up to one order of magnitude.

**KEYWORDS: Kinematic isolator, frictional dissipation, time-history analysis.**

## 1. INTRODUCCIÓN

El almacenamiento es una necesidad importante en todo proceso productivo. Es por ello que muchos de estos productos son almacenados en racks de almacenamiento industrial, ya que dan solución al optimizar el uso de espacios y permitiendo un adecuado traslado de los productos. Estas estructuras generalmente de acero compuestas por columnas, vigas y sistemas reticulados. Comúnmente tienen un sistema de marcos tridimensional de perfiles de acero con caras ortogonales y plataformas planas en cada nivel donde se disponen los productos [1].

El uso de racks de almacenamiento industrial se ha masificado en las industrias ya que dan solución al optimizar el uso de espacios, permitiendo un adecuado traslado los productos y circulación tanto para clientes como trabajadores. Es por esto que los racks se diseñan angostos en una de sus dos direcciones horizontales, mientras que en la otra dirección estas estructuras son mucho más largas siendo dispuestas dentro de naves de almacenamiento con espacios abiertos dejando pasillos para la operación entre racks [2]. Estas estructuras puedan llegar a ser muy esbeltas en una de las dos direcciones horizontales, con elevada carga vertical y lateralmente poco resistentes.

Todo lo anterior conlleva a que los racks sean muy vulnerables a la acción sísmica, al igual que su contenido, siendo un riesgo para las personas que transitan habitualmente cerca de ellos. Es por ello que tras la evaluación de los daños causados por el terremoto 27 de febrero del 2010 surgen las siguientes interrogantes: ¿cómo aumentar la seguridad de personal y clientes? y ¿cómo reducir o evitar las pérdidas económicas por desplome de productos y destrucción de racks? Es de interés para la industria el dar respuesta a estas interrogantes sin causar interrupción en la continuidad de faenas debido a la acción de sismos severos.

En la última década, la investigación en relación a los racks de acero se ha enfocado en reducir la incertidumbre en el diseño por medio del refinamiento de las metodologías de análisis. Se ha determinado que la incertidumbre en los diseños se debe a que los racks, en particular los altos y esbeltos, se ven afectados por estabilidad global, local y distorsional debido a la esbeltez de sus elementos [3]. Estas estructuras tienen una alta probabilidad de incursión no-lineal en conexiones viga-columna [4] y en conexión columna-base [5]. Se realizaron ensayos de caracterización de la relación momento-rotación en conexiones viga-columna de racks de acero para reducir las incertidumbres en el diseño de racks, refinamiento de las metodologías de análisis [6].

A nivel mundial existen soluciones al problema de estabilidad de racks con sistemas de protección sísmica. La primera de ellas fue desarrollada por Gutelius et al. [7], teniendo como objetivo proteger equipos electrónicos sensibles como computadores y servidores. Luego, se desarrolló una solución pensada en proteger a racks de almacenamiento industrial de la acción sísmica [8] y [9]. Esta permitió aislar sísmicamente al rack por lo menos en la dirección angosta, teniendo poco efecto en la dirección longitudinal, debido a lo alto y esbeltas que son estas estructuras. Sin embargo, el único dispositivo de aislamiento basal transferido a la industria, en racks de almacenamiento industrial, es el aislamiento sísmico patentado por Pellegrino et al [8], el cual trabaja principalmente en la dirección del ancho del rack, perpendicular a los pasillos.

También se ha evaluado la viabilidad económica de implementar un sistema de aislamiento sísmico elastomérico en estas estructuras. Los resultados fueron satisfactorios en el sentido que el costo de la implementación es comparable con el costo de las reparaciones de elementos estructurales, detención de la actividad productiva y pérdidas de productos frente a la acción de un sismo severo [10]. Sin embargo, no se han evaluado otros aspectos como la seguridad de los trabajadores y clientes que transitan en áreas cercanas a los racks de almacenamiento industrial.

En Chile, la investigación en este tema es prácticamente nula, no habiendo una norma exclusiva para el diseño de racks, por lo que se tiene que realizar en base a la NCh2369, que es para el diseño de instalaciones industriales. La que deja muchas incertidumbres al momento de diseñar racks, ya que no hay exigencias claras. Un ejemplo es que dicha norma no establece que estas estructuras se deban diseñar con un 100% de la carga de servicio, siendo que este escenario es muy probable que suceda al momento de que ocurra un evento sísmico severo. Por otro lado, estas estructuras no pueden ser considerados como edificios, por lo tanto, su diseño no puede basarse en normas, estándares y recomendaciones para edificios [14], como actualmente ocurre en la práctica chilena.

Lo expuesto anteriormente, motivó a la realización de esta investigación, en la cual se implementa numéricamente un dispositivo cinemático de aislamiento basal ideado por el profesor guía de esta tesis. Éste posee significativa resistencia a tracción al igual que el de Pellegrino [8], pero permite aislar sísmicamente al rack frente a un sismo que lo ataca en cualquier dirección horizontal. Además, este dispositivo es verticalmente muy rígido y su rigidez lateral es controlada por la tensión de un elemento pos-tensado en su interior. Dicha tensión vincula el dispositivo con la superestructura permitiendo resistir niveles relativamente altos de tracción en comparación con la carga axial solicitante. De esta manera el objetivo principal de esta investigación es determinar la efectividad del uso de aislamiento basal, en la reducción de la respuesta de racks en términos de aceleración absoluta y deriva de piso, mediante simulaciones numéricas.

Se establece como hipótesis que la incorporación del dispositivo cinemático de aislamiento basal permitiría una reducción significativa de las aceleraciones laterales y derivas de piso máximas producidas por la acción sísmica debido al desacoplamiento del suelo con la estructura. Esto traería beneficios económicos al reducir las pérdidas de los productos almacenados y disminución en los tiempos de detención de faena luego de sismos severos.

## **2. METODOLOGÍA**

En esta investigación se determinó mediante análisis numéricos tiempo-historia en MATLAB, el efecto que tiene la implementación de un dispositivo cinemático de aislamiento basal en la reducción de la respuesta en racks. Se realizaron tres tipos formulaciones para modelos racks con diferentes condiciones de apoyo y conexiones: fijos en la base con conexiones rígidas, fijos en la base con conexiones semi-rígidas y con aislamiento basal y conexiones semi-rígidas.

En la formulación de los racks se considera la matriz de rigidez Euler-Bernoulli y matriz de masa consistente de un elemento tipo barra tanto para vigas como para columnas. Los elementos del sistema reticulado (dirección horizontal corta del rack) se consideraron como elementos que trabajan axialmente. Cada pallet fue formulado como un sistema de diafragma rígido, añadiendo una masa de 2 Ton con inercia en ambas direcciones horizontales y en la rotación del pallet. Para las conexiones semi-rígidas se consideró la formulación de Bouc-Wen, la cual permite caracterizar el comportamiento de sistemas no lineales con plasticidad concentrada.

## 2.1 Descripción de las estructuras

Todos los modelos de racks fueron diseñados con una altura de 1.5 metros entre cada nivel, un ancho de 0.75 metros en la dirección angosta y un largo de 2.5 metros en el sentido de las vigas. Los perfiles utilizados fueron: Tx 140x105x3x2.5 DOBLE, TC 125x50x2 y CA 70x26x10x2, para las columnas, vigas y sistema reticulado, respectivamente.

En la Figura 1, se muestra a manera de ejemplo un rack de 1 nivel, se considera un pallet en el nivel 1 y uno en la base.

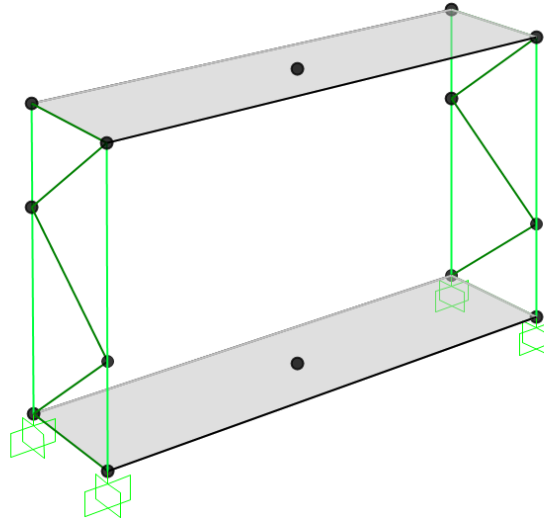


Figura 1: Estructuración básica de cada nivel de los racks analizados.

## 2.2 Dispositivo de aislamiento

El dispositivo cinemático de aislamiento basal utilizado vincula la superestructura a la subestructura mediante un mecanismo pivoteado en su base (Figura 2). Éste es verticalmente muy rígido y la rotación respecto a su apoyo en la base permite el desplazamiento lateral relativo al suelo de la superestructura que rueda sobre él. El dispositivo cuenta con un cable axialmente rígido, el cual mediante una carga de postensado vincula el aislador con la superestructura y ayuda a evitar que la superestructura sufra levantamiento. El roce en la rótula del apoyo basal del aislador permite disipar energía debido al trabajo entre la rotación y el roce, que es proporcional al peso de la estructura. La disipación de energía depende del diámetro de la bola y los materiales de contacto, ya que modifican el coeficiente de roce y el efecto que éste tiene en el equilibrio lateral del aislador.

En esta investigación se utiliza una formulación simplificada del aislador en donde el radio de curvatura ( $R$ ) es constante e igual a su altura ( $H$ ). De esta manera el peso de la estructura ( $P_e$ ) no interactúa con la rigidez lateral del dispositivo, ya que no afecta al equilibrio lateral del dispositivo. Es decir, la excentricidad de la carga  $P_e$  es cero ( $\Delta u = 0$ ), por lo tanto, la rigidez lateral está definida únicamente por la tensión del elemento interno pos-tesado [15]. Otra simplificación, aplicada en esta investigación es que la tensión del cable postensado ( $T$ ) se asume actuando perfectamente vertical, por lo que  $\alpha = 0$  (Figura2).

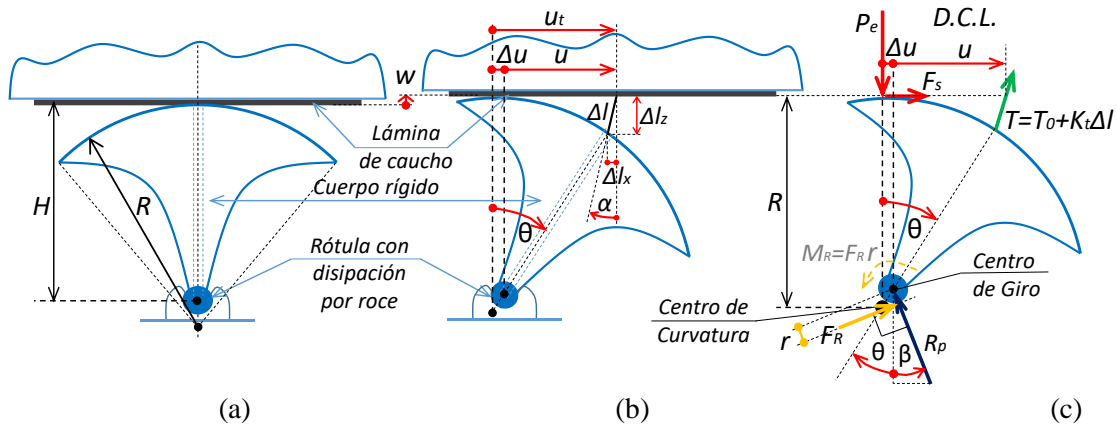


Figura 2: Dispositivo de aislamiento cinemático. (a) posición inicial o de reposo, (b) posición deformada con grandes desplazamientos, (c) Diagrama de cuerpo libre en condición deformada.

Fuente: Maureira [16] y Pardo et al. [15].

El alargamiento del cable,  $\Delta l$ , queda definido mediante la siguiente ecuaciones:

$$\Delta l(u) = \frac{1}{2}R \left( 1 + \frac{1}{36} \left( \frac{u}{H} \right)^2 \right) \left( \frac{u}{H} \right)^2 \quad (1)$$

Realizando simplificaciones se tiene que la reacción del aislador contra la superestructura,  $F_s$ , debido a un desplazamiento  $u$  con velocidad  $\dot{u}$  y disipación por roce en la rótula de bola del apoyo basal del dispositivo es:

$$F_s = \frac{T(u)}{H} u + \frac{\left(\frac{d}{2}\right)}{H} P_e \mu \text{sign}(\dot{u}) \quad (2)$$

En donde,

To: Tensión inicial del cable.

$T(u)$ : Tensión del cable en función de  $u$ .

$K_{\text{resorte}}$ : Rigidez del resorte.

d: Diámetro de la bola.

H: Altura del aislador.

$P_e$ : Carga vertical de la superestructura contra el aislador.  $P_e = (W + T(u))$

$\mu$ : Coeficiente de roce.

W: Peso de la estructura

### 2.3 Análisis dinámico tiempo-historia

Los análisis numéricos para los modelos de racks con conexiones rígidas y semi-rígidas, ambas con apoyos fijos en la base, y racks con conexiones semi-rígidas y con aislamiento basal, fueron sometidos a un análisis de tiempo-historia con acción sísmica. El sismo considerado como forzante externo está basado en el registro de Llolleo del 3 de marzo de 1985. Éste fue escalado en el dominio de la frecuencia para hacer que su espectro de respuesta coincida al espectro de diseño de la NCh2745. Se consideró zona sísmica 3, suelo tipo III, categoría de edificio B y amortiguamiento del 5% del

crítico. En la Figura 3 se muestra el registro sísmico compatibilizado y el espectro de diseño de la NCh2745.

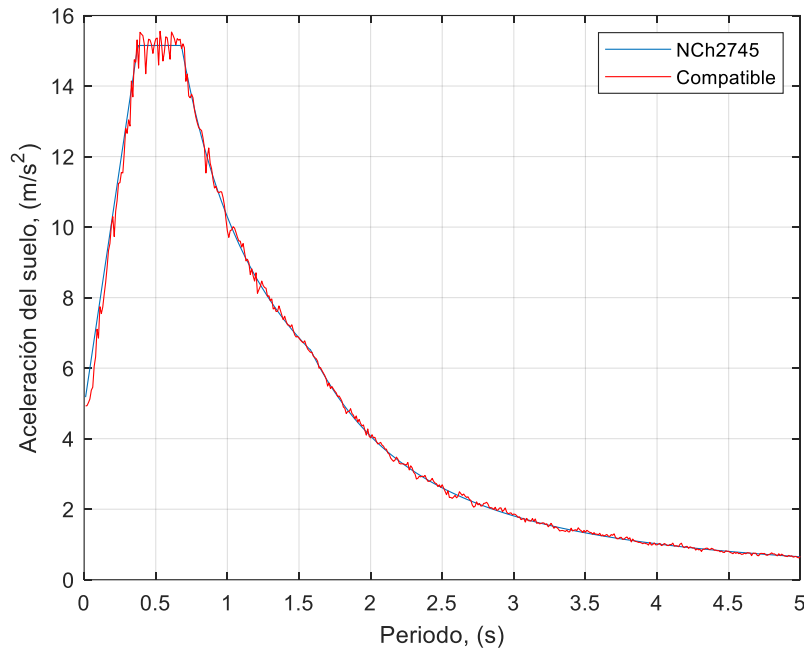


Figura 3: Espectros del diseño de la NCh2745 y registro compatible.

En la Figura 4 se muestra el registro sísmico a través del tiempo, el cual tiene una duración de 116.39 segundos.

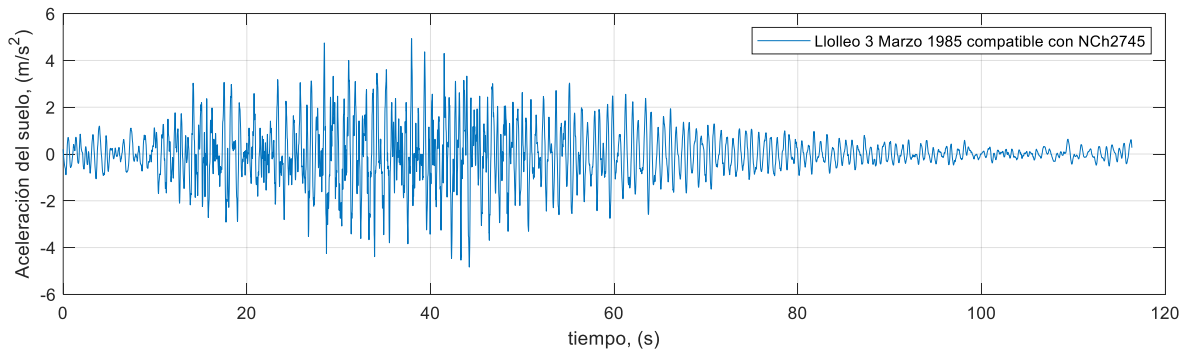


Figura 4: Registro de Lolleo 3 de marzo 1985 compatible con NCh2745.

Debido al alto costo computacional de los modelos a analizar, se truncó el registro sísmico en los primeros 50s, por lo que se realizó cada análisis hasta ese tiempo. Esto se hizo así ya que en este lapso se concentran las mayores aceleraciones del registro, obteniéndose en este intervalo las respuestas máximas de los racks analizados.

## 2.4 Análisis paramétrico

Se analizaron racks con 4 alturas diferentes: 2, 4, 6 y 8 niveles, considerando una altura de 1.5 metros entre cada nivel. En cada caso con aislamiento basal se consideraron 5 periodos de aislamiento: 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 y 5s. Para los modelos de racks fijo en la base se consideró una razón de amortiguamiento de 5%. Todos los modelos fueron sometidos a un único registro sísmico mencionado anteriormente.

El aislador cinemático tiene una altura de  $H = 0.6$  metros, con un pistón neumático en su interior que posee una cámara de aire comprimido que en posición de reposo tiene un largo ( $L_{ca}$ ) igual a 40cm. La presión del gas en condición de reposo es  $p_o = 5\text{Mpa}$ . La sección transversal de la cámara de aire del pistón ( $A_{ca}$ ) está dada por la siguiente ecuación:

$$A_{ca} = \frac{m_t H}{4p_o} \left( \frac{2\pi}{T_a} \right)^2 \quad (4)$$

En donde,

H: Altura del aislador.

$m_t$ : masa total de la estructura.

$T_a$ : periodo de aislamiento.

La tensión del cable cuando  $u = 0$  es  $T_o = p_o A_{ca}$ . Sin embargo, cuando  $u \neq 0$ , el largo de la cámara de aire se reduce a  $L_{ca} - \Delta l(u)$ . De esta manera, la tensión del cable se calcula por medio de la ecuación (5), siguiendo la ley de los gases ideales:

$$T(u) = T_o \left( 1 + \frac{L_{ca}}{L_{ca} - \Delta l(u)} \right) \quad (5)$$

Con el fin de disminuir la altura del aislador de 60 cm a 30 cm, en el interior del aislador se incorporó un resorte para representar el pistón neumático que en su interior tiene aire comprimido. En donde la tensión del cable está dada por la siguiente ecuación:

$$T(u) = T_o + K_{resorte} \Delta l \quad (6)$$

Para determinar la rigidez del resorte se iguala la rigidez lateral del aislador,  $\frac{T(u)}{H}$ , con el resorte y el pistón neumático.

De esta manera, el dispositivo cinemático de aislamiento basal considerado en los análisis tiene una altura  $H = 0.3$  metros y radio de curvatura  $R = 0.3$  metros. Se consideraron 3 coeficiente de roce en el dispositivo de aislamiento basal:  $\mu = 0.2, 0.4$  y  $0.6$ , teniendo como referencia que el coeficiente de roce entre acero-acero es de  $0.4$ . Los diámetros de las bolas se definieron de tal manera que la presión estática por peso propio se mantuviera constante independientemente de la altura del rack. De esta manera, a mayor altura del rack, la rótula de bola considerada en la base del fue de mayor diámetro (Tabla 1).

Tabla 1: Diámetro de las bolas en la rótula del aislador.

N° de niveles	Altura Total (m)	d (cm)
2	3	5
4	6	7
6	9	8.5
8	12	10

La rigidez del resorte en el interior del aislador se determinó según el número de niveles y periodos de aislamiento ( $T_a$ ). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2: Rigidez del resorte en N/m.

Niveles $T_a$	2	4	6	8
2.5	6838	9963	13463	17176
3	4656	7088	9455	11958
3.5	3124	5018	6933	8801
4	2246	3759	5292	6765
4.5	1733	3013	4172	5365
5	1398	2408	3400	4357

La tensión inicial del cable según el número de niveles y periodos de aislamiento ( $T_a$ ) se muestra en la siguiente Tabla 3:

 Tabla 3: Tensión inicial ( $T_0$ ) en N.

Niveles $T_a$	2	4	6	8
2.5	8216	14605	20993	27382
3	5705	10142	14579	19015
3.5	4192	7451	10711	13971
4	3209	5705	8201	10696
4.5	2536	4508	6479	8451
5	2054	3651	5248	6846

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 4 se muestran los primeros 3 periodos naturales de los racks fijos en su base analizados, en función del número de niveles. Se observa que mientras mayor esbeltez tenga la estructura, se vuelve más flexible, es decir, el periodo natural es mayor.

 Tabla 4: Periodos naturales de los racks fijos en su base analizados,  $T_n$  (s).

2 niveles	4 niveles	6 niveles	8 niveles
0.294	0.514	0.808	1.109
0.247	0.294	0.294	0.340
0.234	0.248	0.248	0.294

Para todos los casos de las estructuras analizadas se extrajeron las respuestas objetivo máximas en la dirección larga de la estructura, ya que es la más flexible y es donde se impuso el forzante sísmico.

Se consideró como respuestas de interés: la deriva de piso máxima promedio (drift), aceleración absoluta máxima promedio ( $\ddot{u}_{abs}$ ) y corte basal máximo ( $Q_0$ ). Con el fin de mostrar los resultados con mayor claridad cada respuesta objetivo se normalizó para transformarla en una cantidad adimensional de fácil interpretación. En el caso del drift, este se calculó como la sumatoria de los desplazamientos relativos de cada piso y se dividió por la altura total de la estructura. La determinación de  $Q_0$ , el corte basal máximo se dividió por el peso sísmico. Para el cálculo de  $\ddot{u}_{abs}$ , la aceleración máxima promedio de cada piso se dividió por la aceleración de gravedad.

En la Figura 5, se muestran los resultados de racks fijos con conexiones rígidas y racks fijos con conexiones semi-rígidas. Se puede apreciar que al considerar la plasticidad en las conexiones hay una reducción en cada una de las respuestas objetivos. De la Figura 5(a) se deduce que la incorporación de las conexiones semi-rígidas tiene un mayor efecto en la reducción de la deriva máxima de piso cuando la estructura se hace más esbelta.

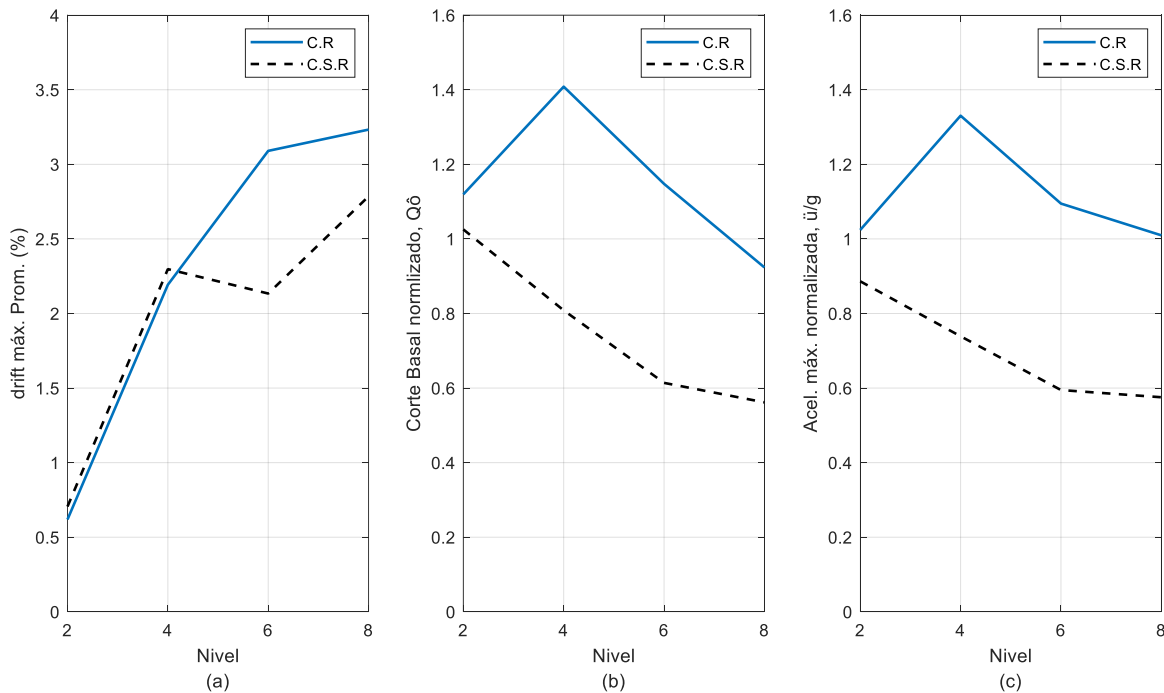


Figura 5: Respuestas objetivos de racks fijo con conexiones rígidas y semi-rígidas. (a) drift máximo promedio, (b) Corte basal normalizado y (c) Aceleración Absoluta máxima normalizada.

Las Figuras 6 a la 9 muestran los resultados obtenidos de los racks con aislamiento basal. Se observa en cada Figura los resultados de racks con diferentes coeficientes de roce ( $\mu$ ) en la rótula de bola en la base del aislador. Con el fin de mostrar que existe una disminución de las respuestas objetivos se incluye la respuesta máxima correspondiente del rack fijo con conexiones rígidas, denotado en la leyenda de las Figuras como C.R. Las respuestas de interés son las mencionadas anteriormente en la Figura 5, las cuales se grafican en función del periodo de aislamiento ( $T_a$ ).

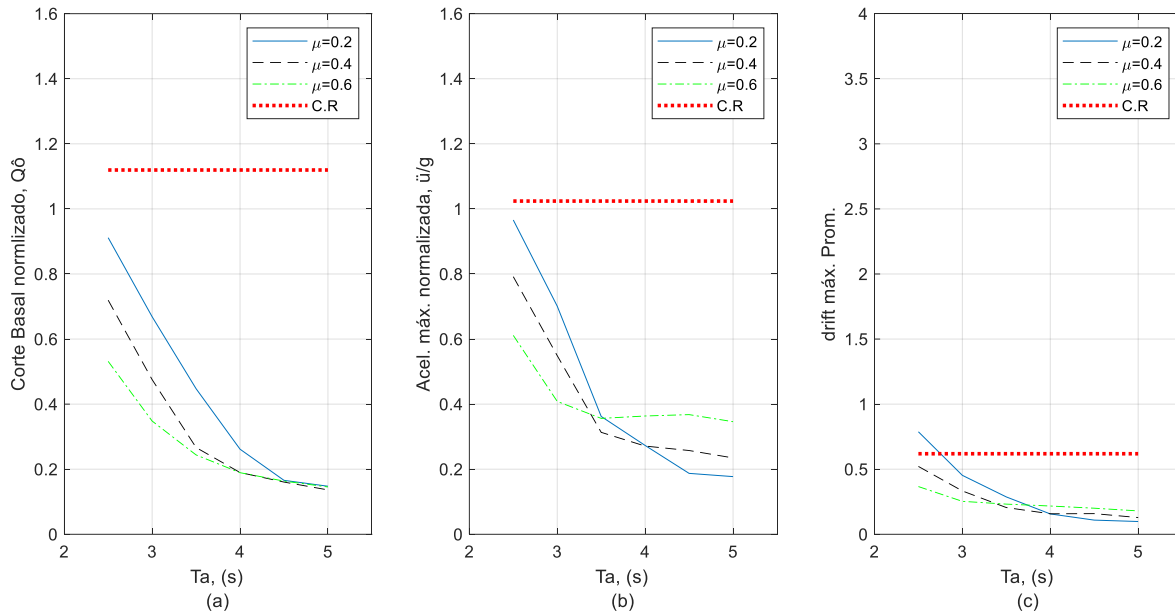


Figura 6: Respuestas objetivos de racks de 2 niveles con aislamiento basal. (a) Corte basal normalizado, (b) Aceleración Absoluta máxima normalizada y (c) drift máximo promedio.

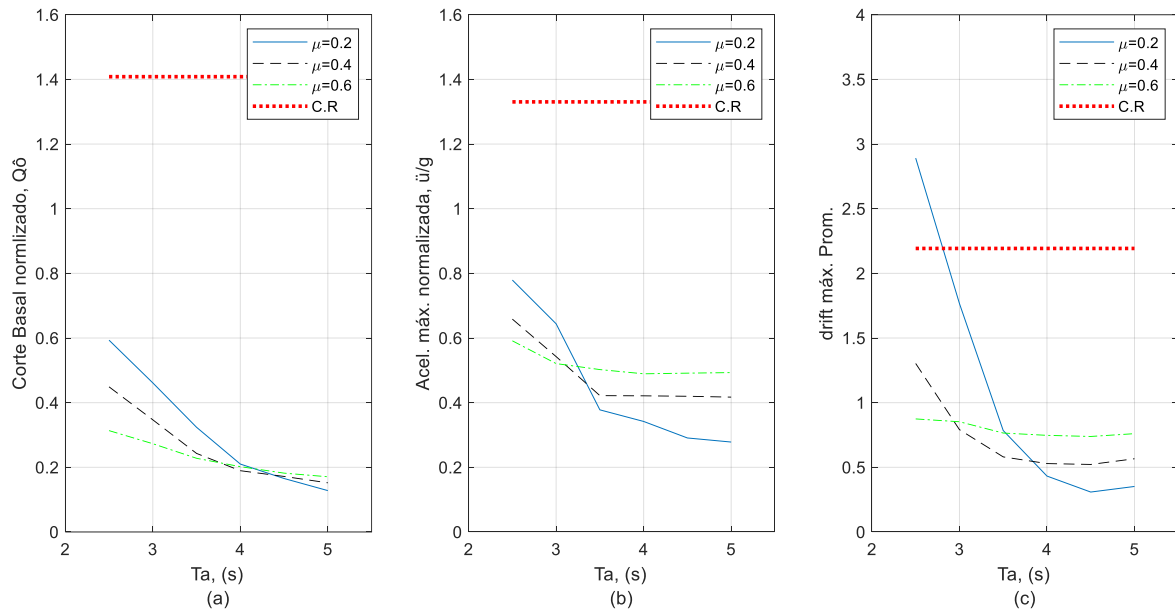


Figura 7: Respuestas objetivos de racks de 4 niveles con aislamiento basal. (a) Corte basal normalizado, (b) Aceleración Absoluta máxima normalizada y (c) drift máximo promedio.

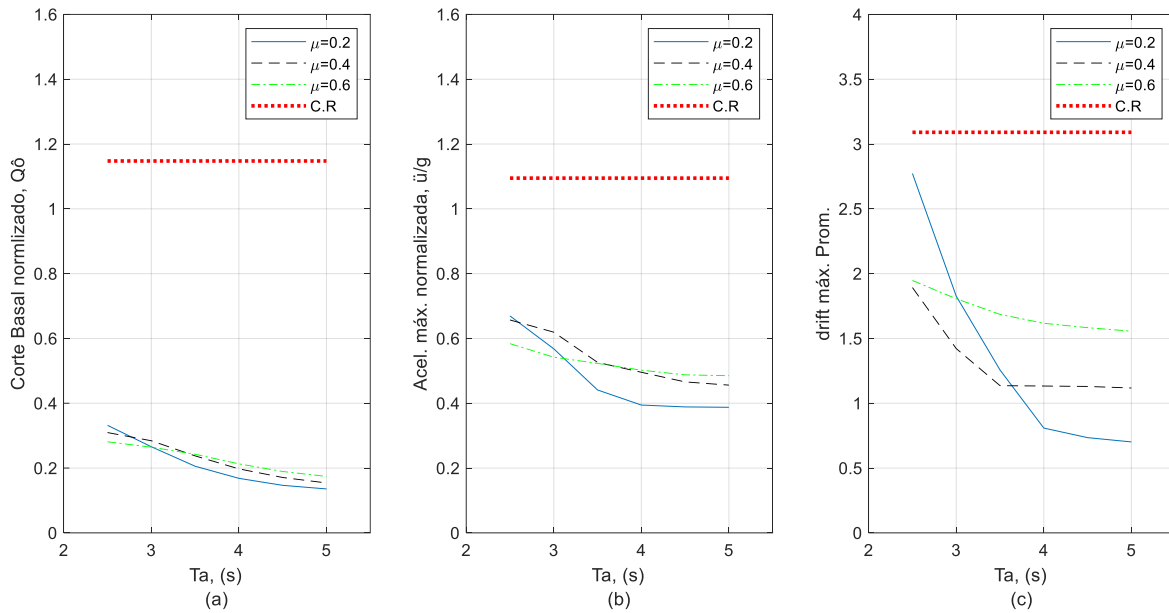


Figura 8: Respuestas objetivos de racks de 6 niveles con aislamiento basal. (a) Corte basal normalizado, (b) Aceleración Absoluta máxima normalizada y (c) drift máximo promedio.

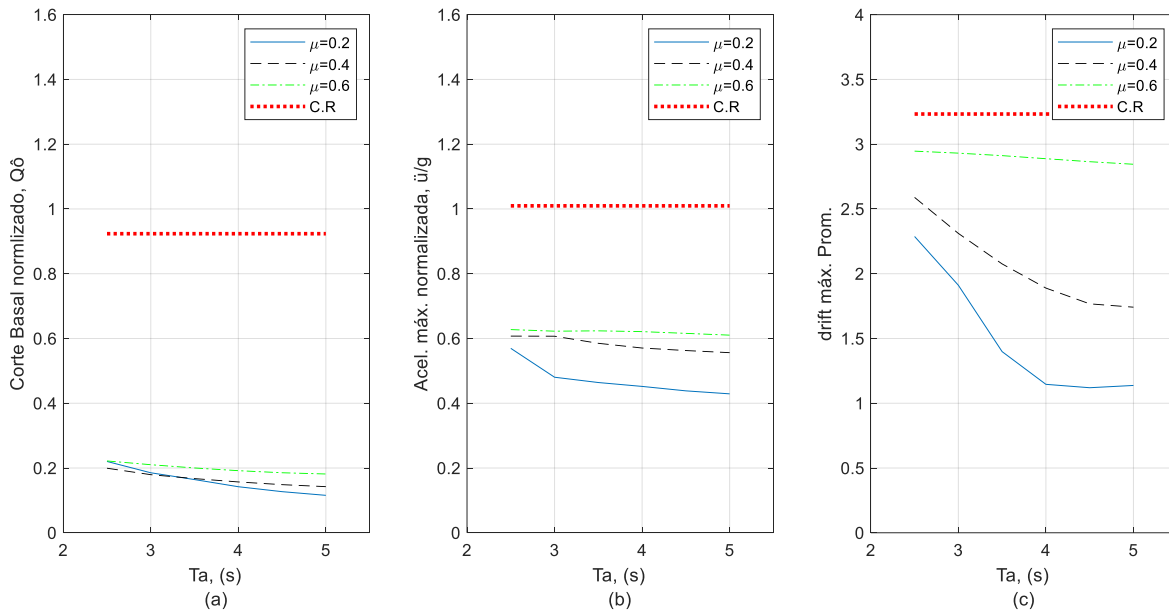


Figura 9: Respuestas objetivos de racks de 8 niveles con aislamiento basal. (a) Corte basal normalizado, (b) Aceleración absoluta máxima normalizada y (c) drift máximo promedio.

De las Figuras 5 a la 9 se observa que existe una reducción de todas las respuestas objetivos con la incorporación del dispositivo cinemático de aislamiento basal. Tanto para el corte basal, aceleración absoluta máxima y deriva de piso máxima promedio, se observa que mientras mayor sea el periodo de aislamiento ( $T_a$ ) estas respuestas disminuyen. Teniendo en cuenta que se consideraron periodos de aislamiento de 2.5 a 5 s a las estructuras, lo dicho anteriormente es consistente con el espectro de

diseño mostrado en la Figura 3, ya que mientras mayor es el periodo de aislamiento menor es la respuesta espectral del sísmico.

También se puede observar que mientras el corte basal disminuye, al aumentar la cantidad de niveles en los racks la deriva de piso máxima promedio va aumentando. El aumento de la deriva de piso máxima promedio es coherente ya que a medida que a la estructura más niveles se le agregan se vuelve más flexible, esto hace que la estructura tenga mayores desplazamientos.

Se considera como respuesta objetivo la aceleración absoluta máxima ya que ésta es la que produce el volcamiento de los pallets almacenados en el rack. En la Figura 10 se muestra un esquema del pallet almacenado, cuyas dimensiones son 1.35 metros y un ancho de 0.75 metros. Dicha Figura ilustra la condición de aceleración horizontal considerada como crítica para efectos de volcamiento. Esta condición está definida por el estado en que la proyección de la fuerza resultante de la acción sísmica y la aceleración de gravedad corta a la arista basal del pallet. Esto corresponde a una condición de equilibrio inestable, ya que una aceleración horizontal mayor a la ilustrada en la Figura 10 y definida analíticamente por la Ecuación (7), generará el volcamiento del pallet almacenado. En la condición ilustrada, si la aceleración horizontal absoluta es mayor a 0.56g se produce el volcamiento del pallet.

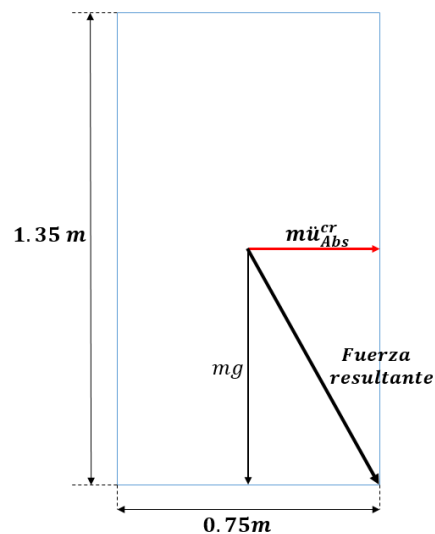


Figura 10: Aceleración Absoluta crítica.

$$\frac{\ddot{u}_{Abs}^{cr}}{g} = \frac{0.75/2}{1.35/2} = 0.56 \quad (7)$$

Dicho lo anterior se observa de las Figuras 6 (b), 7 (b) y 8 (b) que con un período de aislamiento igual o mayor a 3.5s no se supera la aceleración absoluta crítica. Esto implica que no se producirá volcamiento de pallets al cumplirse dicha condición, al no superar los 0.56g en la aceleración absoluta máxima horizontal. Además, se observa que con un período de aislamiento mayor o igual a 3s y  $\mu$  igual a 0.2, en rack de 8 no ocurrirá volcamiento de los pallets.

En cuanto al rack con apoyo basal empotrado, como se observa en la Figura 5(c) tanto para el caso con conexiones rígidas como con conexiones semi-rígidas, la aceleración crítica es superada. Esto significa que todos los racks con apoyo basal empotrado analizados sufrirían volcamiento de los

pallets almacenados bajo la acción de un sismo severo que iguala las expectativas de diseño de la NCh2745.

También, se puede observar que el aumentar el coeficiente de roce en la rótula de bola en la base del aislador ( $\mu$ ) es ineficiente e incluso perjudicial para los racks más esbeltos (4 ó más niveles). Al observar el corte basal de los racks con 4 niveles, Figura 7 (a), se aprecia que al considerar un periodo de aislamiento de 2.5s la magnitud del corte basal se reduce al aumentar el coeficiente de roce. Sin embargo, al considerar un periodo de aislamiento de 5s la magnitud del corte basal normalizado aumenta al aumentar el coeficiente de roce. En el caso de la Figura 7 (a) el punto en el que cambia el orden mencionado anteriormente, se encuentra entre los periodos de aislamiento 4 y 4.5 s. No obstante, al aumentar el número de niveles en los racks este punto se produce con periodos de aislamiento más pequeños hasta llegar al punto en que al aumentar el  $\mu$  aumenta la magnitud del corte basal normalizado. Lo anterior se repite en las otras dos respuestas de interés: Aceleración absoluta máxima normalizada y drift máximo promedio. De esta manera, mientras más alta sea la estructura convendría tener un coeficiente de roce en la rótula de bola en la base del aislador ( $\mu$ ) más pequeño ya que disminuye la respuesta objetivo. Al considerar el drift máximo promedio de un rack con 8 niveles, Figura 9 (c), se observa como al tener un  $\mu$  igual a 0.6 la magnitud de dicha respuesta de interés es cercana a los 2.9 y 2.8 % para periodo de aislamiento de 2.5 y 5 s, respectivamente. Mientras que al utilizar un  $\mu$  igual a 0.2 la magnitud de dicha respuesta de interés es 2.2 y 1.1 %.

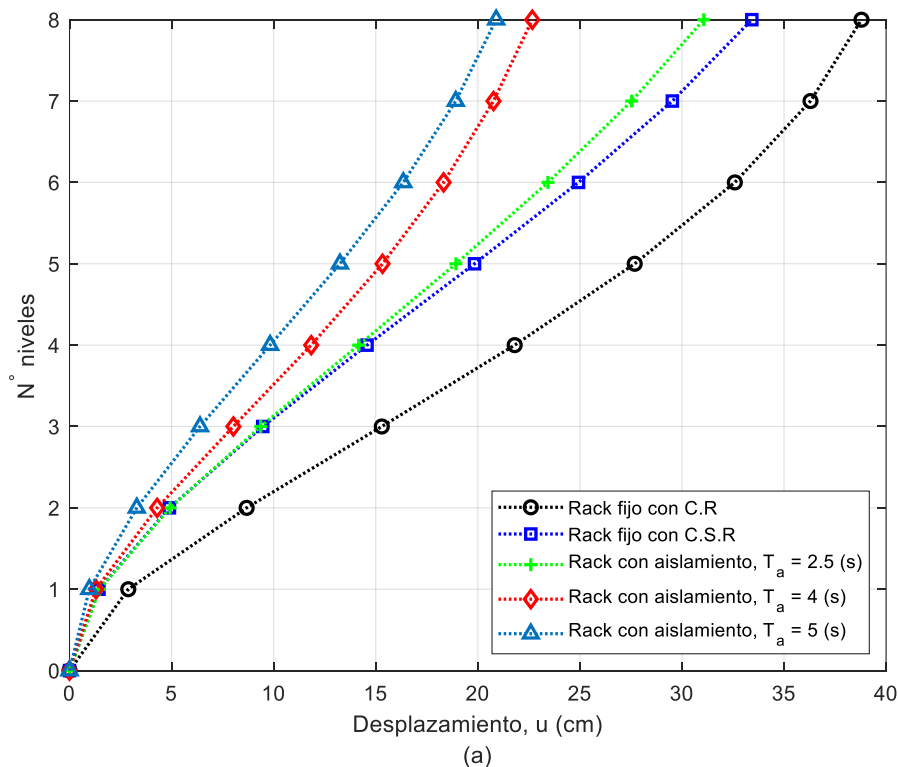


Figura 11: Desplazamiento lateral de racks fijos y con aislación basal, considerando el máximo desplazamiento de techo.

La Figura 11 muestra el desplazamiento lateral máximo de cada nivel considerando racks de 8 niveles con coeficiente de roce en la rótula de bola en la base del aislador ( $\mu$ ) igual a 0.4, teniendo en cuenta

que es el roce entre acero-acero, y diferentes condiciones de borde: rack fijo con conexiones rígidas, rack fijo con conexiones semi-rígidas y racks con aislamiento basal y periodo de aislamiento ( $T_a$ ) de 2.5, 4 y 5 s. Se observa que hay una reducción en los desplazamientos laterales del rack con aislamiento basal respecto de los racks fijos en la base. Concentrándose en el nivel 8 de las estructuras, se observa que hay una reducción de 18 cm entre al rack fijo con conexiones rígidas y 12.5 cm del rack fijo con conexiones semi-rígidas respecto del rack con  $T_a$  igual a 5 s. Además, se puede observar que los desplazamientos laterales en el nivel 8 son de 20.9, 22.6 y 31.1 cm, para los racks con periodo de aislamiento de 5, 4 y 2.5 s, respectivamente. Entre mayor sea el periodo de aislación ( $T_a$ ) la estructura tendrá una mayor reducción de la respuesta objetivo.

En la Figura 12 se observa el desplazamiento máximo del nivel de aislamiento para racks con diferentes niveles de aislamiento y coeficiente de roce en la rótula de bola en la base del aislador ( $\mu$ ). Se observa que mientras mayor es la magnitud de  $\mu$ , el desplazamiento máximo en la base se hace cada vez menor, debido a que hay mayor disipación de energía. Además, se observa que mientras menos esbelta sea la estructura el desplazamiento máximo alcanzado en la base es mayor, en comparación con estructuras más esbeltas. Esto tiene lógica ya que la estructura se vuelve más flexible al ser más esbelta, es decir, su periodo fundamental aumenta, teniendo una menor magnitud del espectro de diseño, Figura 3. Finalmente, se observa que en racks de menos niveles el desplazamiento máximo basal disminuye mientras mayor sea el periodo de aislamiento ( $T_a$ ), esto debido a que la estructura más rígida, es decir, tiene menor periodo fundamental, por lo tanto, los desplazamientos máximos a nivel de la base se concentran en  $T_a$  más bajos. En comparación con racks de mayor número de niveles, sucede lo contrario, debido a que el periodo fundamental de estas estructuras es mayor, por lo tanto, los desplazamientos máximos a nivel basal se concentran en  $T_a$  mayores.

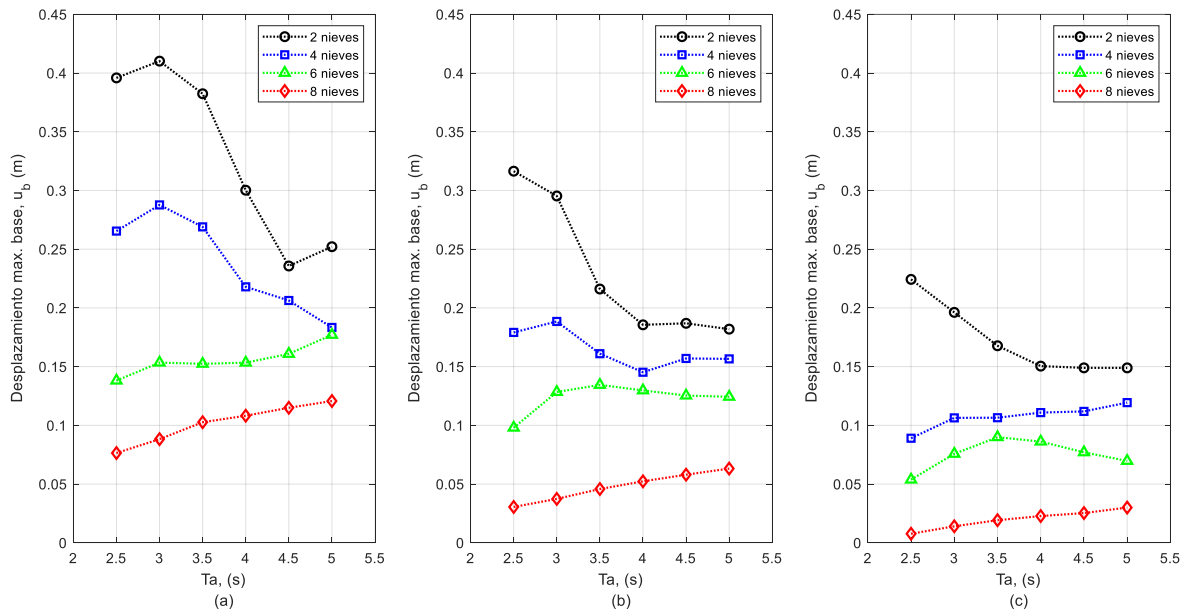


Figura 12: Desplazamiento máximo del nivel de aislamiento. (a)  $\mu$  igual a 0.2, (b)  $\mu$  igual a 0.4 y (c)  $\mu$  igual a 0.6.

La Figura 13 muestra el ciclo histerético del sistema de aislación basal vs el corte basal normalizado. Se observa que a mayor magnitud de coeficiente de roce en la rótula de bola en la base del aislador

( $\mu$ ) la banda del ciclo histerético se hace más ancha, por lo que hay mayor disipación de energía. La efectividad de la disipación de energía se puede notar en que las magnitudes del desplazamiento máximo del nivel de aislamiento, Figuras 12, disminuyen considerando racks con el mismo número de niveles.

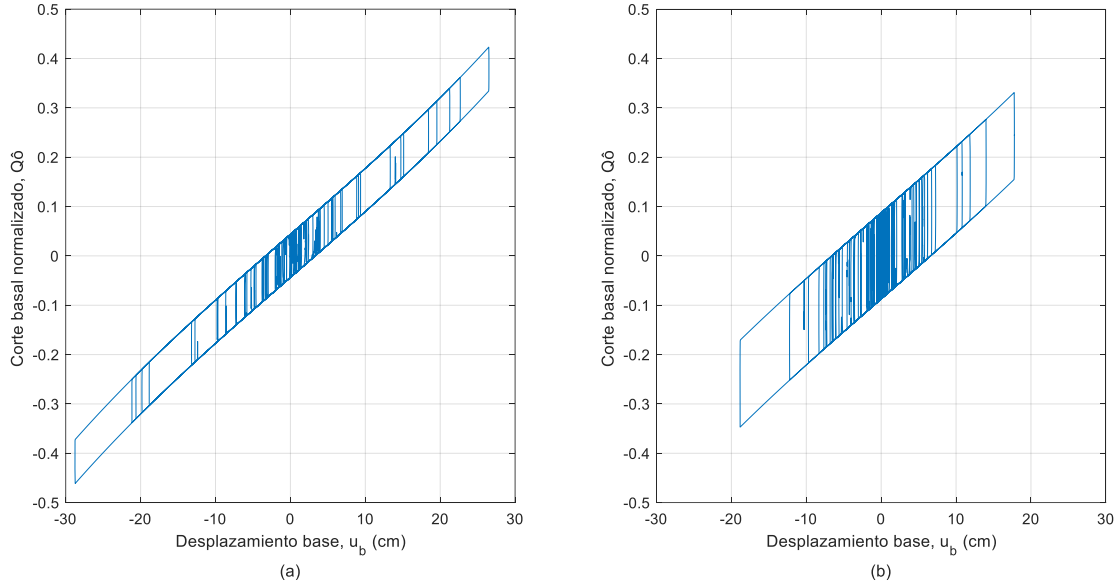


Figura 13: Ciclo histerético del sistema de aislamiento considerando un rack con 4 niveles y  $T_a$  igual a 3 s. (a) aislador basal con  $\mu$  igual a 0.2 y (b) aislador basal con  $\mu$  igual a 0.4.

En las siguiente Tablas se muestra la razón entre la tracción máxima o compresión mínima (según corresponda) de los aisladores y la tensión inicial del cable ( $T_o$ ), donde si el cociente es mayor 1 hay levantamiento en el aislador. Se observa que en el aislador con coeficiente de roce en la rótula de bola en la base del aislador ( $\mu$ ) igual a 0.2 hay tracción en un rack con 4 niveles y periodo de aislación ( $T_a$ ) igual a 2.5 s. Sin embargo, no hay levantamiento en el aislador.

Tabla 5: Razón entre la tracción/compresión de los aisladores y la tensión inicial del cable ( $T_o$ ) para aislador con  $\mu$  igual a 0.2

Niveles $T_a$	2	4	6	8
2.5	-0.4	0.6	-0.4	-0.8
3	-1.5	-0.5	-1.2	-1.2
3.5	-3.0	-2.1	-2.1	-2.1
4	-5.1	-3.9	-3.4	-3.3
4.5	-7.1	-5.9	-4.7	-4.2
5	-9.0	-6.9	-5.8	-5.0

Tabla 6: Razón entre la tracción/compresión de los aisladores y la tensión inicial del cable ( $T_o$ ) para aislador con  $\mu$  igual a 0.4

Niveles $T_a$	2	4	6	8
2.5	-0.8	-0.7	-0.7	-0.5
3	-2.0	-1.5	-1.5	-0.9
3.5	-3.6	-2.6	-2.2	-1.5
4	-5.2	-3.6	-3.0	-2.1
4.5	-6.6	-4.6	-3.9	-2.9
5	-8.5	-5.5	-4.9	-3.8

 Tabla 7: Razón entre la tracción/compresión de los aisladores y la tensión inicial del cable ( $T_o$ ) para aislador con  $\mu$  igual a 0.6

Niveles $T_a$	2	4	6	8
2.5	-1.3	-1.0	-0.6	-0.4
3	-2.4	-1.6	-1.1	-0.5
3.5	-3.5	-2.3	-1.5	-0.8
4	-4.7	-3.1	-2.1	-1.1
4.5	-6.2	-3.9	-2.8	-1.4
5	-7.9	-4.8	-3.5	-1.8

#### 4. CONCLUSIONES

Se verificó la efectividad del uso del dispositivo cinemático de aislamiento basal en la reducción de las respuestas de interés: desplazamiento relativo máximo de piso, la aceleración absoluta máxima y el corte basal máximo.

Se analizaron 3 tipos de racks en cuanto a condiciones de apoyo y conexiones: fijos en su base con conexiones rígidas, fijos en su base con conexiones semi-rígidas, y con aislamiento basal y conexiones semi-rígidas. Se obtuvo como resultado que los racks bajos, de hasta 4 niveles, con conexiones semi-rígidas tienen similares magnitudes de drift máximo promedio respecto a racks fijo con conexiones rígidas, Figura 5(a). Sin embargo, para estructuras esbeltas se nota una diferencia en la respuesta objetivo. Entre los racks fijos con conexiones rígidas y los racks con aislamiento basal y conexiones semi-rígidas, hay una disminución de las respuestas objetivos en todos los casos. Obteniendo menores respuestas de interés en los racks con más niveles de altura.

Se analizaron dispositivos cinemáticos de aislamiento basal con diferentes coeficientes de roce en la rótula de bola en la base del aislador ( $\mu$ ): 0.2, 0.4 y 0.6. Se concluye que si bien hay mayor disipación de energía mientras mayor sea la magnitud del  $\mu$ , sin embargo, mientras más alta es la estructura la que obtuvo menor magnitud de la respuesta de interés es con un  $\mu = 0.2$ . Es por ello que se recomienda usar un menor  $\mu$  mientras más esbelta es la estructura.

Los racks con aislamiento basal fueron analizados con diferentes periodos de aislamiento ( $T_a$ ): 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 y 5 s. Concluyendo que mientras mayor es el  $T_a$  las respuestas de interés son menores. Esto se puede observar claramente en la Figura 11, en donde los desplazamientos laterales en el nivel 8

son de 20.9, 22.6 y 31.1 cm, para los racks con periodo de aislamiento de 5, 4 y 2.5 s, respectivamente. Se recomienda utilizar un  $T_a$  mayor a 3 s para este tipo de estructuras.

Finalmente, se concluye que en ningún aislador hay levantamiento. Estando todos los aisladores en compresión excepto en un rack de 4 niveles y periodo de aislamiento ( $T_a$ ) igual a 2.5 s con coeficiente de roce en la rótula de bola en la base del aislador ( $\mu$ ) igual a 0.2. Sin embargo, el cociente entre la tracción máxima de los aisladores y la tensión inicial del cable ( $T_o$ ) es menor a 1.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento de CORFO por medio del proyecto 19CTEBI-113008, en el marco de la convocatoria de financiamiento de tesis de pregrado 2019 del Comité de Desarrollo Productivo Regional Biobío. Se agradece al apoyo brindado por Unidad de Apoyo a la Innovación de la Universidad Católica de la Santísima Concepción por la asesoría prestada en la postulación a dicho fondo y en la rendición presupuestaria del mismo.

Agradezco a Dios por permitirme estudiar esta hermosa carrera, Ingeniería Civil. Además, por la inteligencia, entendimiento y capacidad que me ha dado durante estos 6 años de carrera, ya que, sin Él nada de lo que he realizado lo hubiera podido ser hecho. Es por ello que si hay alguien digno de recibir la honra por el trabajo realizado en esta investigación es Él.

De igual manera, agradezco a Delia Arias, Graciela Figueroa, Johana Álvarez y Paola Álvarez que siempre estuvieron presente en toda mi carrera universitaria, brindándome su apoyo incondicional.

Finalmente, agradezco por conocer a personas que durante estos 6 años de estudio de una u otra forma estuvieron apoyándome y dándome ánimo. En especial a mis compañeros y amigos de generación más cercanos Claudio Salazar, Diego Molina, Sebastián Alarcón y Nicolás Mardones.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Teh, L. H., Hancock, G. J., & Clarke, M. J. (2004). Analysis and design of double-sided high-rise steel pallet rack frames. *Journal of Structural Engineering*, 130(7), 1011-1021.
- [2] Catálogo de MECALUX, soluciones de almacenamiento. <https://mecaluxcl.cdnwm.com/catalogos/soluciones-de-almacenamiento1.1.2.pdf>.
- [3] Coutinho, G. E. N. R. (2008). Numerical Simulation of the Seismic Behavior of Steel Storage Pallet Racking Systems. Instituto Superior Técnico, Lisbon.
- [4] Bernuzzi, C., Gabbianelli, G., Gobetti, A., & Rosti, A. (2016). Beam design for steel storage racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 116, 156-172.
- [5] Baldassino, N., & Zandonini, R. (2011). Design by testing of industrial racks. *Advanced Steel Construction*, 7(1), 27-47.
- [6] Kwarteng, K., Beale, R. G., Godley, M. H. R., & Thomson, S. (2012). The Effects of Seismic Loading on Pallet Rack Semi-Rigid Joints. In Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology, Scotland.
- [7] Gutelius Jr, J. B., McIntosh, S. C., & Notohardjono, B. D. (2000). *U.S. Patent No. 6,059,251*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [8] Pellegrino, J. B., Courtwright, J. A., & Michael, R. (2007). *U.S. Patent No. 7,263,806*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [9] Michael, R. J., Courtwright, J. A., Ferro, E. B., Filiatrault, A., Higgins, P. S., & Wanitkorkul, A. (2010, July). Development of a new base isolation system for seismic isolation of steel pallet storage racks. In *Proceedings, 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering (9USN10CEE)* (Vol. 10).
- [10] Kilar, V., Petrovčič, S., Koren, D., & Šilih, S. (2013). Cost viability of a base isolation system for the seismic protection of a steel high-rack structure. *International Journal of Steel Structures*, 13(2), 253-263.
- [11] Crosier, J., Hannah, M., & Mukai, D. (2010). Damage to steel storage racks in industrial buildings in the Darfield earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 43(4), 425.
- [12] Uma, S. R., & Beattie, G. (2011). Observed performance of industrial pallet rack storage systems in the canterbury earthquakes. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(4), 388-393.
- [13] Clifton, C., Bruneau, M., MacRae, G., Leon, R., & Fussell, A. (2011). Steel structures damage from the Christchurch earthquake series of 2010 and 2011. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(4), 297-318.
- [14] Coutinho, G. E. N. R. (2008). Numerical Simulation of the Seismic Behavior of Steel Storage Pallet Racking Systems. *Instituto Superior Técnico, Lisbon*.
- [15] Pardo, E., Maureira, N., Oyarzo-Vera, C. & Roco, A. (2019). Kinematic base isolation device with tensile strength.
- [16] Maureira, N. Solicitud de patente de invención N° PCI/IB2018/059935, Instituto Nacional de Propiedad Intelectual 2018 – INAPI, Chile.