

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN RACK TIPO SELECTIVO CON UN SISTEMA DE AISLAMIENTO TIPO RODADURA SOMETIDO A FORZANTE SISMICO EN MESA VIBRADORA

*I. Manzo Sepúlveda*¹, *N. Maureira Carsalade*², *M. Sanhueza Cartes*³

RESUMEN

En esta investigación se evalúa la efectividad de un sistema de aislamiento sísmico tipo rodadura en la reducción del corte basal y deriva de piso de un rack de almacenamiento industrial de tipo selectivo. Para lo anterior se ensayó un rack selectivo de dos niveles con y sin el sistema de aislamiento basal, con diferentes condiciones de carga y forzante sísmico simulado en mesa vibradora actuando en dos direcciones horizontales ortogonales por separado. El registro sísmico simulado por la mesa vibradora corresponde a una de las componentes horizontales del terremoto del 27 de febrero del 2010, medido en la estación de San Pedro de la Paz, escalado en frecuencia al espectro de diseño de la NCh 3703, en suelo tipo 3, zona sísmica 3, factor de importancia de la estructura $I=1$ y factor de reducción de respuesta $R=1$. Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio San José Obrero de la Universidad Católica de Santísima Concepción, Concepción, Chile. Las respuestas de interés se midieron de forma directa e indirecta mediante acelerómetros y transductores de desplazamiento lineal. Los resultados mostraron que el sistema de aislamiento estudiado es capaz de reducir considerablemente la respuesta dinámica del rack en términos de corte basal y deriva de techo, tanto en la dirección larga como en la dirección corta del rack. También se logró identificar que el dispositivo tiene la capacidad de soportar fuerzas de tracción moderadas, además de poder disipar energía mediante roce en su rótula de bola basal.

Palabras clave: Aislamiento basal tipo rodadura, corte basal, deriva de techo, ensayos en mesa vibradora.

ABSTRACT

This research evaluates the effectiveness of a rolling-type seismic isolation system in reducing the basal shear load and floor drift of a selective-type industrial storage rack. For the above, a two-level selective rack was tested with and without basal the isolation system, with different load conditions and simulated seismic forcing on a shaking table acting in two orthogonal horizontal directions separately. The seismic record simulated by the shaking table corresponds to one of the horizontal components of the earthquake of February 27, 2010, measured at the San Pedro de la Paz station, scaled in frequency to fit with the design spectrum of NCh3703, in soil type 3, seismic zone 3, importance factor of the structure $I=1$ and response reduction factor $R=1$. The tests were carried out in the San José Obrero laboratory of the Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile. The responses of interest were measured directly and indirectly using accelerometers and linear displacement transducers. The results showed that the studied isolation system is capable of considerably reducing the dynamic response of the rack in terms of basal shear load and top drift, both in the longitudinal and transversal rack directions. It was also possible to identify that the device has the capacity to withstand moderate traction forces, in addition to being able to dissipate energy through friction on its basal ball joint.

Keywords: Rolling-type base isolation, basal shear load, roof drift, shaking table tests.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE. imanzo@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE

1. INTRODUCCIÓN

Los efectos de los terremotos en las estructuras siempre han sido motivo de preocupación para los ingenieros, especialmente en áreas de alto riesgo sísmico. En estas zonas, la carga sísmica controla el diseño estructural, ya que genera grandes fuerzas de inercia y momentos de vuelco en las estructuras [1]. Chile, al localizarse en la zona de subducción donde se encuentran las placas de Nazca y la Sudamericana, concentra un gran nivel de sismicidad y riesgo sísmico. Es por ello que el estudio de estos fenómenos y sus efectos en las estructuras tienen una alta importancia en nuestro país. Las cargas sísmicas pueden provocar el colapso estructural y la consiguiente pérdida de vidas humanas, así como importantes daños materiales. En consecuencia, proteger las estructuras y su contenido de los terremotos es de gran relevancia económica y social [1]. En este sentido, el desprendimiento de productos y el colapso de los sistemas de almacenamiento tipo rack selectivo debido a la acción sísmica, es un problema relevante de abordar. Los racks selectivos son ampliamente utilizados debido a la creciente necesidad de una utilización racional del espacio en almacenes, fábricas y otras instalaciones utilizadas para almacenar mercancías, lo que amerita su estudio [2].

Los sistemas de almacenamiento tipo racks son estructuras especiales que normalmente soportan cargas vivas mucho mayores que su propio peso. Pueden ser de alturas y esbelteces considerables, similares a los edificios ordinarios de varios pisos. Por lo tanto, en zonas de alta sismicidad, pueden estar sometidos a importantes cargas horizontales, así como a un riesgo adicional asociado al desprendimiento de mercancías [3, 4]. Esto representa un riesgo para las personas que transitan habitualmente cerca de ellos, además de producir pérdidas económicas [5]. Por lo general estos sistemas de almacenamiento son diseñados con perfiles de acero de pared delgada conformados en frío y conexiones simples o apemadas de viga a montante para facilitar la instalación y los posibles cambios [6]. Las columnas se fabrican con secciones abiertas con perforaciones a intervalos estándar para que la viga y las diagonales del sistema de celosía puedan conectarse de forma modular. El material comúnmente utilizado es acero al carbono A36, según la norma ASTM. Las vigas son de sección cerrada generalmente rectangular, compuesta por dos perfiles en C de alas rigidizadas con uniones soldadas discontinuas entre ellas en el sentido longitudinal [2, 8, 9, 10].

Los racks de almacenamiento industrial se han ido desarrollando a lo largo de los últimos años. Hoy en día se pueden distinguir diferentes tipologías, tales como: drive-in, drive-through, push-back, por gravedad, plataformas soportadas y racks selectivos, siendo este último uno de los más utilizados en Chile [10] y en el mundo [11, 12]. Una de las principales ventajas de este tipo de almacenajes, es que permiten el acceso directo a todos los pallets almacenados en cualquier momento y se pueden disponer con entradas únicas o dobles [13]. Las entradas dobles pueden proporcionar almacenamientos de mayor densidad, pero el manejo es más difícil. Mientras que los estantes con entradas únicas tienen un manejo bastante fácil en términos de reposición de los productos almacenados.

Una de las deficiencias de los racks es que los arriostramientos sólo se pueden usar para evitar el balanceo en la dirección transversal al pasillo o corta. Mientras que en el sentido del pasillo o longitudinal, no se pueden utilizar arriostramientos ya que se impedirían el acceso a los pallets que contienen la mercancía almacenada [14]. Otro de los factores a considerar en este tipo de estructura es el hecho de que sus elementos suelen tener perforaciones para el ensamblaje. Esto los hace susceptibles a los fenómenos de inestabilidad local y global característicos de las estructuras de paredes delgadas [2]. Durante terremotos recientes, han ocurrido algunos colapsos de estructuras de estanterías de acero, lo que ha generado inquietudes sobre la capacidad de las estructuras de almacenamiento industrial para resistir de manera segura los efectos sísmicos. Un ejemplo de esto es la inspección realizada por un grupo de investigadores de USA y Nueva Zelanda, los cuales analizaron

una gran variedad de edificios industriales para constatar los efectos del terremoto de Darfield de septiembre de 2010 en la ciudad de Christchurch [15]. Pese a que se observaron daños menores en las estructuras habitacional y de oficinas, los efectos en racks de almacenamiento variaron desde daño moderado a colapso total [15].

En la última década, la investigación en relación con las estanterías de acero se ha centrado en reducir la incertidumbre del diseño mediante el perfeccionamiento de las metodologías de análisis y la caracterización de los componentes resistentes a terremotos y sus conexiones [16, 17, 18, 19]. Algunos de los estudios realizados a este tipo de estructuras se centran en el comportamiento de las partes que componen el rack como, por ejemplo: comportamiento experimental de conexión viga-columna [20, 21, 22, 23, 24, 25]; análisis numéricos con nuevos modelos histeréticos que describen el comportamiento de dichas conexiones [26, 27]; comportamiento experimental [28, 29, 30] y predicciones numéricas [29, 31], de las conexiones columna base, entre otras. Otros investigadores han estudiado la vulnerabilidad sísmica de racks de almacenamiento industrial por medio de ensayos cuasi estáticos [21], así como pruebas dinámicas experimentales y numéricas diversas [10, 12, 32].

Debido a la problemática de diseño de los racks, se presenta la necesidad de buscar soluciones, para poder proteger a la estructura y a las personas que transitan en las cercanías de esta. Considerando que Chile es un país de alta sismicidad, el implementar tecnologías de protección sísmica en los racks de almacenamiento industrial es una opción pertinente. Kilar et al [33], evaluó la viabilidad económica de implementar un sistema de aislamiento sísmico elastómero en racks de almacenamiento industrial altos. Como resultados obtuvieron que el aislamiento sísmico de base que estudiaron no es económicamente factible para intensidades sísmicas bajas, mientras que para intensidades que van de moderadas a altas si pudiera ser de mucha ayuda en términos monetarios. El aislamiento sísmico se basa en el desacoplamiento de la frecuencia fundamental de la estructura y las frecuencias predominantes del movimiento sísmico. Al reducir la frecuencia fundamental, la estructura se mueve a una zona de menor demanda en el espectro de respuesta sísmica [34]. Al aumentar el período fundamental de la estructura a por lo menos 2 s [35, 36], la estructura se desplaza a una zona de menor demanda de los espectros de respuesta sísmica comunes. De esta manera, el aislamiento sísmico reduce las aceleraciones laterales del piso y las derivas del piso, sin embargo, se produce una gran demanda de desplazamiento en la interfaz de aislamiento [37, 38]. Por lo general, esta tecnología protege la estructura de la acción del terremoto horizontal, pero no de la componente vertical, debido a la alta rigidez axial de los aisladores. Sin embargo, los estudios han demostrado que la componente horizontal de los terremotos produce una mayor destrucción en edificios esbeltos que la componente vertical. Por esta razón el aislamiento sísmico es tan eficaz para reducir el daño a estructuras frente a cargas sísmicas [39].

Actualmente en la industria existen alternativas comerciales de aislamiento de base para sistemas de almacenamientos industriales. Sin embargo, en términos generales este tipo de aislamiento está diseñado para proporcionar aislamiento de la base en la dirección transversal al pasillo de una estantería, mientras que proporciona restricciones similares a las placas de base atornilladas convencionales en la dirección longitudinal al pasillo [40]. El sistema estudiado en esta investigación es capaz de proporcionar aislamiento tanto en la dirección longitudinal como en la transversal al pasillo del sistema de almacenamiento industrial. Además, su mecanismo permite ajustar su diseño a múltiples requerimientos de periodo de aislamiento y razón de amortiguamiento, lo que lo hace un dispositivo muy versátil. El sistema de aislamiento estudiado es de tipo rodadura y, entre otras cosas, busca resolver el problema del aislador elastomérico tradicional relacionado con la baja resistencia a la tracción y la inestabilidad lateral cuando se somete a una carga axial alta [42]. Esta investigación tiene como objetivo evaluar la eficiencia de la implementación del dispositivo de aislamiento propuesto, en la reducción de la demanda sísmica sobre un rack de almacenamiento industrial de tipo

selectivo, sometido a carga dinámica en mesa vibradora en cada dirección horizontal por separado. Para lo anterior se comparó la respuesta dinámica de la estructura con aislamiento basal tipo rodadura y sin aislamiento, con diferentes cargas almacenadas. En esta investigación se analizó la reducción en la respuesta dinámica debido a la implementación del sistema de aislamiento, por lo que ambos sistemas, con y sin aislamiento basal, fueron sometidos a una misma excitación. Las respuestas de interés consideradas fueron la deriva de techo máxima y corte basal máximo de ambos casos. Los resultados mostraron una significativa reducción de ambas respuestas objetivo, para todos los casos de carga y dirección de forzante sísmico considerados.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Sistema de aislamiento estudiado

El sistema de aislamiento de base estudiado en esta investigación es un dispositivo auto-centrante de tipo rodadura y proporciona aislamiento en todas las direcciones horizontales. El dispositivo está conformado por una rótula de bola en su apoyo basal, la que se conecta a cuerpo cilíndrico central que alberga a un elemento elástico o resorte en su interior, dicho cuerpo en su cúspide esta unido a un cabezal semiesférico sobre el cual rueda la superestructura conectada al resorte por medio de un cable inextensible (Figura 1). Verticalmente, el dispositivo es muy rígido, y su rigidez lateral está controlada por la tensión de un elemento elástico interno postensado, conjuntamente con el efecto del peso de la estructura. Este último depende de la relación entre su altura H y radio de curvatura R de su superficie semiesférica. Cuando $H/R=1$, el peso de la estructura no aporta rigidez lateral al sistema de aislamiento. Cuando $H/R<1$, el peso ayuda a estabilizar al sistema de aislamiento, proporcionándole rigidez lateral positiva. Si $H/R>1$, el peso desestabiliza al sistema de aislamiento, condición que es no deseada. La carga de tracción en el elemento elástico al interior del dispositivo de aislamiento es transmitida a la superestructura por un cable flexuralmente flexible y axialmente rígido. Éste une al aislador con la superestructura y le permite resistir niveles de tensión moderados en comparación con la carga de compresión estática. Además, el diseño único de este dispositivo de aislamiento previene los efectos de inestabilidad o reducción de la rigidez lateral en aquellos casos donde la carga axial aplicada es significativamente alta [1].

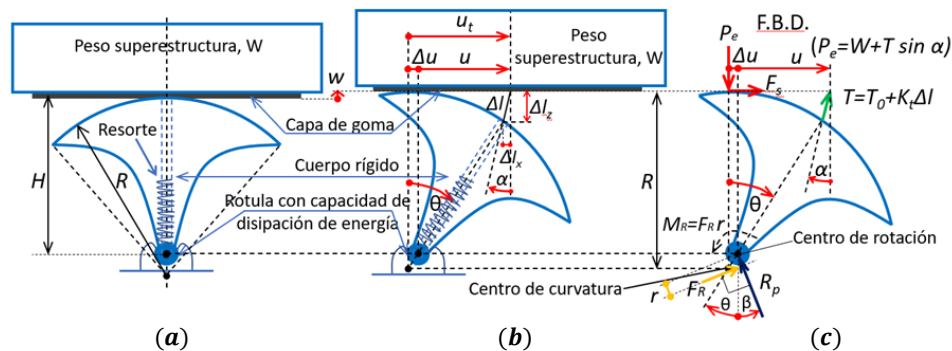


Figura 1: Dispositivo de aislamiento propuesto. (a) Dispositivo en su condición de reposo. (b) Dispositivo en su condición deformada. (c) Diagrama de cuerpo libre del dispositivo en su condición deformada. **Fuente:** Adaptado de Maureira et al (2020)

La rótula de bola de la base del dispositivo es soportada por una carcasa fija al suelo, o a la mesa vibradora en este caso, siendo el diámetro de dicha rótula $d=60\text{mm}$. La disipación de energía de este sistema de aislamiento ocurre en dicha rótula de bola por el roce generado por la rotación del

dispositivo a consecuencia del movimiento lateral de la superestructura. Dicha capacidad de disipación de energía es proporcional al diámetro de la rótula de bola, d , en la base y al coeficiente de roce, μ , entre las superficies en contacto en ésta. La superficie del cabezal superior del dispositivo de aislamiento es semiesférica convexa, y su radio de curvatura, R , puede ser constante o variable. Si el radio de curvatura es constante e igual a su altura ($R=H$), entonces la carga vertical transmitido por la superestructura al aislador, P_e , no interactúa con la rigidez lateral del dispositivo. Si el radio de curvatura es constante y mayor que la altura del aislador ($R>H$), la excentricidad Δu de la carga P_e se aleja del punto de pivote en la base en sentido contrario al movimiento impuesto. Esto hace que la carga vertical P_e contribuya al centrado del aislador, afectando su rigidez lateral [1]. El aislador utilizado en los ensayos tiene radio de curvatura $R=400\text{mm}$. El dispositivo presenta un mecanismo que permite variar su altura, dado que el cuerpo cilíndrico posee una disposición helicoidal de perforaciones para su apernado con separación de 8 mm en dirección del eje axial del cuerpo cilíndrico. Esto permite apernar el cuerpo del aislador a su cabezal semiesférico en 10 posiciones distanciadas 8 mm entre sí, pudiendo obtener alturas entre 328mm y 400mm. Para la realización de los ensayos la altura del dispositivo es constante, siendo $H=360\text{mm}$. Por lo anterior, la carga vertical P_e sí contribuye al centrado del aislador, afectando positivamente la rigidez lateral de éste. En la Figura 2 se presenta el dispositivo utilizado en la realización de los ensayos.



Figura 2. Dispositivo de aislamiento utilizado para los ensayos.

En el interior del cuerpo cilíndrico del aislador, existe un elemento elástico o resorte conectado a un cable que sale del aislador por un orificio ubicado en el centro del cascarón semiesférico y se conecta en la base de la superestructura que protege. Este elemento elástico trabaja con carga de pre-tensión que le otorga al sistema de aislamiento la característica de ser estable lateralmente, además de proporcionar resistencia al levantamiento. Al cambiar la altura del aislador es posible modificar la rigidez lateral del dispositivo, la que se complementa con la rigidez proporcionada por el resorte pre-tensado en su interior. Por ser un mecanismo robusto con partes rígidas, el dispositivo es estable incluso frente a elevadas cargas de compresión, lo que constituye un atributo distintivo de esta tecnología.

En la investigación de Maureira-Carsalade et al. [1], se realiza un exhaustivo análisis del equilibrio del aislador en condición deformada, el cual involucra todas las fuerzas mostradas en el diagrama de cuerpo libre de la (c). Dicho análisis conduce a la ecuación (1) que gobierna el comportamiento del aislador.

$$F_s(u, \dot{u}) = \frac{H}{H+w} (\cos \alpha \sin \theta - \sin \alpha \cos \theta) T(u) + \frac{1}{H+w} \Delta u P_e + \frac{1}{H+w} \mu R_p r \text{sign } \dot{u} \quad (1)$$

El primer término de la ecuación (1) corresponde a la respuesta elástica o fuerza conservativa relacionada con la rigidez del resorte. El segundo término corresponde a la fuerza restauradora debido

al peso propio, presente sólo cuando $H < R$. El tercer término es la respuesta inelástica o no conservativa que produce la disipación de energía por roce.

Una propiedad importante a considerar en la implementación de un sistema de aislamiento, es el periodo de aislamiento, T_a , que proporciona el dispositivo a la estructura. En sistemas de aislamiento con componente elástica de rigidez no constante, como es el caso, el período de aislamiento y la rigidez elástica no son únicos. Esta última depende de la amplitud de vibración en dicho sistema, por lo que Maureira-Carsalade et al [1], definen la rigidez tangente inicial como aquella calculado para una amplitud de vibración de pequeños desplazamientos. Con base en lo anterior, se define el período de aislamiento de pequeños desplazamientos, dado por la ecuación (2).

$$T_a = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k_b^{(0)}}} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{n_a \left(\frac{1}{\frac{2T_0}{3H} + \left(\frac{R-H}{H^2}\right) \left(\frac{Mg}{n_a} + T_0\right)}\right)}} \quad (2)$$

Donde:

M : es la masa total sobre el nivel de aislamiento.

n_a : es el número de aisladores que conforma el sistema de aislamiento.

T_0 : es la tensión de pretensado del resorte dentro del aislador en condición de reposo

R, H : son el radio de curvatura del cabezal y altura del aislador respectivamente.

En concreto este dispositivo no proporciona a la estructura un único valor de periodo de aislamiento, ya que en términos generales depende de la rigidez lateral del sistema la cual varía con el desplazamiento lateral. Con el objetivo de obtener un valor inicial conservador se ha simplificado la expresión y solo se ha considerado la carga inicial de post tensado del resorte, la cual es posible de controlar y que en este caso tiene un valor $T_0=2.060$ N, para todos los ensayos realizados. En esta investigación se realizaron ensayos considerando 2 y 3 niveles cargados con 1 tonelada por nivel. La razón de esta configuración de carga para el sistema de base aislada, así como la relación con la configuración de carga del sistema de base fija y la analogía que existe entre ambas configuraciones se detalla en la sección “Ensayos en mesa vibradora” de este mismo informe. Los periodos de aislamiento calculados con base en la ecuación (2) para los dos distintos casos de carga analizados en esta investigación, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Periodo de aislación de aislamiento para cada caso de carga ensayado.

Niveles con carga	Masa total [kg]	Periodo de aislación [s]
2	2444.39	1.96
3	3502.39	2.21

Para conformar el nivel de aislamiento se instalaron 4 aisladores, bajo una plataforma rígida que permite el accionamiento simultáneo de estos. En la Figura 3 se puede apreciar la configuración del nivel de aislamiento y la disposición de cada uno de los aisladores. Para los ensayos realizados $L=2,80$ m, $B=0,85$ m y $H=0,4$ m es la altura del aislador. La plataforma permite el pretensado de los resortes dentro de los aisladores, aplicando carga a los cables que pasan desde los aisladores y atraviesan hasta la cara superior de la plataforma, donde son fijados. Sobre esta plataforma se instalaron los racks ensayados en mesa vibradora apertando las columnas de éstos sobre las posiciones de cada uno de los aisladores.

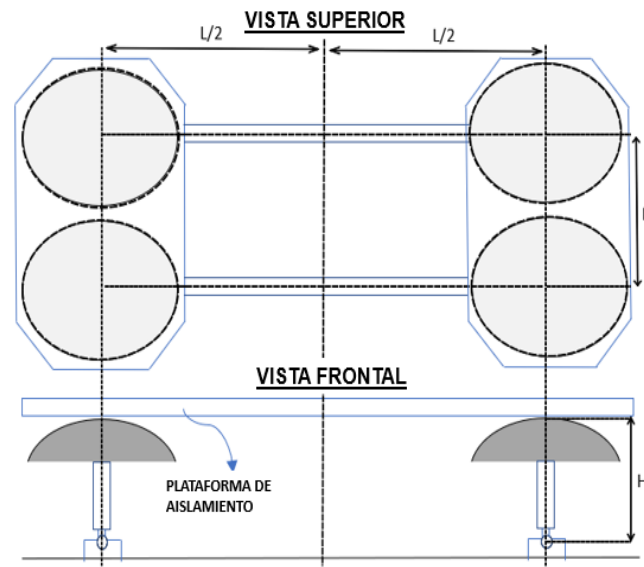


Figura 3: Configuración y disposiciones de los aisladores en la plataforma de aislamiento. Fuente: Coñuemán et al (2022).

2.2. Forzante sísmico

Para las pruebas sísmicas realizadas en los distintos ensayos se consideró un forzante sísmico basado en una de las componentes horizontales de mayor demanda del registro de la estación de San Pedro del terremoto ocurrido el 27 de febrero del 2010 en Chile. Dicho evento sísmico tuvo una duración aproximada de 3 minutos y una magnitud 8,8 en la escala Mw, y ha sido uno de los mayores eventos sísmicos del país en toda su historia instrumentada. El registro indicado fue escalado en el dominio de la frecuencia de forma que su espectro de respuesta se ajustara al espectro de diseño de la NCh3703 con los parámetros presentados en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros sísmicos considerados en la elaboración del sismo de diseño

PARAMETROS SISMICOS	
Categoría del edificio	III
Zona sísmica	3
Tipos de suelo	III
Factor reducción de la respuesta	1
Razón de amortiguamiento	0,05

Los ensayos fueron ejecutados en la mesa vibradora ubicada en el laboratorio San José obrero de la facultad de ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, construida en el marco del proyecto Fondef ID19I10081, dirigido por el Dr. Nelson Maurerira. La mesa vibradora diseñada y construida por docentes y alumnos es capaz de reproducir con muy buena precisión la señal de entrada. Esto debido a que es accionada por un servomotor controlado por PLC mediante computadora, teniendo la capacidad de ser muy preciso en posición. Esto es posible de apreciar en la Figura 4, donde se exhibe el espectro de diseño de la NCh3703, el espectro de respuesta elástico del

registro sísmico del terremoto del 27 de febrero, el ajuste de dicho registro sísmico al espectro de la norma antes ya mencionada, y el espectro de respuesta elástico de la señal de salida registrada por el encoder del motor servo. En la Figura 4, es posible apreciar como el espectro de respuesta elástico del registro obtenido a partir de la lectura del encoder del motor servo (E.R.E Señal de salida), se asemeja bastante al espectro de respuesta elástico del registro sísmico ajustado a la norma (E.R.E. Ajustado a la NCh3703). A su vez, es también posible observar como la respuesta elástica del registro sísmico se ajusta fielmente al espectro de diseño establecido por la norma NCh3703. También se observa el espectro de respuesta elástico del evento sísmico original utilizado para los ensayos (E.R.E. Original).

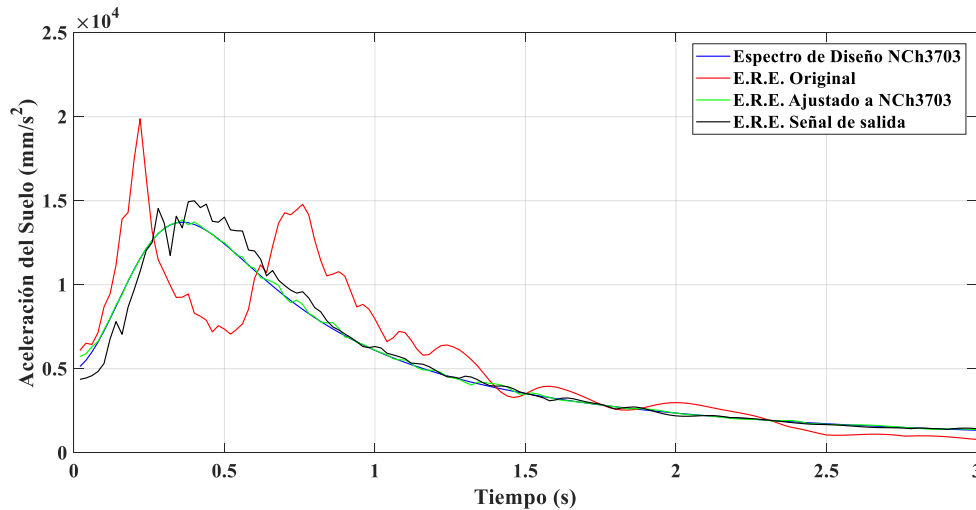


Figura 4: Espectro de respuesta elástico de los distintos registros.

2.3. Arquetipo de rack ensayado

En este estudio se evaluó la respuesta dinámica de un rack de almacenamiento industrial de tipo selectivo de un solo vano y de tres niveles de almacenamiento, incluido el nivel sobre la base. El material utilizado para los elementos estructurales que conforman el rack es acero al carbono A36, según la norma ASTM. Para las columnas se usaron perfiles TX100x105X3 arriostrados entre sí en las caras cortas con perfiles CA45x25x2. Las vigas son de sección cerrada y están compuestas por dos perfiles C100x50x2 de alas rigidizadas con uniones soldadas. En su dirección longitudinal al pasillo el rack tiene una longitud $L_r=280\text{cm}$, y en el sentido perpendicular al pasillo, es decir la dirección más corta, tiene un ancho $A_r=85\text{cm}$, ambos medidos entre ejes de las columnas. La estructura tiene una altura total $H_r=300\text{cm}$, medida desde la base hasta el extremo más alto de las columnas. La altura desde la base del rack al primer nivel viga es de, $h_1=135\text{ cm}$, el segundo nivel con respecto al primer nivel tiene una altura de, $h_2=140\text{ cm}$. En la Figura 5 se presenta esquemáticamente el sistema de almacenamiento utilizado para los ensayos.

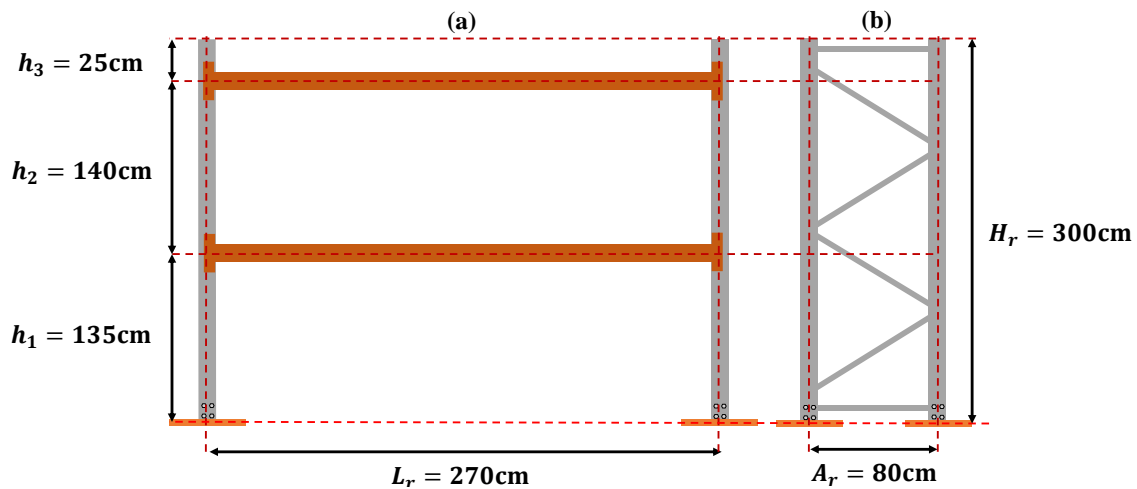


Figura 5: Geometría del sistema de almacenamiento industrial. (a) Vista esquemática del rack ensayado en su dirección longitudinal al pasillo. (b) Vista esquemática del rack ensayado en su dirección transversal al pasillo.

2.4. Montaje de racks en mesa vibradora

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar el montaje de los ensayos.

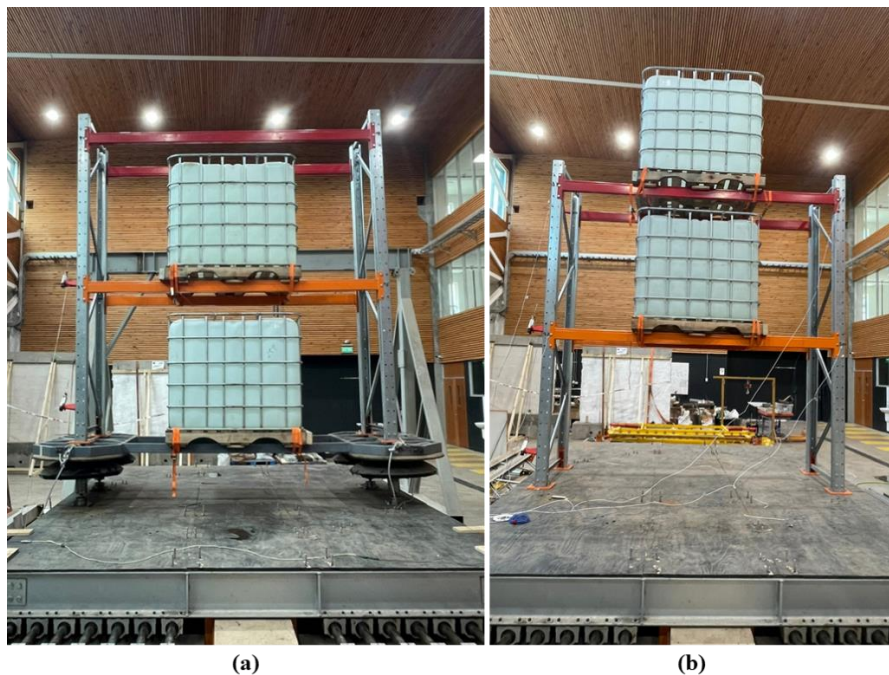


Figura 6: Montaje experimental de los ensayos (a) Ensayo rack de base aislada en su dirección transversal. (b) Ensayo rack de base fija en su dirección transversal.

Para la realización de los ensayos de racks en su configuración de base fija o empotrada, se fijan las placas base de las patas de sujeción de columnas sobre la mesa vibradora. Estas placas se apertan a



las alas superiores de la estructura de la mesa vibradora mediante los orificios dispuestos en ambas partes unidas. Para la configuración de rack con sistema de aislamiento basal se repitió el mismo procedimiento anterior, pero las placa fijación de las placas bases se llevan a cabo sobre la superficie de la plataforma del nivel de aislamiento. En el caso de racks con aislamiento basal, son las placas base de sujeción de las rótulas de bola de los aisladores las que fueron apernadas a las vigas de la estructura de la mesa vibradora. Al finalizar con la fijación de las placas bases de los racks, se montan las columnas ensamblándolas en las patas de sujeción soldadas a las placas base. Luego de instalar las columnas con sus correspondientes riostras en la dirección corta, se montan las vigas que conformaran el primer nivel del rack, y luego se realiza el montaje del segundo par de vigas para la conformación del segundo nivel. Hasta el momento de la colocación del último par de vigas, todo el apriete de las conexiones se realizó de manera manual. Sólo una vez montados todos los elementos estructurales se procedió al apriete definitivo de todos los pernos, pero esta vez con herramientas de torque controlado.

2.5. Campaña experimental

Se realizaron ensayos dinámicos en mesa vibradora a racks con y sin aislamiento sísmico, en dirección longitudinal y transversal. Los ensayos se repitieron para 1 nivel de carga y 2 niveles de carga sobre la estructura del rack en el caso fijo en la base. En los casos con aislamiento se consideró masa sobre el nivel de aislamiento más masa sobre el primer nivel del rack, además del caso con masa sobre el nivel de aislamiento y sobre los dos niveles de la estructura del rack. El forzante dinámico considerado se construyó con base en la componente horizontal con mayor PGA del registro sísmico del terremoto del Maule del 27 de febrero de 2010, medido en la estación de San Pedro de la Paz. El registro anterior fue escalado en el dominio de la frecuencia para hacer coincidir su espectro de respuesta elástico calculado, con el espectro de diseño definido por la NCh3703, en suelo tipo 3, zona sísmica 3, factor de importancia de la estructura $I=1$ y factor de reducción de respuesta $R=1$. Este fue programado en la mesa vibradora, calibrando la señal de entrada con un factor variable en el dominio de la frecuencia para asegurar que el espectro de respuesta elástico calculado con la lectura de aceleración medida en la mesa vibradora, coincida con el espectro de diseño antes mencionado.

Ensayos en mesa vibradora

Para cada ensayo, sin importar la masa instalada en los niveles de carga del rack o si este tiene o no el sistema de aislamiento, se aplicó un factor de escala constante al movimiento sísmico mencionado anteriormente, comenzando con un factor de escala $f_a=0,1$, es decir el 10% del terremoto de diseño. Luego, este factor se aumentó de 0,1 en 0,1 hasta llegar al 100% del terremoto de diseño o hasta que se registrara una condición con riesgo de colapso y peligro para los investigadores que ejecutan el ensayo. En casos riesgosos como el antes mencionado, el factor se aumentó de 0,05 en 0,05, llegando hasta cierto factor de escala del terremoto diseño que se consideró seguro para los operarios e investigadores. Luego de superar el 50% del movimiento sísmico de diseño, y cada vez que se aumentó el factor de escala del forzante dinámico, se realizó una inspección visual de la estructura, específicamente de las conexiones para detectar riesgo de colapso.

Los ensayos se realizaron aplicando movimiento de base programado en la mesa vibradora, actuando en cada una de sus dos direcciones ortogonales por separado. Se cargó un nivel del rack a la vez, agregando en cada nivel una masa de aproximadamente 1.058 kg. La carga se instaló de manera ascendente, de forma que la configuración con sólo el primer nivel de carga fue la primera ensayada para todos los casos. El segundo nivel se cargó y ensayó luego de finalizar todas las pruebas correspondientes al rack con sólo su primer nivel con carga. La primera serie de ensayos se llevó a cabo con los racks de almacenamiento industrial de tipo selectivo en su configuración de base fija.

Al finalizar con todas las combinaciones posibles para este tipo de ensayo, se procedió a analizar la estructura implementando el nivel de aislamiento. Antes de realizar los ensayos con aislamiento basal, y en general antes de realizar una nueva secuencia de ensayos, se cambiaron las vigas con conexiones dañadas si las hubiera y se revisó el apriete de los pernos con torque controlado.

En la configuración con base aislada se realizaron ensayos con dos y tres niveles de carga, estos ensayos son análogos a los ensayos con uno y dos niveles de carga para la configuración de base fija. Esto se debe a que el nivel de aislamiento permite agregar un nivel de carga que interactúa con la estructura y el sistema de aislamiento. El nuevo nivel de carga introducido en el nivel de aislamiento es semejante a cargar la base del rack en su configuración de base fija, pero en dicha configuración la carga no interactúa con la estructura por lo que se ha eliminado del análisis en esa condición. La situación descrita se esquematiza en la Figura 7.

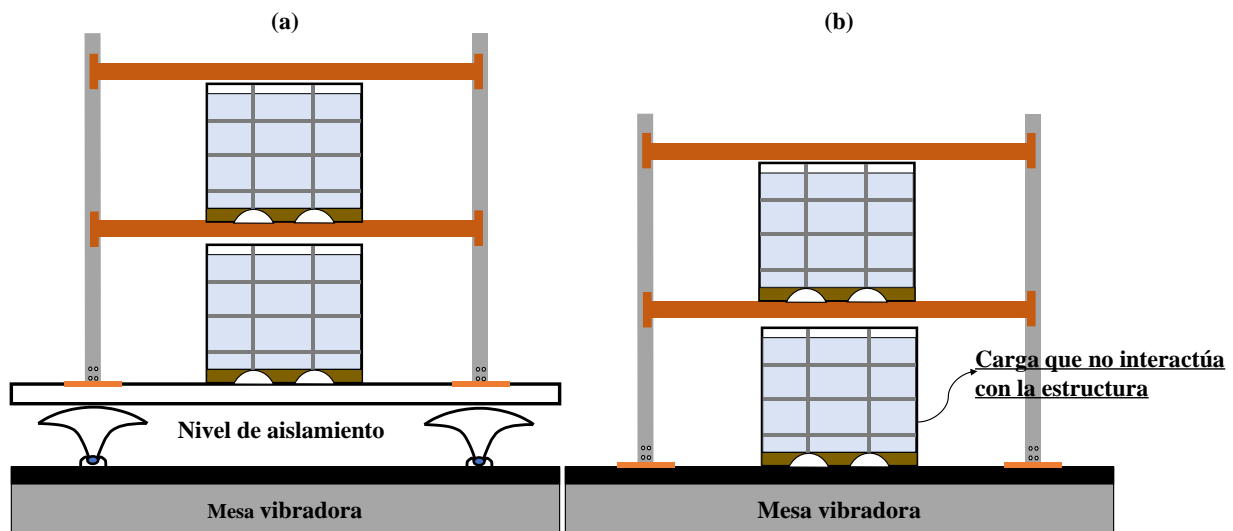


Figura 7: Esquema de dos sistemas análogos. (a) Rack con aislamiento basal con dos niveles de carga. (b) Rack sin sistema de aislamiento basal con un nivel de carga.

Instrumentación

Para analizar si efectivamente existe una reducción en la respuesta dinámica del rack en cuanto a deriva de techo, al incorporar aislamiento basal, se utilizaron transductores de desplazamiento lineal variable (LVDT). Estos dispositivos son capaces de medir deformación por voltaje inducido en el instrumento asociado a su accionamiento. La caracterización del movimiento de la estructura bajo los efectos de la señal excitadora se llevó a cabo con sensores de la marca Accuiacy, con recorrido de 70mm. Dependiendo de la dirección de análisis se usaron distintos esquemas de disposición de los LVDTs, pero en todos ellos se buscó medir el desplazamiento relativo del nivel 1 con respecto a punto muy cercano a la base, y el desplazamiento relativo del nivel 2 con respecto al nivel 1.

Con el fin de verificar la existencia de la reducción en la respuesta dinámica en términos de corte basal máximo del rack, debido a la implementación de un sistema de aislamiento, se han dispuesto de 4 acelerómetros marca PCB, modelo TLD333B50 (acelerómetros A) y 4 acelerómetros de la marca PCB, modelo 352C33 (Acelerómetros B). Estos acelerómetros registrarán las aceleraciones absolutas de cada nivel del rack en la dirección de aplicación del movimiento de base en mesa vibradora. Las especificaciones técnicas más importantes de los acelerómetros tipos A y B se encuentran resumidas

en la Tabla 3. Por temas de disponibilidad de los acelerómetros B no pudieron ser implementados durante los ensayos de rack de base fija en su dirección longitudinal.

Tabla 3. Especificaciones técnicas acelerómetros.

Especificaciones	Acelerómetro A	Acelerómetro B
Sensibilidad ($\pm 10\%$)	102 mV/(m/s ²)	10,2 mV/(m/s ²)
Rango de medición	± 49 m/s ² pk	± 490 m/s ² pk
Rango de frecuencias ($\pm 5\%$)	0,5 to 3000 Hz	0,5 to 10000 Hz
Frecuencia de resonancia	≥ 20 kHz	≥ 50 kHz
Límite de sobrecarga	± 39.000 m/s ² pk	± 49.000 m/s ² pk

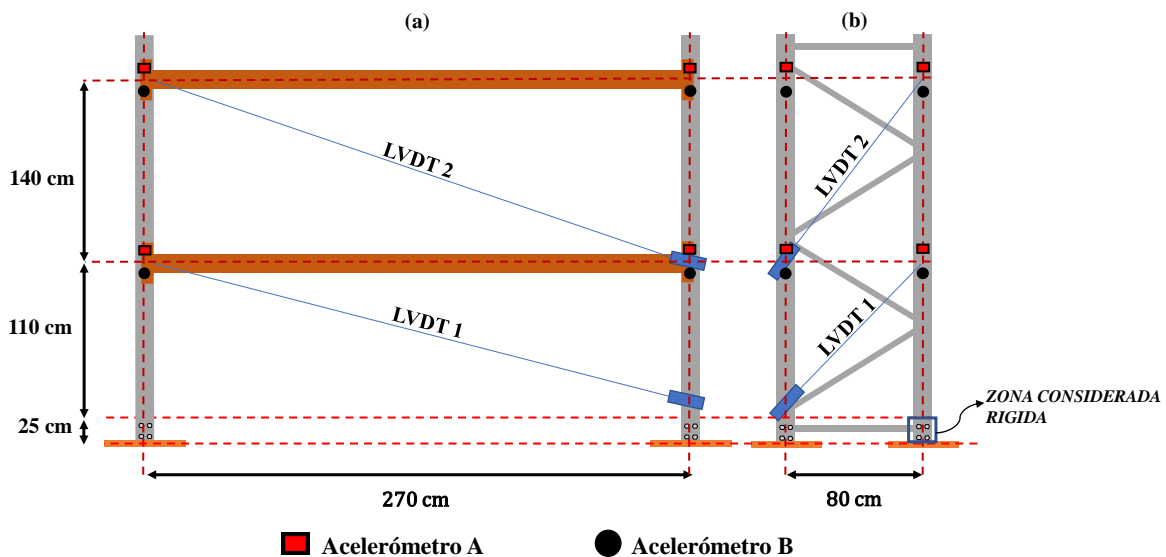


Figura 8: Esquema instrumentación LVDTs, según dirección de aplicación del forzante. (a) Ensayos en dirección longitudinal. (b) Ensayos en dirección transversal.

En la **Figura 8** se presentan los distintos esquemas de instrumentación utilizados para las distintas direcciones de análisis en los ensayos. Como es posible observar, hay una zona de la cual no se tiene información de deformación, indicada como “zona considerada rígida” en la **Figura 8**. Esto debido a la imposibilidad que hubo para montar los LVDTs de tal forma que registraran la deformación producida en ese lugar. Sin embargo, y debido a la alta rigidez de la zona a causa las placas de sujeción que rigidizan la base de la columna, las deformaciones concentradas en dicha zona se pueden considerar despreciables, más si se toma en cuenta la pequeña porción que abarca la zona considerada.

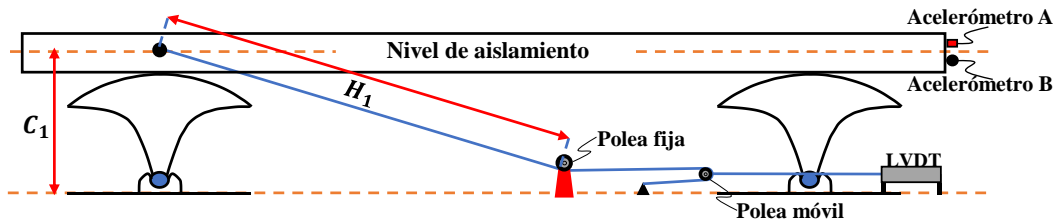


Figura 9: Esquema de instrumentación del sistema de aislamiento.

Para captar el desplazamiento del sistema de aislamiento, se colocaron dos sensores de desplazamiento de tipo LVDT en cada cara lateral del nivel del aislamiento. El movimiento relativo del nivel de aislamiento se registró con transductores de la marca Accuiacy, modelo KTR-300, con recorrido de 300mm, midiendo siempre en el sentido del movimiento de base aplicado. Dado el rango de medición de desplazamiento de los LVDTs fue necesario introducir un sistema de polea el cual redujera el desplazamiento medido en el LVDT, dicho sistema de poleas reduce el desplazamiento real a la mitad, por lo que el LVDT registra la mitad del desplazamiento del aislador. En la Figura 9 se ejemplifica la disposición del LVDT.

Además de lo implementado en la estructura, se instaló un acelerómetro tipo A y uno tipo B para medir y caracterizar el movimiento de la mesa vibradora. Para registrar el desplazamiento de la misma mesa se utilizó un sensor de desplazamiento del tipo LVDT de recorrido de 550mm (Figura 10). Adicionalmente, el servomotor que acciona la mesa vibradora posee un encoder interno que permite medir y grabar con precisión la posición y velocidad de movimiento. Este fue utilizado para corroborar las mediciones con instrumentación externamente adicionada.

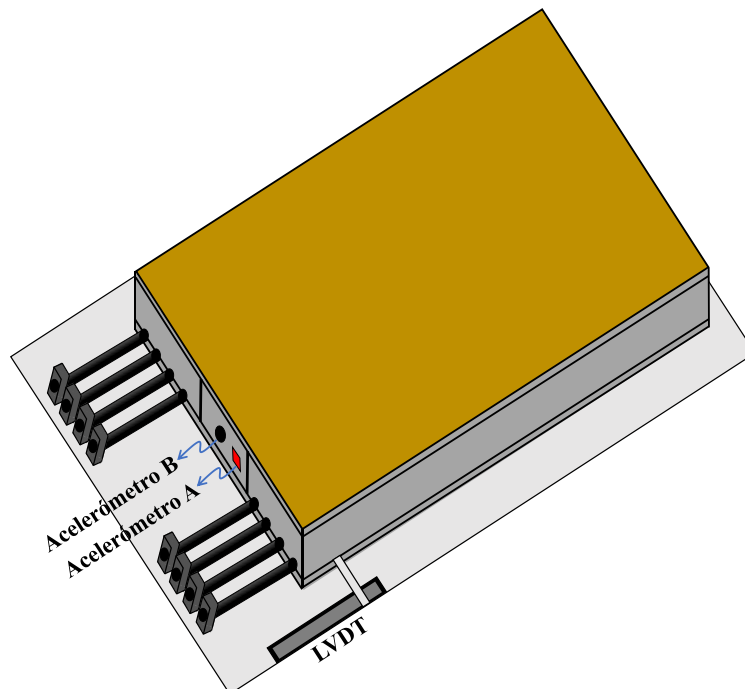


Figura 10: Esquema de instrumentación del movimiento y aceleración de la mesa vibradora.

2.6. Procesamiento de datos

Luego de obtener los datos mediante el sistema de adquisición de datos y el software LabVIEW, se procesaron dichos datos mediante un algoritmo programado en MATLAB, en el cual se les aplicó un filtro de frecuencias para eliminar el ruido ambiental de la señal medida. Posteriormente a los datos filtrados se le aplicaron sus correspondientes constantes de calibración para transformar los datos medidos en voltajes, a las unidades de medición física, siendo cm para desplazamientos y cm/s^2 para aceleraciones. Como resultados se tendrán la aceleración y desplazamiento de la mesa vibradora, las aceleraciones absolutas de piso y las derivas de piso del rack, para los casos con y sin sistema de aislamiento basal. A partir de lo anterior se concluyó respecto a la efectividad de la nueva tecnología estudiada para reducir dichas respuestas en el rack.

Deriva de techo y desplazamiento nivel de aislamiento

La cinemática permite describir el movimiento de los objetos y también posibilita relacionar el movimiento de los grados de libertad locales con el de los grados de libertad globales. En este caso se relacionó el desplazamiento medido a través de los LVDTs con el desplazamiento experimentado por la estructura durante los ensayos. El desplazamiento medido por el LVDT se puede relacionar cinemáticamente con el desplazamiento lateral relativo al piso anterior de la estructura, dicha situación se esquematiza en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** En dicha figura se puede observar como el desplazamiento sufrido por el LVDT en la dirección diagonal, se puede proyectar a la dirección lateral de la estructura. Al LVDT 1 se le puede asociar el desplazamiento lateral relativo desde un punto cercano de la base hasta el nivel 1, y al LVDT 2 por su parte se le puede relacionar con el desplazamiento relativo del nivel 2 con respecto al nivel 1. Análogamente para los ensayos en dirección transversal los desplazamientos registrados por los LVDTs se pueden proyectar de la misma forma al grado de libertad lateral de la estructura.

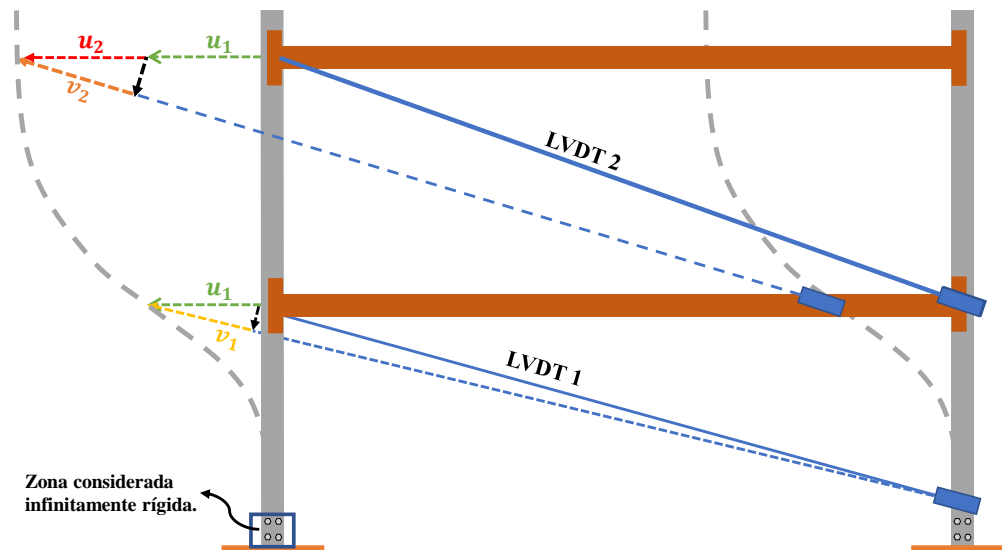


Figura 11: Relación del desplazamiento capturado por los LVDTs, y el desplazamiento lateral de la estructura, ensayo longitudinal.

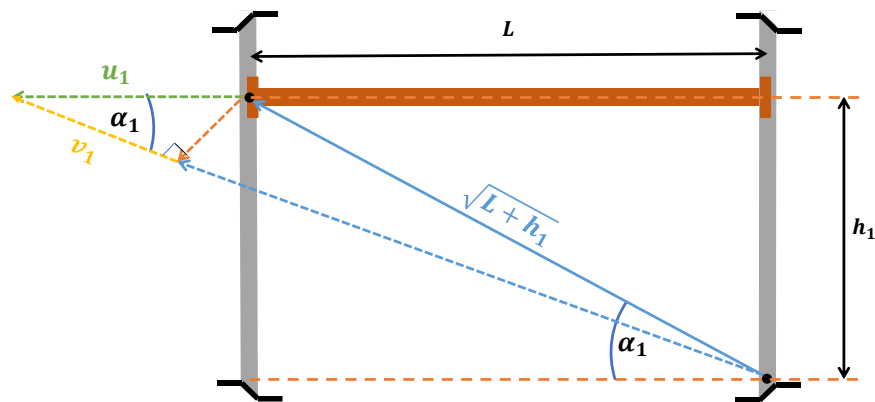


Figura 12: Relación geométrica entre el grado de libertad del LVDT 1 (v_1), y el grado de libertad lateral del primer nivel de la estructura (u_1), para los ensayos longitudinales.

Bajo la hipótesis de desplazamiento pequeños es posible obtener expresiones que permiten relacionar los grados de libertad locales de los LVDT con los de la estructura. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede ver como geoméricamente es posible corresponder el grado de libertad, v_1 , del LVDT 1 con el grado de libertad, u_1 , de la estructura. Por consiguiente, este mismo procedimiento se puede repetir para el grado de libertad local del LVDT 2.

Para todos los ensayos, la expresión que relaciona el grado de libertad local del LVDT con el grado de libertad lateral de la estructura se presenta a continuación (3):

$$u_i = \frac{\sqrt{L_i^2 + h_i^2}}{L} v_i \quad (3)$$

Donde:

i : índice asociado al nivel de la estructura analizado

u_i : desplazamiento lateral estructura (cm)

h_i : altura entre el punto inicial y final de la diagonal del LVDT (cm)

v_i : desplazamiento del grado de libertad del LVDT (cm)

L_i : separación entre el punto inicial y final de la diagonal del LVDT (cm)

La ecuación (3) permite generalizar la proyección de los grados de libertad para un sistema de almacenamiento industrial de n pisos con el mismo esquema de instrumentación presentado en este estudio. Luego de proyectar los grados de libertad locales a los grados de libertad laterales de la estructura, es posible obtener la deriva de techo de la estructura, la cual queda dada por la expresión (4):

$$Drift = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{\sum_{i=1}^n h_i} 100 \quad [\%] \quad (4)$$

Para obtener el desplazamiento de los aisladores se sigue un procedimiento similar al anterior. Esto debido a que los LVDTs dispuestos no miden de forma directa el desplazamiento del nivel de aislamiento (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), pero a través de relaciones cinemáticas es posible obtener el desplazamiento de interés. En la Figura 13 se puede observar cómo

geoméricamente se puede relacionar el desplazamiento medido a través del LVDT con el desplazamiento del nivel de aislamiento.

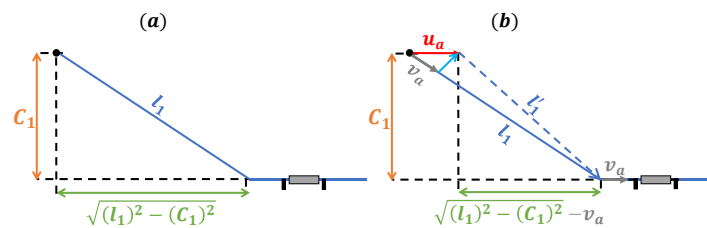


Figura 13: Cinemática del aislador. (a) Condición en reposo. (b) Condición deformada

La expresión que relaciona el grado de libertad local del LVDT con el grado de libertad lateral del nivel de aislamiento se presenta a continuación (5):

$$u_a = \sqrt{(l_1 + v_a)^2 - c_1^2} - \sqrt{l_1^2 - c_1^2} \quad (5)$$

Donde:

u_a : desplazamiento del nivel de aislamiento (cm)

c_1 : altura entre el punto inicial y final de la diagonal (cm)

l_1 : longitud de la diagonal (cm)

v_a : desplazamiento medido por el LVDT (cm)

Corte basal normalizado

Por la segunda ley de Newton, se sabe que la fuerza neta sobre un sistema es igual a la masa por su aceleración. En una estructura, la fuerza inercial es directamente proporcional a la masa por la aceleración absoluta actuando sobre ella, correspondiente a la aceleración absoluta del suelo (\ddot{u}_g), más la aceleración relativa de la estructura respecto al suelo (\ddot{u}_i). La aceleración de suelo es la que experimenta la estructura cuando ésta se comporta como cuerpo rígido, mientras que la aceleración relativa son las aceleraciones que sufre, los pisos con masa de la estructura por su deformación relativa al suelo. La aceleración neta o absoluta del sistema (\ddot{u}_{abs}) se define como la suma de ambas aceleraciones, la absoluta del suelo y la de la estructura relativa al suelo ($\ddot{u}_g + \ddot{u}_i$). En la Figura 14 se esquematiza la situación para un sistema con dos grados de libertad, uno por cada nivel de carga.

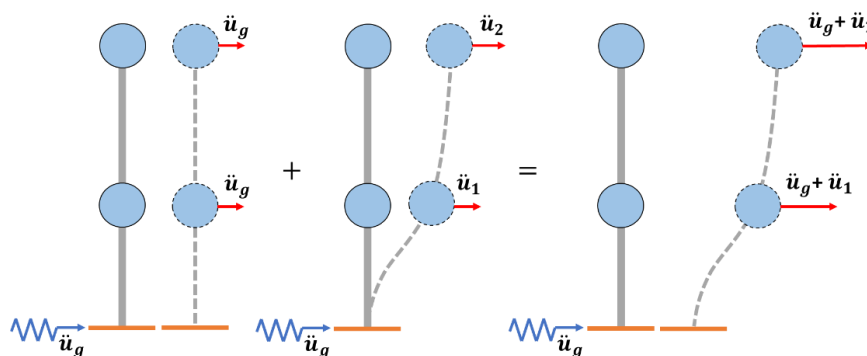


Figura 14. Esquema conceptual de la estructura con dos grados de libertad.

Los acelerómetros dispuestos en la estructura registran la aceleración neta o absoluta del punto en el que son instalados. Con la información de las aceleraciones de cada nivel más su correspondiente masa concentrada, es posible calcular la fuerza de corte en cada nivel de carga (ecuación 6). La suma de las fuerzas de corte de cada nivel es lo que se define como corte basal (Q_0), (ecuación 7). Al dividir dicho corte basal por el peso sísmico (P_s), se obtiene el corte basal normalizado (Q_N), (ecuación 8). Éste es independiente del peso de la estructura y permite comparar respuestas en racks con diferentes pesos. Para el caso del sistema estructural con aislamiento basal el cálculo del corte basal normalizado se hizo de forma similar. Pero, debido a que el nivel de aislamiento puede almacenar carga que interactúa con el sistema estructural, se agrega un grado de libertad referido a dicho nivel de aislamiento. Por lo anterior, el corte basal en el rack con aislamiento considera la suma de las fuerzas de corte por piso, calculadas como se indicó antes, en todos los niveles incluyendo el de aislamiento.

$$Q^i = M^i \times a^i \quad (6)$$

$$Q_0 = \sum_{i=1}^n Q^i \quad (7)$$

$$Q_0^N = \frac{Q_0}{P_s} \quad (8)$$

Donde:

i : índice asociado al nivel de la estructura analizado

M^i : masa tributaria asociada al nivel i

a^i : aceleración promedio asociada al nivel i

Q^i : fuerza cortante asociada al nivel i

Q_0 : corte basal

P_s : peso sísmico

Q_0^N : corte basal normalizado al peso sísmico

En cada nivel de la estructura se dispuso de dos acelerómetros del tipo A y del tipo B. La aceleración de cada nivel de la estructura se calculó como el promedio de las aceleraciones registradas por cada par de acelerómetros de cada tipo en cada piso. Al comparar la máxima aceleración promedio obtenida en cada nivel de la estructura por cada tipo de acelerómetro, se pudo apreciar que el acelerómetro del tipo A, al ser de menor rango de medición, se saturaba al ser sometido a aceleraciones mayores a su rango medible. Por lo anterior, los datos obtenidos por este tipo de acelerómetros no son del todo representativos de la estructura, ya que pueden llegar a subestimar las aceleraciones sufridas por ésta. Debido a que hubo un grupo de ensayos que sólo se realizó con este tipo de acelerómetros, surgió la necesidad de corregir o suavizar el corte basal máximo calculado con dichos acelerómetros. Para corregir dicha problemática se propone el uso de la expresión matemática dada por la ecuación (9) para calcular un índice asociado al corte basal máximo. En dicha ecuación, la fuerza de corte basal en cada instante de medición discreta se calculó con la ecuación (8), utilizando para ello las ecuaciones (7) y (6). La ecuación (9) introduce un factor “ α ”, de suavización de peaks de aceleración, que define el índice de aceleración máxima normalizada. Por la forma en que se define dicho índice, considera en su cálculo el corte basal durante toda la duración del forzante dinámico, desde el tiempo inicial t_i , hasta el tiempo final de éste, t_f , suavizando el resultado producto del uso de

la integral. Cuando el parámetro $\alpha \rightarrow \infty$, la influencia de los valores de corte basal más grandes se amplifica, obteniéndose que $I_{Q_0^N} \rightarrow \max_t |Q_0^N(t)|$.

$$I_{Q_0^N} = \frac{\int_{t_i}^{t_f} |Q_0^N(t)|^\alpha dt}{\int_{t_i}^{t_f} |Q_0^N(t)| dt} \quad (9)$$

Donde:

$I_{Q_0^N}$: Índice asociado a un valor promedio de los cortes máximos normalizados (adimensional)

Q_0^N : Corte basal normalizado al peso sísmico (adimensional)

α : parámetro que permite suavizar la respuesta máxima.

La ecuación (9) es sensible al parámetro α , por lo que se ha hecho un análisis de sensibilidad el cual se presenta en la Figura 15. Dicho análisis busca ajustar la respuesta del corte basal normalizado obtenida en los ensayos realizados con los acelerómetros tipo A.

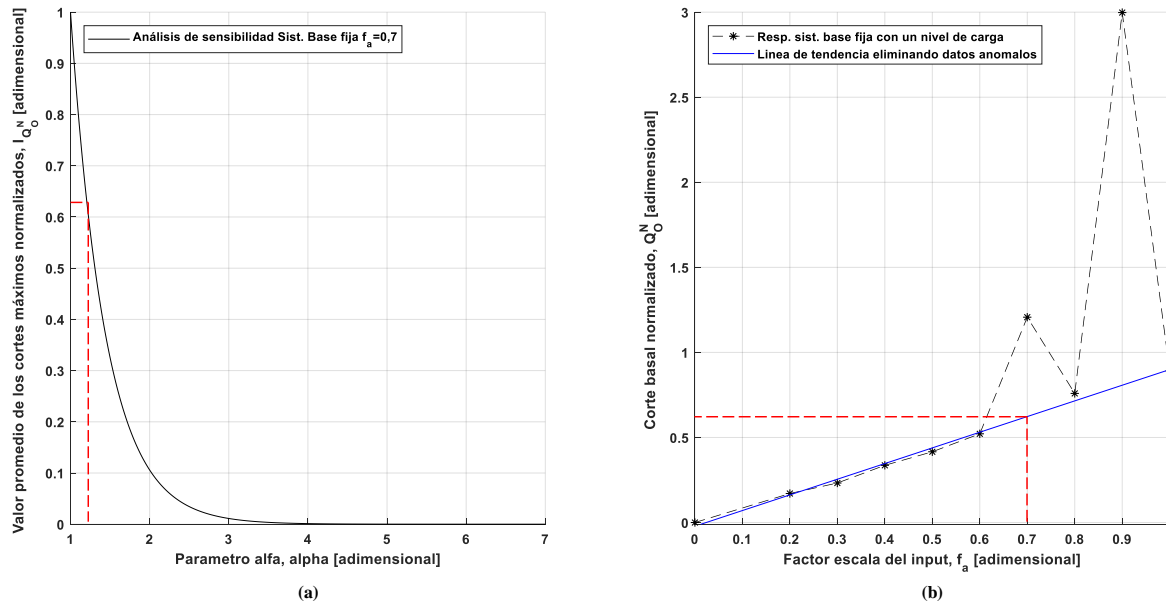


Figura 15. (a) Análisis de sensibilidad del parámetro α . (b) Resultados de corte basal del rack de base fija con un nivel de carga

En la Figura 15 (a) se muestra el análisis de sensibilidad del índice definido por la ecuación (9), respecto del parámetro α . Como se observa, la sensibilidad es alta particularmente para valores bajos de α . En la Figura 15 (b) se muestra la línea de tendencia de los resultados, eliminando los datos atípicos, esta tendencia permitió ajustar el valor de α para las situaciones que se estimaron pertinentes.

3. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIONES

3.1. Ensayos dirección transversal

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos llevados a cabo en la dirección transversal del rack y con distintas configuraciones de carga. Para el rack con sistema de base aislada los ensayos se detuvieron antes de alcanzar el 100% del registro sísmico considerado. Esto debido a medidas preventivas que se tomaron, por el potencial riesgo de volcamiento por levantamiento del rack en el nivel de aislamiento, aunque éste no era del todo claro. Para los ensayos de base fija esta situación fue algo más clara, por lo tanto, de igual forma que para el sistema con aislamiento de base se optó por dar por terminada la serie de ensayos antes de llegar al 100% del sismo considerado.

En las Figura 16 y Figura 17 se presentan los resultados de deriva máxima de techo, para rack de almacenamiento industrial con base fija y rack de almacenamiento industrial con sistema de aislamiento basal tipo rodadura. En las figuras es posible apreciar el desplazamiento promedio máximo del nivel de aislamiento.

En la Figura 16 se puede apreciar la máxima deriva de techo para cada uno de los factores de escalada del sismo que se han considerado en los ensayos de racks de base fija y aislada, con uno y dos niveles de carga respectivamente. El valor máximo de la deriva de techo alcanzada en la condición de base aislada para un $f_a = 0,80$, es de, $Drift = 0.037\%$, por su parte el rack en condición de base fija y con un nivel de carga, la deriva de techo máxima para un $f_a = 0,80$ logra alcanzar un valor de, $Drift = 0.54\%$. Sí dicho valor se compara con el obtenido para el rack de base aislada y dos niveles de carga, se logra evidenciar una reducción en la respuesta del rack, siendo la deriva de techo máxima del sistema con aislamiento basal alrededor de 15 veces menor que la deriva de techo máxima para el sistema sin aislamiento basal (base fija). El sistema de aislamiento en cambio para ese factor de escala presenta un desplazamiento promedio máximo del nivel de aislamiento $u_a = 9,05\text{cm}$.

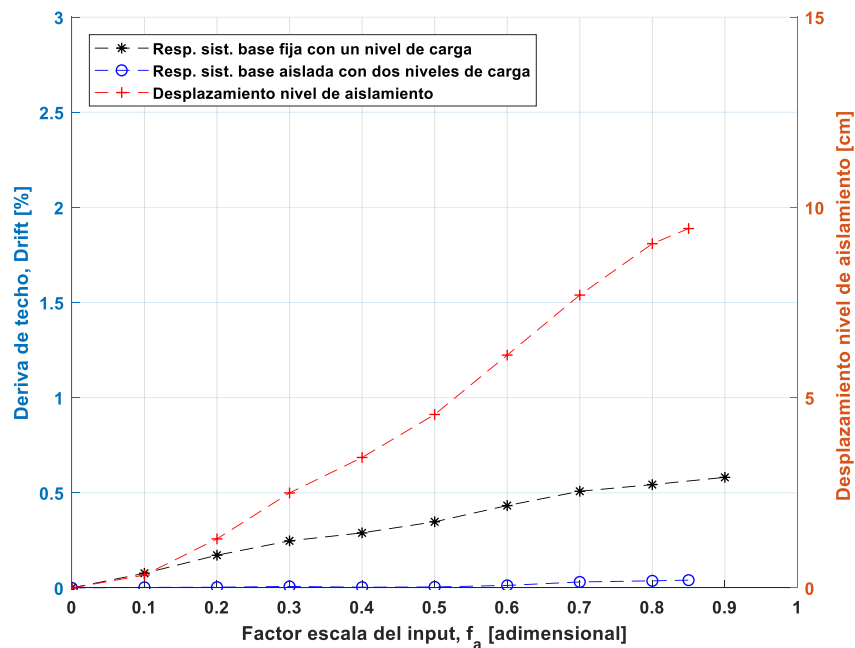


Figura 16: Máxima deriva de techo en dirección transversal para el sistema estructural de base fija con un nivel de carga y el sistema estructural de base aislada con dos niveles de carga.

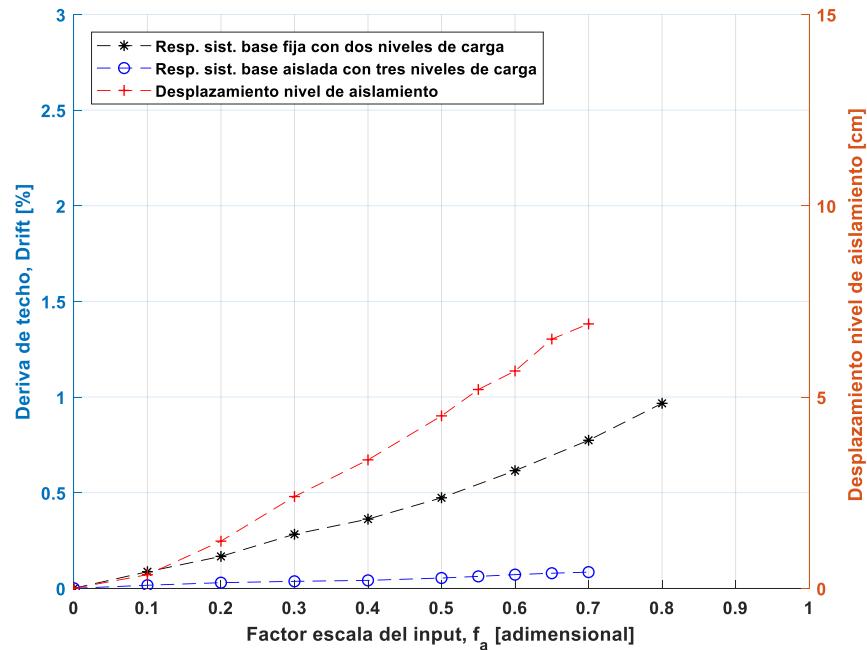


Figura 17: Máxima deriva de techo en dirección transversal para el sistema estructural de base fija con dos niveles de carga y el sistema estructural con base aislada análogo con tres niveles de carga.

Se presentan en la Figura 17 los resultados de la máxima deriva de techo que se obtuvieron para los distintos factores de escala considerados para rack de base fija con dos niveles de carga y rack con aislamiento basal con tres niveles de carga. Para un factor de escala del sismo de diseño de $f_a = 0,70$ el sistema sin aislamiento alcanzó una deriva de techo de $Drift = 0,77\%$, mientras tanto, el sistema con aislamiento basal para un factor de escala $f_a = 0,70$ alcanzó una deriva de techo de $Drift = 0,085\%$. El nivel de aislamiento registró un desplazamiento máximo $u_a = 6,91\text{cm}$.

Según los resultados expuestos en las Figura 16 y Figura 17 es posible afirmar que, sin importar la combinación de carga analizada, para todo factor de escala del sismo de diseño ensayado, la respuesta máxima obtenida en término de deriva de techo se ve reducida en la condición de base aislada en comparación con la condición de base fija. Además de lo anterior, se puede evidenciar como el desplazamiento asumido por el nivel de aislamiento crece a medida que se aumenta el factor de escala del sismo.

En las Figura 18 y Figura 19, se presentan los resultados del máximo corte basal normalizado registrado en cada uno de los sistemas de almacenamiento industrial evaluados.

Como es posible de apreciar en la Figura 18 para todos los factores de escala ensayados se evidencia una reducción en el corte basal normalizado del sistema aislado en relación al sistema sin aislamiento basal. El corte basal del sistema con aislamiento de base asciende hasta un valor de $Q_o^N = 0,35$ para un factor de escala del sismo de diseño de $f_a = 0,80$, dicho valor es superado para el sistema sin aislamiento de base dado un factor de escala de $f_a = 0,50$. Si se equipara la respuesta de ambos sistemas para un mismo factor de escala, en este caso $f_a = 0,80$, el sistema sin aislamiento presenta un corte basal normalizado de $Q_o^N = 0,58$, mientras que por su parte el sistema con aislamiento basal

presenta un corte basal normalizado de $Q_o^N = 0,20$, lo que evidencia una clara reducción en la respuesta.

La Figura 19 permite apreciar como para todo factor de escala la respuesta en cuanto a corte normalizado se ve reducida en los ensayos realizados con el sistema de base aislada. El máximo corte basal normalizado para el sistema sin aislamiento de base se registró para un factor de escala $f_a = 0,70$, y el corte basal normalizado alcanzado es de $Q_o^N = 0,96$, para dicho factor de escala del sismo de diseño, la respuesta registrada para el sistema con aislamiento basal es de $Q_o^N = 0,16$, lo que se traduce en un corte basal 6 veces menor al experimentado en su condición de base fija. Los resultados presentados en la Figura 18 y Figura 19, permiten ver una clara reducción de la respuesta en términos de corte basal para el sistema con aislamiento de base en relación con el sistema sin aislamiento de base (base fija). La reducción en la respuesta se produce en todos los factores de escala del sismo de diseño y en todas las combinaciones de carga ensayadas.

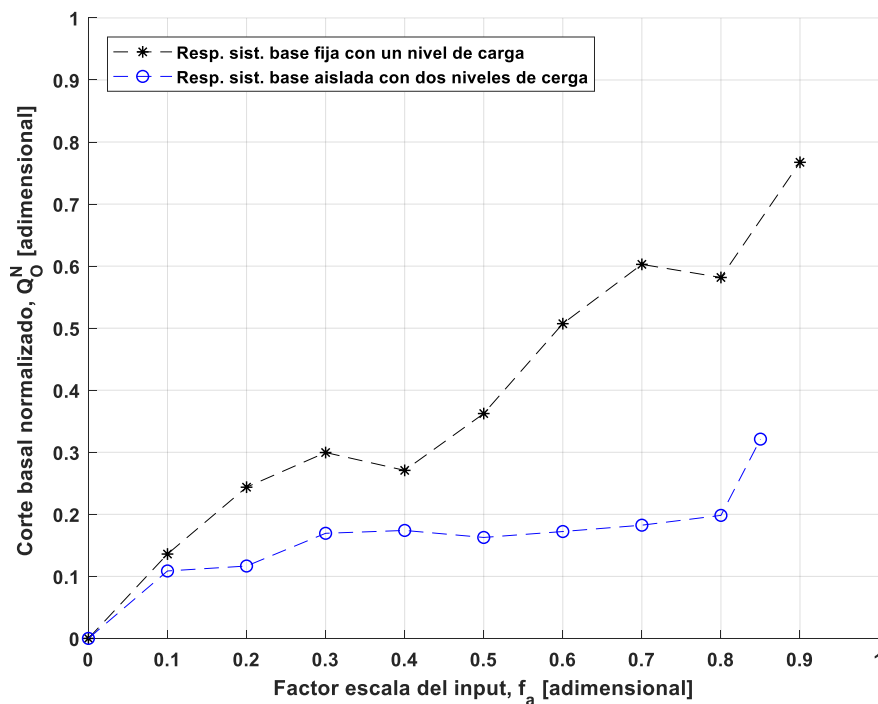


Figura 18: Máximo corte basal normalizado en dirección transversal para el sistema estructural de base fija con un nivel de carga y el sistema estructural de base aislada con dos niveles de carga.

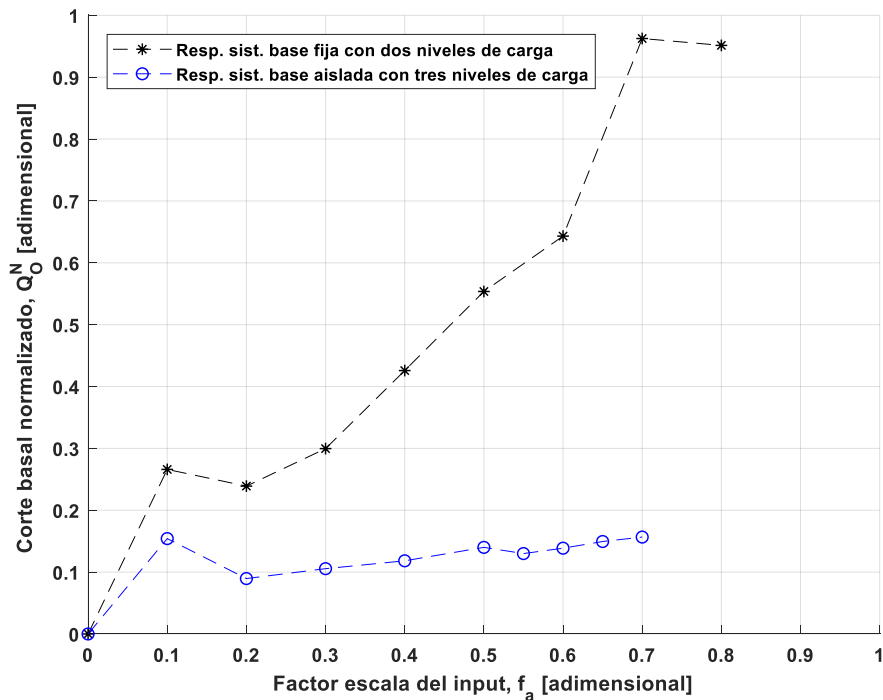


Figura 19: Máximo corte basal normalizado en dirección transversal para el sistema estructural de base fija con dos niveles de carga y el sistema estructural de base aislada con tres niveles de carga.

3.2. Ensayos dirección longitudinal

Los ensayos se llevaron a cabo en la dirección longitudinal del sistema de almacenamiento industrial y con distintas configuraciones de carga. La serie de ensayos concluyó al alcanzarse el cien por ciento del sismo de diseño. En los sistemas de almacenamiento industrial con base fija se presentaron indicios de daño en la viga para un factor de escala de, $f_a = 1.0$. Debido a la situación descrita anteriormente, para los ensayos posteriores dicha viga fue retirada en conjunto con su par del mismo nivel, y ambas reemplazadas.

En la Figura 20 y Figura 21, se presentan los resultados en términos de deriva máxima de techo, para los dos sistemas estructurales evaluados, rack fijo en la base y rack con aislamiento basal.

La Figura 20 permite apreciar como el sistema de aislamiento de base amplifica la respuesta de la estructura en términos de deriva máxima de techo para factores de escala menores e igual a 0,4 ($f_a \leq 0,40$). En cambio, para factores de escala posteriores a dicho valor se puede notar una reducción en la respuesta. Para un factor de escala de $f_a = 1,00$ se tiene que la deriva máxima de techo para el sistema sin de base fija es de $Drift = 0,57\%$, mientras que para el sistema de base aislada es de $Drift = 0,076\%$.

La Figura 21 presenta los resultados para los ensayos realizados en el sentido longitudinal del rack, sin y con sistema de aislamiento basal, con dos y tres niveles de carga respectivamente. Para todo factor de escala del sismo de considerado, se evidencia una reducción en la respuesta del rack con sistema de aislamiento basal, respecto del rack fijo en la base. Dado un factor de escala de $f_a = 1,00$ la máxima respuesta registrada en términos de deriva máxima de techo para el sistema estructural de

base fija es de $Drift = 2.73\%$. En cambio, para el sistema estructural con aislamiento de base se registra una deriva de techo máxima menor $Drift = 1.83\%$. El sistema de aislamiento presenta un desplazamiento $u_a = 11,92\text{cm}$.

Según los resultados expuestos en las Figura 20 y Figura 21 es posible afirmar que sin importar la combinación de carga analizada y que, para todo factor de escala mayor al $f_a > 0.4$, la respuesta máxima obtenida en término de deriva de techo se ve reducida en la condición de base aislada en relación con la condición de base fija. Además de lo anterior se puede apreciar como el rack en base aislada con solo un nivel de carga no sufre derivas de techo mayores a la establecido por la normativa, por su parte el rack en condición de base fija y con dos niveles de carga supera dicho valor normativo, el cual se establece como un 1,5% en la NCh3703. Para el rack con base fija y con dos niveles de carga dicho valor se ve superado con un factor de escala del sismo de $f_a = 0,50$. Este llega a su situación más crítica cuando se somete al 100% del sismo de diseño, en donde dicho valor límite se supera en un 81,8%. Esta situación también se observa en el rack con aislamiento basal y tres niveles de carga, en donde el valor normativo se supera en un 22,1% para el 100% del sismo.

En las Figura 22 y Figura 23 se presentan los resultados en términos de corte basal normalizado, para los dos sistemas evaluados; rack de almacenamiento industrial con base fija y rack de almacenamiento industrial con sistema de aislamiento basal tipo rodadura.

Los resultados presentados en la Figura 22 se puede ver como para todos los factores de escala del sismo de diseño, se registra una reducción en la respuesta para el rack de base aislada. Para un factor de escala de $f_a = 1,00$, se registró un corte basal normalizado máximo para el sistema de base fija de $Q_o^N = 0,89$, en cambio para el sistema con aislamiento de base se obtuvo un valor de $Q_o^N = 0,23$. Al comparar ambos casos en esta situación, la respuesta se ha visto reducida casi 4 veces en el rack de base aislada en comparación con el rack de base fija.

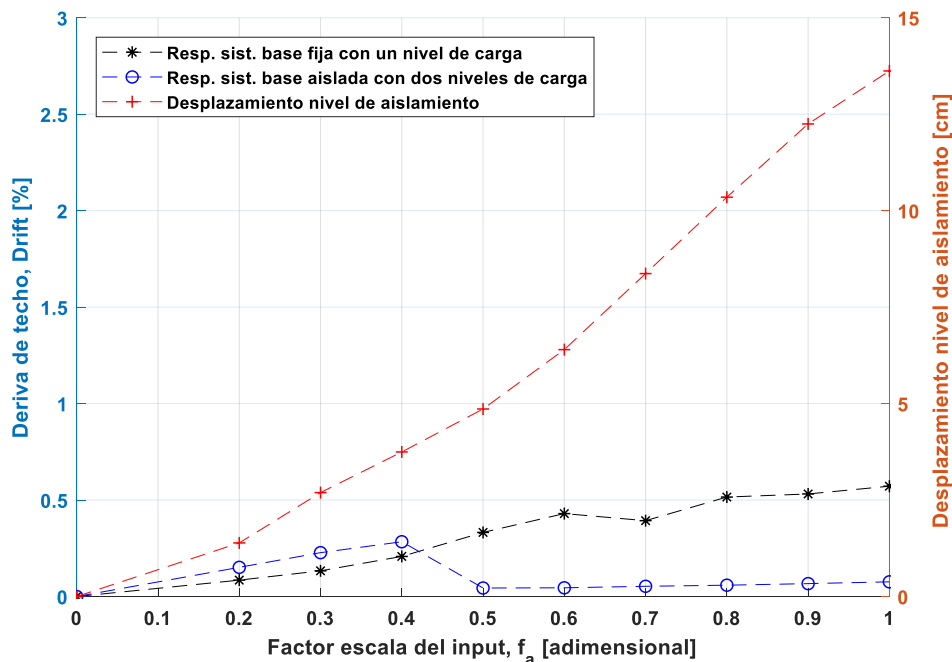


Figura 20: Máxima deriva de techo en dirección longitudinal para el sistema estructural de base fija con un nivel de carga y el sistema estructural de base aislada con dos niveles de carga.

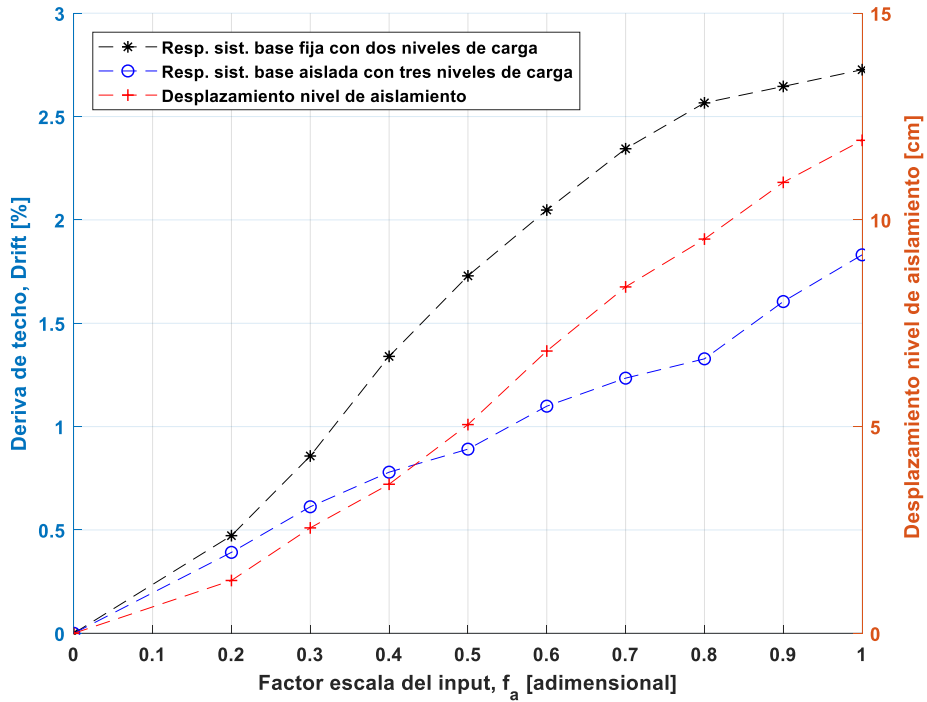


Figura 21: Máxima deriva de techo en dirección longitudinal para el sistema estructural de base fija con dos niveles de carga y el sistema estructural de base aislada con tres niveles de carga.

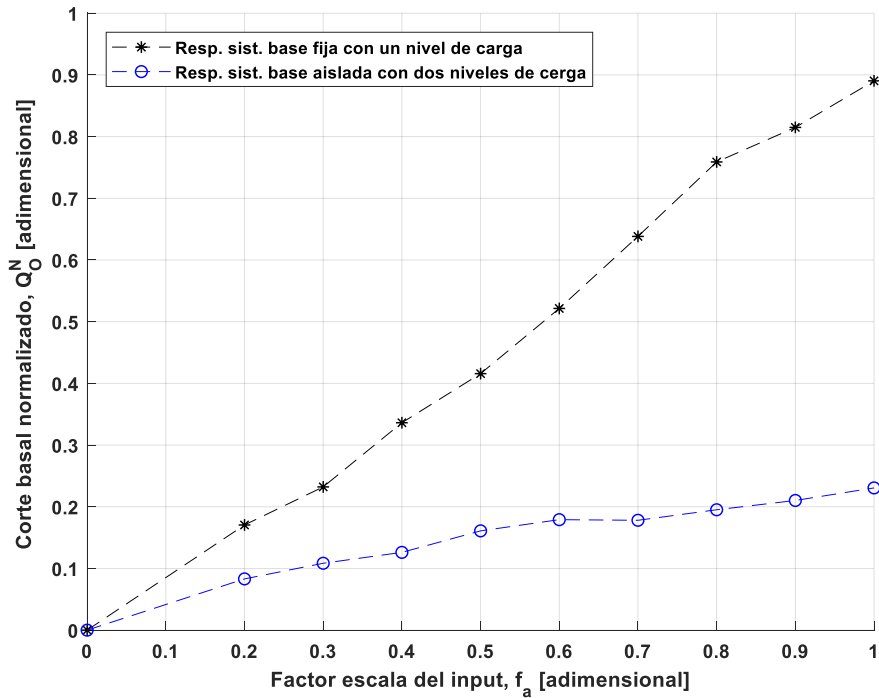


Figura 22: Máximo corte basal normalizado en dirección longitudinal para el sistema estructural de base fija con un nivel de carga y el sistema estructural de base aislada con dos niveles de carga.

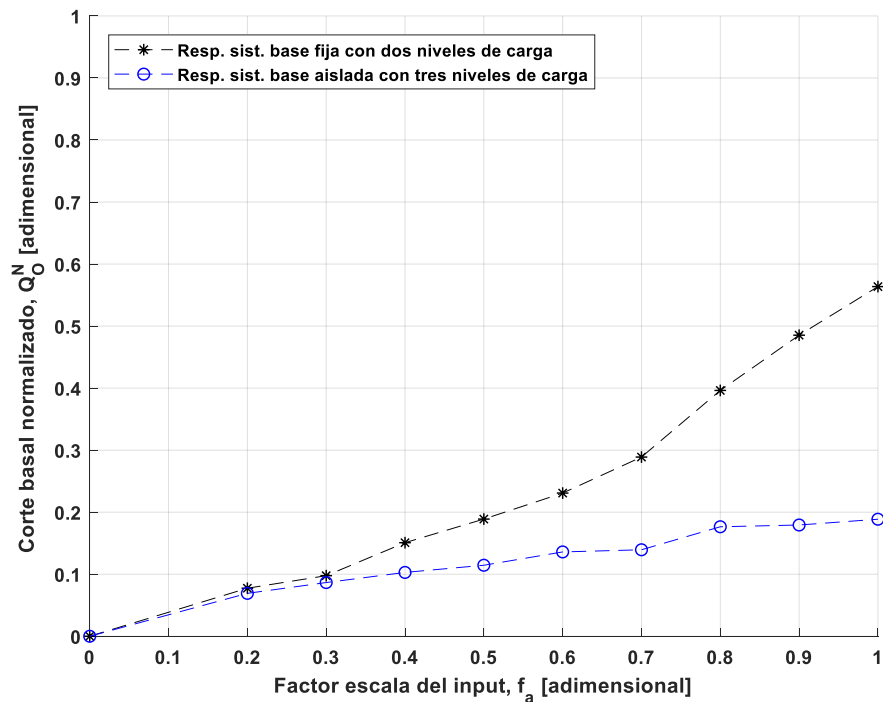


Figura 23: Máximo corte basal normalizado en dirección longitudinal para el sistema estructural de base fija con dos niveles de carga y el sistema estructural de base aislada con tres niveles de carga.

De los resultados presentados en la **Figura 23** se puede ver como para todos los factores de escala del sismo, se registra una reducción en la respuesta para el rack de base aislada. Para un factor de escala de $f_a = 1,00$, se registro un corte basal normalizado para el sistema de base fija de $Q_o^N = 0,56$, en cambio para el sistema con asilamiento de base se obtiene un valor de $Q_o^N = 0,19$. En esta situación la respuesta es aproximadamente 3 veces menor que la respuesta del rack de base fija.

Los resultados presentados en las Figura 22 y Figura 23, permiten ver una clara reducción de la respuesta en términos de corte basal para el rack con aislamiento de base en relación con el rack sin aislamiento de base (base fija). La reducción en la respuesta se produce para todos los factores de escala del sismo de diseño y en todas las combinaciones de carga ensayadas. Se evidencia un mayor beneficio en el aislamiento para la configuración de rack de base fija con un nivel de carga, en comparación con la configuración de rack de base fija con dos niveles de carga. Esto se puede atribuir a que el período fundamental de la estructura con un nivel de carga es menor que para dos niveles de carga. El rack de base fija al contar con dos niveles de carga tiene una mayor masa por lo que el período fundamental también es mayor lo que desplaza a la estructura a una zona de menor demanda, lo cual explica que el beneficio del sistema de aislamiento no sea tan considerable en comparación a la configuración con solo un nivel de carga.

4. CONCLUSIONES

En todos los casos analizados la deriva máxima de techo se ha visto reducida, excepto para los ensayos en dirección longitudinal con dos niveles de carga, y con un factor de escala menor e igual al 0.4. Sin embargo, la amplificación vista en estos ensayos no mostró ser significativa. En términos de seguridad

no logra ser tampoco un problema, ya que está muy por debajo del valor establecido normativamente del 1,5% de deriva máxima de piso.

En relación al corte basal, el rack con aislamiento basal redujo su respuesta en comparación con el rack de base fija. En la dirección transversal es donde el dispositivo ha demostrado ser más eficiente, reduciendo el corte basal normalizado hasta en un 83,73%, es decir, más de 5 veces por debajo de la respuesta del rack con base fija. En la dirección longitudinal la reducción relativa fue aproximadamente la mitad de la observada en la dirección transversal.

Al ver los resultados de la Tabla 1 se puede concluir que el efecto de la masa en el periodo de aislamiento no es preponderante. Esto se debe a que la rigidez lateral proporcionada por el sistema de aislamiento estudiado depende de dos factores: la carga de pre-tensado del elemento elástico en el interior del aislador, y la relación entre la altura y radio de curvatura de éste, H/R . En el sistema de aislamiento utilizado, la carga de pre-tensado fue relativamente baya y la relación H/R estuvo por debajo del valor 1. La rigidez lateral estuvo predominantemente controlada por la relación H/R , siendo ésta proporcional al peso de la estructura. Por lo tanto, al estar el período de aislamiento fuertemente controlado por la relación H/R , éste resultó ser poco sensible a la masa de la superestructura.

Una de las deficiencias del sistema de aislamiento estudiado, observada durante la campaña experimental, es el levantamiento de la superestructura en el nivel de aislamiento, con la consiguiente tendencia al volcamiento. Esto se observó particularmente para sismo aplicado en la dirección transversal o corta del rack. Lo anterior se debe a la gran esbeltez (altura del rack/ distancia entre aisladores) del rack en esta dirección, lo que induce mayores cargas de tracción en el nivel de aislamiento debido a las fuerzas inerciales laterales. Dichas cargas de tracción, al superar la carga de pre-tensado de los aisladores, generan levantamiento de la superestructura respecto del aislador. Pese a lo anterior, el comportamiento y eficiencia del sistema de aislamiento no se vio afectado, en la práctica su desempeño se ha visto limitado por tema de seguridad debido a riesgo de volcamiento. Como solución a esta problemática, se propone incrementar la carga de pre-tensado de los resortes al interior de los aisladores y acercar o igualar a 1 la relación H/R . De esta forma se puede mantener el mismo período de aislamiento, incrementando la resistencia del aislador al levantamiento, reduciendo así el riesgo de volcamiento.

En resumen, el sistema de aislamiento mostró ser efectivo en la reducción del corte basal y deriva de piso en ambas direcciones ortogonales del rack. Se concluye que la tecnología tiene potencial para ser implementada en la industria de racks con beneficios comprobados experimentalmente.

5. REFERENCIAS

- [1] Maureira-Carsalade, N., Pardo, E., Oyarzo-Vera, C., & Roco, A. (2020). A roller type base isolation device with tensile strength. *Engineering Structures*, 221, 111003.
- [2] Freitas, A. M., Souza, F. T., & Freitas, M. S. (2010). Analysis and behavior of steel storage drive-in racks. *Thin-Walled Structures*, 48(2), 110-117.
- [3] Sideris P, Filiatrault A, Leclerc M, Tremblay R. Experimental investigation on the seismic behavior of palletized merchandise in steel storage racks. *Earthquake Spectra* 2010; 26(1):209–33.
- [4] Alhan C, Gavin HP. Reliability of base isolation for the protection of critical equipment from earthquake hazards. *Eng Struct* 2005; 27(9):1435–49.

- [5] FEMA-460 Seismic Considerations for Steel Storage Racks Located in Areas Accessible to the Public; National Institute of Building Sciences: Washington, DC, USA, 2005.
- [6] Tagliafierro, B., Montuori, R., & Castellano, M. G. (2021). Shake table testing and numerical modelling of a steel pallet racking structure with a seismic isolation system. *Thin-Walled Structures*, 164, 107924.
- [8] Yin, L.; Tang, G.; Zhang, M.; Wang, B.; Feng, B. Monotonic and cyclic response of speed-lock connections with bolts in storage racks. *Eng. Struct.* 2016, 116, 40–55. [CrossRef]
- [9] Yin, L.; Tang, G.; Li, Z.; Zhang, M.; Feng, B. Responses of cold-formed steel storage racks with spine bracings using speed-lock connections with bolts I: Static elastic-plastic pushover analysis. *Thin-Walled Struct.* 2018, 125, 51–62. [CrossRef]
- [10] Nuñez, E.; Aguayo, C.; Herrera, R. Assessment of the Seismic Behavior of Selective Storage Racks Subjected to Chilean Earthquakes. *Metals* 2020, 10, 855. [CrossRef]
- [11]. Simoncelli, M., Tagliafierro, B., & Montuori, R. (2020). Recent development on the seismic devices for steel storage structures. *Thin-Walled Structures*, 155, 106827. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106827>
- [12] Kanyilmaz, A.; Brambilla, G.; Chiarelli, G.; Castiglioni, C. Assesment of the behavior of braced steel storage racking systems by means of full-scale push over tests. *Thin-Walled Struct.* 2016, 17, 138– 155. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.06.004>
- [13] Maguire, J. R., Teh, L. H., Clifton, G. C., Tang, Z. H., & Lim, J. B. (2020). Cross-aisle seismic performance of selective storage racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 168, 105999. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105999>
- [14] Kilar, V., Petrovčič, S., Koren, D., & Šilih, S. (2011). Seismic analysis of an asymmetric fixed base and base-isolated high-rack steel structure. *Engineering Structures*, 33(12), 3471-3482.
- [15] 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.
- [16] Coutinho, G.E.N.R. Numerical Simulation of the Seismic Behavior of Steel Storage Pallet Racking Systems; Instituto Superior Técnico: Lisbon, Portugal, 2008.
- [17] Bernuzzi, C.; Gabbianelli, G.; Gobetti, A.; Rosti, A.; Gabbianelli, G. Beam design for steel storage racks. *J. Constr. Steel Res.* 2016, 116, 156–172. [CrossRef]
- [18] Baldassino, N.; Zandonini, R. Design by testing of industrial racks. *Adv. Steel Constr.* 2011, 7, 27–47. [CrossRef]
- [19] Kwarteng, K.; Beale, R.; Godley, M.; Thomson, S. The Effects of Seismic Loading on Pallet Rack Semi-Rigid Joints. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology*, Dubrovnik, Croatia, 4–7 September 2012.
- [20] Gusella, Federico, Giovanni Lavacchini, and Maurizio Orlando. "Monotonic and cyclic tests on beam- column joints of industrial pallet racks." *Journal of Constructional Steel Research* 140 (2018): 92-107.
- [21] Bernuzzi, C., & Castiglioni, C. A. (2001). Experimental analysis on the cyclic behaviour of beam-to- column joints in steel storage pallet racks. *Thin-Walled Structures*, 39(10), 841-859.

- [22] Zhao, Xianzhong, Liusi Dai, and Kim JR Rasmussen. "Hysteretic behaviour of steel storage rack beam-to-upright boltless connections." *Journal of Constructional Steel Research* 144 (2018): 81-105.
- [23] Dai, Liusi, Xianzhong Zhao, and Kim JR Rasmussen. "Flexural behaviour of steel storage rack beam- to-upright bolted connections." *Thin-Walled Structures* 124 (2018): 202-217.
- [24] Dai, Liusi, Xianzhong Zhao, and Kim JR Rasmussen. "Cyclic performance of steel storage rack beam- to-upright bolted connections." *Journal of Constructional Steel Research* 148 (2018): 28-48.
- [25] Elghazouli, A. Y., Málaga-Chuquitaype, C., Castro, J. M., & Orton, A. H. (2009). Experimental monotonic and cyclic behaviour of blind-bolted angle connections. *Engineering Structures*, 31(11), 2540-2553.
- [26] Gabbianelli, Giammaria, Cavalieri Francesco, and Roberto Nascimbene. "Seismic vulnerability assessment of steel storage pallet racks." (2020): 18-40.
- [27] Yin, L., Tang, G., Li, Z., & Zhang, M. (2018). Responses of cold-formed steel storage racks with spine bracings using speed-lock connections with bolts II: Nonlinear dynamic response history analysis. *Thin-Walled Structures*, 125, 89-99.
- [28] Baldassino, N., and R. Zandonini. "Performance of base-plate connections of steel storage pallet racks." *Proceedings of Fifth International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures (CIMS2008)*, Gregory J. Hancock Symposium, Sydney, Australia. 2008.
- [29] Petrone, F., Higgins, P. S., Bissonnette, N. P., & Kanvinde, A. M. (2016). The cross-aisle seismic performance of storage rack base connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 122, 520-531.
- [30] Gilbert, B. P., & Rasmussen, K. J. (2011). Determination of the base plate stiffness and strength of steel storage racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(6), 1031-1041.
- [31] Huang, Zhaoqi, et al. "Determination of the flexural behavior of steel storage rack baseplate upright connections with eccentric anchor bolts." *Thin-Walled Structures* 160 (2021): 107375.
- [32]. Castiglioni, C. A., Panzeri, N., Brescianini, J., & Carydis, P. (2018). Shaking table tests on steel pallet racks. In *Stessa 2003* (pp. 775-781). Routledge.
- [33]. 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.
- [34] Gómez, D., Marulanda, J., & Thomson, P. (2008). *Control Systems for Dynamic Load Protection of Civil Structure*. Medellín: Universidad del Valle.
- [35]. Kelly, J. M. (1993). Earthquake-resistant design with rubber. 10.1007/978-1-4471-3359-9
- [36] Warn, G. P., & Ryan, K. L. (2012). A review of seismic isolation for buildings: historical development and research needs. *Buildings*, 2(3), 300-325.
- [37] Fasil, N. K., & Pillai, P. S. (2018). The State Of The Art On Seismic Isolation Of Shear Wall Structure Using Elastomeric Isolators. *International Research Journal Of Engineering And Technology (IRJET)*, 5(4), 1349-1351.
- [38] Jain, M., & Sanghai, S. (2017). A review: on base isolation system. *IJSART*, 3(3), 326-330.
- [39] Clemente, P., & Martelli, A. (2019). Seismically isolated buildings in Italy: State-of-the-art review and applications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 471-487.



UCSC

Universidad Católica de la Santísima Concepción

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil

[40] Filiatrault, A., Higgins, P. S., Wanitkorkul, A., Courtwright, J. A., & Michael, R. (2008). Experimental seismic response of base isolated pallet-type steel storage racks. *Earthquake spectra*, 24(3), 617-639.

[41]. Kelly, J. M. (1986). Aseismic base isolation: review and bibliography. *Soil Dynamics and earthquake engineering*, 5(4), 202-216. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(86\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0267-7261(86)90006-0)

[42] Maureira, N. Solicitud de patente de invención N° PCI/IB2018/059935, Instituto Nacional de Propiedad Intelectual 2018 – INAPI, Chile.