

EFFECTIVIDAD DE UN SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN ESTANTERÍA INDUSTRIAL SELECTIVA SOMETIDA A ACCIÓN DINÁMICA EN MESA VIBRADORA

H. Coñueman Hidalgo¹, N. Maureira Carsalade², E. Núñez-Castellanos³

RESUMEN

En este documento se exponen los resultados de ensayos experimentales que busca evaluar la efectividad de un sistema de aislamiento basal de tipo rodadura patentado por la UCSC, en la protección de racks de almacenamiento industrial de tipo selectivo. Para este propósito se llevaron a cabo ensayos dinámicos en mesa vibradora, ubicada en el laboratorio de la facultad de ingeniería de la UCSC, diseñada y construida para tales efectos. El equipo tiene un recorrido de 600mm, capacidad de carga vertical de 12 Ton, y empuje dinámico de 8 Ton, pudiendo generar movimiento de forma unidireccional.

Se analizaron racks con carga en 1, 2 y 3 niveles, tanto en condición fijo en su base como con aislamiento basal. Cada una de las estructuras antes mencionadas fue sometida a forzante dinámico de movimiento de base en la dirección longitudinal del rack y en su dirección transversal de forma separada. Se registró el movimiento de la base y desplazamientos laterales relativos de piso. Esto permitió calcular corte basal, derivas de piso y aceleraciones de piso en cada uno de los casos ensayados.

Los resultados mostraron que el sistema de aislamiento estudiado es capaz de reducir la respuesta del rack en términos de corte basal y deriva de piso. La tecnología estudiada resultó ser más efectiva para reducir la respuesta estructural cuando el movimiento de base es en dirección longitudinal al rack.

Palabras clave: Aislamiento basal, mesa vibradora, racks de almacenamiento, análisis experimental.

ABSTRACT

This document presents the results of experimental tests that seek to evaluate the effectiveness of a rolling-type basal insulation system patented by the UCSC, in the protection of selective-type industrial storage racks. For this purpose, dynamic tests were carried out on a vibrating table, located in the laboratory of the UCSC engineering faculty, designed and built for such purposes. The equipment has a 600mm travel, 12 Ton vertical jib capacity, and 8 Ton dynamic thrust, being able to generate unidirectional movement.

Racks with loads at 1, 2 and 3 levels were analyzed, both in a fixed condition at the base and with base isolation. Each of the aforementioned structures was subjected to dynamic forcing of base movement in the longitudinal direction of the rack and in its transverse direction separately. Base movement and relative lateral floor displacements were recorded. This allowed calculating basal shear, floor drifts and floor accelerations in each of the tested cases.

The results showed that the isolation system studied is capable of reducing the response of the rack in terms of basal shear and floor drift. The technology studied turned out to be more effective in reducing the structural response when the base movement is longitudinal to the rack.

Keywords: Base isolation, shaking table, storage racks, experimental analysis.

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

² Profesor Guía, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE nmaureira@ucsc.cl

³ Prof. Informante, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, enunez@ucsc.cl

INTRUDUCCION

Los sistemas de almacenamiento tipo rack se han vuelto un elemento fundamental en la industria, teniendo una fuerte demanda en los últimos años debido al crecimiento de la industria del retail. Esto ha generado un aumento en el interés por el desarrollo de sistemas de estanterías de almacenamiento de este tipo [1]. Las tipologías de racks comúnmente utilizadas en Chile son los racks de estantería selectiva, estantería compacta o drive-in, racks push-back y cantilevers [2]. Los racks de estantería selectiva son la solución de almacenaje más usada, ya que su concepción permite la rápida localización y el acceso directo e inmediato a cada tarima contenedora, de este modo se ahorra tiempo y esfuerzo en la manipulación de las mercancías [3].

Estos sistemas de almacenamiento principalmente se componen de perfiles de secciones de acero conformado en frío de paredes delgadas, con montantes de sección perforada para facilitar el montaje de vigas las cuales son generalmente cerradas de tipo cajón [4]. Es común que estas estructuras se arriostren sólo en su dirección transversal debido a la imposibilidad de ubicar arriostramiento en su dirección longitudinal sin reducir la capacidad de almacenamiento [5].

Si comparamos la estructura de un edificio con una estructura de almacenamiento veremos que en edificios las cargas de uso son comparables con el peso propio de la estructura. Esto no sucede en las estructuras de almacenamiento, donde el peso propio de la estructura es despreciable en comparación con el peso que soportara durante su uso. Es por lo anterior que la respuesta dinámica de estas estructuras está condicionada por el peso de productos almacenados durante la ocurrencia del sismo [6]. Además, se debe considerar que la geometría de este tipo de estantería hace que sean lateralmente poco resistentes, siendo más esbelta en una de sus direcciones. La carga que se aplica verticalmente sobre estos es elevada y sus alturas son considerables, por lo que son susceptibles de pandeo.

Chile es un país de alta sismicidad, producto de su ubicación en la zona de interacción entre la placa de nazca y la sudamericana, en el borde sur-este del cinturón de fuego del pacífico. En esta zona se producen frecuentemente movimientos sísmicos de diversa intensidad. Es por esto que las estructuras de almacenamiento o rack chilenos han sido sometidas a sismos con magnitud de momento superior a 7 en los últimos 15 años. Esto ha permitido verificar la falta de eficiencia de los diseños basados en la normativa nacional vigente, ya que se han registrado varios casos en que se producen fallas locales y en algunas situaciones el colapso total de las estructuras [2].

La normativa sísmica nacional al respecto no es específica para el diseño de racks, sino que se apoya de normas que regulan el diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, por ejemplo, la NCh2369 entre otros códigos [7], y recomendaciones extranjeras que no obedecen a la realidad sísmica del país [8,9,10,11]. Por ello la importancia del desarrollo de tecnologías que aseguren la seguridad de los productos que se almacenan evitando el desprendimiento de estos ante un evento sísmico, además de reducir el peligro para las personas.

Dado lo ya señalado, nace esta investigación que busca mediante el ensayo de racks de almacenamiento de tipo selectivo determinar experimentalmente el contraste entre racks sin aislación basal y con aislación basal mediante un sistema de aislamiento tipo rodadura, determinando su efectividad en la reducción de drift, corte basal y aceleración absoluta en la estantería. Se dispone de 1 rack de 3 niveles el cual serán ensayado con una carga constante en cada nivel, el sistema de aislamiento consiste en una plataforma compuesta de 4 dispositivos de aislamiento cinemático ideados por el profesor guía los cuales se describen más adelante [12].

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar experimentalmente la efectividad de la implementación de un sistema de aislamiento basal de tipo rodadura, en la reducción de la respuesta dinámica de racks de almacenamiento industrial de tipo selectivo, respecto de la misma estructura fija en la base, sometida a idéntica excitación. Lo anterior en términos de respuestas máximas de desplazamiento relativo entre pisos, corte basal y aceleración absoluta de piso.

Objetivos específicos

Montar e instrumental los racks a ser ensayados y realizar pruebas de marcha blanca.

Definir y ejecutar protocolos de ensayos experimentales a racks con base fija y base aislada, registrando información pertinente durante los ensayos.

Procesar datos experimentales, confeccionar tablas, gráficos realizar análisis de la información y extraer conclusiones.

MARCO TEÓRICO

En este trabajo se presenta la evaluación de un dispositivo de control de la respuesta sísmica más específicamente un sistema de protección pasivo de aislamiento basal que se presenta como una alternativa para diseñar nuevas estructuras o bien readecuar estructuras existentes.

Un sistema de aislación tiene como objetivo desacoplar la estructura horizontalmente del suelo de fundación para que el movimiento horizontal del suelo durante el sismo no se transmita a la estructura y que ella permanezca idealmente inmóvil en un marco de referencia inercial. Si bien un desacople perfecto entre suelo y estructura es impracticable con la tecnología actual [13], se busca en cualquier sistema de aislación concentrar en éste la deformación impuesta por el suelo, reduciendo la deformación en la superestructura. De esta forma, una estructura aislada adecuadamente tendrá un modo fundamental de vibrar tal que la superestructura permanezca esencialmente rígida y la deformación se concentra en el nivel de aislación como se aprecia en la Figura 1.

El sistema de aislamiento basal de tipo rodadura implementado en los ensayos fue propuesto y descrito por el profesor guía de este trabajo de tesis [12]. El dispositivo puede disipar energía por fricción debido al trabajo de la fuerza de roce en la rótula de bola de su apoyo basal. Un elemento elástico pre-tensado en su interior proporciona rigidez lateral y también resistencia al levantamiento. La rigidez lateral puede ser proporcionada de forma complementaria por el peso propio de la estructura.

Se evaluará la respuesta dinámica de racks de almacenamiento industrial sometidos a movimientos de base impuestos en mesa vibradora. El forzante corresponde a un tren de movimientos armónicos de amplitud y frecuencia variable por intervalos, cuyo espectro de respuesta se ajusta al espectro de diseño de la norma NCh2745. El movimiento comienza con baja frecuencia (1/4 hz) y amplitud grande, para terminar con alta frecuencia (1.7 hz) y amplitud pequeña. La mesa vibradora utilizada fue diseñada y construida en el marco del Proyecto FONDEF IDeA código ID19I10081, por lo que se encontraba en marcha blanca durante la realización de los ensayos, siendo esta la primera ocasión en que se utilizaba.

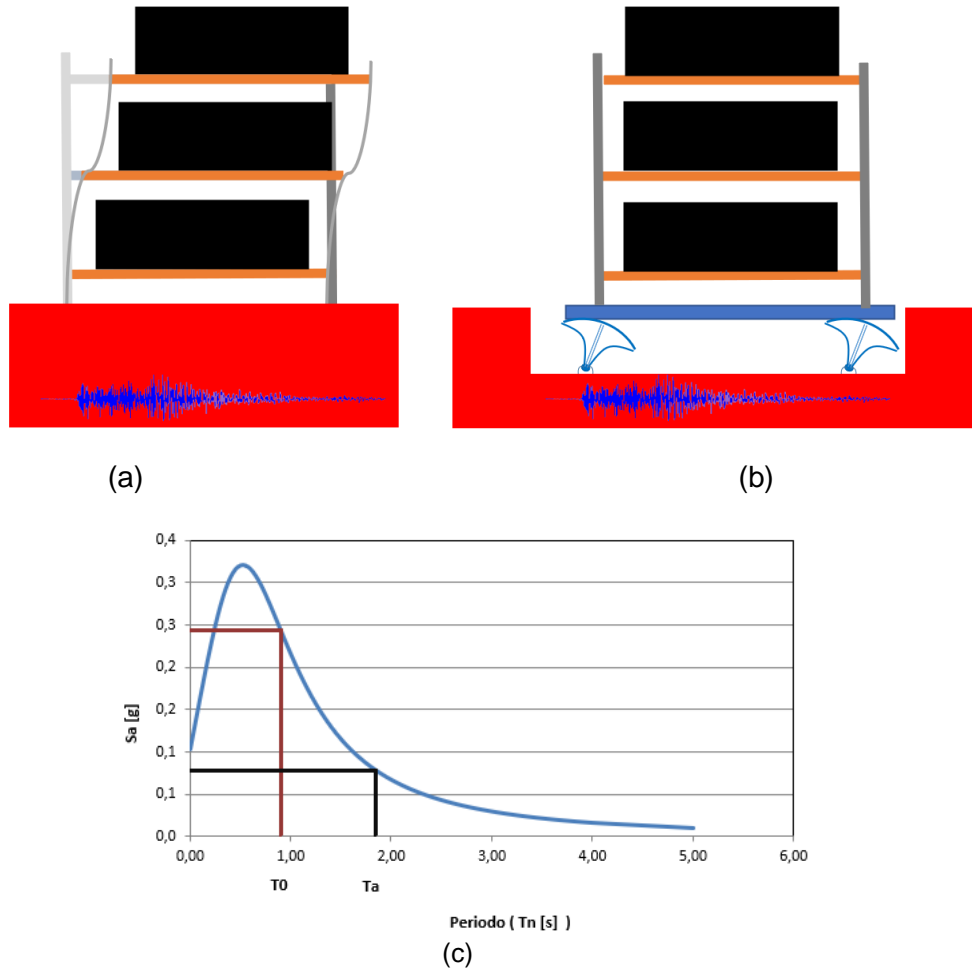


Figura 1: (a) Comportamiento esperado rack sin aislamiento basal con periodo T_0 , (b) Comportamiento esperado rack con aislamiento basal con periodo T_a , (c) Contraste al pasar de un periodo T_0 sin aislamiento a T_a , periodo de la estructura aislada. **Fuente:** Elaboración propia.

Con el aislamiento basal se busca lograr una conexión fundación-estructura flexible con la finalidad de reducir las aceleraciones en la estructura, llevándola a niveles por debajo de la aceleración del suelo (Figura 1 c). En este caso, el suelo corresponde a la mesa vibradora, por lo que los aisladores deberán ser capaces de desacoplar la estructura del movimiento de ésta, disipando además una parte de la energía impuesta por el movimiento basal. Esto reduciría los desplazamientos relativos en el rack con respecto a una estructura gemela sin aislación basal sometida al mismo forzante de movimiento simulado. De este modo se busca validar la efectividad de la implementación de este dispositivo de aislamiento sísmico en racks, aumentando la seguridad ante el colapso y a su vez reduciendo la pérdida de mercancías y/o destrucción de racks. Esto permitiría, además, asegurar la continuidad de operaciones en el corto plazo a un evento sísmico severo y proteger también la integridad de las personas.

Un sistema de aislamiento debe satisfacer tres requisitos fundamentales para ser efectivo en la reducción de la demanda sísmica sobre una estructura. Estos son: debe tener una gran flexibilidad horizontal de modo de alargar el periodo fundamental de la estructura a una zona de menor aceleración espectral, debe introducir disipación de energía de modo de reducir la

demanda de deformación sobre el sistema de aislación y, debe proveer una rigidez vertical suficiente alta para reducir las vibraciones verticales molestas por cargas de servicio.

Es por lo anterior que previo a esta etapa experimental se realizaron análisis paramétricos del sistema de aislamiento utilizado la ecuación constitutiva que rige el comportamiento de éste [12]. Dichos análisis permitieron concluir que el dispositivo es capaz de disipar energía y llevar la superestructura a periodos más largos, si se controlan adecuadamente sus variables de diseño. Estas variables son: la altura y radio de curvatura del dispositivo (ya que predominan en el aporte a la rigidez lateral) la carga pos-tensado del elemento elástico en el interior del aislador (que aporta rigidez lateral y resistencia al levantamiento), además del diámetro y materialidad de la rótula de bola en el apoyo basal del aislador (variables que controlan la capacidad de disipación de energía). A continuación, se explica de mejor forma el funcionamiento del dispositivo de aislamiento basal que constituye la tecnología desarrollada en este proyecto.

Descripción del dispositivo de aislamiento

Dispositivo de aislamiento sísmico cinemático autocentrante de tipo rodadura ensayado cuya idea es original de Maureira et al [12], está compuesto por un cascarón semiesférico unido a un cuerpo cilindro conectado a una rótula de bola en su apoyo basal. En esta última se produce disipación de energía por roce debido a la rotación del dispositivo debido al movimiento lateral de la superestructura (Figura 2). Dicha capacidad de disipación de energía es proporcional al diámetro de la rótula de bola en la base (Figura 3 d) y al coeficiente de roce entre las superficies en contacto en ésta. En su interior el aislador contiene un elemento elástico o resorte (Figura 3 c) conectado a un cable que sale del aislador por un orificio ubicado en el centro del cascarón semiesférico (Figura 3 a) y se conecta en la base (Figura 4) 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. Cuando el radio de curvatura del cascarón semiesférico es mayor que la altura del dispositivo ($R > H$, Figura 2 a), la proyección del peso de la superestructura no coincide con el centro de rotación del aislador (Figura 2 c). En esta condición, el peso de la superestructura ayuda a estabilizar al sistema de aislamiento, proporcionando parte de la rigidez lateral. Por ser un mecanismo robusto con partes rígidas (Figura 3), el dispositivo es estable incluso frente a elevadas cargas de compresión, lo que constituye un atributo distintivo de esta tecnología.

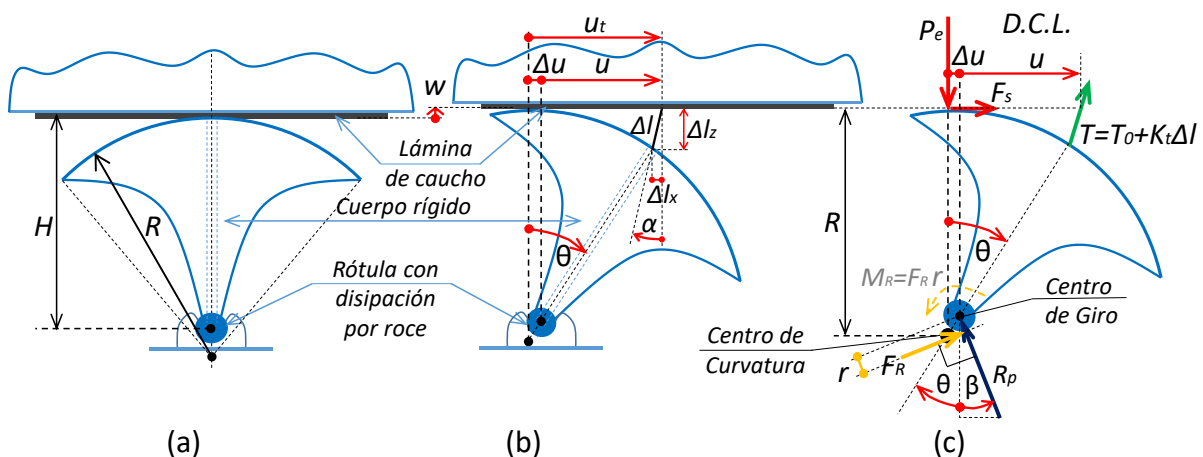


Figura 2: Dispositivo de aislamiento cinemático. (a) posición inicial de reposo, (b) posición deformada con grandes desplazamientos, (c) Diagrama de cuerpo libre en condición deformada. **Fuente:** Adaptado de Maureira et al. [12].

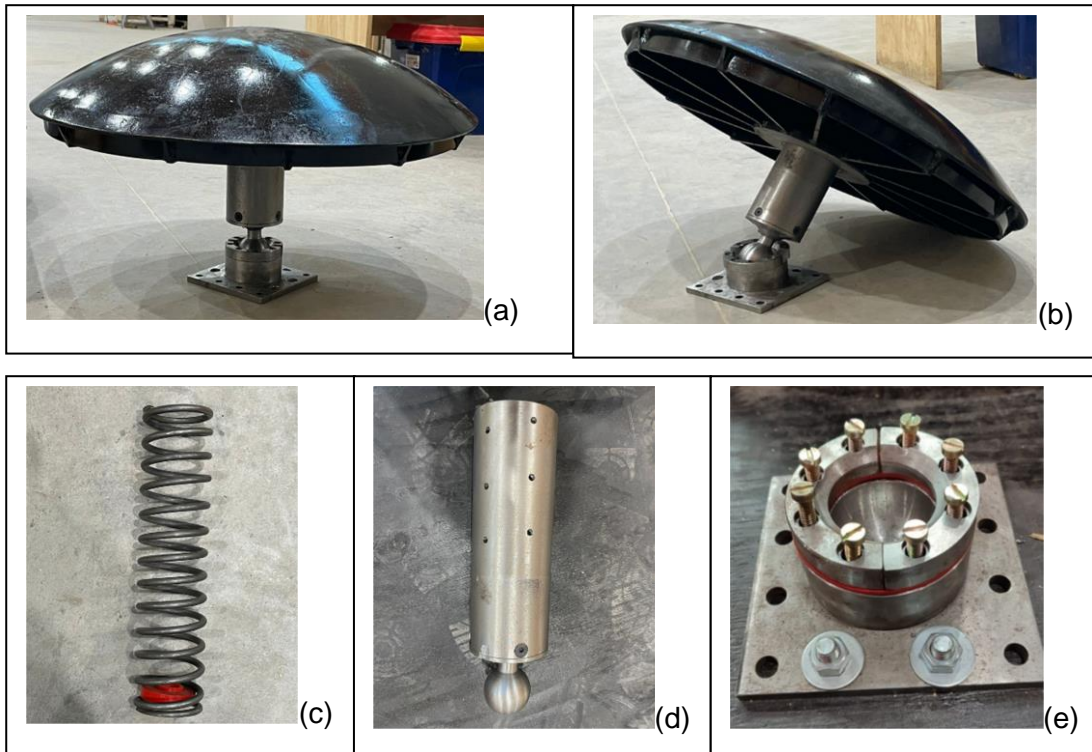


Figura 3: Dispositivo de aislamiento construido para ensayos experimentales. (a) Posición no deformada, (b) posición deformada, (c) elemento elástico que va al interior del cuerpo, (d) cuerpo y rótula de bola, (e) soporte de la rótula de bola. **Fuente:** Elaboración propia.

El aislador utilizado en los ensayos es un mecanismo rígido, virtualmente indeformable con 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 apertado con separación de 8 mm en dirección del eje axial del cuerpo del aislador. Esto permite apertar el cuerpo del aislador a su cabezal semiesférico en 10 posiciones distanciadas 8mm, pudiendo obtener alturas entre 328 mm y 400mm. 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 como se muestra en la ecuación (1).

$$T_a = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{M_e} \left(\frac{2}{3H} T_0 + \frac{R-H}{H^2} (M_e g + T_0) \right)}} \quad (1)$$

En esta ecuación, T_a es el período de aislamiento proporcionado a la estructura por el sistema de aisladores. La ecuación muestra como el período de aislamiento del sistema es inversamente proporcional a la carga de pre-tensado del elemento elástico en el interior del aislador, T_0 . Dicha carga aporta rigidez lateral al sistema de aislamiento y se incrementa con el aumento del desplazamiento lateral que se produce cuando el dispositivo se inclina, aumentando más la rigidez. Esto se debe a que el elemento elástico en el interior del aislador se deforma producto del desplazamiento lateral.

Para la realización de los ensayos se utilizó una altura $H=360\text{mm}$, luego la rigidez lateral del dispositivo viene proporcionada por la rigidez del resorte en su interior en este caso un resorte de acero ASTM A229 con módulo de corte $G=7,96 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$, tensión de fluencia en tensión $\sigma_f=1.251 \text{ MPa}$, tensión de fluencia al corte $\tau_f=834 \text{ MPa}$, diámetro de barra de 6 mm y diámetro exterior de espira 60 mm de rigidez $K=4.095 \text{ N/m}$, la carga de pos-tensado, $T_0=2.060 \text{ N}$ y la masa

sobre que actúa sobre el sistema de aislamiento, la cual será variable existiendo 3 casos de carga, lo que consiste en cargar con 900kg cada nivel del rack uno a la vez.

Para conformar el nivel de aislamiento se instalaron 4 aisladores presentados anteriormente, bajo una plataforma rígida que permite el accionamiento simultaneo de estos (Figura 3).

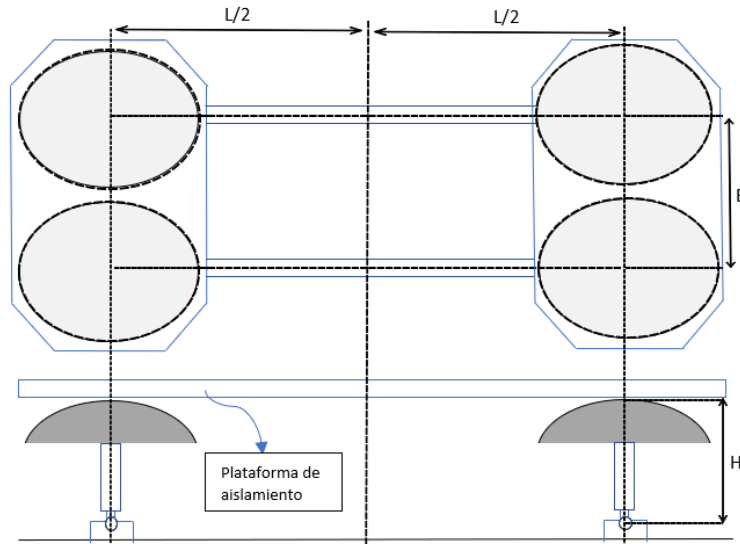
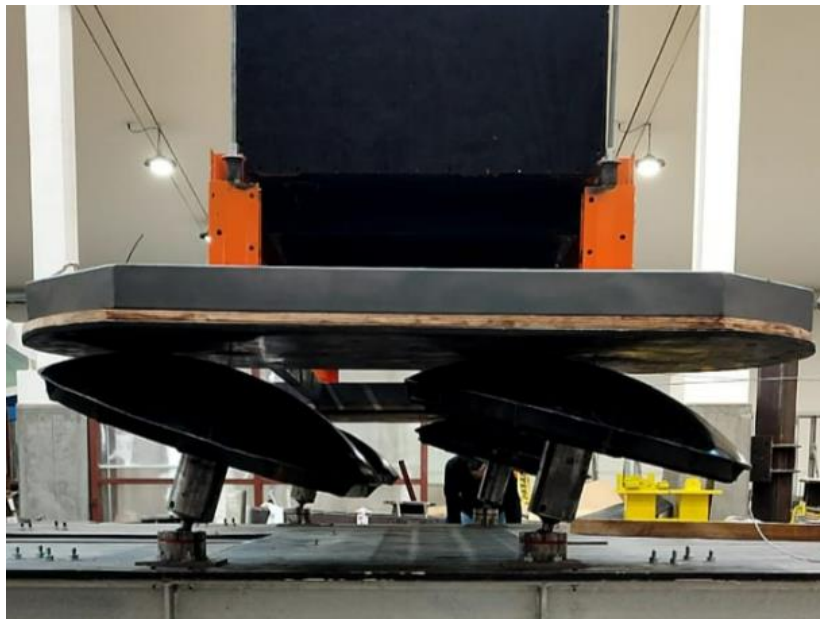


Figura 4: Esquema de la plataforma de aislación: vista en planta (arriba), elevación (abajo).

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.



(a)



(b)

Figura 5: Montaje del sistema de aislamiento. (a) Sistema de pos-tensado del elemento elástico del dispositivo, (b) Sistema de aislamiento montado y en condición deformada. **Fuente:** Elaboración propia.

Descripción metodológica

Montaje experimental de racks

Sobre la plataforma de aislamiento presentada anteriormente se fijan las placas base de las “patas de sujeción de columnas” (Figura 5 a) apernadas en sus 4 esquinas. Posteriormente se ensamblan y apernan las columnas del rack sobre dichos soportes. Las columnas del rack son perfiles TX100x105x3 arriostrados entre sí en las caras cortas con perfiles CA45x25x2 y C58x22x2. Las conexiones tienen pernos instalados con apriete manual hasta completar el montaje de todas las partes. Luego de instalar las 4 columnas con sus correspondientes diagonales de arrostramiento se procede al montaje de las vigas, que son perfiles TC100x50x2. El primer par de vigas se ubica a una altura de 0.35m sobre la base de las columnas, las siguientes vigas se instalan equidistantes a 1.2m de separación entre ejes. Una vez montadas todas las vigas se procede al apriete definitivo de todos los pernos esta vez con herramientas de torque controlado.



Figura 6: Rack montado sobre sistema de aislamiento, en mesa vibradora. **Fuente:** Elaboración propia.

El rack de almacenamiento en estudio fue configurado con tres niveles de carga (Figura 6). Fue ensayado con movimiento de base 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 900 kg, partiendo del nivel más bajo hasta llegar al tercer nivel y obteniendo una carga total de aproximadamente 2700 kg (Figura 6).

Debido a su geometría, el rack presenta diferencias en su forma de vibrar al comparar su dirección longitudinal y su dirección transversal. Es más flexible en la dirección longitudinal y más rígido en su dirección transversal o corta, ya que en esta se encuentra arriostrado.

Además, considerando la variación en la masa para los diferentes ensayos y en virtud que el periodo de la estructura es directamente proporcional a su masa se tendrá diferentes periodos fundamentales para la estructura ensayada.

Tabla 1: Periodo fundamental del rack sin aislamiento basal. **Fuente:** Elaboración propia.

Ensayo	Dirección	Periodo(s) rack base fija
1 Nivel cargado	Longitudinal	0,104
	Transversal	0,037
2 Niveles cargados	Longitudinal	0,226
	Transversal	0,071
3 Niveles cargados	Longitudinal	0,379
	Transversal	0,106

Esquema de instrumentación

Para analizar si efectivamente existe una reducción en la respuesta dinámica del rack se instalaron en ciertas zonas dispositivos de medición de desplazamiento del tipo LVDT. Estos son capaces de medir deformación por voltaje inducido en el instrumento asociados a su accionamiento. Se instalaron estos instrumentos en tres ubicaciones: i) entre la mesa vibradora y sus fundaciones, ii) en diagonal en caras laterales del rack, entre primer y último nivel de vigas, ii) se instalaron dos entre el nivel de aislamiento y la mesa vibradora, utilizando una escuadra para que la medición fuera horizontal (Figura 7). Similar disposición de instrumentos se utilizó en la dirección longitudinal y transversal del rack, midiendo siempre en el sentido del movimiento de base aplicado. 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.

Para medir el movimiento de la mesa vibradora se utilizó un sensor LVDT de la marca Omega, modelo LDI-119-150, con recorrido de 150mm. Los desplazamientos relativos de entre piso fueron medidos con sensores de la marca Accuiacy, modelo KTC-100, con recorrido de 100mm. El movimiento relativo del nivel de aislamiento se registró con transductores de la marca Accuiacy, modelo KTR-300, con recorrido de 300mm.

En los ensayos de marcha blanca inicialmente se instalaron acelerómetros para registrar de forma redundante lo que los transductores de desplazamiento miden. Sin embargo, debido a limitación de frecuencia de medición de los acelerómetros (>1 hz), estos eran incapaces de medir en las etapas iniciales de baja frecuencia (1/4 hz) de la señal excitadora. Por lo anterior se decidió instrumentar únicamente con transductores de desplazamiento. Además, durante la marcha blanca se detectó que las deformaciones medidas en el rack eran mucho más pequeñas que el recorrido de los instrumentos utilizados (100mm). Además, el recorrido de la mesa vibradora (600mm) es 4 veces mayor que el recorrido del transductor utilizado para medirlo (150mm). Por lo anterior, en estos dos casos se utilizaron sistemas de poleas móviles para amplificar o reducir la medición. En el caso de los desplazamientos relativos de entre piso del rack, la medición física fue amplificada 4 veces, de modo que 1 mm de desplazamiento real se registraron como 4 mm de deformación en el instrumento. En el sensor que midió el movimiento de la mesa vibradora se redujo la medición física, de modo que 4mm de desplazamiento real se registraron como 1 mm de deformación instrumental.

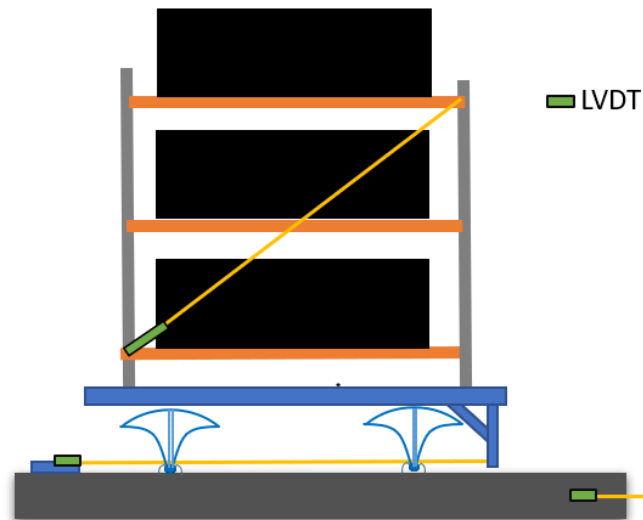


Figura 7: Esquema ubicación LVDTs en rack en dirección longitudinal con aislamiento basal sobre mesa vibradora. **Fuente:** Elaboración propia.

Ensayos realizados

Durante el desarrollo de esta investigación se llevaron a cabo ensayos dinámicos a un rack de tipo selectivo, tanto en su dirección longitudinal como en su dirección transversal. Esto mediante la excitación generada por la mesa vibradora ubicada en el laboratorio San José obrero de la facultad de ingeniería de la UCSC.

Primero se sometió a movimiento de base la estructura sin aislamiento, con apoyos de columnas fijos a la mesa vibradora, con forzante en cada una de sus dos direcciones por separado. El ensayo se realizó considerando 3 condiciones de carga: i) sólo en el nivel más bajo, ii) en los dos niveles más bajos, y iii) en los tres niveles del rack. Cada ensayo se realizó 3 veces por cada configuración de masa y orientación de la estructura respecto del movimiento de base. La secuencia de ensayos se repitió de igual forma para las mismas configuraciones antes mencionadas, pero con aislamiento basal (Figura 6).

Debido a que el movimiento de la mesa vibradora es unidireccional y se requiere evaluar la efectividad del sistema de aislamiento en las dos direcciones, se realizaron ensayos rotando el rack sobre la mesa vibradora. Las cargas de piso se aplicaron utilizando cajas de madera impermeabilizadas y selladas, las que se llenaron con aproximadamente 850 litros de agua, completando un peso total aproximado por nivel de 900 kg. Se instalaron las cajas vacías y fueron llenadas luego de sujetarlas al rack por medio de eslingas tensas para evitar accidentes por volcamiento. Las cajas se llenaron siguiendo la secuencia de carga descrita en el párrafo anterior, desde el nivel más bajo hasta el más alto.

En los casos con movimiento de base actuando en dirección transversal al rack, solo se realizaron 2 de los 3 ensayos previstos dejando fuera el ensayo con el rack cargado en sus tres niveles. Esto debido a que, al realizar los ensayos con peso en los tres niveles, las vibraciones registradas y el efecto visual de vibración de la estructura era muy severo, por lo que fueron detenidos para evitar volcamiento. Esto por seguridad del personal académico, estudiantes y de las entidades colaboradoras, además de proteger la mesa vibradora y sus componentes electrónicos que se habrían dañado por el volcamiento de las cajas con agua.

Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos se realizó utilizando el programa MATLAB elaborando rutinas específicas para este propósito. Inicialmente se obtuvieron las curvas de calibración para cada uno de los instrumentos de medición, las que permiten convertir voltaje medido en desplazamiento físico, esto incluido el efecto del sistema de poleas móviles antes mencionado. Se filtraron las señales de voltaje (proporcional al desplazamiento) de las mediciones para eliminar vibraciones ajenas al fenómeno físico, así como el ruido electromagnético. Una vez filtradas las señales, se aplicó la ecuación de calibración a cada instrumento para determinar los desplazamientos relativos correspondientes. Posteriormente se construyeron gráficas de respuesta en el tiempo de los resultados medidos. Como se mencionó antes, los transductores utilizados registran voltaje proporcional al desplazamiento por lo que fue necesario derivar 2 veces para obtener la aceleración relativa. Esto se hizo con todos los instrumentos utilizados para determinar aceleración de la mesa vibradora, del nivel de aislamiento y aceleración relativa de piso del rack. La aceleración de la mesa vibradora se determinó también derivando la velocidad registrada por el encoder

Durante el procesamiento de datos del desplazamiento relativo entre pisos del rack, se observa como el registro no fue capaz de mostrar con confiabilidad la deformación física observada en los registros en video de los ensayos. Como se observa en la Figura 8, la medición muestra desplazamientos inferiores a 1 mm, lo cual no es consistente con lo observado en los videos. Aunque el desplazamiento relativo de piso fue pequeño en los ensayos, sí pudo ser percibido visualmente. Se plantea como hipótesis que esto puede deberse al sistema de poleas móviles utilizados para amplificar el desplazamiento medido en el instrumento, debido al uso de cables que no fueron lo suficientemente rígidos, absorbiendo éstos parte de la deformación de entrepiso. Las estimaciones obtenidas a partir de grabaciones sugieren que el registro medido subestima la deformación de entrepiso.

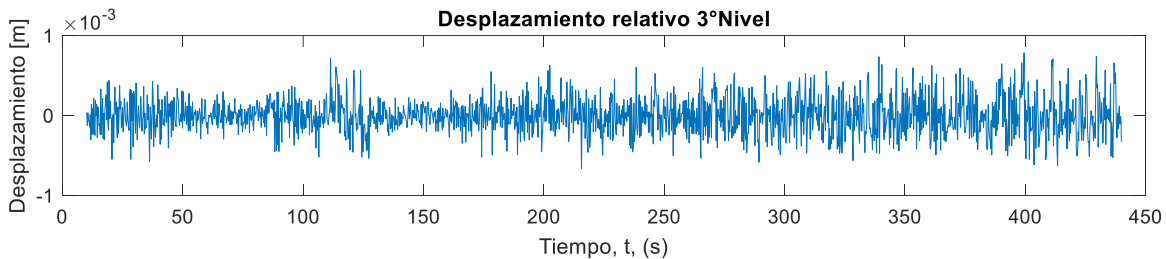


Figura 8: Medición desplazamiento relativo entre primer y tercer nivel de rack con 3 niveles cargados y movimiento de base aplicado en la dirección longitudinal. **Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 8, como es posible notar, no existe una variación clara en la deformación del rack lo que se replica para todos los ensayos, observándose predominancia de ruido en la señal medida. Debido a esto, para evaluar la efectividad del dispositivo de aislamiento en la reducción de la respuesta de corte basal y, con el fin de no transmitir ruido a la medición utilizada en dicho cálculo, solo se consideró la aceleración absoluta del piso de aislamiento y de la mesa vibradora. Esto corresponde a la simplificación de superestructura como cuerpo rígido sobre un sistema de aislamiento flexible, muy comúnmente usada en ingeniería. Es decir, se analizó el sistema con si fuera de un grado de libertad, como se muestra en la Figura 9.

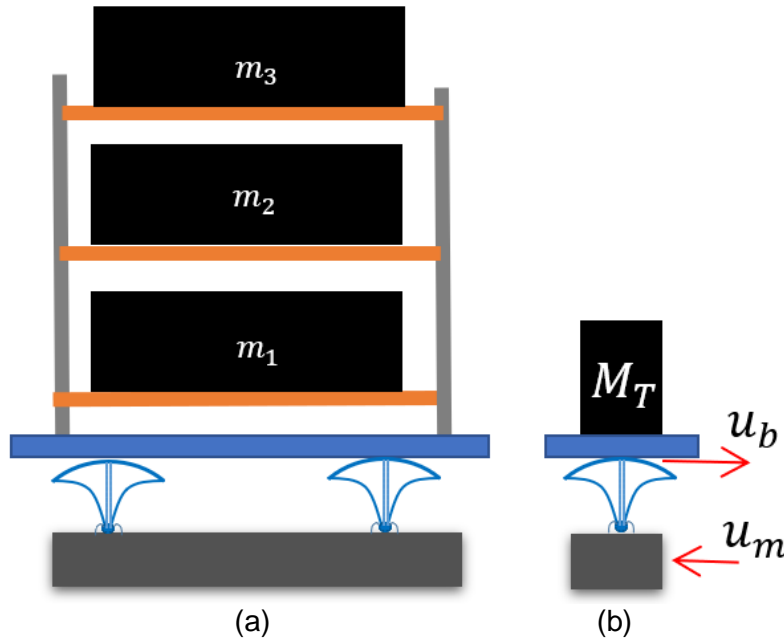


Figura 9: Modelo de análisis del sistema con aislamiento basal. (a) Posición inicial de reposo, (b) Simplificación sistema 1 grado de libertad. **Fuente:** Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 9, se considera 1 grado de libertad para el sistema con aislamiento basal, donde la aceleración absoluta de la base de aislamiento vendrá dada por la superposición de la aceleración relativa de la mesa vibradora y aceleración de la base de aislamiento. En el caso del rack fijo en su base, la aceleración absoluta se asumió igual a la correspondiente a la mesa vibradora, suponiendo desplazamiento relativo de piso despreciable como se explicó antes. Con las aceleraciones absolutas antes descritas, multiplicando por la masa total del sistema, se calcula el corte basal de la estructura. Esto permitió evaluar si existe una reducción en el corte basal del rack con aislamiento basal con respecto a la estructura con base fija, sometidas ambas al mismo forzante o movimiento de la mesa vibradora.

Es necesario mencionar que la masa total de la estructura no es solo la que se concentra en los niveles del rack, también se considera la masa de la estructura y la masa adicional del nivel de aislamiento cuando corresponde. La plataforma de aislamiento y parte de los aisladores que se mueve solidario a ella tiene una masa no despreciable. La masa de la plataforma de aislamiento es de aproximadamente 200kg y la suma de las masas de los aisladores que se mueven solidarios a ésta es de 163,3 kg.

Luego el cálculo de corte basal (Q_0), para ambos casos de estudio viene dado por el producto de la aceleración absoluta de la base (\ddot{u}_m) y la masa (m_T) sobre el sistema como se muestra en la ecuación 2 para el sistema con base fija, y en la ecuación 3 para el sistema aislado, P_S corresponde al peso sísmico y Q_n al corte basal normalizado al peso sísmico, valores que utilizan para el análisis de resultados posterior.

$$Q_0 = m_T \times \ddot{u}_m \quad (2)$$

$$Q_0 = m_T \times (\ddot{u}_b + \ddot{u}_m) \quad (3)$$

$$P_S = m_T \times \ddot{g} \quad (4)$$

$$Q_n = \frac{Q_0}{P_S} \quad (5)$$

Movimiento de mesa vibradora

Se definió como forzante dinámico un movimiento de base compuesto por un tren de señales armónicas de frecuencia y amplitud variable por intervalos de tiempo. La señal es, por lo tanto, una armónica pura en cada uno de dichos intervalos, cambiando de amplitud y frecuencia entre intervalos (Figura 10 a, b, c). En las figuras 10 a, b, c, las líneas verticales segmentadas corresponden a los instantes en que ocurre el cambio de frecuencia y amplitud en el tren de armónicas. Las frecuencias asignadas se definieron en un rango amplio, teniendo señales con períodos entre 0.6s y 4s. Las amplitudes de cada señal armónica se definieron de tal forma que el espectro de respuesta del tren de armónicas se ajuste al espectro de diseño de la NCh2745 en zona sísmica III, suelo tipo III, categoría de estructura 3, y sin reducir por el factor R. Debido a que el contenido de frecuencia del tren de armónicas es discreto, el ajuste con el espectro de diseño también lo es, como se muestra en la Figura 10d.

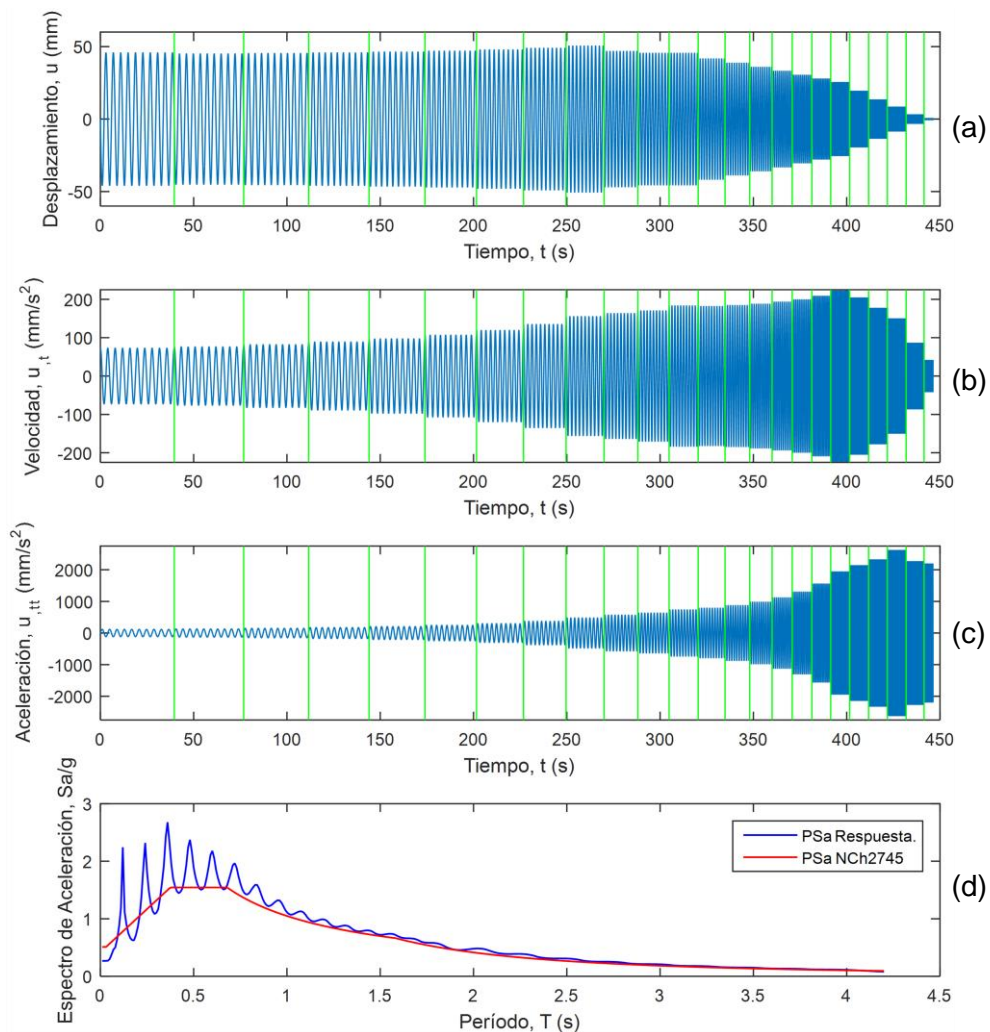


Figura 10: Señal de entrada del algoritmo de programación de la mesa vibradora. a) desplazamiento, b) velocidad, c) aceleración, d) espectro de diseño y de respuesta.

Como se mencionó antes, la mesa vibradora fue diseñada y construida en el marco de un prefector Fodef. El cual tuvo retrasos en su construcción debido a las restricciones impuestas por la pandemia Covid19. Teniendo muy poco tiempo para dominar su funcionamiento. En el período

de marcha blanca de la mesa vibradora surgieron diversas problemáticas respecto de su operación, las cuales aún no tienen respuesta al momento de este escrito. Dos de las interrogantes más importantes son: i) ¿tiene el equipo construido una limitación para reproducir aceleraciones muy altas?, ii) ¿puede el equipo ser programado con pasos de tiempo discretos pequeños sin que se altere el contenido de frecuencia de la señal de entrada? Estas interrogantes surgieron al observar las gráficas de la Figura 11, que muestran la señal efectivamente medida en la mesa vibradora.

En la Figura 11 se presenta la serie de tiempo de aceleración calculada con base en las mediciones del encoder interno del motor que acciona la mesa vibradora. Este corresponde al forzante dinámico efectivamente reproducido por la mesa vibradora en los ensayos experimentales. Al comparar las gráficas de las Figuras 10 y 11, queda en evidencia que la mesa vibradora no alcanzó las aceleraciones máximas del tren de armónicas considerado en la entrada del algoritmo de programación del servomotor que la acciona. Además, el contenido de frecuencia de la señal de salida se ve truncado en frecuencia alta (período corto) respecto de la señal de entrada. Esto queda en evidencia al comparar las gráficas de Figura 10d y Figura 11b, ya que la primera muestra su pico de más alta frecuencia asociado a un período de aproximadamente 1.2 segundos, en cambio la segunda lo muestra a 0.6 segundos, siendo ruidosa la información mostrada para períodos inferiores. Esto puede deberse a una supuesta imposibilidad del equipo de generar aceleraciones altas, como se observa en el truncamiento del espectro de respuesta de la señal medida mostrado en la Figura 11 b. Esto pudo haber conducido a retardo en la reproducción de la señal de salida, alargando los períodos del tren de armónica en esos casos, lo que respondería a la interrogante anterior.

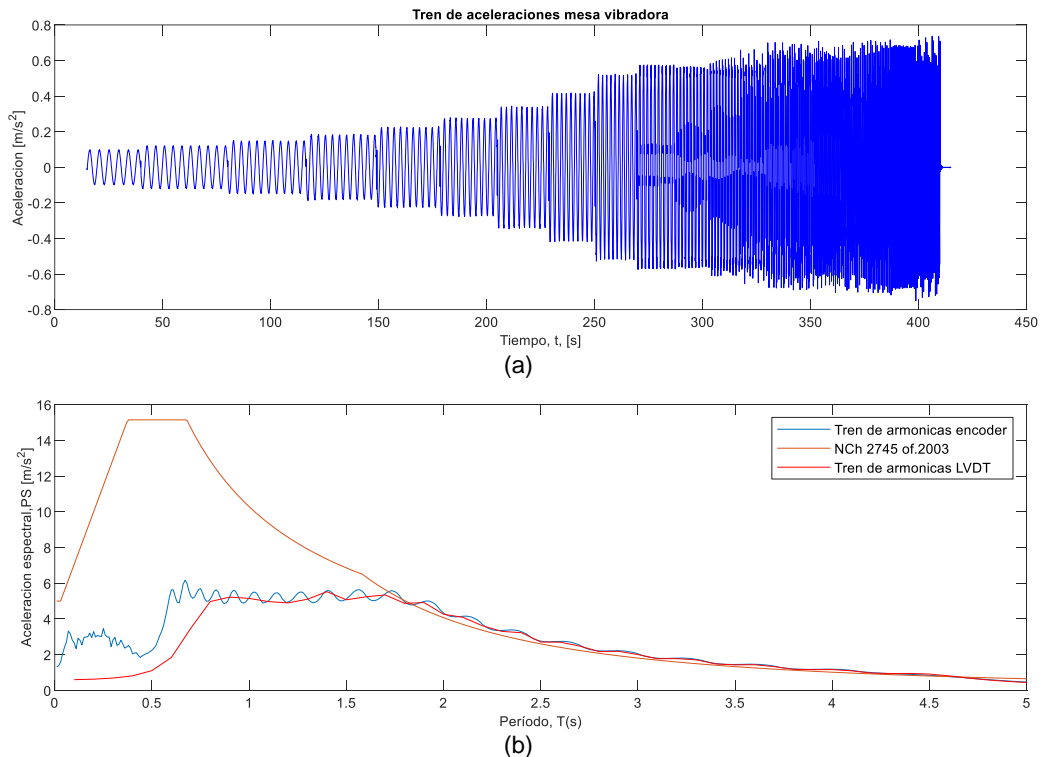


Figura 11: Respuesta efectiva de la mesa vibradora. (a) Aceleración del tren de señales armónicas, (b) Espectros de diseño de la NCh2745 y de respuesta de la señal medida.

En la Figura 11 (b), se muestran tres espectros: i) en la línea anaranjada el de la norma NCh 2745 con los parámetros antes indicados, ii) en línea celeste el de respuesta calculado con el registro

de velocidad del encoder interno del motor, y iii) en color rojo el espectro de respuesta calculado con la medición del transductor de desplazamiento (LVDT) derivado numéricamente 2 veces para obtener aceleración. Se observa como el tren de aceleraciones efectivamente reproducido por la mesa vibradora no se ajusta al espectro de pseudo-aceleraciones de la norma NCh2745 para períodos aproximadamente menores a 1.7 s. Hasta el momento de redacción de este informe se asume que el motor que acciona la mesa vibradora es incapaz de reproducir aceleraciones mayores. Esto es relevante ya que la señal excitadora sí lograría llevar a resonancia a los racks con aislamiento basal, cuyos períodos de aislamiento son todos mayores a 2 segundos. Sin embargo, estaría lejos de lograr la resonancia del rack fijo en su base, cuyos períodos son todos menores a 0.38 s, como se muestra en Tabla 1.

Para resolver la problemática de aceleraciones truncadas antes planteada, se decidió amplificar la respuesta medida por un factor de ajuste en el dominio de frecuencia. Este factor se define como aquel requerido para escalar en frecuencia el espectro de respuesta de la señal de aceleración efectivamente reproducida por la mesa vibradora, para ajustarla al espectro de diseño de la NCh2745. El mismo factor $f(\omega)$ se aplicaría sobre la transformada de Fourier de las respuestas medidas experimentalmente, para luego retornar al espacio del tiempo con las señales ajustadas. Lo anterior se muestra en la Figura 12 aplicado a la señal de aceleración efectiva de la mesa vibradora.

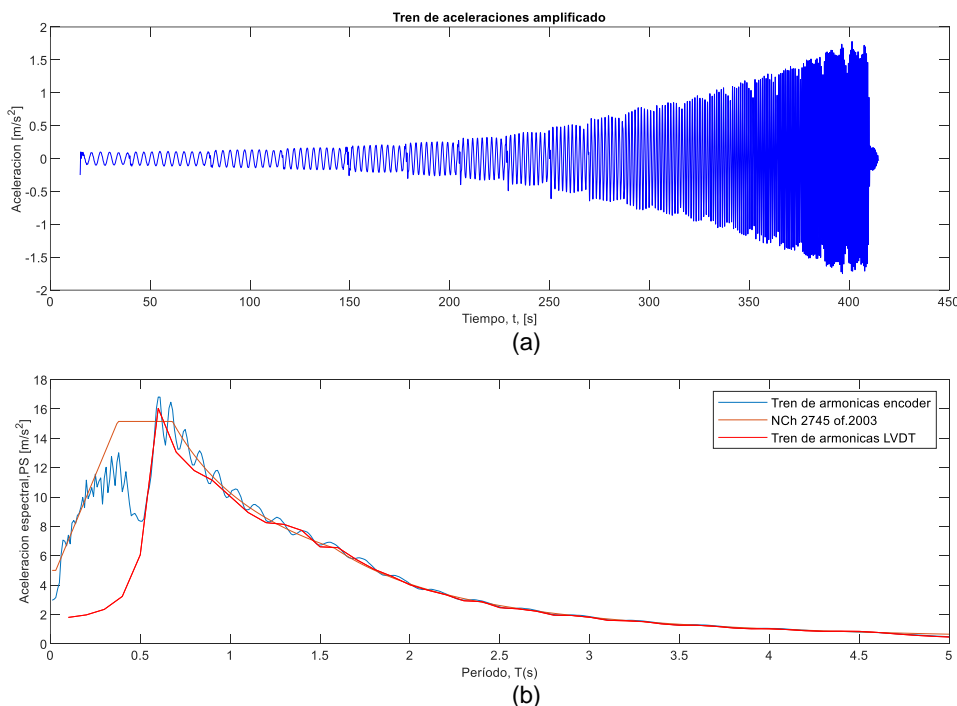


Figura 12: Respuesta efectiva de la mesa vibradora escalada en dominio de frecuencia. (a) Aceleración del tren de señales armónicas, (b) Espectros de diseño de la NCh2745 y de respuesta de la señal medida.

Obtenido así lo presentado en la figura 12 (a) y (b), donde se amplifico la señal medida en los ensayos para ajustar sus valores al espectro de la norma NCh2745.

Es posible apreciar como las curvas que representan el movimiento de la mesa vibradora se desajustan entre sí para períodos que van desde los 0s hasta 0.6s, sabemos que la curva celeste está asociada exactamente a la señal enviada a la mesa vibradora por lo que tal registro es preciso, caso contrario a lo que se presenta en la línea roja la cual muestra la señal medida con LVDT de forma externa, se plantea la hipótesis de que esto se debe a la forma en que se realizó

la medición ya que para no sobrepasar el recorrido máximo del dispositivo usado, se empleó un sistema de poleas como el que se presenta en la *figura 13*, con el cual es posible amplificar 4 veces su recorrido máximo, este sistema se conforma de 2 poleas móviles y una polea fija, las cuales se conectan por una cuerda de pesca y permiten el accionamiento del dispositivo de medición. Al comparar las curvas de la figura 11 b, se aprecia como se mide de forma precisa el movimiento de la mesa vibradora cuando corresponde a periodos largos (desde 0,6s hasta 5s), pero se pierde la eficacia en la medición cuando el periodo del movimiento es más pequeño, esto debido a que el sistema no logra reponerse entre cada oscilación, esto se debe que la cuerda utilizada no es totalmente rígida por lo que posiblemente en este tramo correspondiente a los últimos segundos del movimiento en la mesa vibradora, la cuerda se deforma absorbiendo parte del movimiento que se quiere medir, dando paso así a un error en la medición, esto ocurre tanto para la medición con el LVDT en la mesa vibradora y el piso de aislamiento que se ensaya.

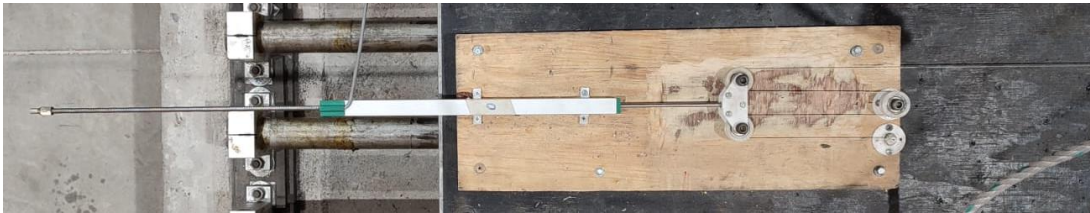


Figura 13: Transductor de desplazamiento (LVDT) con sistema de polea utilizado para la medición del recorrido de la mesa vibradora y dispositivo de aislamiento.

Análisis de resultados

En la *Figura 15* se presentan los resultados obtenidos en la realización de los ensayos con forzante en la dirección longitudinal. Figuras 15 a, c, d corresponden a desplazamiento relativo del nivel de aislamiento. Figuras 15 b, d, f, corresponden a corte basal calculado.

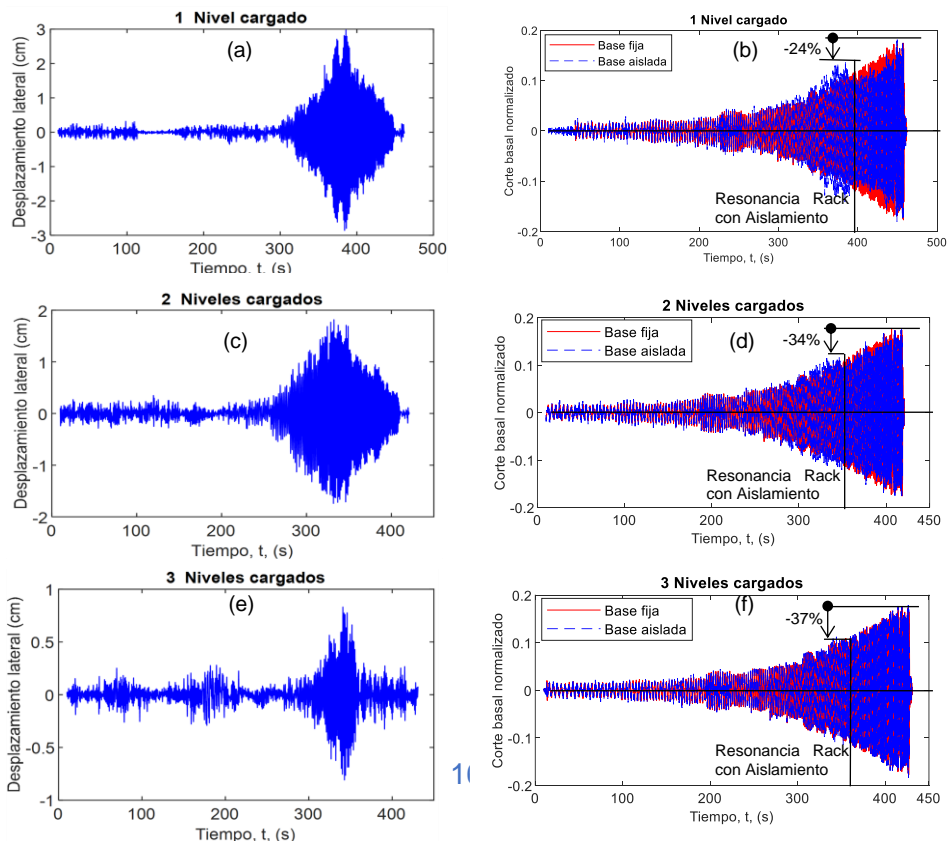


Figura 12: Ensayos dirección longitudinal: (a), (c), (e) desplazamiento relativo del nivel de aislamiento. (b), (d), (f) evolución del corte basal en rack de base fija y de base aislada, dividido por el peso sísmico.

En la Figura 12 se muestra el desplazamiento medido en la deformación lateral del piso de aislamiento en función del tiempo para los tres casos de carga, con la dirección longitudinal del rack en sentido del movimiento de la mesa vibradora, además se muestra la evolución en el contraste en el corte basal para los ensayos con base fija y base aislada durante la ejecución del ensayo, considerando el rack como cuerpo rígido.

Como se mencionó, la fidelidad en la medición se pierde cuando el movimiento de la mesa vibradora se asocia a periodos menores a 1.7 s, por truncamiento de la aceleración efectivamente reproducida. Esto ocurre aproximadamente desde el tiempo $t=310$ s en adelante, luego de la undécima armónica (Figura 11 a), cuyo período es $T_{11}=1.7$ s, observándose el truncamiento de la aceleración espectral para períodos más cortos (Figura 11 b).

En la Figura 12 (a), (c) y (e) se aprecia el desplazamiento relativo en el piso de aislamiento mientras fue sometido al movimiento de la mesa vibradora. Se puede apreciar como el sistema de aislamiento muestra una respuesta acentuada aproximadamente entre los tiempos 300 s y 400 s. Este es el instante en que se alcanza la resonancia de los racks con aislamiento basal, donde se esperaría el corte basal más alto. Sin embargo, los cálculos de corte basal basados en la suma de las fuerzas inerciales mostrados en la Figura 12 (b), (d) y (f), muestran que esta respuesta tiene un máximo para los casos con aislamiento basal que ocurre en forma posterior a la resonancia. Esto es inconsistente con lo observado en los videos de los ensayos, donde claramente las deformaciones máximas ocurrieron en la condición de resonancia. Teóricamente, cuando el período del movimiento de base es cada vez más corto en relación al período de aislamiento (lo que ocurre después de los 400 segundos), el corte basal se reduce sistemáticamente. Dicha respuesta es proporcional a la aceleración absoluta de la masa, que es la suma de la aceleración relativa de piso y la aceleración absoluta de la mesa vibradora. Cuando el período del forzante es mucho más corto que el período de aislamiento, ambas aceleraciones tienden a ser iguales, pero en contrafase, anulándose entre sí. Esto no es lo que muestran los cálculos (Figura 12 (b), (d) y (f)). Se plantea como hipótesis que los cables con los que se usaron en el sistema de poleas móviles para conectar el transductor de desplazamiento (LVDT) que registró el movimiento de la mesa vibradora (Figura 13) no eran lo suficientemente rígidos. Esto generaría un retraso en la transmisión del movimiento de la base al sensor, lo que habría ocasionado que no se lograra la condición de movimiento en contrafase con el de la mesa vibradora. Esto habría conducido a una respuesta de corte basal erróneamente acentuada ocurriendo posteriormente a la condición de resonancia del modelo de aislamiento. Por lo anterior, para ser consistente con la respuesta observada durante la ejecución de los ensayos, en lo sucesivo se reporta la respuesta de corte basal máximo de los racks con aislamiento basal calculada en la condición de resonancia. Lo observado en la Figura 12 (b), (d) y (f) respecto de la evolución en el tiempo del corte basal de los racks fijos en la base sí es consistente con lo observado durante los ensayos. Los períodos fundamentales de los racks fijos son todos menores a 0.38s (Tabla 1), siendo estos menores que el mínimo periodo alcanzado por la señal excitadora efectiva, del orden de 0.6 s. Debido a lo anterior, no se alcanzó a excitar en condición de resonancia el modo fundamental de los racks fijos en la base, siendo la condición más cercana a ella la ocurrida al final de la señal excitadora. Por lo tanto, la tendencia al crecimiento monótono del corte basal máximo en los racks fijos en la base es correcta. Sin embargo, el corte máximo calculado subestima el corte basal que un sismo de diseño causaría a estos racks, debido a que no se logró alcanzar la condición de resonancia ni cercana a ella. En consecuencia, las reducciones de corte basal por el uso de aislamiento sísmico reportadas aquí son todas muy

conservadoras y no reflejan el real beneficio del uso de esta tecnología, debido a las limitaciones del equipo utilizado.

Corte basal máximo

Los datos de la Figura 12 (b) permitieron determinar una reducción del 24% en el corte basal para racks con 1 solo nivel de carga. Con la información de la Figura 12 (d), se pudo determinar que la reducción del corte basal en racks con 2 niveles cargados fue del 34%. Del análisis de datos de la Figura 12 (f), el mismo cálculo muestra reducción del corte basal en racks con 3 niveles del

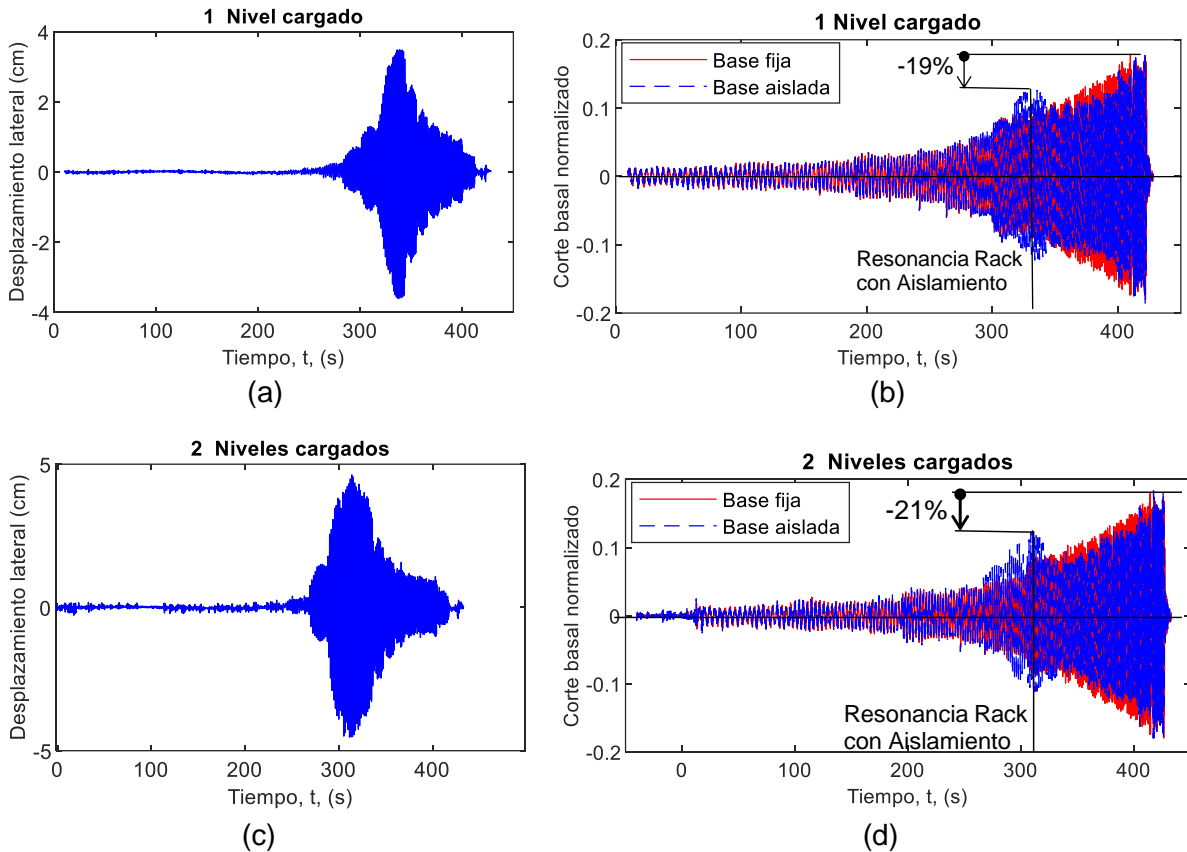


Figura 13: Ensayos dirección longitudinal: (a), (c) desplazamiento relativo del nivel de aislamiento. (b), (d) evolución del corte basal en rack de base fija y de base aislada, dividido por el peso sísmico.

Del mismo modo que lo mostrado anteriormente en la Figura 13 (a) y (c) se muestra el desplazamiento registrado en el sistema de aislamiento en función del tiempo. En este caso es posible notar con claridad la condición de resonancia en la vecindad de los tiempos 340 y 320 segundos, respectivamente. En dichos instantes es donde, en teoría, debe alcanzarse el corte basal máximo en los racks con aislamiento basal. Con posterioridad a esos tiempos, el corte basal debería disminuir sistemáticamente, por el desacoplamiento progresivo del movimiento al incrementarse la frecuencia de la excitación por sobre la frecuencia de aislamiento. Siendo consistente con lo anterior, y teniendo en cuenta lo explicado en párrafos anteriores, se determinan reducciones del corte basal máximo del 19% y 21% para los casos con 1 y 2 niveles de carga, respectivamente.

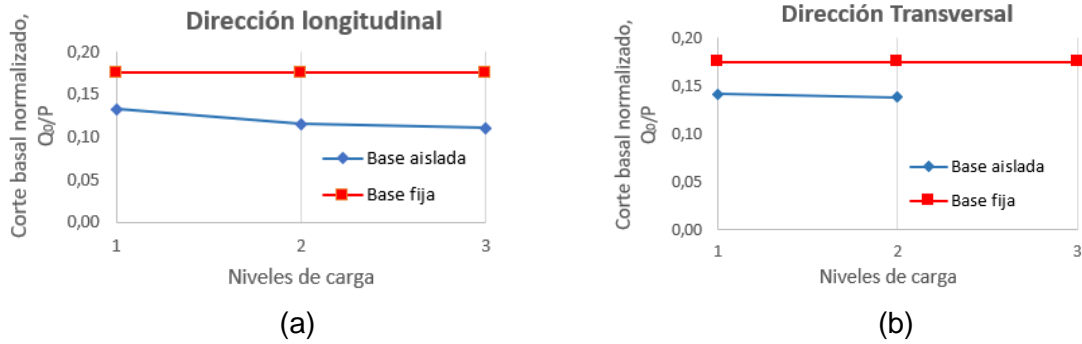


Figura 14 : Contraste corte basal base aislada y base fija: (a) Rack en dirección longitudinal al forzante, (b) Rack en dirección transversal al forzante.

Lo anterior se resume en figura 14 donde se muestra el contraste en la reducción del corte basal para el sistema con base fija y base aislada, mostrando una tendencia a la reducción de dicha variable dinámica a medida que aumenta la carga sobre el sistema para ambos sentidos ortogonales del rack ensayado.

Aceleración absoluta de piso y volcamiento de pallets

Como se mencionó anteriormente, debido a los desplazamientos relativos de piso muy pequeños registrados por los sensores, la aceleración absoluta de las masas del rack se asumió uniforme. Estas aceleraciones se reflejan en la Figura 12 (b), (d), y (f), y Figura 13 (b) y (d), en proporción a la aceleración de gravedad. Se observa que en todos los casos ensayados la aceleración no superó el 20% de la aceleración de gravedad, tanto para los racks fijos en la base como para aquellos con aislamiento basal. De acuerdo con lo establecido por Álvarez et al (2021), el volcamiento de los pallets no ocurre hasta alcanzado una aceleración lateral de piso del 63% de la aceleración de gravedad. Por lo tanto, se puede concluir que no existió peligro de volcamiento en los casos experimentales analizados.

Derivas máximas de piso

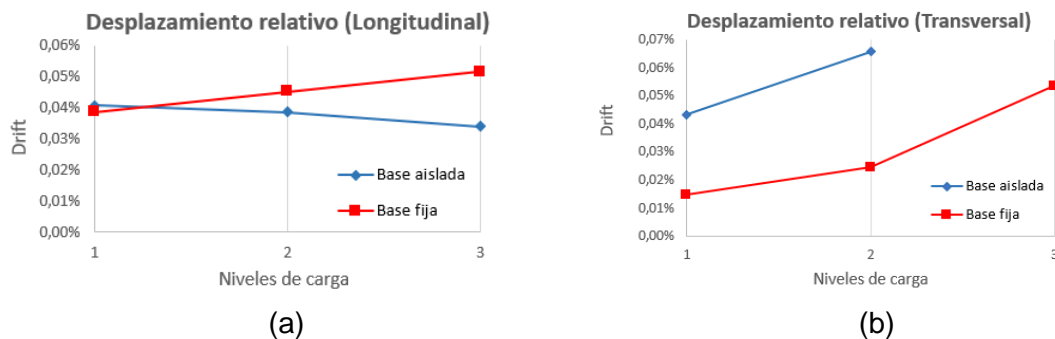


Figura 15 : Contraste desplazamiento relativo base aislada y base fija: (a) Rack en dirección longitudinal al forzante, (b) Rack en dirección transversal al forzante.

De acuerdo a lo mencionado al inicio de la sección “Análisis de resultados”, los desplazamientos relativos de piso registrados fueron muy pequeños, con fuerte influencia de ruido ambiental y subestimados debido al uso de poleas móviles con cables no del todo inextensibles. En todos los casos, tanto con y sin aislamiento de base, se registraron derivas de piso del orden de milímetros. Esto corresponde a derivas menores a 0.1%, muy por debajo del límite normativo de 1.5%, como se aprecia en la figura 15 donde se muestra el máximo desplazamiento de techo corresponde a

un 0,06% de la altura total del rack. Sin embargo, estos son valores que subestiman mucho las derivas de piso reales observadas en los ensayos experimentales, las cuales pueden haber sido de un orden de magnitud mayor.

En resumen, para la obtención de resultados experimentales más fidedignos, se sugiere realizar ensayos experimentales con racks más altos para registrar mejor las vibraciones. También se recomienda utilizar un esquema de instrumentación redundante, con acelerómetros y sensores de desplazamiento midiendo simultáneamente los mismos grados de libertad. Los instrumentos de medición utilizados deben tener rangos de medición que no sean mucho más amplios que el rango de las mediciones que se tomarán. La mesa vibradora debe ser programada con movimientos de base que contengan frecuencias más altas, para así alcanzar mayores aceleraciones y desplazamientos de piso. De esta manera se podría evaluar con más fundamento el efecto benéfico de incorporar aislamiento basal en la protección sísmica de racks de almacenamiento industrial.

CONCLUSIONES

En general, se pudo observar una moderada reducción de la respuesta de corte basal en racks con aislamiento sísmico respecto de aquellos fijos en la base, con valores entre 19% y 37 %. Esto es una cota inferior del potencial de esta tecnología, ya que en los ensayos no se logró excitar el modo fundamental de los racks fijos en la base. Además, por limitaciones del motor que acciona la mesa vibradora utilizada en los ensayos, la aceleración efectiva alcanzada en ésta resultó truncada, estando muy por debajo del sismo de diseño representado por el espectro de diseño normativo.

Las aceleraciones máximas absolutas de piso fueron inferiores al 20% de la aceleración de gravedad, tanto para racks con base fija como para aquellos con aislamiento basal. Esta aceleración es menor que el límite sugerido por Álvarez et al (2021) de 63% de la aceleración de gravedad, como el umbral de riesgo de volcamiento de los pallets. Por lo tanto, no se registró riesgo de volcamiento de pallets, aunque tampoco pudo evidenciarse que esto se debiera al uso de aislamiento basal.

No se pudo determinar la deriva de piso de manera confiable. Esto debido a que los desplazamientos relativos de piso medidos fueron muy pequeños, del orden del 1% del recorrido del instrumento utilizado, rango en el que la sensibilidad de la medición puede ser absorbida por ruido electromagnético o de vibraciones ambientales. Esto pudo deberse al uso de un sistema de poleas móviles para amplificar la medición física y poder medir con mayor confiabilidad y precisión. En este sistema, el uso de cables que no fueron lo suficientemente rígidos, pudo afectar severamente la confiabilidad de las mediciones al absorber por deformación de dichos cables (lienza de pescar) una parte importante de la deformación total de entrepiso.

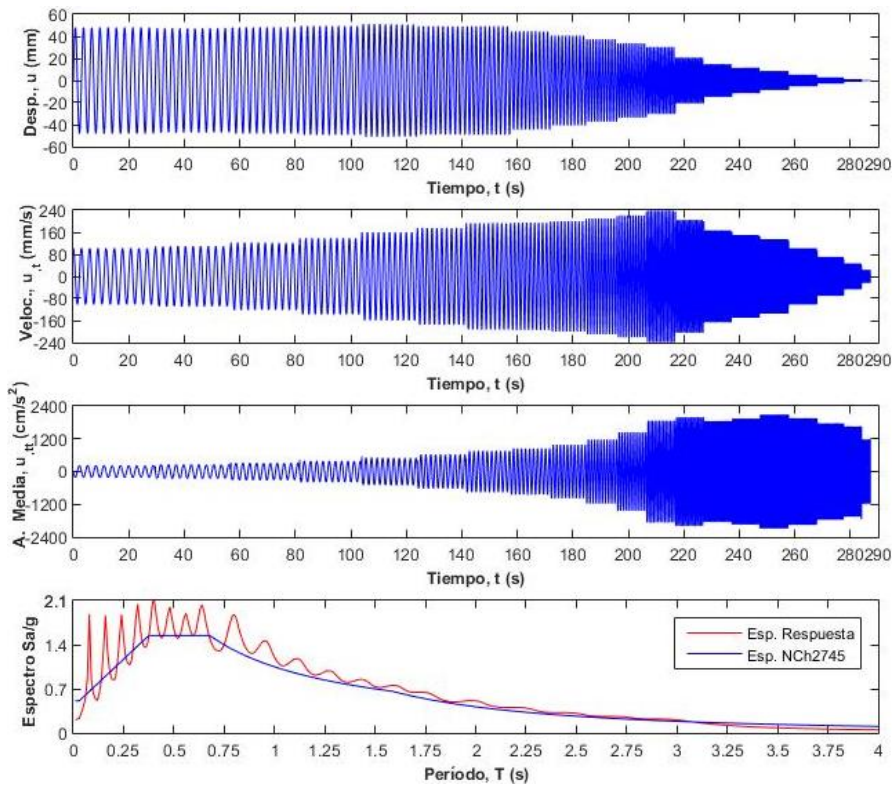
Se recomienda repetir los ensayos realizando cambios en el montaje experimental y ajustes en la programación del motor servo que acciona la mesa vibradora. En cuanto a la instrumentación, se recomienda prescindir en lo posible de sistemas de poleas móviles en los sensores de desplazamiento. De ser posible utilizando transductores de desplazamiento con recorrido sólo un poco mayor que el rango de deformación esperado, y cables de acero inextensibles. También se recomienda incluir sensorización con acelerómetros en forma redundante a los sensores de desplazamiento. El uso de ambos instrumentos permitiría medir con mayor precisión la respuesta estructural y de la mesa vibradora. Los sensores de desplazamiento serían más confiables para desplazamientos grandes y baja frecuencia de vibración, en cambio los acelerómetros medirían de manera más confiable los movimientos de alta frecuencia y baja amplitud. Motivados por lo anterior, la UCSC ha adquirido con fecha posterior al término de este proyecto, un set de 7

sensores de desplazamiento con recorridos entre de 10, 25 y 50 mm (Figura 16). Esto para poder repetir los ensayos en mejores condiciones y obtener resultados más confiables.



Figura 16: Instrumentos de medición de desplazamientos con recorridos entre de 10, 25 y 50 mm, adquiridos con posterioridad al término de este proyecto.

En cuanto al accionamiento de la mesa vibradora, luego del término de este proyecto se ha continuado trabajando en mejorar los protocolos de control de movimiento. A la fecha de envío del informe de cierre se ha logrado reproducir señales con frecuencias de hasta 12.5 hz (período de 0.08 s). Se logró resolver el problema de la limitación de aceleración máxima, pudiendo alcanzar un buen ajuste entre el espectro de respuesta de la señal efectivamente reproducida y el espectro de diseño de la normativa (Figura 17).



(a)

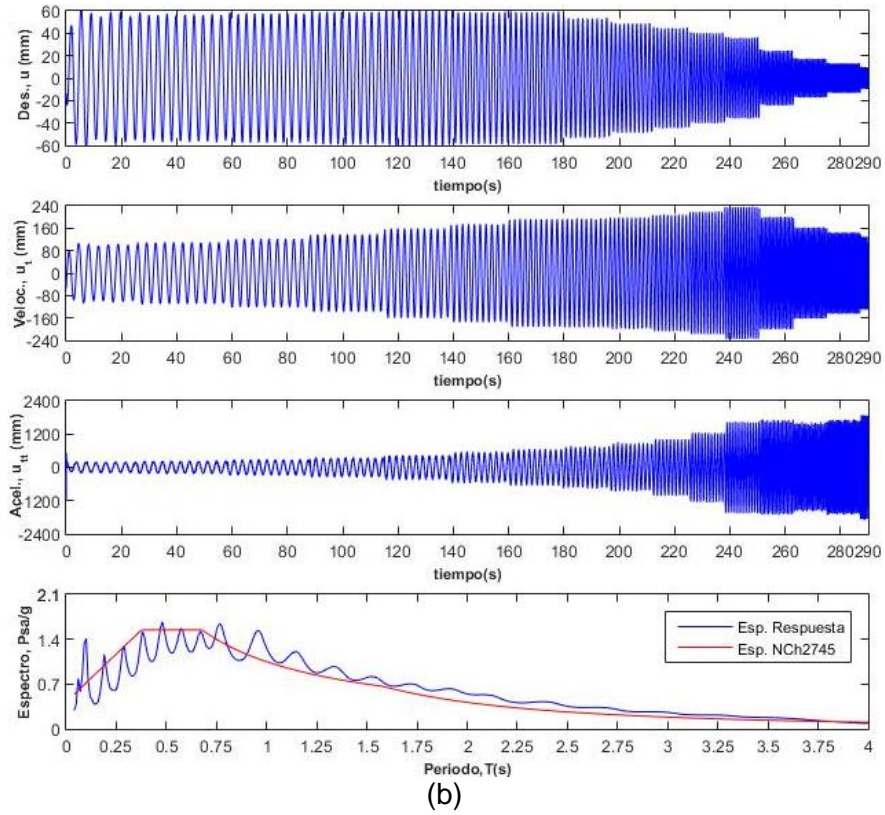


Figura 17: Mejoras en la señal de movimiento efectiva de la mesa vibradora. (a) aceleración de entrada, (b) aceleración efectivamente registrada, (c) ajuste del espectro de la señal medida con el normativo.

REFERENCIAS

- [1] Dumbrava, F. and Cerbu, C., 2020. Experimental Study on the Stiffness of Steel Beam-to-Upright Connections for Storage Racking Systems.
- [2] ICHA (2017). Bases técnicas para el diseño estructural de estantería metálica en Chile. Instituto Chileno de Acero, Santiago, Chile.
- [3] Catálogo de estantería. Racks y soluciones de almacenamiento. <http://www.meb.com.mx/#nuestros-clientes>
- [4] Petrovčič, S., & Kilar, V. (2012). Effects of horizontal and Vertical Mass-Asymmetric distributions on the seismic response of a high-rack steel structure. *Advances in Structural Engineering*, 15(11).
- [5] Bernuzzi, C. (2015). European and United States approaches for steel storage pallet rack design: Part 1: Discussions and general comparisons. *Thin-Walled Structures*, 97, 308-320.
- [6] Claudio Bernuzzi, Marco Simoncelli (2016). An advanced design procedure for the safe use of steel storage pallet racks in seismic zones. *Thin-Walled Structures*.
- [7] NCh2369 (2003), "Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales", Instituto Nacional de Normalización - INN, Chile.
- [8] EN 15512 (2009), Steel static storage systems - Adjustable Pallet Racking Systems – Principles for Structural design. European Committee for Standardization.
- [9] EN 16681 (2016), Steel Static Storage Systems - Adjustable Pallet Racking Systems - Principles for Seismic Design, European Committee for Standardization.
- [10] ANSI RMI MH 16.1: Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Storage Racks (2012). Racks Manufacturers Institute (RMI), American National Standard.
- [11] AS/NZS 4048: Steel storage racking. Standards Australia, 2012.
- [12] Maureira-Carsalade, N., Pardo, E., Oyarzo-Vera, C. and Roco, A., 2020. A roller type base isolation device with tensile strength.
- [13] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN). 2003. NCh 2745 Of2003; Análisis y diseño de edificios con aislamiento sísmica. Santiago, INN-Chile.