



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGON

**PRUEBAS EXPERIMENTALES EN MESA VIBRADORA DE
MARCOS DE ACERO CON CONTRAVENTEOS
RESTRINGIDOS AL PANDEO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LIC. INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

ERICK RAMIREZ HERNANDEZ



**DIRECTOR DE TESIS:
M. en I. Karla Ivonne Gutiérrez Vázquez**

Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Resumen

En esta tesis se presentan los resultados de un estudio experimental llevado a cabo en un modelo de laboratorio sometido a movimientos ligeros en la base. Este modelo constó de cinco marcos colocados en paralelo, los cuales soportaban dos losas rígidas de concreto reforzado en su parte superior; mismas que los conectaron. En cada marco se colocaron Contraventeos Restringidos al Pandeo (CRPs) de acuerdo a un protocolo de pruebas. Para cada prueba, se estimó la frecuencia de vibrar y el nivel de amortiguamiento. Esto con el fin de hacer una comparación y un análisis de los efectos de los Contraventeos Restringidos al Pandeo colocados en marcos sujetos a vibraciones de baja intensidad. Un aspecto importante que se debe remarcar es que tanto los CRPs como los marcos permanecieron en su intervalo elástico lineal, es decir, no se realizaron pruebas que indujeran respuesta inelástica en los marcos o en los CRPs.

Abstract

This thesis presents the results of an experimental study carried out in a laboratory model subjected to low-intensity ground movements. The model had five frames connected in parallel. They supported two rigid reinforced concrete slabs on their top; which connected them together. In each frame, Buckling Restrained Braces (BRBs) were placed, according to a defined testing program. For each conducted test, the frequency of vibration and the damping ratio were determined. This was done with the purpose of comparing and analysing the BRB effects on frame structures subjected to low-intensity ground motions. A relevant aspect to be stressed is the fact that all the test were conducted such that both the frames and the BRBs remained within their linear elastic level of response, i.e. no test that induced inelastic response were conducted.

Agradecimientos

En esto agradecimiento es necesario incluir a todas las personas que intervinieron para poder hacer realidad uno de los logros más importantes hasta el momento en mi vida.

Para empezar tengo que agradecer a las personas más importantes para llevar a cabo este logro, mis padres Telesforo Ramírez Álvarez y Guillermina Hernández Álvarez porque además del apoyo económico, al apoyo más importante fue el amor recibido, la dedicación y la paciencia con la que cada día se preocuparon por mi futuro. Mis padres que me alentaron a seguir adelante cuando el panorama se tornaba muy oscuro y cuando los ánimos para seguir con mis estudios estaban por los suelos. Sin miedo a equivocarme gracias a ellos he conseguido este objetivo que es titularme, ya que nunca dejaron de insistir en que el estudio siempre sería lo que me sacaría adelante. En general muchas gracias a toda mi familia que mucho o poco también aportaron su granito de arena para que este sueño se hiciera realidad.

Gracias a todos los maestros que formaron parte de mi formación durante toda mi estancia en la carrera, aportándome los conocimientos suficientes para poder ser lo que soy hasta ahora y con cuya colaboración de ellos puedo decir que me puedo titular como Licenciado en Ingeniería Civil.

Un agradecimiento muy grande a mis tutores de tesis, los Doctores Héctor Guerrero Bobadilla y José Alberto Escobar Sánchez, quienes fueron muy importantes para poder realizar los experimentos, los cuales fueron fundamentales para poder llevar a cabo esta tesis. Que gracias a la aportación de sus conocimientos y a su perseverancia conmigo fue posible concluir esta tesis.

Por último y no por eso menos importante, un agradecimiento para mi casa de estudios la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Estudios Superiores Aragón y el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Estas instituciones fueron parte muy importante en mi

vida ya que gracias a sus instalaciones y recursos, tuve la oportunidad de estudiar y de formarme profesionalmente

Contenido

1	Introducción	1
2	Revisión bibliográfica.....	4
2.1	Sistemas de protección sísmica	5
2.2	Disipadores de energía sísmica.....	6
2.3	Contraventeos restringidos al pandeo (CRPs)	7
2.4	Estudios previos de CRPs	9
3	Descripción de equipo de pruebas.....	11
3.1	Mesa Vibradora.....	11
3.2	Contraventeos Restringidos al Pandeo (CRPs) utilizados en el experimento.	13
3.2.1	Análisis del comportamiento del contraventeo aislado.....	15
3.3	Modelo de marcos	15
3.3.1	Dimensiones y colocación	16
3.3.2	Apoyos	17
3.3.3	Masas.....	17
3.4	Conexión de CRPs	20
4	Descripción de los Experimentos	21
4.1	Instrumentación de dispositivos.....	21
4.1.1	Acelerómetros	21
4.1.2	Transductores de desplazamientos.....	24
4.2	Programa de pruebas.....	26
4.3	Leyes de similitud.....	27
5	Resultados experimentales	28

5.1	Metodología.....	28
5.2	Resultados.....	30
5.2.1	Prueba 1, modelo sin CRPs	30
5.2.2	Pruebas 2 con contraventeo convencional	32
5.2.3	Prueba 3, utilizando un CRP	35
5.2.4	Prueba 4, modelo con 2 CRP.....	37
5.2.5	Prueba 5, modelo con 3 CRPs.....	39
5.2.6	Prueba 6, con 3 CRPs en el modelo	42
5.2.7	Prueba 7, se colocaron 4 CRPs en el modelo	44
5.2.8	Prueba 8, modelo con 5 CRPs.....	46
5.3	Resumen de resultados experimentales	48
6	Conclusiones y recomendaciones	51
7	Referencias	53

1 Introducción

1.1 Justificación

En la actualidad el diseño de estructuras para un ingeniero civil es cada vez más exigente; primordialmente en edificaciones. Debido al incremento en la población mundial estos cada vez deben ser más altos y por lo tanto más esbeltos. Por lo que se vuelve de suma importancia la evaluación dinámica de las estructuras, pues queda demostrado que un análisis estático en ocasiones no llega a ser lo suficientemente seguro para mantener una buena solidez en las estructuras(1).

Aunado a esto, un punto muy importante para el diseñador estructural, es que las estructuras cumplan con tres objetivos importantes: que sean seguras, sustentables y económicas. De acuerdo con esto, se reconoce la importancia que tienen los dispositivos de disipación de energía sísmica en una estructura.

El buen diseño de una edificación puede otorgar un buen desempeño de ésta ante solicitudes de cargas accidentales (cargas de viento y sismo) y, al mismo tiempo, un mayor nivel de seguridad para sus habitantes(1).

Dado que la resistencia lateral es una propiedad muy importante en el diseño, se ha llegado a tener casos en donde las estructuras llegan a ser demasiado robustas. Es por esto que el uso de disipadores sísmicos en una edificación otorga grandes beneficios. Esto debido a que provoca decrementos considerables en la cantidad de insumos usados en la construcción; por lo que se llega a tener columnas más esbeltas y trabes con menor peralte; obteniendo una ejecución de obra más económica sin sacrificar el buen diseño del edificio.

1.2 Objetivos de la tesis

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es evaluar los cambios en las propiedades dinámicas (frecuencia de vibrar y amortiguamiento) de un modelo estructural compuesto por cinco marcos trabajando en paralelo, equipados con disipadores de energía sísmica del tipo contraventeos restringidos al pandeo (CRPs) ante movimientos en la base de baja intensidad y respuesta elástica lineal.

1.2.2 Objetivos particulares

- Realizar experimentos de modelos de marcos en la mesa vibradora de la UNAM
- Estudiar las características de los CRPs
- Entender los efectos de los CRPs en las propiedades dinámicas de modelos de marcos.
- Medir la influencia del número de CRPs colocados en un modelo de marcos.

1.3 Alcances

Los experimentos fueron realizados en el Laboratorio de la Mesa Vibradora del Instituto de Ingeniería de UNAM. El modelo ensayado representa una construcción de un nivel con cinco marcos trabajando en paralelo, conectados con losas rígidas de concreto reforzado y con columnas relativamente esbeltas. Las dimensiones del modelo ensayado tienen una escala de 1/3. En el experimento, se realizaron diferentes tipos de movimientos, tanto sísmicos, como ruidos blancos de diferentes intensidades. El propósito de esta tesis se

enfoca en presentar las propiedades dinámicas del modelo ante movimientos en la base de tipo ruido blanco con una intensidad de 10 gals (cm/s^2). Adicionalmente se hizo un análisis del modelo con la adaptación de un contraventeo convencional, para para medir su respuesta dinámica y compararlo con un CRP.

Todas las partes que intervienen en el modelo estudiado se realizaron para el uso exclusivo del experimento, tanto las losas de concreto, los marcos, etc., a excepción de los Contraventeos Restringidos al Pandeo. Estos últimos se utilizaron en un experimento previo a este, pero se encuentran en buenas condiciones. Y por lo tanto, se decidió utilizarlos en estos experimentos

1.4 Resumen breve del contenido de la tesis

En el capítulo 2 se hace una revisión bibliográfica sobre estudios que preceden a esta tesis. Se revisa información que es de utilidad para el entendimiento de los experimentos.

En el capítulo 3 se hace una descripción de la realización de cada una de las partes del modelo ensayado completo, los materiales que se utilizaron y su función de cada uno de ellos. También se crea una breve reseña de las herramientas utilizadas y del laboratorio de la mesa vibradora de la UNAM.

En el capítulo 4 se hace una descripción del protocolo de movimientos impuestos al modelo y la colocación y función de cada de los equipos de medición colocados alrededor del mismo.

Más adelante, en el capítulo 5, se muestran los resultados de los experimentos y se hace una comparación de los mismos.

Por último, en el capítulo 6 se muestran las conclusiones y recomendaciones de esta tesis para futuro proyectos.

2 Revisión bibliográfica

En este capítulo se hará una revisión de los avances más recientes sobre disipadores de energía sísmica, dándole mayor énfasis a los contraventeos restringidos al pandeo (CRPs). De esta manera el lector entenderá la relevancia de esta tesis y del estudio de disipadores sísmicos en general.

Con el paso de los años en la profesión de un ingeniero civil constantemente se enfrenta a nuevos retos debido a las limitaciones económicas, cambios climáticos, demandas del cliente, problemas con el terreno, etc. El propósito de un ingeniero civil es poder dar solución a cada uno de estos problemas de forma segura, económica y sustentable.

En la actualidad, debido al aumento en la población, las manchas urbanas en el mundo son cada vez más extensas, lo que provoca que cada vez exista menos superficie para poder construir. Es por esto que muchas de las edificaciones actuales son más grandes y esbeltas, lo que requiere un análisis más detallado para entender su comportamiento.

Aunque muchas veces el análisis estático de la estructura es suficiente para entender el comportamiento estructural, es importante hacer análisis dinámicos para poder dar una mejor seguridad a la estructura; pues en el pasado, muchas estructuras han fallado por no considerar los efectos dinámicos. Un ejemplo muy conocido es el puente Tacoma(2).

2.1 Sistemas de protección sísmica

Es muy importante el estudio de sistemas de protección sísmica, sobre todo en países con un índice alto de sismicidad como: Chile, Japón, Estados Unidos, México, etc. Debido a esto el estudio de estos dispositivos se ha vuelto de suma importancia para los investigadores.

Existen tres tipos de sistemas de protección sísmica: activa, semi-activa y pasiva. A nivel mundial los sistemas de protección pasiva son los más utilizados debido a su gran respuesta ante movimientos sísmicos y a que son económicamente aceptables(3). Los dispositivos pasivos son elemento de carácter reactivo, cuya respuesta no es controlable y depende únicamente de las condiciones de trabajo en que se encuentren. En esta categoría entran los aisladores de energía sísmica y los disipadores de energía sísmica que se activan al momento de un esfuerzo dinámico en la estructura. En general este tipo de protección está enfocado a reducir la respuesta dinámica de las estructuras, a través de sistemas mecánicos diseñados para disipar energía a través del calor(3). Permiten mejorar la respuesta aumentando los periodos y proporcionando amortiguamiento y absorción de energía adicional y de esta forma reduciendo sus deformaciones.

Los aisladores sísmicos se encargan de separar la interacción suelo estructura para evitar que se transmitan vibraciones importantes producidas por un sismo. Esto se logra mediante dispositivos estructurales que son capaces de absorber grandes cantidades de deformación sin que esta sea transmitida a la estructura. La desventaja de un aislador sísmico es que no actúan ante cargas de viento a diferencia de los disipadores que si lo hacen.

2.2 Disipadores de energía sísmica

Para proteger una estructura se sugiere que durante la ocurrencia de un evento sísmico las demandas máximas de deformación sean del orden de 50% al 60% de su deformación última(4). Esto ha dado lugar a diseños de dispositivos de disipación de energía pasiva, evitando daños a la estructura principal. Este tipo de disipadores de tipo pasivo a diferencia de los activos, no requieren del suministro externo de energía eléctrica. Las diagonales o contraventeos se les conoce con el concepto de fusible estructural. Ya que se busca que al momento de una carga accidental, movimiento sísmico o cargas de viento, estos dispositivos reciban el mayor esfuerzo y si es posible el esfuerzo en su totalidad y así minimizar el posible daño estructural. Al ser dispositivos externos a la estructura principal estos pueden ser removidos y reemplazados, si así lo requieren.

Los disipadores de energía, a diferencia de los aisladores, no evitan que las ondas sísmicas sean transmitidas a la estructura. Estos dispositivos se encargan de absorber la energía que es transmitida a la estructura durante un sismo de tal manera que busca reducir los daños en los elementos estructurales principales(5).

Los disipadores de energía se pueden clasificar según su modo de activación y esto es por(5):

- a) Velocidad:
- b) Desplazamiento
- c) Velocidad y desplazamiento

También se clasifica por su tipo de arreglo que se pueden utilizar en una construcción: estos pueden ser en diagonal o tipo Chevron. El uso de uno u otro dependerá de la forma de la estructura, pero sobre todo del criterio del diseñador estructurista y del arquitecto.

El caso de un contraventeo en un sistema estructural tiene un papel muy importante en edificaciones grandes y esbeltas para soportar cargas sísmicas y de viento. Es un dispositivo estructural que ayuda a mejorar la respuesta de la estructura ante cargas horizontales y que ayuda a dar mayor rigidez a las estructuras. Los contraventeos disminuyen las solicitaciones de servicio en elementos como vigas y columnas recibiendo estos la mayor parte del trabajo al momento de un movimiento sísmico.

2.3 Contraventeos restringidos al pandeo (CRPs)

El estudio sobre contraventeos restringidos al pandeo fue desarrollado en los años 80's en Japón y, a raíz de esto, ha sido empleado en una gran cantidad de edificios(6).

Sus componentes principales son: el núcleo de acero, material aislante, el material de confinamiento del núcleo (regularmente mortero) y un tubo de acero que ayuda al material de confinamiento a impedir el pandeo del núcleo. En la figura 2.1 se puede observar la forma regular ordinaria de un BRB.

El objetivo del material aislante es evitar la fricción entre el núcleo y el material envolvente y tiene que aportar el espacio suficiente para permitir que el área transversal del núcleo se expanda al comprimirse. Este material tiene que ser resistente al efecto de deslizamiento que se presente en el dispositivo al momento de la prueba(4).

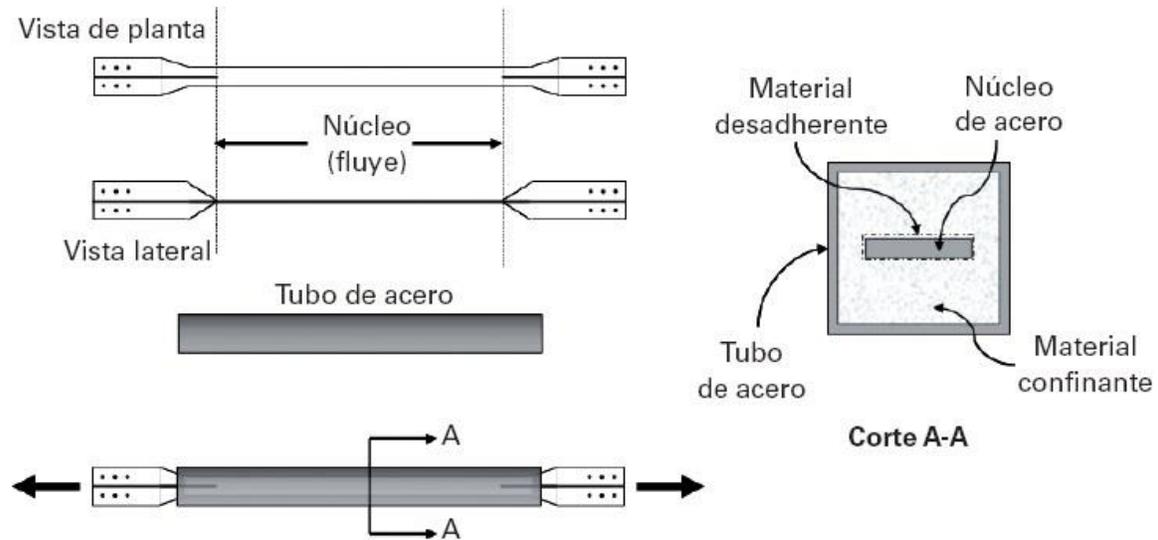


Figura 2.1 Descripción de Contraventeo Restringido al Pandeo (7)

El CRPs trabaja a través de la fluencia del núcleo de acero, ya que cuando llega a su comportamiento inelástico empieza a absorber energía en sus deformaciones plásticas. Un dispositivo que disipa energía en base a fluencia debe tener un ciclo histerético altamente estable en presencia de deformaciones inelásticas importantes(3). Un disipador histerético se comporta elásticamente para resistir las cargas inducidas a este, trabajando generalmente en el rango inelástico cuando es sometido a grandes esfuerzos. El confinamiento del núcleo de acero es esencial para prevenir el pandeo de Euler por efectos de esbeltez cuando este es sometido a cargas de compresión(4). El material aislante es importante para impedir la adherencia del núcleo con el material de confinamiento y con esto dar paso a que el núcleo absorba energía a la hora de estar expuesto a las fuerzas de compresión.

El CRPs funciona como un fusible dentro de la estructura ante una descarga de energía sísmica, ya que al momento de un sismo el contraventeo recibe el daño y si los daños son irreversibles, el CRP puede ser remplazado de manera sencilla. De esta forma se evitan daños a la estructura principal del edificio.

El CRPs es un disipador de energía de comportamiento histerético ante cargas cíclicas o que varían en el tiempo, el cual depende del desplazamiento para trabajar a su máxima capacidad. Los CRP se les clasifican como sistemas pasivos de disipación de energía sísmica(3). En la actualidad estos dispositivos son muy utilizados ya que son económicos y no necesitan la intervención de algún tipo de energía externa para funcionar, como en el caso de los disipadores de energía.

2.4 Estudios previos de CRPs

Después de la invención del CRP, los países de Estados Unidos y Japón son los que más interés han mostrado en su investigación. Esto debido a su alto grado de sismicidad que afecta gran parte de su territorio.

Por su parte en México, aun siendo un país con una de las ciudades más afectadas por terremotos, además de estar en una zona de lago, tiene pocos avances en este tipo de tecnologías. Por lo que para poder emplear este tipo de dispositivos es necesario hacer uso de patentes provenientes de otros países. En la actualidad, universidades como la UNAM y la UAM han hecho algunos estudios sobre esta tecnología, aunque es su mayoría son pruebas de forma aislada.

En un estudio elaborado por la UAM (4) se llevaron a cabo experimentos en CRPs variando la forma geométrica del núcleo y el material aislante con que se trabajó, de tal forma de encontrar el mejor comportamiento en los dispositivos. Los resultados de este trabajo dieron una buena estabilidad en su curva histerética; con una resistencia a la compresión y a la tensión similar, principalmente en CRPs con núcleos de doble ángulo con placas de refuerzo en los extremos (4).

Existe también el estudio analítico llevado a cabo por Terán (8), donde plantea una metodología sencilla para el dimensionado de un sistema de contraventeo para edificios altos resistente a sismos, basado en la rigidez de los elementos estructurales (8).

Otro estudio fue hecho en la mesa vibradora de la Universidad Nacional Autónoma de México, por Guerrero et al (9). Este experimento se basa en un modelo de cuatro niveles fabricado a base de elementos prefabricados de concreto, equipado con CRPs en cada nivel (9). En este documento se crea un protocolo de movimientos a base de ruidos blancos, para medir las propiedades dinámicas de la estructura, y movimientos sísmicos para medir su capacidad para resistir movimientos telúricos fuertes (9). El propósito de este estudio fue proporcionar evidencia experimental sobre el comportamiento de estructuras de concreto reforzado equipadas con CRPs, pues este tipo de experimentos no se habían realizado con anterioridad.

En estudio realizado por Takeuchi (6) se hizo un análisis de los elementos que componen un CRP, variando el espesor y forma geométrica del tubo que restringe el pandeo, variando también el espesor de concreto y el área transversal de núcleo. El protocolo de pruebas se divide en tres tipos: prueba monotónica, pruebas cíclicas y pruebas cíclicas colocando el CRPs de forma diagonal. El propósito de esta última prueba, fue poder obtener resultados más realistas simulando la colocación en un marco de forma diagonal y, de esta forma, poder medir el efecto de torsión de los extremos de CRPs (6).

G. Palazzo (10) realizó el proceso de diseño, análisis y pruebas de CRPs con el propósito de contribuir al mejor entendimiento de su comportamiento estructural y, con eso, proponer CRPs económicos y simples, pero a la vez eficientes para futuras aplicaciones (10). Estas pruebas demostraron lo relativamente sencillo que es elaborar un CRP, además de otorgar un comportamiento histerético estable en los dispositivos.

Después de la revisión bibliográfica, se puede observar que el uso de CRPs ha aumentado debido a su gran capacidad para disipar energía; además de ser económicos tanto en su producción como en su implementación en edificaciones en general. Esto hace que se siga desarrollando investigación en el tema y, de esta forma, poder seguir innovando en este tipo de tecnologías de bajo costo.

3 Descripción de equipo de pruebas

Los experimentos que se describen en esta tesis, fueron elaborados en el laboratorio de la Mesa Vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En este capítulo se describen las características generales de la mesa vibradora, así como los aparatos de instrumentación y la función que desempeñan en el experimento. También se describe la colocación y las características de los de los CRPs y marcos utilizados.

3.1 Mesa Vibradora

La mesa vibradora es un laboratorio que pertenece al Instituto de Ingeniería de la UNAM, que depende de la coordinación de Estructuras y Materiales. Aunque la mesa es un poco antigua, esta tiene la capacidad suficiente para trabajar con modelos de escalas importantes. El trabajo que permite realizar, es la simulación de movimientos sísmicos de diferentes intensidades.

Fue fabricada por la empresa MTS Systems Corporation de EUA y fue donada al Instituto de Ingeniería por el Kajima Technical Research Institute, el cual lo eligió de entre ocho

instituciones postuladas como donatarias, que fueron: las universidades de Princeton, California (Irvine) y Minnesota, en EUA; la Universidad de Columbia Británica, en Canadá; la Universidad de Chile; la Universidad Bogazici, en Turquía; el Instituto Torroja-Aires, en España; y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en México ([11](#)).

Los estudios que se pueden realizar tienen que ver con la respuesta dinámica de las estructuras, la demostración de validez de conceptos estructurales, el desarrollo y validación de modelos analíticos, y la evaluación y validez del comportamiento de equipo mecánico, eléctrico, electrónico y de comunicaciones ante sismos ([11](#)). En esta tesis, la actividad que nos interesa es el de estudio de la respuesta dinámica de elementos y sistemas estructurales.

La mesa vibradora está compuesta por orificios barrenados para poder conectar las estructuras a ensayar. Dichos orificios están a 150 mm de separación y tienen un diámetro de 25 mm.

Las características de la mesa vibradora son las siguientes ([11](#)):

- Cuarto de máquinas con un par de unidades de potencia con bombas de pistón y flujo variable
- Sistema de adquisición de datos de 96 canales de captura.
- Cinco grados de libertad: (2 desplazamientos y 3 rotaciones)
 - Desplazamiento horizontal máximo: +/- 150mm
 - Desplazamiento vertical máximo: +/- 75mm
 - Velocidad horizontal máxima (movimiento uniaxial)= 1100 mm/s
 - Velocidad vertical máxima (movimiento axial)=450 mm/s
- Dimensiones de 4m x 4m
- Peso de plataforma: 8.5ton
- Peso máximo que soporta: 20 ton
- Aceleración:

- Horizontal máxima de 1g con un modelo de 20 ton y un momento de volteo de 100 t-m
- Vertical máxima de 1g con un modelo de 20 ton y un momento de volteo de 100t-m
- Intervalo de frecuencia: de 0.1 a 50 Hz
- Grúa viajera de 10 ton de capacidad.

3.2 Contraventeos Restringidos al Pandeo (CRPs) utilizados en el experimento.

Los contraventeos utilizados para estas pruebas tienen núcleo de acero S275 (proveniente de Europa) de sección rectangular; cuyo núcleo fue cortado con láser para proveer una geometría al núcleo del contraventeo, similar a aquella de los disipadores comerciales(9).

Las partes del CRPs utilizados en los experimentos se muestran en la Figura 3.1, y son:

- a) Núcleo de acero de sección rectangular. Más delgada en el centro y más ancha en los extremos con seis perforaciones de 3/8" en sus extremos.
- b) Cuatro placas de conexión Marco-CRPs con seis perforaciones de 3/8" en cada extremo.
- c) Material de politetrafluoroetileno que sirve para desmoldar el acero del mortero con una capa delgada de 0.4mm.
- d) Tubo interno de sección cuadrangular relleno totalmente de mortero para confinamiento del núcleo de acero
- e) Dos tubos exteriores de sección cuadrangular rellenos hasta la mitad de mortero para recubrimiento de las placas de conexión.

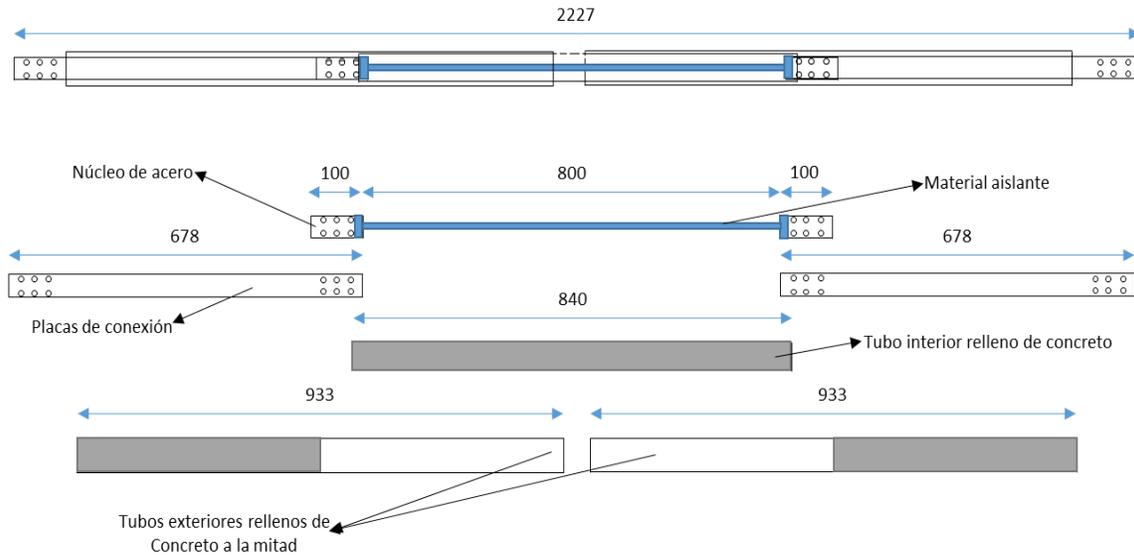


Figura 3.1 Partes y dimensiones de los CRPs utilizados en los experimentos.

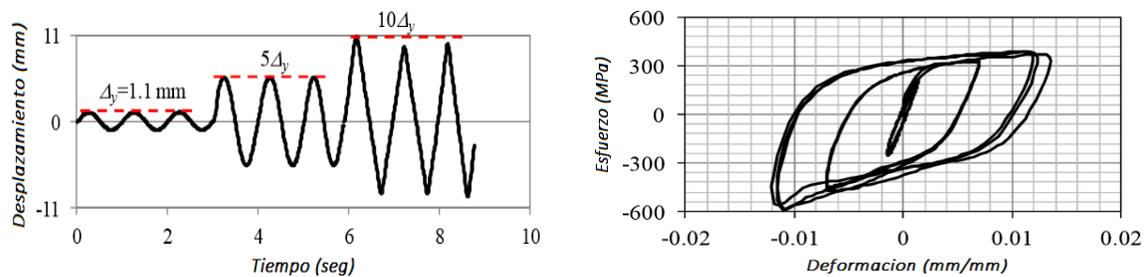
Para la fabricación de un CRP, se coloca una capa del material aislante en todo el núcleo excepto en sus extremos, se introduce al tubo interno dejando por fuera sus extremos y por último se rellena de concreto. Se hace la unión del núcleo con las placas de conexión, dos de cada lado. Por último se introducen las uniones en los dos tubos exteriores y se llenan de mortero hasta la mitad.



Figura 3.9 Contraventeos ensamblados

3.2.1 Análisis del comportamiento del contraenteo aislado

En estudios previos a esta tesis se realizaron pruebas de dos CRPs aislados (uno con núcleo rectangular y otro con núcleo circular), para determinar su comportamiento individual. La figura 3.2a muestra los desplazamientos aplicados de manera cuasi-estática; mientras que la figura 3.2b muestra la curva esfuerzo - deformación resultante del CRP de núcleo rectangular ante dichas cargas (9). El núcleo de forma circular tuvo un comportamiento muy similar aunque no fue reportado (9).



a) Cargas cíclicas

b) Curva esfuerzo-deformación

Figura 3.2. Respuesta de CRPs ante cargas cíclicas (9).

Como se puede observar en la figura 3.2b la capacidad del CRP es más grande en tensión que en compresión (9). Lo cual ya se ha observado en varios resultados experimentales realizados anteriormente (ver (6), (8) y (10)).

3.3 Modelo de marcos

En esta sección se muestra una descripción del modelo ensayado, así como el proceso de instalación de marcos en la mesa vibradora y sus dimensiones.

3.3.1 Dimensiones y colocación

Los marcos se fabricaron a base de perfiles tipo PTR. En la elaboración de los marcos se utilizó acero A-36 para los perfiles y las placas de conexiones correspondientes, que fueron unidas con soldadura. El perfil fue de 5cm por 5cm como dimensiones transversales con un espesor de pared 3mm.

Los marcos, mostrados en la Figura 3.3, tenían una altura de 1.60m por 1.85m de ancho. Estos marcos fueron colocados de forma paralela al sentido de la aplicación de los movimientos en la base, con una separación de 60cm entre cada uno de ellos. Las placas, que estaban colocadas en las esquinas de los marcos que se observan en la figura 3.3, tenían el propósito de conectar los disipadores, aunque también proporcionaban rigidez al marco.



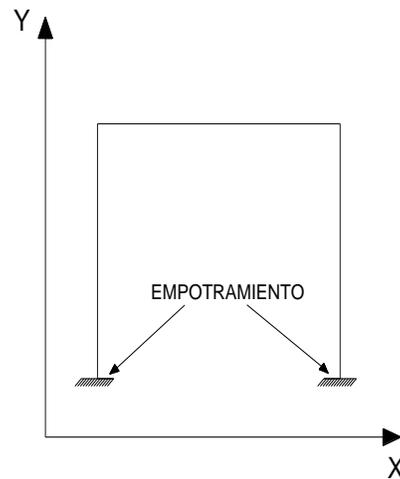
Figura 3.3 Modelo colocado en plataforma de la mesa vibradora.

3.3.2 Apoyos de marcos

La base de los marcos fue soldada con una placa de acero con perforaciones en sus extremos. Esto para realizar la conexión de los marcos a la plataforma de la mesa vibradora. En la figura 3.4 se puede observar el apoyo del marco. Las conexiones en los apoyos de los marcos de acero con la mesa vibradora se realizó con rondanas y tornillos de 1 pulgada.



a) Apoyos



b) Orientación

Figura 3.4 Fijación de los marcos a la plataforma.

3.3.3 Masas

Se utilizaron losas de concreto para imponer carga al modelo. Esto se hizo para dar mayor inercia durante el movimiento. Las losas fueron fabricadas con concreto reforzado y fueron coladas para una resistencia aproximada de 250 kg/cm^2 . Se les colocaron ganchos

de alambrcn para poder ser transportadas. Las dimensiones de estas losas son de 3m x 0.8m x 0.2m. Aunque las losas tenan las mismas dimensiones, su peso varió ligeramente; siendo la primera losa de 1,061 kg y la segunda de 1,080 kg; lo cual fue medido utilizando una celda de carga.

En la figura 3.5 se observa un material deformable sobre los marcos de acero. Este tuvo la finalidad de dar un área de contacto uniformemente repartida cuando las losas fueron colocadas sobre el modelo. Esto se realizó porque, como es normal, las losas de concreto presentan imperfecciones. El material deformable es amarrado para evitar su deslizamiento o caída del marco.



Figura 3.5 Material deformable colocado entre los marcos y las losas.

Se colocaron las dos losas de concreto sobre los marcos de acero (ver figura 3.6) con la ayuda de una grúa viajera. Las losas se colocaron simétricamente, de tal forma que cada marco tuviera la misma área tributaria y con ello garantizar que su carga sea similar para los cinco marcos. Con las losas de concreto, el modelo se puede idealizar como una

estructura simple, con una masa de concreto y piso rígido soportada por columnas ligeras de acero.



Figura 3.6 Colocación de losas de concreto.

Debido a los movimientos generados durante el experimento, fue necesario conectar las losas de concreto a los marcos, como se aprecia en la figura 3.7. La conexión se estableció por medio de ángulos, placas de acero y espárragos; evitando desplazamientos relativos entre las losas y los marcos, ante los movimientos de las pruebas.



Figura 3.7 Fijación de losas de concreto en marcos de acero.

3.4 Conexión de CRPs

Se hicieron perforaciones de las placas de acero (ubicadas en la esquina superior e inferior de los marcos) para la conexión de los CRPs. En cada marco se colocó un contraventeo. El número de contraventeos se instalaran de acuerdo al programa de pruebas, que se describe más adelante.



Figura 3.9 Conexión marco-contraventeo.

4 Descripción de los Experimentos

En este capítulo se describen las pruebas que se realizaron para la elaboración de esta tesis, así como la instrumentación correspondiente.

4.1 Instrumentación de dispositivos

La instrumentación en los macos fue empleada para medir desplazamientos y aceleraciones de la estructura para poder calcular las propiedades dinámicas del modelo (frecuencia de vibrar y amortiguamiento) para cada una de las pruebas.

4.1.1 Acelerómetros

Los acelerómetros son dispositivos que se utilizan para medir las vibraciones o las aceleraciones. La fuerza generada por la vibración o el cambio en el movimiento (aceleración) hace que la masa comprima el material piezoeléctrico, generando una carga eléctrica que es proporcional a la fuerza ejercida sobre él ([12](#)). Estos se conectaron a los canales 2, 3, 4, 5, 6 y 8 del sistema de adquisición de datos de la mesa vibradora. Los

acelerómetros utilizados en el experimento son del tipo SETRA Modelo 411. Este aparato mide aceleraciones lineales que van desde la posición estática hasta los 3000 Hz de frecuencia (12).

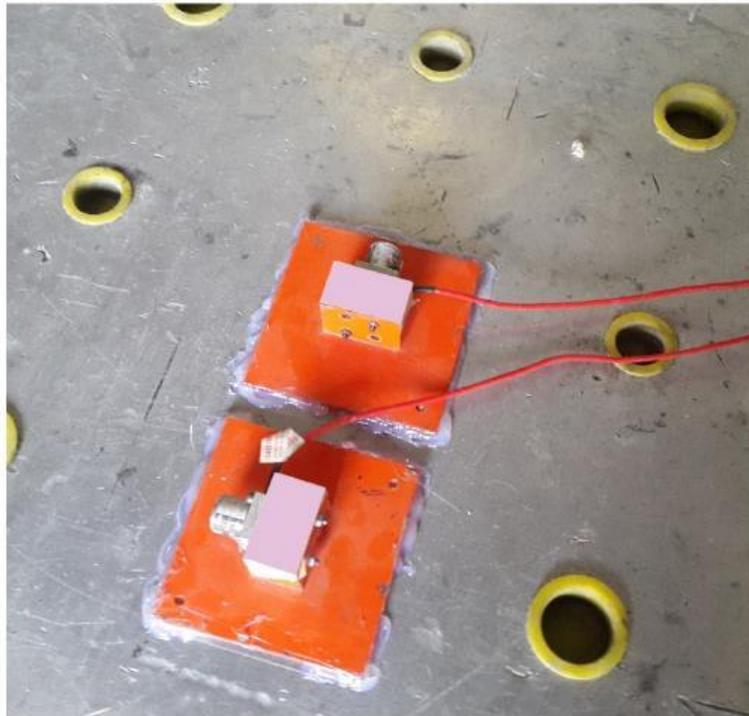


Figura 4.1. Acelerómetros utilizados en los experimentos.

Se colocaron acelerómetros en la base de la mesa vibradora y en las losas de concreto como se ve en la figura 4.2. En la base de la mesa vibradora se colocaron 2 acelerómetros al centro. El acelerómetro A1 se colocó en el sentido de las pruebas (eje X) y A2 en dirección perpendicular (eje Y) como se muestra en la figura 4.2a. En las losas de concreto se ubicaron cuatro acelerómetros más, como se ve en la figura 4.2b. En el sentido de las pruebas (eje X) se ubicaron los aparatos A3, A4 y A6 de manera continua, yendo de atrás hacia adelante y en medio de las losas. El acelerómetro A5 se colocó al centro de las losas en el sentido del eje Y.

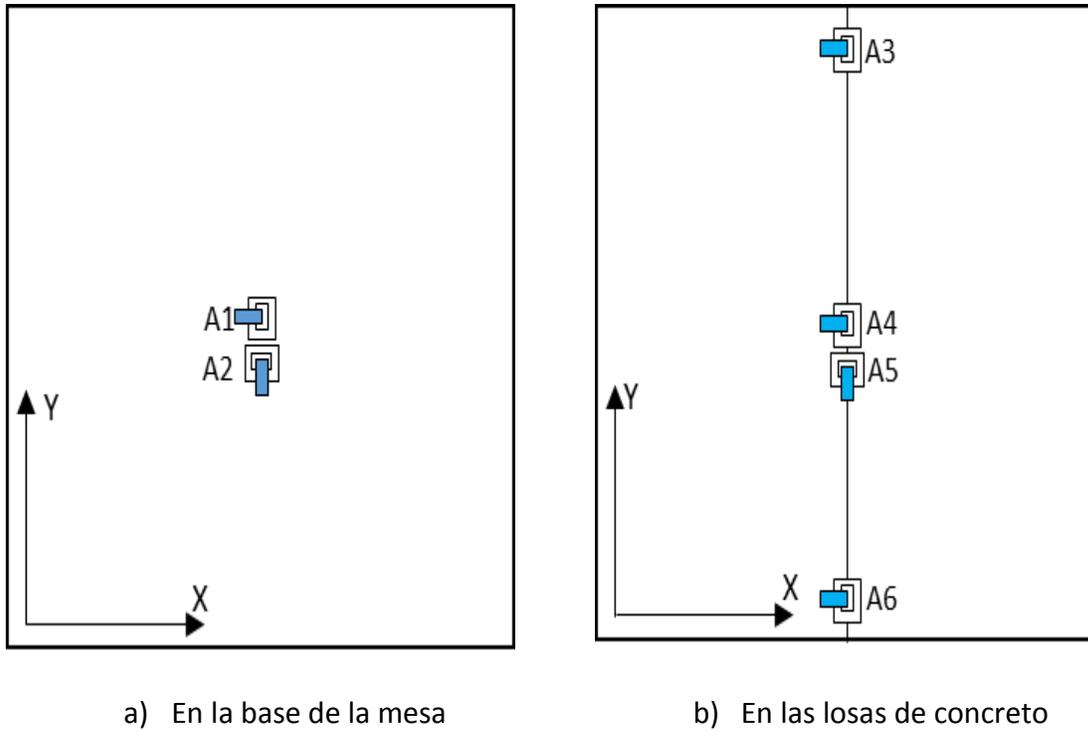


Figura 4.2. Ubicación de acelerómetros.

En la tabla 4.1 se puede observar la conexión de cada acelerómetro con el canal correspondiente al panel de adquisición de datos de la mesa vibradora.

Tabla 4.1 Ubicación y conexión de acelerómetros.

Nivel	Acelerómetros	Canal
Base	A1	2
	A2	3
	A3	6
Losa	A4	4
	A5	8
	A6	5

4.1.2 Transductores de desplazamientos

Un transductor de desplazamientos (LVDT por sus siglas en inglés) es un dispositivo que se encarga de medir el voltaje de salida de corriente alterna proporcional al desplazamiento de su núcleo (13).

Se colocaron cinco LVDTs en el modelo, estos fueron conectados al sistema de adquisición de datos de la mesa vibradora. De los cinco LVDTs, tres fueron conectados en los contraventeos 1, 3 y 5 como se ve en la figura 4.3. Esto para medir sus desplazamientos relativos y de esta forma, estimar el nivel de demanda en ellos. Otros dos LVDTs se colocaron lateralmente en los marcos 1 y 5 (figura 4.5), para medir desplazamientos laterales del modelo.

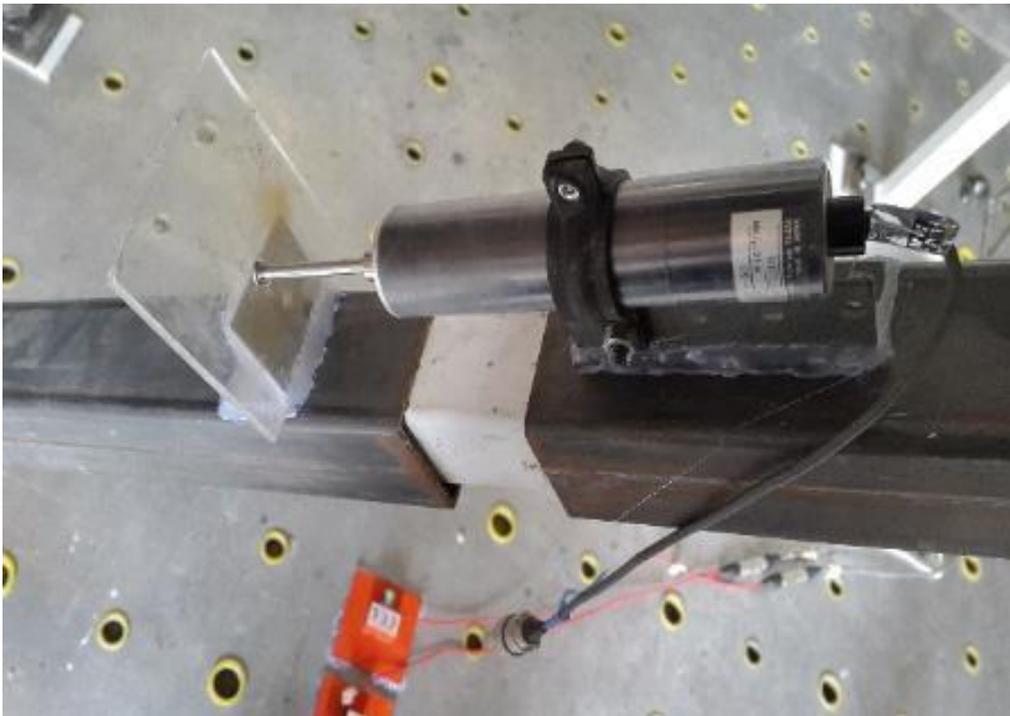


Figura 4.3 Dispositivo tipo LVDT.

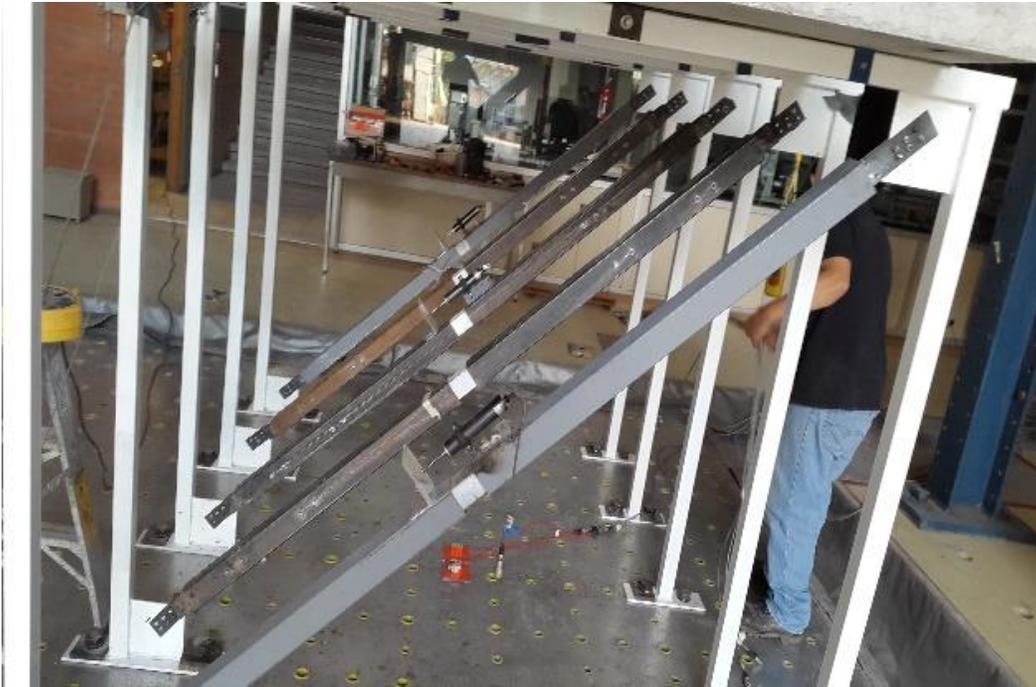


Figura 4.4 LVDTs en contraventeos.



Figura 4.5 LVDT en una de las esquinas de uno de los marcos.

4.2 Programa de pruebas

El programa de pruebas está diseñado para medir la respuesta dinámica del modelo ante los movimientos inducidos en la base, variando el tipo de arreglo y el número de contraventeos colocados.

El tipo de movimientos de entrada que se utilizó para las pruebas fueron ruidos blancos de 10 gal (cm/s²) de intensidad. Un ruido blanco es un tipo de movimiento con una señal aleatoria que contiene un intervalo de frecuencias con la misma probabilidad de ocurrencia para todo el intervalo.

La tabla 4.2 muestra el protocolo de pruebas. Primero se colocó una prueba sin contraventeos, es decir, solo con marcos. Después se colocó un contraventeo tradicional en el marco de en medio (marco 3). Posteriormente, el contraventeo tradicional se reemplazó por un CRP. Enseguida se retiró el CRP del marco 3 y se colocaron 2 CRPs, uno en el marco 1 y otro en el 5. Posteriormente el número de CRPs se aumentó de manera subsecuente como se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Programa de pruebas.

No. de prueba	No. de diagonales	Descripción
1	0	Sin contraventeos
2	1	Se colocó 1 contraventeo convencional en el marco 3
3	1	Se colocó un CRP en el marco 3
4	2	Se colocaron CRPs en los marcos 1 y 5
5	3	Se colocaron CRPs en los marcos 2, 3 y 4
6	3	Se colocaron CRPs en los marcos 1, 4 y 5
7	4	Se colocaron CRPs en los marcos 1, 2, 4 y 5
8	5	Se colocaron CRPs en los marcos 1, 2, 3, 4 y 5

4.3 Leyes de similitud

Para la realización de los experimentos se hizo uso de la teoría del modelamiento dadas las limitaciones del equipo de prueba. Se seleccionó un factor geométrico de $1/3$ y se desarrollaron las leyes de similitud correspondientes. De esta manera se obtienen factores que relacionan las propiedades del modelo con una estructura a escala real. Los factores de escala que se obtuvieron son mostrados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Leyes de similitud del experimento.

Propiedades físicas	Factor para pasar a escala completa	Factor para pasar a escala del modelo reducido
Distancia	3	$1/3$
Área	3^2	$1/3^2$
Momento de inercia	3^4	$1/3^4$
Masa por área	1	1
Modulo elástico	1	1
Esfuerzo	1	1
Periodo de vibración	$\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$
Medida de Tiempo	$\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$
Desplazamientos	3	$1/3$
Velocidad	$\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$
Aceleración	1	1

5 Resultados experimentales

En este capítulo se presentan los resultados del comportamiento de la estructura ante los movimientos de la mesa vibradora para cada una de las pruebas que se realizaron con los CRPs. Los resultados de las pruebas que se muestran son las principales características dinámicas de los marcos contraventeados, es decir: frecuencia natural de vibración y el porcentaje de amortiguamiento.

5.1 Metodología

El cálculo de estos resultados se llevó a cabo con la ayuda de los programas Degtra y Excel. Degtra es un programa desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este programa permite calcular la frecuencia de vibrar, entre otras funciones. Por su parte el programa Excel fue de utilidad para la presentación de las gráficas y el cálculo del amortiguamiento de la estructura. Los pasos que se siguieron para obtener la frecuencia de vibrar del modelo fueron los siguientes:

1. Se realizó la descarga de información del sistema de adquisición de datos de la mesa vibradora. Para fines de esta tesis solo fueron necesarios los datos de los

canales 2 y 4 que corresponden a la base y azotea, respectivamente, y están orientados en la dirección principal de los marcos (ver capítulo anterior).

2. Se introdujeron los datos de las señales de aceleraciones medidas al programa Degtra.
3. Se hizo corrección de línea base y filtrado entre 0.5 Hz y 20 Hz de las señales.
4. Por último se calculó el espectro de Fourier y sus funciones de transferencia.
5. De la amplitud máxima de la función de transferencia, para cada prueba, se leyó la frecuencia de vibrar del modelo.

Por su parte, el cálculo del amortiguamiento se realizó de la siguiente forma:

1. Igualmente, los datos de los canales 2 y 4 se introdujeron a Degtra.
2. Luego, se hizo corrección de línea base y filtrado de las señales entre 0.5 Hz y 20 Hz.
3. Por integración, se calcularon las aceleraciones, velocidades y los desplazamientos relativos del modelo.
4. Después, estos datos se introdujeron a una hoja de cálculo de Excel programada para realizar el balance de la ecuación de energía (ver ecuación 5.1) y, de esta forma obtener el porcentaje de amortiguamiento.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t)$$

Ecuación 5.1

En donde:

- m = masa
- \ddot{u} = aceleración de desplazamientos
- c = coeficiente de amortiguamiento viscoso
- \dot{u} = velocidad de desplazamiento
- k = rigidez lateral del sistema
- u = deformaciones resultantes

5.2 Resultados

En esta sección se muestran los resultados de cada una de las pruebas y, al final, se muestra un resumen y comparación de los resultados

5.2.1 Prueba 1, modelo sin CRPs

En la primera prueba se trabajó con el modelo sin dispositivos CRPs, como se muestra en la figura 5.1. Por su parte, la figura 5.2 muestra la estimación de la frecuencia natural del modelo, que corresponde a 3.03 Hz. El amortiguamiento estimado por balance de la ecuación de energía, está representado por la línea negra, continua de la figura 5.3.



Figura 5.1 Modelo sin CRP (prueba 1).

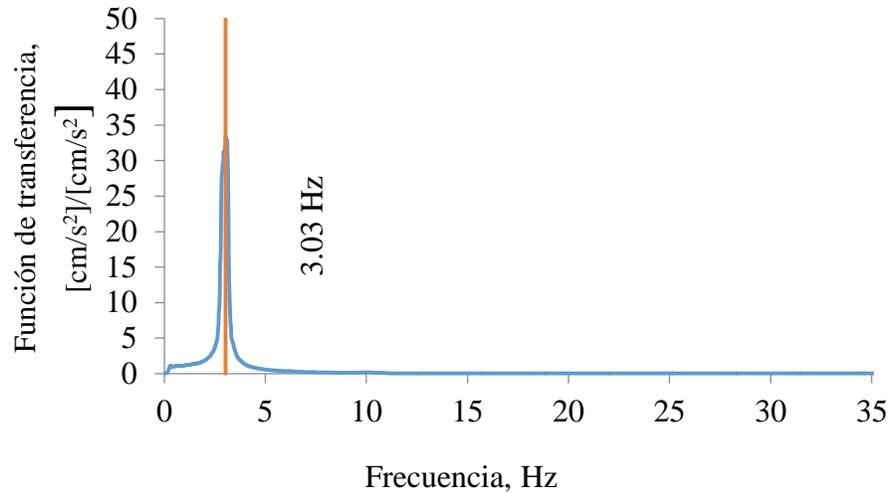


Figura 5.2 Frecuencia de vibrar del modelo sin CRPs (prueba 1).

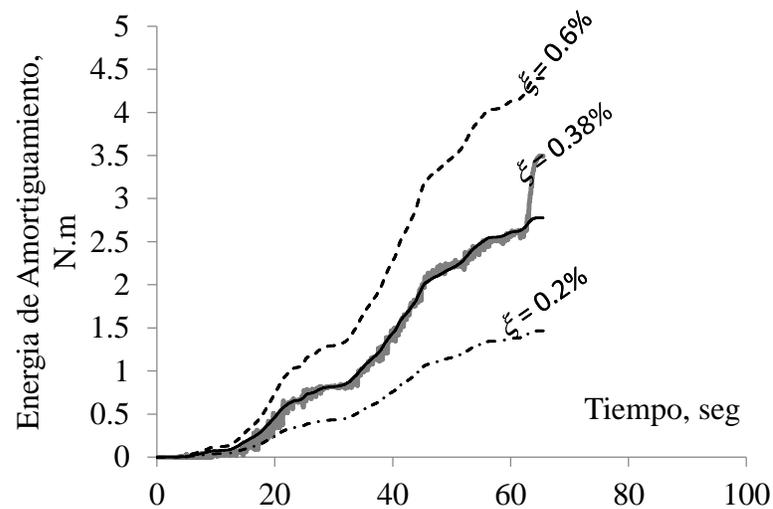


Figura 5.3 Estimación del amortiguamiento del modelo sin CRPs (prueba 1).

Los resultados de la prueba 1 (figura 5.3) muestran que la disipación de energía del modelo sin CRPs es baja; pues el porcentaje de amortiguamiento es menor al 1%. La vibración que se presentó durante esta prueba pudo ser casi evidente a simple vista, esto

se refuerza con el valor tan bajo de la frecuencia vibrar del modelo (figura 5.2). Según los registros de los acelerómetros A1 y A4, los desplazamientos máximos del dispositivo fueron de aproximadamente 1.5mm en la parte final de la prueba.

Es importante decir que las losas que se encuentran encima el modelo generan una fuerza inercial que retrasa el desplazamiento libre del mismo; y provocan que el modelo tenga una velocidad de reacción relativamente lenta; es decir una frecuencia de vibrar baja.

5.2.2 Prueba 2, modelo con contraventeo convencional

Esta prueba se realizó con un contraventeo convencional en el marco central (como se ve en la figura 5.4). La prueba se hizo para poder comparar las propiedades dinámicas del modelo sin contraventeos, con un contraventeo convencional, y con CRPs. El contraventeo convencional consistió de un perfil cuadrado de dimensiones transversales de 2.5cm x 2.5cm x 0.2cm.

Las figuras 5.5 y 5.6 muestran la estimación de la frecuencia natural de vibración y el porcentaje de amortiguamiento, respectivamente.



Figura 5.4 Modelo con contraventeo convencional

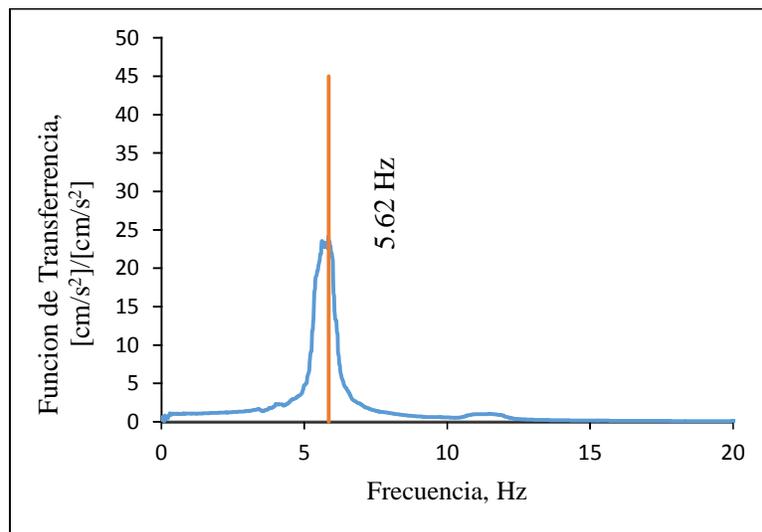


Figura 5.5 Frecuencia de vibrar en el modelo con un contraventeo convencional

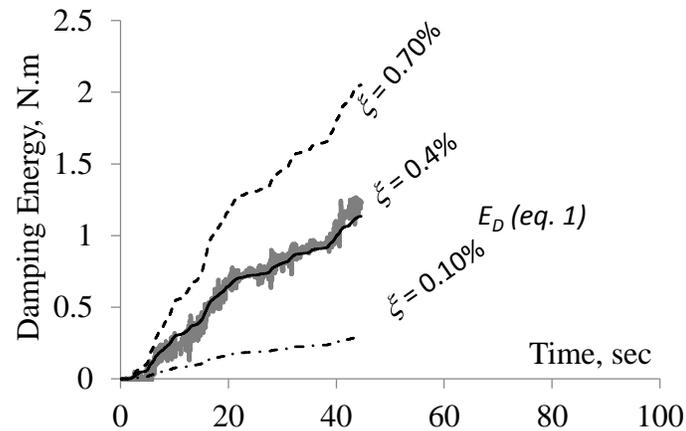


Figura 5.6 Estimación de amortiguamiento en modelo con contraventeo convencional.

En esta parte se realizó una prueba con un contraventeo convencional con el objetivo de medir las diferencias que existen entre un contraventeo convencional y un CRP. Este contraventeo se realizó sin estudio previo de su comportamiento esfuerzo-deformación y con una geometría transversal menor a los CRPs (comparada con el acero de recubrimiento, no con el núcleo que es el que disipa la energía), utilizados en estas pruebas es decir solo es provisional con el fin de hacer dicha comparación. De acuerdo a los resultados se puede observar que el nivel de amortiguamiento es ligeramente mayor a la prueba sin contraventeo. El nivel de amortiguamiento de este contraventeo es tan pequeño que se puede decir que, para fines de estas pruebas, es inservible para poder disipar energía.

Su frecuencia de vibrar aumenta en relación a la prueba sin contraventeo como se puede apreciar en la figura 5.5. Los desplazamientos máximos por consecuencia reducen no superando el milímetro.

5.2.3 Prueba 3, modelo con un CRP

En esta tercera prueba se utilizó un CRP en el marco número 3 del modelo como se puede observar en la figura 5.7. Los resultados se muestran en las figuras 5.8 y 5.9, en donde se presentan la frecuencia natural de vibración y el porcentaje de amortiguamiento, respectivamente.



Figura 5.7 Prueba con un CRP (Prueba 3).

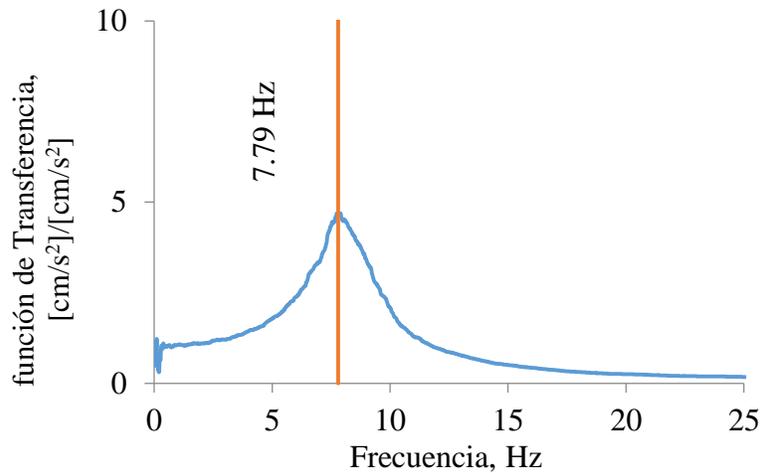


Figura 5.8 Frecuencia de vibrar del modelo con un CRP (prueba 3).

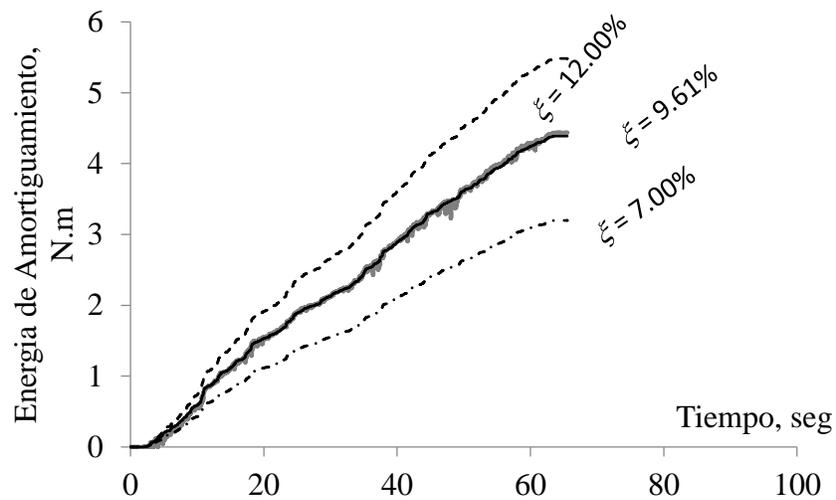


Figura 5.9 Estimación de amortiguamiento del modelo con un CRP (prueba 3).

Los resultados en la prueba 3 nos muestran que la colocación de un CRPs en el modelo ensayado, genera un amortiguamiento muy elevado, comparado al mostrado por el modelo sin CRP (como se puede observar en la figura 5.6). Así mismo se puede observar que el comportamiento de un CRP en comparación con un contraventeo convencional es

mucho mejor ya que el amortiguamiento del CRP se eleva considerablemente. Por otra parte, el CRP no presentó problemas de daño aparente de pandeo ni problemas con el núcleo del disipador o en las placas de conexión. En general el comportamiento del dispositivo fue adecuado.

Por su parte la frecuencia natural de vibración del modelo aumentó en poco más del doble, en comparación con la de la prueba 1. Por consecuencia, los registros de desplazamientos en esta prueba fueron menores (siendo los máximos de apenas 0.4mm, casi una séptima parte que los de la prueba 1). Las velocidades también fueron menores, pero las aceleraciones fueron más grandes. Esto se debe a que las perturbaciones fueron muy pequeñas y, aunque las aceleraciones sean más grandes, las velocidades no son tan altas por el desplazamiento tan corto.

5.2.4 Prueba 4, modelo con dos CRPs

En esta prueba se colocaron dos CRPs, uno en el marco 1 y otro en el 5, como se observa en la figura 5.10. Dado que se colocaron simétricamente, los CRPs evitan que exista alguna torsión significativa del modelo. Las figuras 5.11 y 5.12 representan la frecuencia de vibrar y el porcentaje de amortiguamiento, respectivamente.



Figura 5.10 Prueba con dos CRPs (prueba 4).

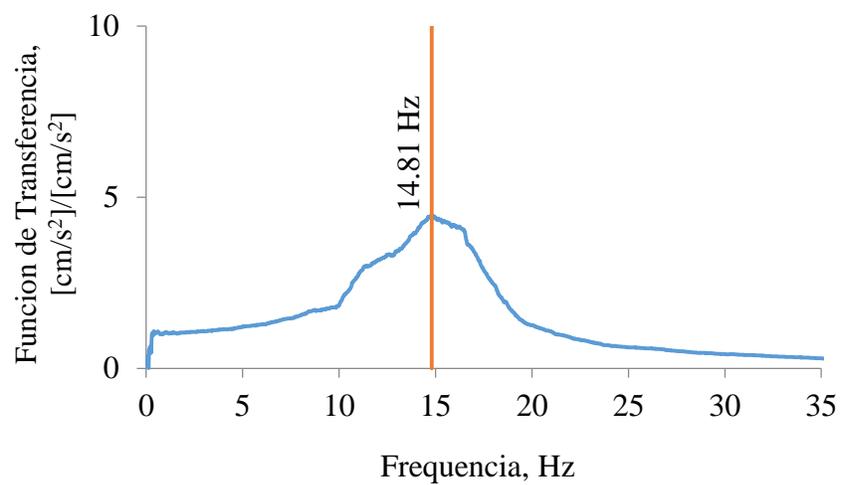


Figura 5.11 Frecuencia de vibrar del modelo con dos CRPs (prueba 4).

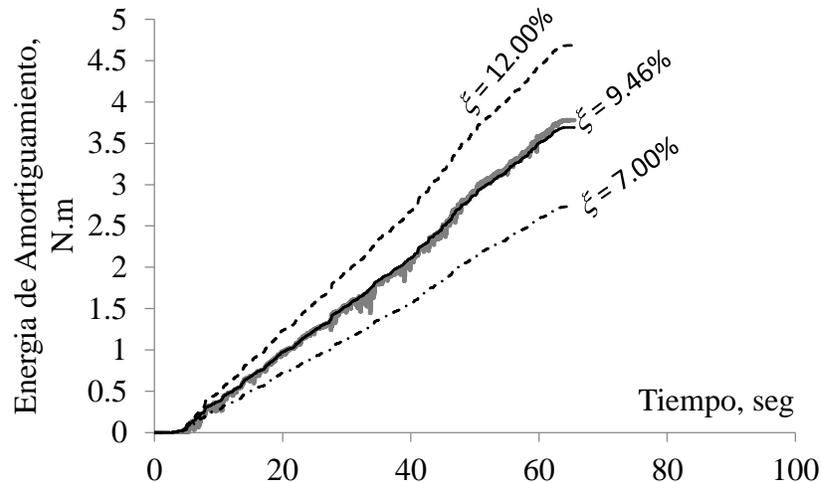


Figura 5.12 Estimación de amortiguamiento del modelo con dos CRPs (prueba 4).

En esta prueba se colocó un CRP más al modelo en comparación con la prueba anterior. Con esto se esperaba que el amortiguamiento tuviera un aumento, pero comparando las figuras 5.12 y 5.9, se aprecia un leve decremento. Esto puede deberse a que el aumento en el número de CRPs aumentó la rigidez del modelo, lo que provocó que el nivel de deformaciones se redujera. Este hecho se discutirá en la sección 5.3.

5.2.5 Prueba 5, modelo con tres CRPs

En esta prueba se colocaron tres CRPs en los marcos centrales del modelo, dejando los dos marcos extremos sin CRPs, como se puede observar en la figura 5.13. Posteriormente en las figuras 5.14 y 5.15 se presentan la frecuencia de vibrar y el porcentaje de amortiguamiento del modelo.



Figura 5.13 Prueba con tres CRPs (prueba 5).

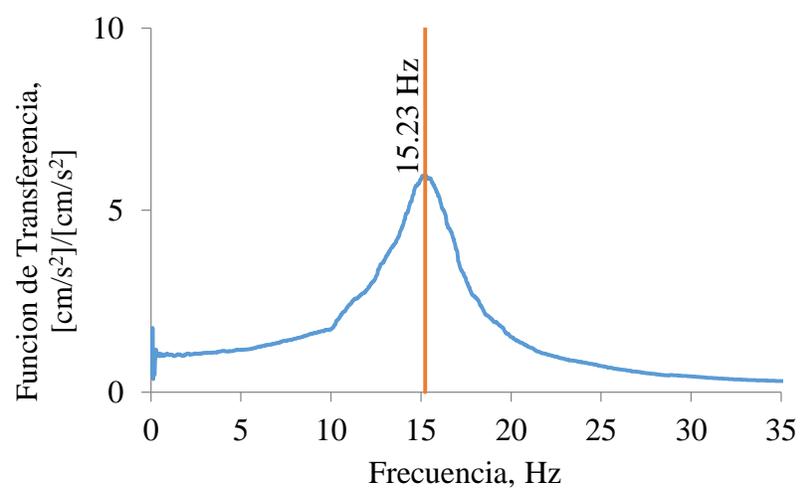


Figura 5.14 Frecuencia de vibrar del modelo con tres CRPs (prueba 5).

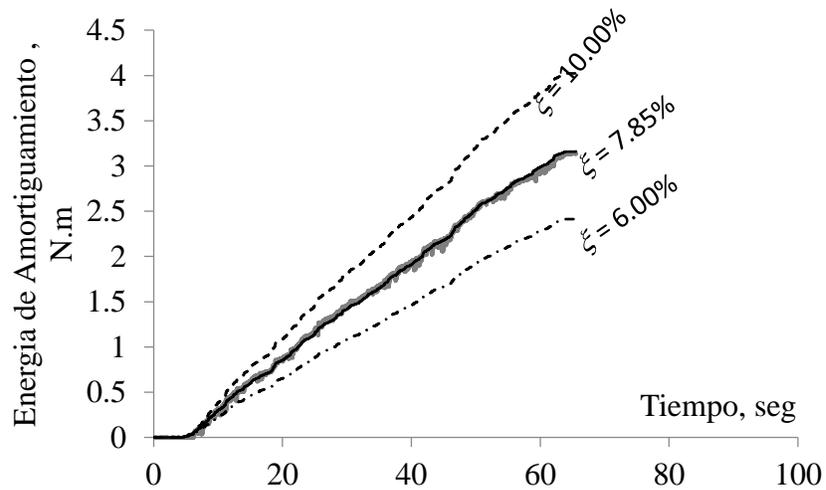


Figura 5.15 Estimación de amortiguamiento del modelo con tres CRPs (prueba 5).

En esta tercera prueba nos podemos percatar que la frecuencia de vibrar del modelo aumento de manera muy importante, en comparación con las pruebas anteriores. Esta observación se discutirá más adelante, en la sección 5.3.

En el caso del amortiguamiento se esperaba que a mayor número de CRPs, su porcentaje aumentara ya que la función de cada CRP es absorber energía. Por lo tanto se suponía que habría una mayor cantidad de energía disipada, pero como se puede observar en las figuras 5.9, 5.12 y 5.15, el amortiguamiento en vez de aumentar, disminuyó. Reforzando lo observado en las pruebas 3 y 4.

Una explicación a la disminución del nivel de amortiguamiento es que al haber más CRPs en el modelo, este tendió a ser más rígido, lo que redujo los niveles de deformación en los disipadores comparado con las pruebas anteriores.

5.2.6 Prueba 6, modelo con tres CRPs en el modelo colocados de manera asimétrica

En esta prueba se utilizaron igualmente tres CRPs en el modelo, pero variando su colocación como se observa en la figura 5.16, es decir, en los marcos 1, 4 y 5. Esto para verificar si el acomodo de los CRPs varía su propiedades dinámicas (frecuencia de vibrar y porcentaje de amortiguamiento). Enseguida, las figuras 5.17 y 5.18 muestran dichas propiedades, respectivamente.

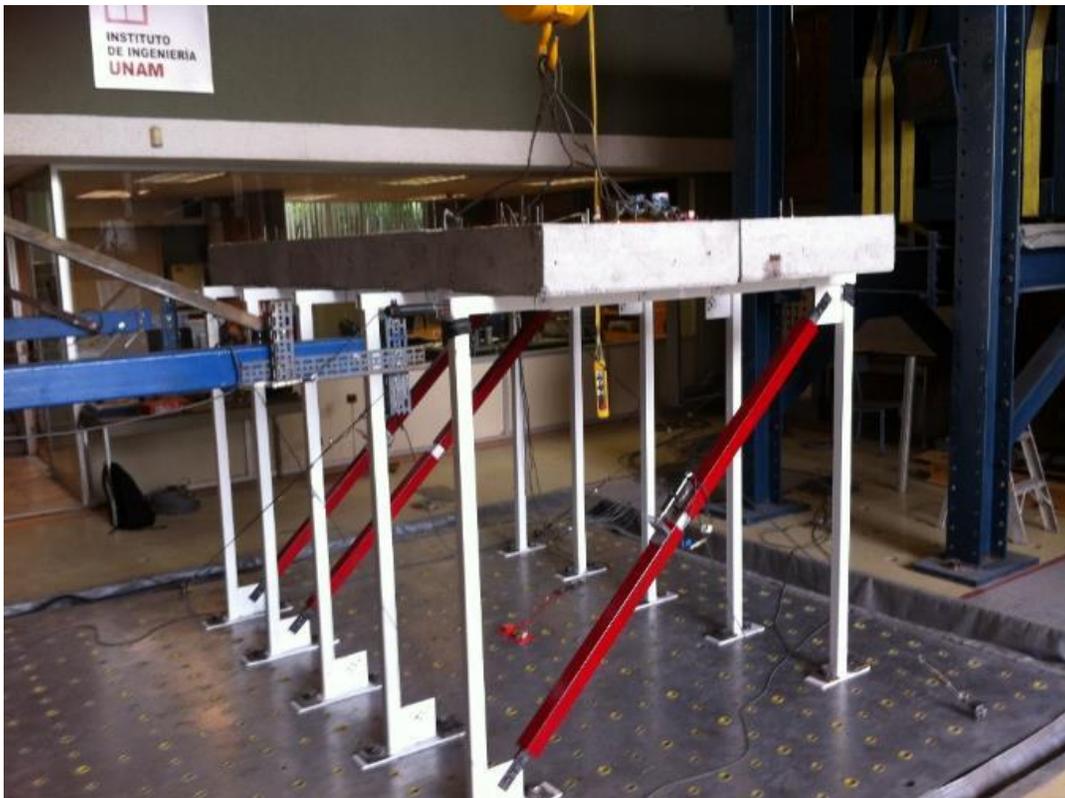


Figura 5.16 Prueba con tres CRPs colocados de asimétricamente (prueba 6).

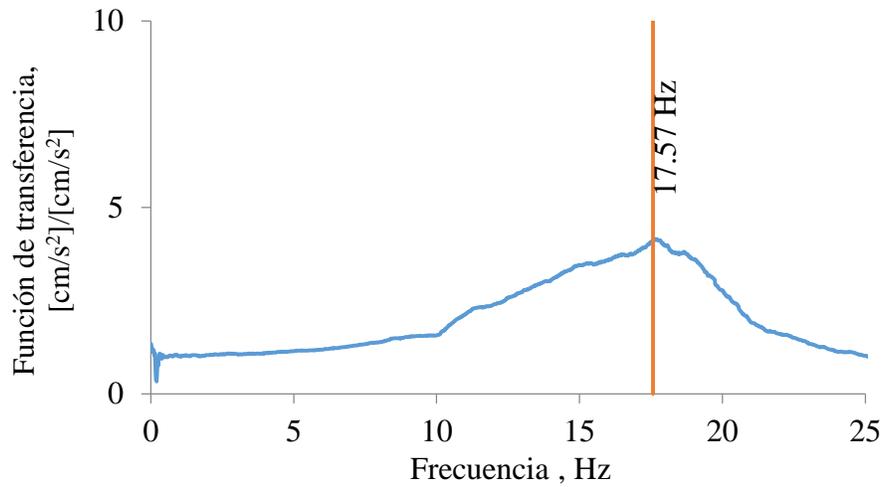


Figura 5.17 Frecuencia de vibrar con tres CRPs colocados asimétricamente (prueba 6).

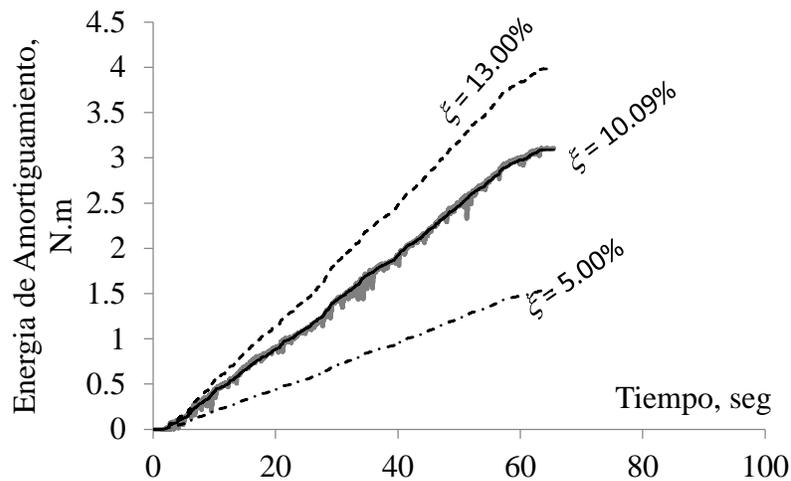


Figura 5.18 Amortiguamiento con tres CRPs colocados asimétricamente (prueba 6).

En esta última prueba con CRPs podemos observar que el amortiguamiento se incrementó de manera importante. Como se puede observar en la figura 5.21, el amortiguamiento aumentó hasta 10.09%. Este aumento no sigue la tendencia de las pruebas anteriores, puesto que su amortiguamiento mayor que todas las pruebas anteriores y, de acuerdo a la

tendencia, se esperaba que el amortiguamiento fuera por lo menos igual que la prueba anterior.

Otro punto, importante de recordar, es que en la prueba anterior se tenía el mismo número de diagonales pero el amortiguamiento aumentó en casi 2%. Una explicación para este comportamiento (entre las pruebas 5 y 6) podría ser que en el arreglo de la prueba 5 reduce la torsión del modelo, debido a que los marcos se encuentran colocados de manera simétrica. En esta prueba nos damos cuenta que el acomodo de los CRPs, juegan un papel importante en el amortiguamiento del modelo.

5.2.7 Prueba 7, modelo con cuatro CRPs

En esta prueba fueron colocados cuatro CRPs en el modelo dejando el marco central sin diagonal, como se puede observar en la figura 5.19. Después, en las figuras 5.20 y 5.21 se observan los resultados de la frecuencia de vibrar y la estimación del porcentaje de amortiguamiento, respectivamente.



Figura 5.19 Prueba con cuatro CRPs (prueba 7).

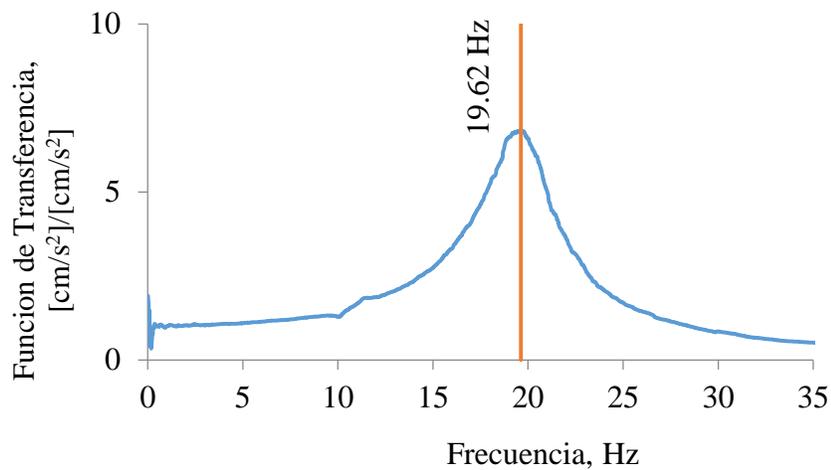


Figura 5.20 Frecuencia de vibrar en modelo con cuatro CRPs (prueba 7).

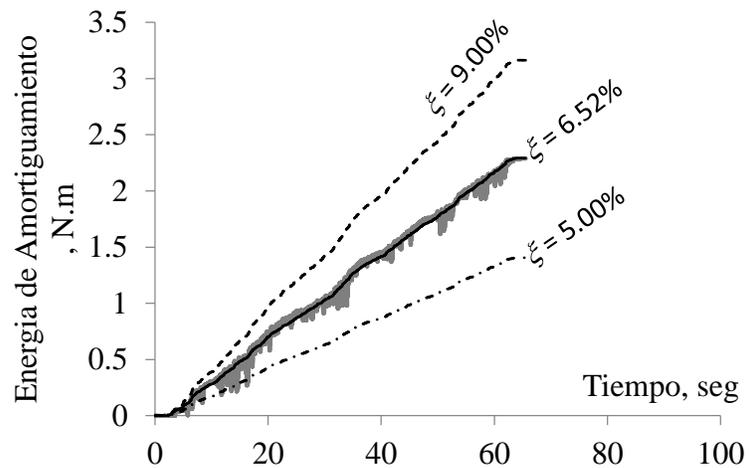


Figura 5.21 Amortiguamiento con cuatro CRPs (prueba 7).

En esta prueba se realizó sin la diagonal del centro. Se observa en la figura 5.21 que el amortiguamiento disminuyó. Con esto se puede ratificar que el aumento del número de CRPs en los marcos, afecta inversamente al porcentaje de amortiguamiento (con

excepción de la prueba anterior). En cuanto a la frecuencia de vibrar (ver figura 5.20), podemos observar que ésta aumenta con el número de diagonales.

5.2.8 Prueba 8, modelo con cinco CRPs

En esta última prueba, se colocaron CRPs en todos los marcos con los que contaba el modelo, como se puede observar en la figura 5.22. Mientras que en la figura 5.23 se observan los resultados de la frecuencia de vibrar del modelo, en la figura 5.24 se muestra la estimación de porcentaje de amortiguamiento.



Figura 5.22 Prueba con cinco CRPs (prueba 8).

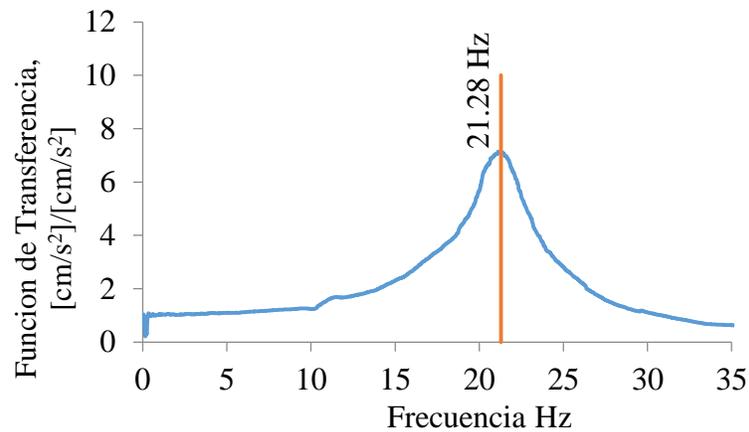


Figura 5.23 Frecuencia de vibrar del modelo con cinco CRPs (prueba 8).

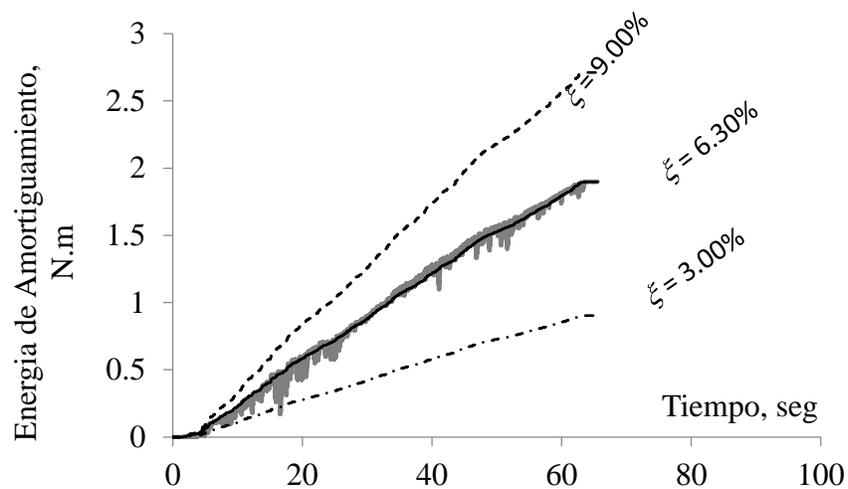


Figura 5.24 Amortiguamiento del modelo con cinco CRPs (prueba 8).

En la figura 5.24 se puede observar que el amortiguamiento sigue con la misma tendencia a disminuir en cuanto se agregan CRPs al modelo ensayado. Por su parte, la frecuencia natural de vibración tiene un comportamiento ascendente a medida que los CRPs van aumentando, aunque no de forma proporcional.

5.3 Resumen y discusión de los resultados experimentales

En la tabla 5.1 se muestra un resumen de los resultados de amortiguamiento y del periodo natural de vibración.

Tabla 5.1 Resumen de resultados.

Prueba	No. de diagonales	Frecuencia de vibración, Hz	Amortiguamiento
1	0	3.03	0.38%
2	1 (convencional)	5.86	0.41%
3	1	7.79	9.61%
4	2	14.81	9.46%
5	3	15.23	7.85%
6	3	17.57	10.09%
7	4	19.62	6.52%
8	5	21.28	6.30%

En las figuras 5.22 y 5.23 se muestran los resultados de amortiguamiento y LA FRECUENCIA natural respectivamente, para cada prueba. Se destaca que la prueba 1 se realizó sin contraventeos, la prueba 2 con un contraventeo convencional, las pruebas 3, 4, 5, 7 y 8 con uno, dos, tres, cuatro y cinco CRPs colocados de manera simétrica, y la prueba 6 se realizó con tres CRPs (al igual que prueba 5) pero colocados de manera asimétrica.

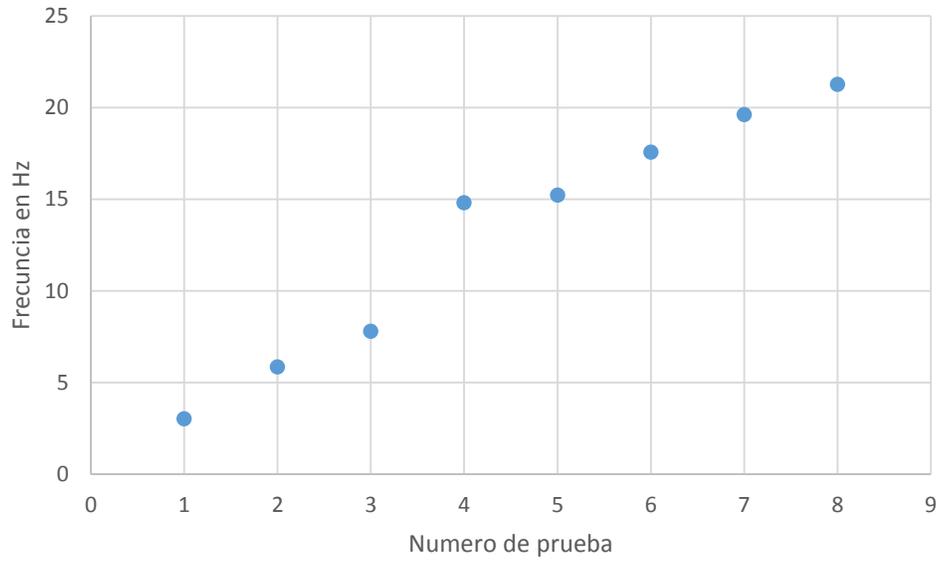


Figura 5.25 Resumen de frecuencias de vibrar

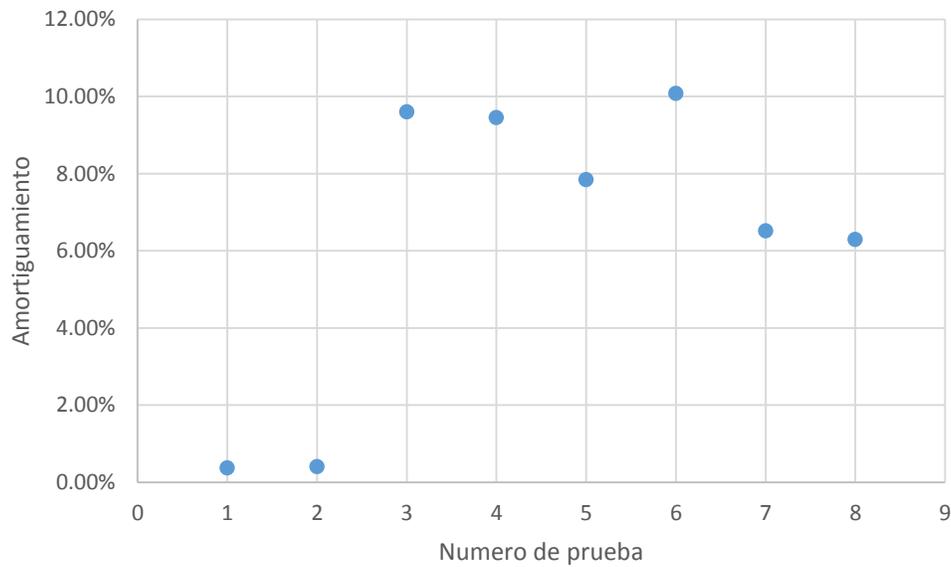


Figura 5.26 Resumen de amortiguamientos

En la figura 5.25, correspondiente a la estimación de los amortiguamientos, se pueden observar varios aspectos interesantes que vale la pena destacar:

- Los niveles de amortiguamiento de las pruebas 1 y 2 fueron muy bajos, comparados con los valores que se observaron con los CRPs.
- Los CRPs permiten incrementar las dos propiedades dinámicas más importantes del modelo, es decir, la frecuencia de vibrar y el porcentaje de amortiguamiento.
- Contrario a lo que se suponía antes de las pruebas, el nivel de amortiguamiento tendió a reducir cuando el número de CRPs se incrementó en el modelo. Esto se debe probablemente a que el modelo se hizo más rígido, lo que redujo el nivel de deformación en los CRPs y en consecuencia el nivel de disipación de energía.

En la prueba 7, correspondiente a las prueba con tres CRPs colocados de manera asimétrica se observó un incremento muy importante en el nivel de amortiguamiento. Como se ve en la figura 5.25, esta prueba fue la única en rebasar el 10%. Dada la combinación de efectos de torsión y traslación, se recomienda realizar más estudios para casos asimétricos a fin de entender mejor el mecanismo que permite incrementar la capacidad de disipación del sistema.

- Otro punto importante es el comportamiento del contraventeo convencional. El amortiguamiento fue muy bajo, comparado con la prueba con un solo CRP. Esto permite claramente observar que los contraventeos convencionales no incrementan e nivel de amortiguamiento en las estructuras de manera importante; mientras que los CRPs si lo hacen, lo cual es una gran ventaja de estos disipadores.

6 Conclusiones y recomendaciones

Un modelo a base de marcos de acero fue sometido a movimientos de baja intensidad con la intención de medir sus propiedades dinámicas (frecuencia de vibrar y porcentaje de amortiguamiento), bajo respuesta elástico-lineal.

Como conclusión general podríamos decir que los CRPs ayudaron a mejorar el comportamiento del modelo ensayado ante movimientos telúricos. En esta tesis se ofrecen las siguientes conclusiones:

1. Los CRPs permiten aumentar la frecuencia de vibrar y el nivel de amortiguamiento en las estructuras.
2. Quizás el descubrimiento más relevante en este trabajo fue que los CRPs aumentan el porcentaje de amortiguamiento de manera significativa.
3. El acomodo de CRPs modifica el porcentaje de amortiguamiento en estructuras equipadas con estos disipadores. Esto se observó en las pruebas 5 y 6, en donde se utilizaron tres CRPs pero con diferente acomodo. Se pudo observar que el aumento del porcentaje de amortiguamiento fue notable.

4. Por otro lado, también se observó que el número de CRPs modifica el amortiguamiento, aunque en este caso los resultados son diferentes a los esperados ya que se observó que en el aumento de CRPs, el amortiguamiento disminuyó. Esto se explica por la reducción de deformaciones en los CRPs al rigidizarse el sistema marcos-disipadores.
5. Durante los experimentos se comprobó que el uso de CRPs es benéfico ya que uno de los objetivos de un CRP es que funcione como fusible ante un movimiento telúrico, por lo que es importante que la conexión se pueda realizar de forma fácil y es algo que se logró en las pruebas.
6. Y por último, es muy importante observar que, comparando las pruebas 2 y 3, se pudo verificar que los CRPs tienen mucho mejor comportamiento que los contraventeos convencionales.

Como recomendaciones a futuro, se plantea lo siguiente:

1. Se recomienda estudiar efectos de torsión en estructuras equipadas con CRPs, pues en el experimento se observó comportamiento diferente para la prueba 6, es decir, para el arreglo de CRPs asimétrico, el cual provocó torsión en el modelo.
2. Sería importante evaluar el comportamiento de diferentes secciones del núcleo de los CRPs. Así como diversas geometrías de la funda. Esto debido a que estudios previos ha demostrado que se tiene un comportamiento diferente en elementos ensayados de forma aislada.
3. Hacer modelos numéricos (o sea, de elementos finitos) para comparar contra los datos recabados en los experimentos desarrollados durante esta tesis.
4. Hacer más experimentos que permitan evaluar la influencia de los CRPs con respecto al tamaño de las columnas de una estructura.

7 Referencias

1. Tejada, A. D. (2011). *Análisis Dinámico de Estructuras en el Dominio de la Frecuencia*. Universidad Politécnica de Madrid, Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras, Madrid.
2. Chopra, A.K., *Dinámica de estructuras* Cuarta ed. 2014, México Pearson Educación
3. Lopez, C., R. Retamales, and T. Kannegiesser. *Protección sísmica de estructuras* 2011 [cited 2016 Diciembre, 2016]; Available from: [http://descargas.coreduc.cl/Proteccion Sismica de Estructuras - Febrero 2012 CLR v4.1.pdf](http://descargas.coreduc.cl/Proteccion%20Sismica%20de%20Estructuras%20-%20Febrero%202012%20CLR%20v4.1.pdf).
4. Espinoza, D.A., et al., *Estudio Experimental de Contravientos Restringidos Contra Pandeo: Desarrollo Conceptual y Detalles de Implementación* 2009, Universidad Autónoma Metropolitana: México p. 53.
5. Oviedo, J.A. and M.d.P. Duque, *Sistemas de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones* Escuela de Ingeniería Antioquia, 2006: p. 16.
6. Takeuchi, T., et al., *Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrained braces* Journal of Constructional Steel Research 2010. **66**: p. 11.
7. Gilmore, A. T. (Diciembre de 2010). El futuro del diseño sísmoresistente de las edificaciones de concreto reforzado: una visión basada en la sustentabilidad. *Universidad Autónoma de México*, 2(1), 15.
8. Gilmore, A.T. and G.C. Galaz, *Dimensionado Preliminar Basado en Rigidez de Edificios Altos con Estructuras de Acero Rigidizados con Diagonales Concéntricas* Ingeniería Sísmica 2014. **90**: p. 21.
9. Guerrero, H., et al., *Effects of Buckling- Restrained Braces on Reinforced Concrete Precast Models Subjected to Shaking Table Movements* Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2015: p. 40.
10. Palazzo, G., et al., *A low-tech dissipative buckling restrained brace. Design, analysis, production and testing*. Engineering Structures, 2009. **31**(9): p. 2152-2161.
11. *Mesa vibradora* 2013 [cited 2016 Diciembre 15, 2016]; Available from: www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/GacetaNoviembre2013/Paginas/Mesavibradora.aspx.
12. OMEGA. Acelerómetro 2016. Available from: <https://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html>.

13. Aschheim, M., J.P. Moehle, and A. Lynn, *Earthquake performance assessment of concrete structures*. Progress in Structural Engineering and Materials, 1998. **1**(4): p. 370-377.