

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA
ESTRUCTURA CON AISLADORES SÍSMICOS DE GOMA LAMINADOS
(LAMINATED RUBBER BEARINGS)

JULY KATERIN CRUZ CRUZ
OMAR LEONARDO GONZÁLEZ GUTIÉRREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA

2015

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA
ESTRUCTURA CON AISLADORES SÍSMICOS DE GOMA LAMINADOS
(LAMINATED RUBBER BEARINGS)

JULY KATERIN CRUZ CRUZ
OMAR LEONARDO GONZÁLEZ GUTIÉRREZ

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil

Director
OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO
Ph.D. Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA

2015

A Dios, ese ser supremo que hace que todo suceda como tiene que ser, siempre de la mejor manera.

A mi Mamá, Dioselina Cruz, el ser que me dio la vida, quien con todo su amor incondicional me llena de felicidad, y me impulsa cada día a hacer mis sueños realidad y luchar hasta el final por lo que deseo.

A mi Tía Ana Ligia Cruz, mi segunda mamá quien con su apoyo absoluto hizo que todo fuera posible.

A mi familia, cada uno aportó un granito de arena para la realización de este sueño, sus buenos deseos y su presencia.

A nuestro director de proyecto, el profesor Oscar Begambre, por su magnífica dirección, por su tiempo y por enseñarnos que todo se logra con dedicación y paciencia, sin su guía este proyecto no se hubiese realizado plenamente.

A mi compañero y amigo Omar Leonardo González, fue el mejor compañero que haya podido tener. Sin él, sin su apoyo incondicional y sin su particular manera de ser, no hubiésemos podido ser ese gran equipo que somos, nos esperan muchas metas más por cumplir, y es un placer que esta la hayamos logrado juntos, siempre viviendo al límite.

A mis amigos, con cada uno compartí maravillosos momentos: alegrías, tristezas, derrotas, victorias, locuras, desveladas e inmensidad de cosas que me hacen comprender que lo más importante de esta etapa de mi vida es haberlos conocido en cada una de sus facetas y saber que cuento con ellos incondicionalmente.

A la vida, con todos esos caminos que he andado tratando de conquistarla he aprendido que lo más importante es la felicidad.

July Katerin Cruz Cruz

A Dios por permitirme cada día vivir bajo su maravillosa voluntad, a Él todo se lo debo.

A mis padres por dedicarme los mejores años de su vida y ser esa fuente de amor, ejemplo e inspiración para seguir caminando hacia el futuro.

A mis hermanos Edison y Slendy, por su comprensión, cariño y apoyo incondicional en todo momento.

A Fernando Carreño por ser ese ángel que Dios envió para patrocinar mis sueños y enseñarme que los límites solo existen en nuestra mente.

A Katerin Cruz Cruz por ser la compañera perfecta para elaborar este trabajo y más que eso por su valiosa amistad durante los últimos años; a su familia por tratarme siempre como un hijo.

A la iglesia Cruzada Cristiana Reino en Acción, sus pastores Arnulfo e Isabel Díaz y el ministerio MSA por su inmenso amor y apoyo espiritual.

A la gran Familia Feliz, tíos y primos por ser el motor que me anima a progresar diariamente.

A todos mis amigos de la universidad, que con sus consejos, compañía y apoyo hicieron de mí un mejor profesional.

A mis amigos de la vida por acompañarme en todo el proceso vivido, los cuales demuestran con sus acciones que somos una familia.

A los siete que iniciamos este sueño de ser Ingenieros y las orejas que siempre nos acompañaron, por estar ahí en los momentos tanto gratos como difíciles.

Al profesor Oscar Begambre por enseñarme con su ejemplo el profesional integro que deseo ser.

Omar Leonardo González Gutiérrez

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Oscar Javier Begambre y Ricardo Alfredo Cruz por la orientación, colaboración y apoyo incondicional otorgado en todo el desarrollo del proyecto.

Al profesor Carlos Borrás, a los estudiantes Daniel Verano y Diego Camacho, por su desinteresada e importante colaboración en el manejo y funcionamiento de la mesa vibratoria.

A los estudiantes Juan Carlos Núñez Larrota y Rafael Ricardo Tortello Infante, por su apoyo incondicional en el desarrollo del proyecto.

Al señor Fidel Núñez Gamboa por su colaboración y ayuda en el desarrollo del modelo metálico utilizado.

A los grupos de investigación INME y Geomática de la escuela de ingeniería civil, DICBOT de la escuela de ingeniería mecánica por el préstamo de los equipos utilizados para llevar a cabo en su totalidad el proyecto.

A la ingeniera Diana Marcela Cañas por su constante asesoría en la redacción del presente trabajo.

A la señora Carmen Tarazona por su incondicional guía en los procedimientos administrativos realizados en la Universidad Industrial de Santander para el presente trabajo.

En general a todos los que hicieron posible la realización de este proyecto.

JULY KATERIN CRUZ CRUZ

OMAR LEONARDO GONZÁLEZ GUTIÉRREZ

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
1. DESCRIPCIÓN DE ESTRUCTURA ANALIZADA.....	21
1.1. PROPIEDADES FÍSICAS	21
1.2. PROPIEDADES DINÁMICAS.....	23
2. AISLADORES SÍSMICOS DE GOMA LAMINADOS	26
2.1. EVOLUCIÓN Y FUNCIONALIDAD.....	26
2.2. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS AISLADORES	28
2.2.1. Parámetros establecidos	29
2.2.2. Rigidez lateral del aislador.....	30
2.2.3. Rigidez Vertical del Aislador	30
2.2.4. Carga Crítica del Aislador.....	31
2.3. PRODUCCIÓN DEL AISLADOR.....	32
3. MODELO DE LA ESTRUCTURA CON AISLADORES SISMICOS	34
3.1. MATRIZ DE RIGIDEZ CONDENSADA	35
3.2. MATRIZ DE MASA.....	36
3.3. MODOS DE VIBRACIÓN ESTRUCTURAL.....	36
3.3.1. Determinar las frecuencias de vibración.....	36
3.3.2. Determinación de los modos de vibración	37
3.4. PARTICIPACIÓN MODAL.....	38
3.4.1. Modos normalizados respecto a la masa del sistema	39
3.4.2. Factores de participación Modal	39
4. MONTAJE EXPERIMENTAL	41
5. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE LABORATORIO	45
5.1. ESTRUCTURA SIN AISLADORES	46
5.1.1. Frecuencia de 7.5 Hz.....	46
5.1.2. Frecuencia de 10.5 Hz.....	47

5.1.3.	Frecuencia de 16.5 Hz.....	48
5.1.4.	Frecuencia de 18.5 Hz.....	49
5.1.5.	Frecuencia de 21 Hz.....	50
5.2.	ESTRUCTURA CON AISLADORES	53
5.2.1.	Frecuencia de 7.5 Hz.....	53
5.2.2.	Frecuencia de 10.5 Hz.....	54
5.2.3.	Frecuencia de 16.5 Hz.....	55
5.2.4.	Frecuencia de 18.5 Hz.....	56
5.2.5.	Frecuencia de 21 Hz.....	57
6.	ANALISIS DE RESULTADOS	60
6.1.	COMPARACIÓN DE LAS FRECUENCIAS NATURALES	60
6.2.	COMPARACIÓN DEL SISTEMA AISLADO EN LAS FRECUENCIAS DE ESTUDIO	62
7.	CONCLUSIONES.....	66
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	70
	BIBLIOGRAFÍA	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pórtico Metálico Utilizado.	22
Figura 2. Pórtico plano con múltiples grados de libertad.	23
Figura 3. Registro de desplazamiento del pórtico en vibración libre.	25
Figura 4. Edificio Aislado, Indonesia.	27
Figura 5. Esquema Aislador de Goma Laminado.	27
Figura 6. Relación Dureza en Shore con Módulos de Elasticidad y Cortante.	29
Figura 7. Molde Metálico Para Producción de los Aisladores.	32
Figura 8. Aislador Sísmico Elaborado.	33
Figura 9. Sistema de Estructura Aislada	34
Figura 10. Modos de Vibración de la estructura. Izquierda modo1 y derecha modo 2.	38
Figura 11. Mesa vibratoria.	41
Figura 12. Generador de funciones CFG253	41
Figura 13. Ensamble de la estructura sobre la mesa sísmica sobre los aisladores de goma laminados.	42
Figura 14. Acelerómetros piezoeléctricos.	43
Figura 15. Acelerómetros piezoeléctricos instalados en la estructura.	43
Figura 16. Tarjeta de adquisición de datos.	43
Figura 17. Nomenclatura de los diferentes niveles del pórtico.	45
Figura 18. Valores de Aceleración, 7.5 Hz. Sin Aisladores	46
Figura 19. Valores de Aceleración, 10.5 Hz. Sin Aisladores	47
Figura 20. Valores de Aceleración, 16.5 Hz. Sin Aisladores	48
Figura 21. Valores de Aceleración, 18.5 Hz. Sin Aisladores	49
Figura 22. Valores de Aceleración, 21 Hz. Sin Aisladores	50
Figura 23. Valores máximos de (a) Aceleración, (b) Velocidad, y (c) desplazamiento, de la estructura sin aislamiento en la placa superior (Ps) y la placa inferior (Pi), para todas las frecuencias de estudio.	51
Figura 24. Valores de Aceleración, 7.5 Hz. Con Aisladores.	53
Figura 25. Valores de Aceleración, 10.5 Hz. Con Aisladores.	54

Figura 26. Valores de Aceleración, 16.5 Hz. Con Aisladores	55
Figura 27. <i>Valores de Aceleración, 18.5 Hz. Con Aisladores</i>	56
Figura 28. <i>Valores de Aceleración, 21 Hz. Con Aisladores</i>	57
Figura 29. Valores máximos de (a) Aceleración, (b) Velocidad, y (c) desplazamiento, de la estructura aislada, para todas las frecuencias de estudio.	58
Figura 30. Comparación de las magnitudes de respuesta dinámica: (a) Aceleración, (b) Velocidad, y (c) desplazamiento, de la estructura en estado original y con los aisladores de base, para la planta superior en todas las frecuencias de estudio.	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del acero utilizado en el pórtico.	22
Tabla 2. Masa de los elementos del pórtico.	22
Tabla 3. Rigidez Vertical del Aislador (S el factor de forma del aislador, E_c el Módulo de compresión instantánea de la composición goma-acero y K_{va} la rigidez vertical del aislador).	31
Tabla 4. Carga Crítica del Aislador (P_E es la Carga por deformación de Euler para una columna sin deformación por cortante, P_S la rigidez a cortante por unidad de longitud, P_{Cr} la carga Crítica soportada por el aislador)	32
Tabla 5. Matriz de rigidez condensada del sistema.....	35
Tabla 6. Matriz de Masa del Sistema.	36
Tabla 7. Frecuencias y Periodos de Vibración	37
Tabla 8. <i>Modos de Vibración</i>	37
Tabla 9. Modos de Vibración Normalizados respecto a la masa.....	39
Tabla 10. Porcentaje de participación de masa.....	39
Tabla 11. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 7.5 Hz.	46
Tabla 12. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 7.5 Hz.	47
Tabla 13. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 16.5 Hz.	48
Tabla 14. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 18.5 Hz.	49
Tabla 15. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 21 Hz.	50
Tabla 16. Valores máximos de respuesta (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento D) en los diferentes niveles de la estructura sin aislamiento (Placa Superior: P_s , Placa Inferior: P_i), para todas las frecuencias de estudio.	51
Tabla 17. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 7.5 Hz.	53

Tabla 18. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 10.5 Hz.	54
Tabla 19. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 16.5 Hz.	55
Tabla 20. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 18.5 Hz.	56
Tabla 21. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 21 Hz.	57
Tabla 22. Valores máximos de respuesta (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento D) en la placa superior e inferior de la estructura aislada (Placa Superior: Ps, Placa Inferior: Pi), para todas las frecuencias de estudio.	58
Tabla 23. Porcentaje de error entre las frecuencias fundamentales halladas teórica y experimentalmente.	60
Tabla 24. Período fundamental del Pórtico metálico con aislamiento sísmico y sin éste.	61
Tabla 25. Reducción porcentual de los valores RMS de la Respuesta Dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento D) en la placa superior (PS), entre la frecuencia fundamental del sistema sin aislamiento y del sistema aislado.	61
Tabla 26. Porcentaje de variación de la respuesta dinámica en RMS (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento D) entre la estructura original y la estructura con el sistema de aislamiento, para todas las frecuencias de estudio.	64
Tabla 27. Desplazamiento Relativo entre la placa Superior e inferior del pórtico metálico.	65

NOMENCLATURA Y ACRÓNIMOS

En esta sección se definen todos los términos empleados en las ecuaciones y desarrollo del presente trabajo.

K_H : Rigidez lateral del pórtico

H : Longitud de elementos verticales

I : Segundo momento de área elementos verticales

L : Longitud de elementos horizontales

J : Segundo momento de área elementos horizontales

ω : Frecuencia angular del pórtico

m : Masa total del pórtico en kilogramos [Kg]

f_n : Frecuencia natural del pórtico en Hertz [Hz]

T : Periodo del pórtico en segundos [s]

K_{ha} : Rigidez lateral del aislador

K_{va} : Rigidez vertical del aislador

A_a : Área de la sección transversal del aislador

H_a : Altura total del apoyo

G_a : Módulo de cortante del elastómero

E_a : Módulo de elasticidad del elastómero

E_c : Módulo de compresión instantánea de la composición goma-acero

S : Factor de forma del aislador

t : Espesor de una de las capas de goma

P_{Cr} : Carga crítica soportada por el aislador

P_E : Carga de deformación de Euler para una columna sin deformación por cortante

P_S : Rigidez al cortante por unidad de longitud

I_a : Segundo momento de área aislador de goma

$[K^c]$: Matriz de rigidez condensada del sistema estructural aislado

$[K]$: Matriz de rigidez condensada multiplicada por el número de vanos del sistema estructural aislado

$[M]$: Matriz de masa del sistema estructural aislado

w_s : Frecuencia natural angular del sistema estructural aislado

f_{ns} : Frecuencia natural del sistema estructural aislado en Hertz [Hz]

T_s : Periodo del sistema estructural aislado en segundos [s]

$\{\mu\}$: Modo de vibración

$[M_{gen}]$: Matriz de masa generalizada del sistema estructural aislado

$[\Phi]$: Matriz de formas modales

$[\Phi_n]$: Matriz de formas modales normalizadas respecto a la masa

$\{\gamma\}$: Vector linealidad entre aceleración del terreno y del grado de libertad.

Γ : Factor de participación.

A: Aceleración

V: Velocidad

D: Desplazamiento

P_s : Placa superior de la estructura

P_i : Placa inferior de la estructura

$P_s C$: Placa superior de la estructura con aislamiento

$P_s S$: Placa superior de la estructura sin aislamiento

δ : Decremento Logarítmico

ξ : Razón de Amortiguamiento

u_n : Amplitud máxima para el cálculo del amortiguamiento.

RESUMEN

TÍTULO:

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA CON AISLADORES SÍSMICOS DE GOMA LAMINADOS (LAMINATED RUBBER BEARINGS)*

AUTORES:

JULY KATERIN CRUZ CRUZ
OMAR LEONARDO GONZÁLEZ GUTIÉRREZ**

PALABRAS CLAVE:

Aislamiento sísmico, aisladores sísmicos de goma laminados, respuestas dinámicas, mesa vibratoria.

DESCRIPCIÓN:

El aislamiento sísmico busca desligar a la estructura del movimiento del suelo, reduciendo las consecuencias devastadoras durante el evento telúrico. Para que lo anterior suceda se debe concentrar la deformación relativa entre la estructura y el suelo en dispositivos estratégicamente diseñados llamados aisladores sísmicos. En este trabajo, se estudió un sistema de aislamiento sísmico en la base, utilizando aisladores de goma laminados. Se diseñó un sistema de aislamiento sísmico de acuerdo a la estructura metálica de un grado de libertad utilizada en el experimento. Se evaluó el efecto generado por los aisladores comparando la respuesta dinámica de velocidad, aceleración y desplazamiento de la estructura metálica con y sin aislamiento de base. Las señales armónicas fueron inducidas en el sistema estructural por una mesa vibratoria, operando frecuencias cercanas a las naturales del sistema. Los resultados muestran que la respuesta dinámica en la estructura con el sistema de aislamiento se disminuye significativamente cuando ésta es excitada en las frecuencias fundamentales de los sistemas de estudio. El periodo fundamental de la estructura se incrementó al colocar los apoyos de goma laminados en la base, permitiendo así que en el espectro de respuesta la aceleración disminuyera considerablemente y que el sistema aislado tuviera el comportamiento esperado. Finalmente se destacó que el diseño realizado se ajustó a las condiciones de la mesa vibratoria disponible en los ensayos experimentales.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo ingeniero civil, PhD. Co-director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández ingeniero civil, PhD.

ABSTRACT

TITLE:

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A STRUCTURE WITH SEISMIC ISOLATORS OF LAMINATED RUBBER BEARINGS (LAMINATED RUBBER BEARINGS)*

AUTHORS:

JULY KATERIN CRUZ CRUZ
OMAR LEONARDO GONZÁLEZ GUTIÉRREZ**

KEYWORDS:

Seismic isolation, laminated rubber bearings, dynamic response, vibrating table.

DESCRIPTION:

Base isolation seeks to decouple the structure from the ground movement, reducing the devastating consequences of a telluric event. To do so, it is necessary to concentrate the relative deformation between the structure and the ground into strategically designed devices known as seismic isolators. In this work a seismic base isolation system using laminated rubber bearings was studied. A base isolation system was designed according to the steel structure of one degree of freedom used in the experiment. The effect caused by the isolators was evaluated by comparing the dynamic response of speed, acceleration and displacement of the steel structure with and without base isolation. Harmonic signals were induced in the structural system by a vibrating and operate at frequencies nearby the natural frequencies of the system. The results show that the dynamic response in the structure with the insulation system is significantly decreased when it is excited in the fundamental frequencies of the study systems. The fundamental period of the structure was increased by placing the laminated rubber on the base, allowing the spectrum of acceleration response to decrease greatly and the isolated system to have the expected behavior. Finally it made noted that the design adjusted to the conditions of the vibrating table available in experimental trials.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicist – Mechanics, School of Civil Engineering, Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, PhD. Co-Director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández, PhD.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día se ha logrado un avance significativo en la construcción de edificaciones seguras alrededor del mundo, las cuales imponen retos a la ingeniería por su gran altura y sus peculiares diseños arquitectónicos; pero ha sido la naturaleza la encargada de establecer los parámetros en el actual diseño de estas obras ingenieriles, ya que los sismos se convirtieron en factores decisivos al lograr una estructura favorable en condiciones de seguridad y servicio.

Inicialmente se buscó contrarrestar el efecto sufrido en la estructura mediante el incremento de su rigidez, sin embargo al interior de esta aún existen repercusiones ante eventos sísmicos, considerando que frente a un sismo de magnitud representativa la estructura presentará una mayor probabilidad de colapsar teniendo en cuenta únicamente la resistencia en la edificación [1].

Estas desventajas se pueden remediar parcialmente con el uso de sistemas de control pasivos de aislamiento de base, desacoplando la estructura del movimiento del terreno mediante mecanismos que incrementan la flexibilidad del sistema global estructura-base logrando así reducir el desplazamiento relativo de los elementos estructurales [2].

En Colombia el diseño de estructuras se encuentra reglamentado por medio de las Normas de Construcciones Sismo Resistentes (NSR 10), sin embargo en otros países las técnicas convencionales de disipación de energía expuestas en nuestra normativa se complementan con sistemas adicionales a los componentes estructurales de la edificación, los cuales generan variaciones en las

características dinámicas de la estructura logrando reducir la demanda sísmica de la misma y así controlar su deformación [3].

El presente trabajo mostrará el análisis experimental del aislamiento sísmico mediante la utilización de apoyos en goma laminados, los cuales permitirán realizar una evaluación del comportamiento dinámico de la estructura metálica de un piso, dispuesta para esta investigación, usando los aisladores y sin el uso de éstos.

Finalmente, se puede observar la organización del presente trabajo. En la sección (2) se realizará una descripción completa del pórtico empleado. En la sección (3) se describen las principales características, el diseño y la construcción de los aisladores sísmicos. A continuación, en la sección (4) se presenta el modelo y las características dinámicas de la estructura con aisladores de goma laminados. Seguidamente, en la sección (5) se describe el montaje experimental. En las secciones (7) y (8) se muestran de manera respectiva los resultados obtenidos y los análisis realizados. Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado.

1. DESCRIPCIÓN DE ESTRUCTURA ANALIZADA

1.1. PROPIEDADES FÍSICAS

La estructura utilizada en el análisis experimental corresponde a un pórtico metálico de un piso, de acero A-36 (ver Tabla 1), el cual fue construido por la unión con soldadura 6318, de cuatro barras verticales, circulares, metálicas, de diámetro de $\frac{1}{2}$ " y altura de 0,30m, dispuestas como columnas, a cuatro barras horizontales, circulares, metálicas, de diámetro de $\frac{1}{2}$ " y longitud de 0,37m cada una, dispuestas como vigas. Sobre esta estructura se encuentra soldada una platina metálica de espesor de $\frac{1}{4}$ " y dimensiones 0,39 cm x 0,39 cm.

La estructura metálica, descrita anteriormente, será sometida a excitaciones armónicas en una dirección, las cuales serán controladas y aplicadas por una mesa vibratoria.

Para anclar la estructura a la mesa sísmica, se soldaron las cuatro columnas a una platina metálica cuadrada, de espesor de $\frac{1}{4}$ " y dimensiones 0,52m x 0,52m, debidamente perforada con 16 agujeros de $\frac{1}{2}$ ", los cuales servirán para amarrar la estructura mediante pernos de $\frac{1}{2}$ ".

Como se debe controlar el movimiento horizontal en una sola dirección (dirección X), se soldaron dos barras diagonales, circulares, metálicas, de diámetro de $\frac{1}{2}$ " y longitud de 0,545m, puestas como riostras en las caras laterales de la estructura, con el fin de restringir cualquier tipo de movimiento torsional que se presente.

Las dimensiones anteriormente mencionadas, fueron escogidas con el fin de obtener una estructura cuyo comportamiento se pueda modelar usando un grado de libertad y una rigidez lateral alta.

Tabla 1. Propiedades del acero utilizado en el pórtico.

Acero A-36	
<i>Densidad</i>	7850 Kg/m ³
<i>Modulo Elasticidad</i>	2E+11 Pa

Figura 1. Pórtico Metálico Utilizado.



La masa total del pórtico es de 24, 12 [Kg] (ver Tabla 2.)

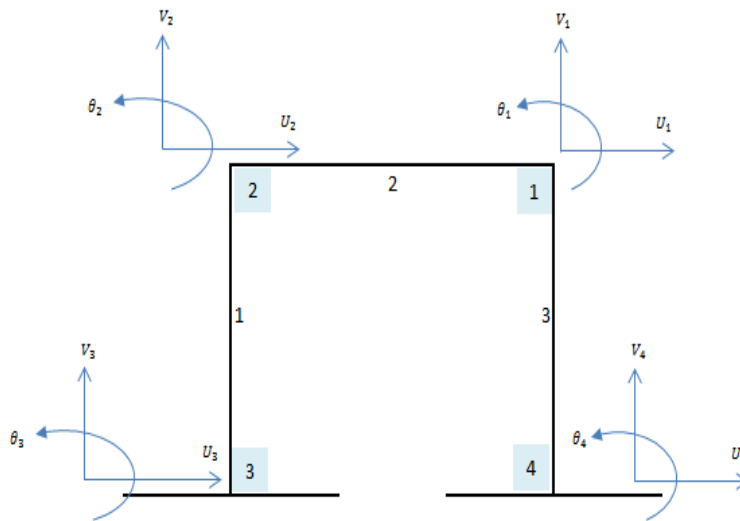
Tabla 2. Masa de los elementos del pórtico.

	<i>masa [Kg]</i>
<i>Placa Superior</i>	7,58
<i>Placa Inferior</i>	13,48
<i>Columns</i>	1,59
<i>Vigas</i>	1,47
<i>Masa Total</i>	24,12

1.2. PROPIEDADES DINÁMICAS.

Para el cálculo de la rigidez del pórtico, primero se analizó el sistema como un pórtico plano con múltiples grados de libertad (ver Figura 2.)

Figura 2. Pórtico plano con múltiples grados de libertad.



Para analizar el pórtico plano y obtener la ecuación de rigidez lateral, se realizó el proceso de condensación estática, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Todos los elementos son rígidos axialmente.
- Solo hay carga lateral aplicada en el pórtico.
- No hay grados de libertad vertical ni de rotación.
- La base de la estructura está totalmente empotrada.

Se redujo el sistema a un solo grado de libertad y se encontró la ecuación de la rigidez lateral.

$$K_H = \frac{12E(6HJ+IL)I}{H^3(3HJ+2IL)} \quad (1)$$

Reemplazando los valores se obtiene que la rigidez lateral del pórtico K_H es 68374,4883 [N/m].

La rigidez de toda la estructura se calcula multiplicando por dos a la rigidez lateral del pórtico: 136748,97 N/m

La frecuencia angular (ω) está definida por la siguiente expresión:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (2)$$

La masa que hace parte del sistema de un grado de libertad, corresponde a la masa total del pórtico menos la masa de la placa inferior, entonces $m= 10,6445$ Kg. Para este valor de masa, la frecuencia angular (ω) es 113,3437 rad/s. La frecuencia natural (f_n) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f_n = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

Para el valor de ω calculado, la frecuencia natural del pórtico es 18,04 Hz. El periodo (T) de la estructura es de 0,055 s y se calculó mediante la ecuación 4.

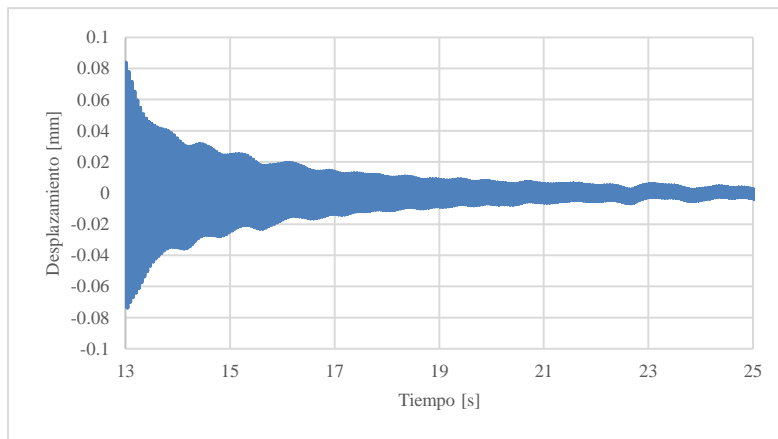
$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4)$$

La razón de amortiguamiento del pórtico metálico se obtuvo calculando el decremento logarítmico δ el cual se define en la ecuación (5) como el logaritmo natural de la razón de dos amplitudes máximas consecutivas u_n y u_{n+1} . Para esto es necesario que el sistema estructural esté en vibración libre.

$$\delta = \ln\left(\frac{u_n}{u_{n+1}}\right) \quad (5)$$

Las amplitudes de desplazamiento se registraron a través de un acelerómetro puesto en la placa superior del pórtico metálico (ver Figura 3).

Figura 3. Registro de desplazamiento del pórtico en vibración libre.



La razón de amortiguamiento (ξ) depende del decremento logarítmico y se despeja de la ecuación (6):

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (6)$$

El valor de ξ para el pórtico metálico de un piso es de 1.18%, por lo tanto el amortiguamiento de la estructura no es considerado en el desarrollo del presente estudio.

2. AISLADORES SÍSMICOS DE GOMA LAMINADOS

2.1. EVOLUCIÓN Y FUNCIONALIDAD

Durante muchos años se ha buscado mejorar el diseño de las estructuras con el fin de optimizar la respuesta de las mismas ante un evento sísmico, es ahí cuando surge la investigación que involucra separar la estructura de su fundación mediante los diferentes sistemas de aislamiento sísmico, enfocando su funcionalidad en disminuir la energía de entrada al sistema estructural cuando ocurre un evento telúrico [3].

El concepto de aislamiento sísmico surgió hace más de un siglo; sin embargo, sólo en los últimos cuarenta años inició su utilización en algunas edificaciones y desde hace quince años incrementó su demanda debido al buen desempeño que presentó este sistema ante diferentes sismos presentados [4], es decir es hasta ahora cuando el aislamiento estructural se tomó como una estrategia práctica para el diseño sismo-resistente [5].

Aunque existen diversos sistemas de aislamiento sísmico, en el actual trabajo se profundizará en el diseño y evaluación del aislador elaborado con goma y láminas intercaladas de acero. Desde finales del siglo XIX se ha investigado el aislamiento sísmico en estructuras, siendo Yugoslavia, Estados Unidos, Japón y Chile los primeros países en aislar algunos edificios con goma laminada [4]. La utilización de aislamiento sísmico creció paulatinamente, sin embargo debido a su excelente respuesta ante movimientos telúricos de Kobe (Japón, 1995), Northridge (California, 1994) y más reciente en Chile (Región del Bio-Bio, 2010) se encontró un crecimiento exponencial en el uso de este tipo de estructuras en edificaciones (Ver figura 4) [4].

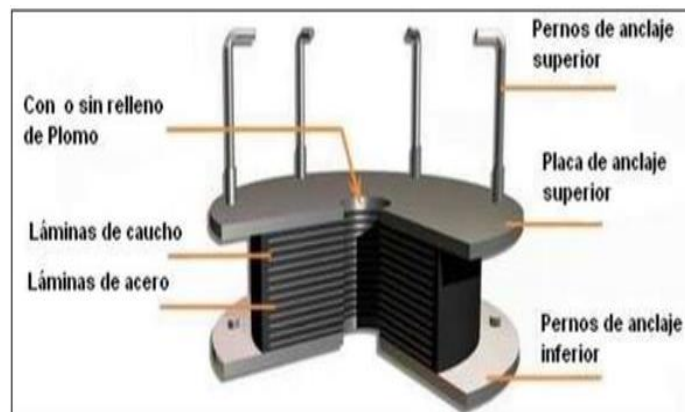
Figura 4. Edificio Aislado, Indonesia.



Fuente: Boroschek, R. 2001 [7].

Los aisladores de goma laminados se caracterizan por ser fuertes y rígidos bajo cargas verticales, pero muy flexible bajo fuerzas laterales [5]; este tipo de apoyo se compone por capas alternas de goma y láminas de acero unidas mediante un proceso de vulcanización (Ver Figura 5), la rigidez lateral del aislador depende del espesor de las diferentes capas de goma y la vertical se controla por medio de las láminas de acero que inhibe la expansión lateral del elastómero [6].

Figura 5. Esquema Aislador de Goma Laminado.



Fuente: Aguiar, et al. 2008 [8].

Existen ciertas ventajas al usar apoyos de goma laminada en las estructuras; investigaciones realizadas [7] muestran las más importantes:

1. Debido a la gran flexibilidad de la interface de aislación se modifica el periodo natural fundamental de la estructura, disminuyendo la demanda sísmica impartida en la misma.
2. Genera un bajo factor de participación sísmica para los modos superiores, cómo se verá en la sección 4.4.
3. La respuesta se controla por el modo fundamental que posee una forma lineal en la estructura y una amplitud importante en la aislación.
4. La aceleración en la estructura disminuye, contribuyendo a limitar el daño en elementos estructurales y no estructurales.

2.2. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS AISLADORES

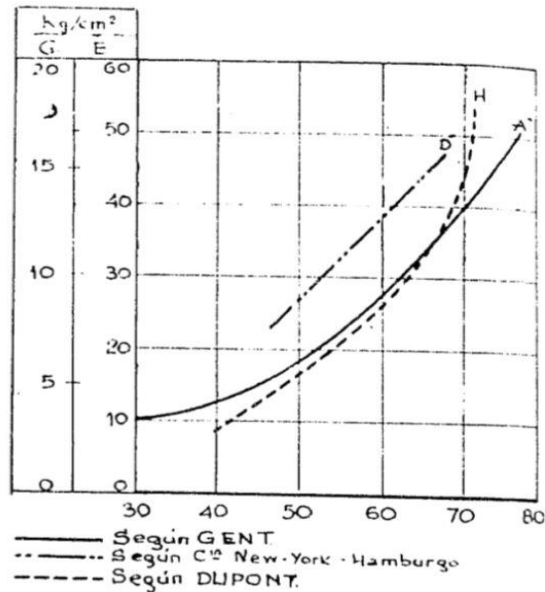
Al usar aislamiento de base se busca que la estructura sea capaz de resistir un sismo de gran intensidad y posteriormente ésta pueda seguir operando sin daños mayores [6], es por esto que el aislador de goma laminado se convirtió con el paso de los años en uno de los sistemas de control estructural más utilizados alrededor del mundo.

Para iniciar el diseño del aislador, es necesario especificar el tipo de goma utilizada ya que su módulo de elasticidad y de cortante es de vital importancia en el establecimiento de las diferentes características de este apoyo. El caucho natural utilizado presenta una dureza medida en *Shore*. Aunque no existe relación matemática entre la dureza Shore y los módulos de elasticidad y cortante del caucho, se puede aproximar por medio de curvas obtenidas teóricamente según la referencia [9]. Se debe tener en cuenta que el diseño será utilizado en la mesa sísmica descrita en la sección 4, razón por la cual las dimensiones seleccionadas permitirán observar el comportamiento de una estructura aislada para esta escala.

2.2.1. Parámetros establecidos

Se tomó el caucho natural de 50 Shore, el cual aproxima su módulo de elasticidad E_a en $17 \frac{Kg}{cm^2}$ y el de cortante G_a en $5,5 \frac{Kg}{cm^2}$ (seleccionados de acuerdo a la curva establecida por Dupont (Ver figura 6).

Figura 6. Relación Dureza en Shore con Módulos de Elasticidad y Cortante.



Fuente: Angulo Prota, Luis, 1965 [9]

Posteriormente se seleccionó la forma que tomaría la sección transversal de la goma en el aislador, teniendo en cuenta que la sección cuadrada presenta mayores desventajas frente a la circular ya que, en la primera, se pueden presentar deformaciones locales en las esquinas del apoyo [10]; debido a esta razón se trabajó con aisladores circulares.

Seguidamente se establecieron dos parámetros variables en el aislador, los cuales determinan si éste cumplirá con la limitante de carga crítica al instalar el pórtico

metálico, estos factores son el radio y la altura del apoyo. Después de realizar varias iteraciones modificando el diámetro y la altura del aislador con el fin de cumplir la carga crítica mostrada en la sección 3.2.4, se determinó que la altura del aislador era de 10 [cm] y el diámetro de la goma de 6 [cm], también es importante aclarar que en el aislador se colocaron dos láminas de acero con espesor de 1/16" dividiendo la goma en tres partes equidistantes de 3.23 [cm] de espesor.

2.2.2. Rigidez lateral del aislador

Las propiedades mecánicas de éstos aisladores se han estudiado por décadas. El uso de la teoría elástica les permitió a diversos investigadores establecer y verificar dichas propiedades [1]. La más importante de las propiedades es la rigidez horizontal del aislador, dada por la siguiente ecuación [1], [4], [6], [8]:

$$K_{ha} = \frac{G_a * A_a}{H_a} \quad (7)$$

Sustituyendo los valores se obtuvo que la rigidez lateral del aislador K_{ha} es **15239, 866 N/m**.

2.2.3. Rigidez Vertical del Aislador

La rigidez vertical del apoyo deberá ser mayor que la obtenida horizontalmente, definida por la siguiente expresión [1]:

$$K_{va} = \frac{E_c * A_a}{H_a} \quad (8)$$

Sin embargo, se debe conocer el valor resultante del módulo de compresión instantánea de la composición goma-acero E_c mediante la siguiente ecuación [1]:

$$E_c = 6 * G_a * S^2 \quad (9)$$

Dónde, S puede ser calculado a partir de la siguiente expresión [4]:

$$S = \frac{D}{4t} \quad (10)$$

Reemplazando los valores respectivos en las ecuaciones 8, 9 y 10 se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Rigidez Vertical del Aislador (S el factor de forma del aislador, Ec el Módulo de compresión instantánea de la composición goma-acero y Kva la rigidez vertical del aislador).

Parámetro	Valor	Unidades
S	0,4573	-
Ec	6,9015	Kg/(cm ²)
Kva	19123,4933	N/m

2.2.4. Carga Crítica del Aislador

Los apoyos se encuentran restringidos contra la rotación en ambos extremos y tienen libertad de moverse horizontalmente en su parte superior, también existe una carga crítica soportada por cada uno de los aisladores regida bajo la siguiente expresión [1]:

$$P_{cr} = \frac{-P_S + \sqrt{P_S^2 + 4 * P_S * P_E}}{2} \quad (11)$$

Donde P_S y P_E son aproximadamente

$$P_S = G_a * A_a \quad (12)$$

$$P_E = \frac{1}{3} * \frac{6 * G_a * S^2 * I_a * \pi^2}{H_a^2} \quad (13)$$

En la tabla 4 se puede observar la solución a las ecuaciones 11, 12 y 13. Comparando la carga crítica con la existente en cada apoyo debido al peso del pórtico se tiene que cada apoyo recibe aproximadamente 60 N y puede soportar 130 N, razón que nos permite tener una holgura para diferentes análisis.

Tabla 4. Carga Crítica del Aislador (PE es la Carga por deformación de Euler para una columna sin deformación por cortante, PS la rigidez a cortante por unidad de longitud, PCr la carga Crítica soportada por el aislador)

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
<i>PE</i>	<i>141,555</i>	<i>N</i>
<i>PS</i>	<i>1523,986</i>	<i>N</i>
<i>PCr</i>	<i>130,398</i>	<i>N</i>

Con los valores de la tabla 3 y 4 se procedió a la fabricación de los aisladores cómo se muestra en la siguiente sección.

2.3. PRODUCCIÓN DEL AISLADOR

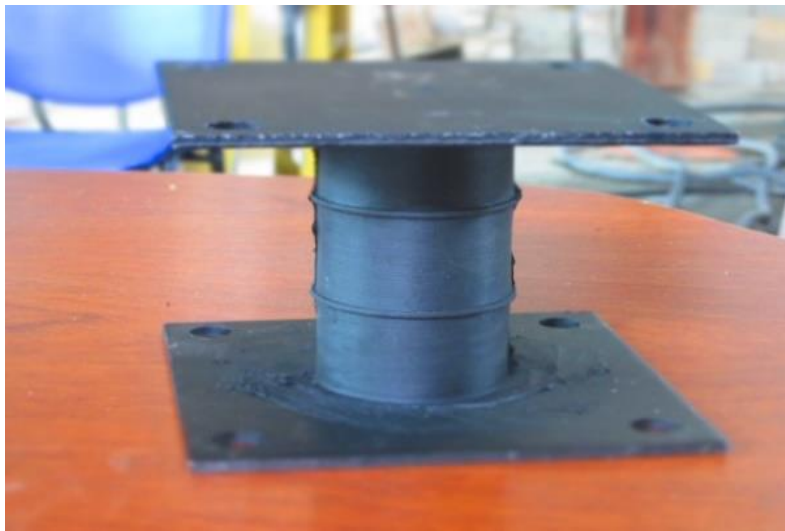
El proceso de fabricación se basó en las dimensiones expuestas anteriormente; para lograr la producción de los aisladores se hizo necesaria la elaboración de un molde metálico (Ver figura 7) capaz de soportar las altas temperaturas a la que se debe exponer la goma en el proceso de vulcanización.

Figura 7. Molde Metálico Para Producción de los Aisladores.



En el molde metálico se deben intercalar las capas de acero y caucho, posteriormente se aplica una presión aproximada de 600 psi a una temperatura de 150°C durante 15 minutos. En este tiempo reacciona el epóxico puesto entre las capas del aislador, vulcanizando el caucho y alcanzando la propiedad elástica, la unión entre las láminas de acero y el caucho debe ser tan fuerte que primero deberá fallar el caucho como se recomienda en [4].

Figura 8. Aislador Sísmico Elaborado.

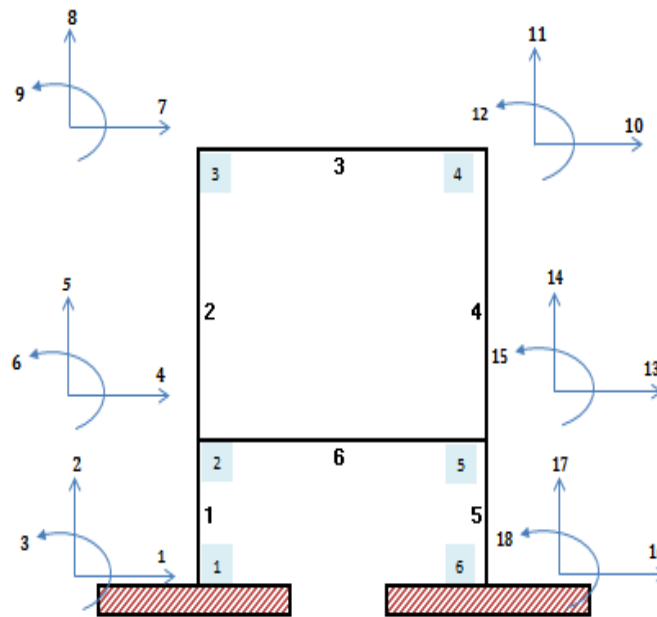


Finalmente se fabricaron cuatro aisladores (Ver figura 8), usando la metodología y parámetros establecidos con anterioridad.

3. MODELO DE LA ESTRUCTURA CON AISLADORES SISMICOS

El modelo de análisis usado en este trabajo se representa mediante un pórtico plano con múltiples grados de libertad (Ver figura 9), los diferentes cálculos tuvieron en cuenta la nomenclatura dada a cada uno de los elementos, facilitando así la solución dinámica del pórtico mediante el método de masas concentradas, el cual supone que los pisos tienen rigidez infinita, la deformación axial de las columnas se desprecia y la masa se concentra al nivel de los pisos [13]. Se debe aclarar que el sistema de aislamiento no absorbe toda la energía del sismo, sino que la desvía por medio de la dinámica del sistema sin depender del amortiguamiento [1] ya que la estructura metálica presenta una alta rigidez y la tipología utilizada de aislador en el presente estudio es de bajo amortiguamiento, razón por la cual se supone que este último es cero.

Figura 9. Sistema de Estructura Aislada



3.1. MATRIZ DE RIGIDEZ CONDENSADA

Existen sistemas donde el elevado número de grados de libertad dificultan los procesos para llegar a una determinada respuesta, es ahí donde la condensación estática reduce la matriz de rigidez definiendo los grados de libertad secundarios y expresarlos en función de los primarios [13], permitiendo llevar a cabo una metodología aproximada y efectiva para obtener una solución adecuada.

Para llegar a la matriz de elementos primarios y secundarios se debió realizar el siguiente procedimiento:

- Calcular la matriz de rigidez local de cada elemento y transformarla a coordenadas globales.
- Realizar el montaje de la matriz de rigidez global de la estructura.
- Disminuir los grados de libertad generados por el empotramiento, acortamientos verticales y reducciones horizontales que surgen al establecer que las placas son infinitamente rígidas.

$$[K]^c = [kpp] - [kps][kss]^{-1}[ksp] \quad (14)$$

Finalmente se aplica la ecuación 14 de matriz de rigidez condensada [13], cuyo resultado se puede visualizar en la Tabla 5:

Tabla 5. Matriz de rigidez condensada del sistema.

<i>K condensada</i>	
78222,0566	-51391,99
-51391,99	49874,1082

3.2. MATRIZ DE MASA

Esta matriz se caracteriza por ser diagonal, adquiere la estructuración observada en la ecuación 15 y se aplicada en nuestro modelo académico, tal como se observa en la Tabla 6.

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Tabla 6. Matriz de Masa del Sistema.

Matriz de Masa	
15,8125243	0
0	10,6445981

3.3. MODOS DE VIBRACIÓN ESTRUCTURAL

Teniendo la matriz de masa y rigidez del sistema estructural, se puede calcular los modos de vibración del mismo.

3.3.1. Determinar las frecuencias de vibración

En la siguiente expresión, al igualar el determinante de la ecuación característica del sistema o también conocida como ecuación de frecuencias a cero [13] se pueden obtener los valores correspondientes a la frecuencias de vibración del sistema estructural.

$$|[K] - w_s^2[M]| = 0 \quad (16)$$

En la Tabla 7 se puede observar el resultado generado de las diferentes frecuencias y periodos naturales de vibración, determinantes en el cálculo de los modos de vibración y factores de participación en la estructura; se debe tener en

cuenta que a la frecuencia más pequeña se le denota como w_1 y se le conoce como frecuencia fundamental [13].

Tabla 7. Frecuencias y Periodos de Vibración

Modo de Vibración	1	2
$w_s \text{ rad/s}$	41.2971894	132.510409
$f_{ns} \text{ Hz}$	6.57265183	21.0896867
$T_s \text{ Seg}$	0.15214559	0.04741654

3.3.2. Determinación de los modos de vibración

Para calcular los modos de vibración, es necesario partir del diagrama de cuerpo libre de un modelo de dos grados de libertad sin amortiguamiento [13], donde buscamos reducir las ecuaciones hasta llegar al problema característico mencionado anteriormente en la búsqueda de las frecuencias naturales del sistema aislado.

$$|[K] - w_s^2[M]| * \{\mu\} = \{0\} \quad (17)$$

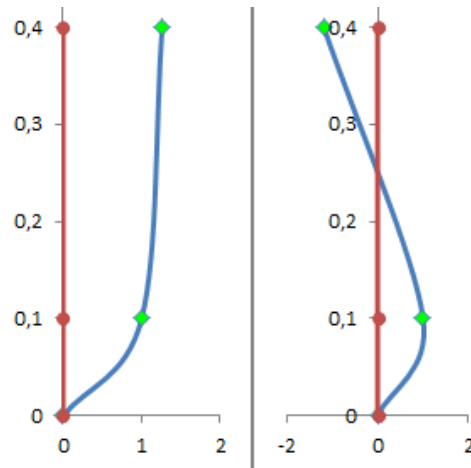
Para que este sistema tenga solución debe cumplirse que el determinante de la ecuación 17 sea cero, lo cual ya se garantizó con las frecuencias angulares obtenidas anteriormente, además la respuesta depende de una constante de proporcionalidad arbitraria, es decir, para cada valor de frecuencia se tiene un vector $\{\mu\}$ que cuenta con una forma definida, pero una amplitud arbitraria [13]; solamente se hallan los modos en una dirección, debido a que la mesa sísmica utilizada solo maneja una dirección de movimiento, mostrando así los siguientes resultados:

Tabla 8. Modos de Vibración

Altura	Modo 1	Modo 2
0.1	1	1
0.4	1.259695535	-1.179251251

En la figura 10, se puede observar el comportamiento que tendrá el sistema estructural al excitarlo con las frecuencias naturales.

Figura 10. Modos de Vibración de la estructura. Izquierda modo1 y derecha modo 2.



3.4. PARTICIPACIÓN MODAL

El vector de modos normales se obtuvo al asignarle al vector $\{\mu\}$ un elemento con valor unitario, sin embargo para los cálculos requeridos es conveniente normalizar este vector respecto a la masa del sistema y así obtener el coeficiente de participación [13]; el resultado esperado es que todo el porcentaje de participación se encuentre en el primer modo dinámico de la estructura aislada .

En el primer modo se deforma el aislador, pero la estructura se mantiene rígida; por lo tanto a este se le conoce como el modo de aislamiento. El segundo modo se deforma tanto la estructura como los aisladores, razón por la que se conoce como el modo estructural, el cual contribuye muy poco a los efectos generados por el sismo en la estructura [5]. Existe ortogonalidad entre el modo fundamental y los modos superiores, estos últimos no participan en el movimiento, por lo tanto la

energía y frecuencias generadas por la excitación no se transmiten a la estructura [1].

3.4.1. Modos normalizados respecto a la masa del sistema

Para poder encontrar el porcentaje de participación es importante normalizar los modos de vibración en relación a la masa del sistema, el resultado se puede observar en la Tabla 9 y se logró aplicando la ecuación 18.

$$\Phi_n = \frac{\mu_{ij}}{\sqrt{\sum_{K=1}^n (m_k * a_{kj}^2)}} \quad (18)$$

Tabla 9. Modos de Vibración Normalizados respecto a la masa.

Φ_n	
0,174864402	0,180730325
0,220275907	-0,21312646

3.4.2. Factores de participación Modal

El factor de participación modal Γ se puede despejar mediante la siguiente expresión, dónde, $\{\gamma\}$ es un vector cuyos valores son 1, esto se debe a que la aceleración del terreno es colineal con la aceleración del grado de libertad [13].

$$\Gamma = -[\Phi n]^T * [M] * \{\gamma\} \quad (19)$$

Tabla 10. Porcentaje de participación de masa.

Modo	Γ_i	Γ_i^2	Participación de Masa
1	5.110	26.110	98.688 %
2	0.589	0.347	1.312 %

Analizando el resultado anterior, aproximadamente toda la participación se encuentra en el primer modo, motivo por el cual en el diseño de estructuras

aisladas los modos superiores no juegan un papel relevante, y sólo el primer modo necesita ser incluido [1].

4. MONTAJE EXPERIMENTAL

Como se mencionó anteriormente la estructura metálica es sometida a distintas excitaciones armónicas en la base, las cuales son aplicadas mediante un servoactuador hidráulico el cual se aprecia en la figura 11.

Figura 11. Mesa vibratoria.



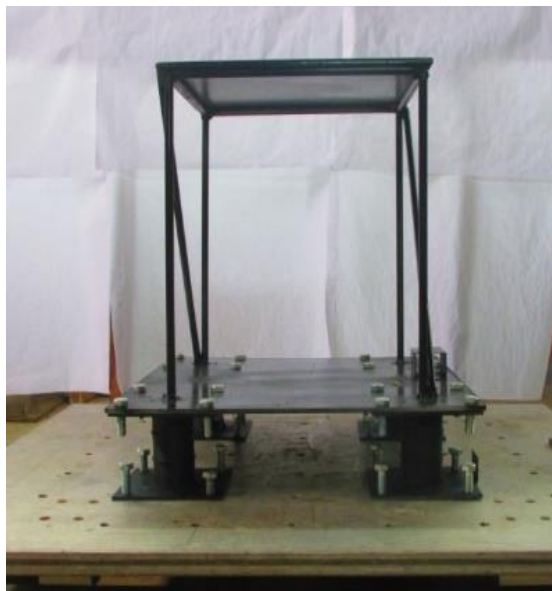
La mesa sísmica pertenece al grupo de investigación DICBOT (dinámica, control y robótica) de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Las señales sinusoidales o excitaciones armónicas tienen una amplitud constante de 1.5 cm y son enviadas a la mesa vibratoria mediante un generador de funciones modelo CFG253 (ver figura 12).

Figura 12. Generador de funciones CFG253



El montaje de la estructura de análisis se realizó por medio de pernos de $\frac{1}{4}$ ", de esta manera se ancló totalmente a la mesa vibratoria. Este proceso se realizó dos veces: primero, para la estructura sin aislamiento, y segundo, para la estructura puesta sobre los cuatro aisladores de goma laminados (ver Figura 13).

Figura 13. Ensamble de la estructura sobre la mesa sísmica sobre los aisladores de goma laminados.



Para medir la respuesta de aceleración del montaje bajo la acción de cada señal armónica, se utilizaron tres acelerómetros piezoeléctricos modelo 352C331 presentados en la figura 14, los cuales fueron puestos en los diferentes niveles del sistema (ver Figura 15):

- Nivel 1: base del aislador.
- Nivel 2: base de la estructura de análisis.
- Nivel 3: platina superior de la estructura de análisis.

Figura 14. Acelerómetros piezoeléctricos.



Figura 15. Acelerómetros piezoeléctricos instalados en la estructura.



Los acelerómetros son acoplados mediante cables coaxiales a una tarjeta de adquisición de datos NI-USB 92342 (ver Figura 16).

Figura 16. Tarjeta de adquisición de datos.



La tarjeta de adquisición de datos, se conecta a un computador usando un puerto USB.

Para controlar y observar las respuestas de las señales, se utilizó un complemento del software Labview Signal Express: el Toolkit NI Sound and Vibration Assistant, el cual permite programar plantillas de recopilación y organización de datos.

Con el fin de obtener las respuestas dinámicas del sistema en estudio, se evaluaron seis valores cercanos a las frecuencias naturales del primer modo de vibración de la estructura sin aislamiento y del primer y segundo modo de vibración de la estructura con aislamiento.

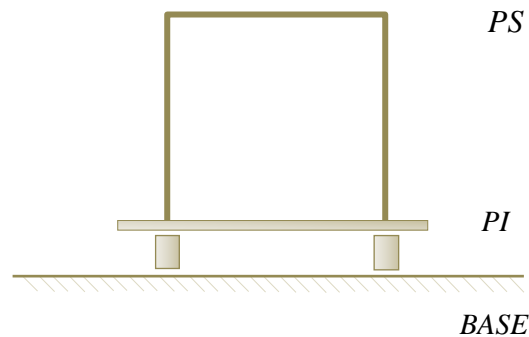
En la siguiente sección se presentan de forma detallada los resultados obtenidos.

5. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

Los ensayos realizados en el laboratorio mostraron la respuesta experimental del pórtico metálico con los aisladores puestos en su base y sin estos, teniendo en cuenta que la excitación armónica (emitida por la mesa vibratoria) genera una señal sinusoidal con amplitud constante de 1.5 cm se debe comprender que únicamente se variaba el valor de la frecuencia asignada en el generador de señales.

Con el fin de realizar una interpretación de los resultados obtenidos se empleó la siguiente nomenclatura: a la placa superior del pórtico se le denominó como P_s , a la placa inferior del pórtico como se le denominó P_i y a la base de los aisladores como $BASE$ (Ver figura 17).

Figura 17. Nomenclatura de los diferentes niveles del pórtico.



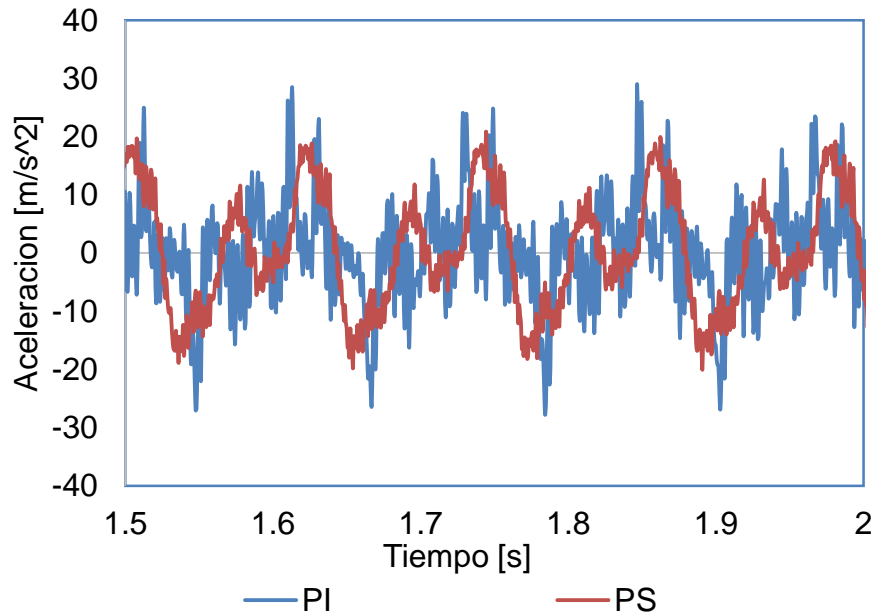
En las siguientes secciones se encontrará la presentación de los resultados generados en los ensayos de laboratorio, se buscó simplificar la presentación de los datos mediante el uso de los valores máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento e igualmente se evidenció en la gráfica de aceleración el comportamiento que tuvo el sistema ante las diferentes frecuencias.

5.1. ESTRUCTURA SIN AISLADORES

Se tomaron cinco frecuencias características en las que se puede observar los casos críticos del sistema de estudio. La tabla 16 muestra todos los valores máximos en desplazamiento, velocidad y aceleración para la estructura sin aislamiento tanto en la placa superior como en la inferior de la misma.

5.1.1. Frecuencia de 7.5 Hz

Figura 18. Valores de Aceleración, 7.5 Hz. Sin Aisladores



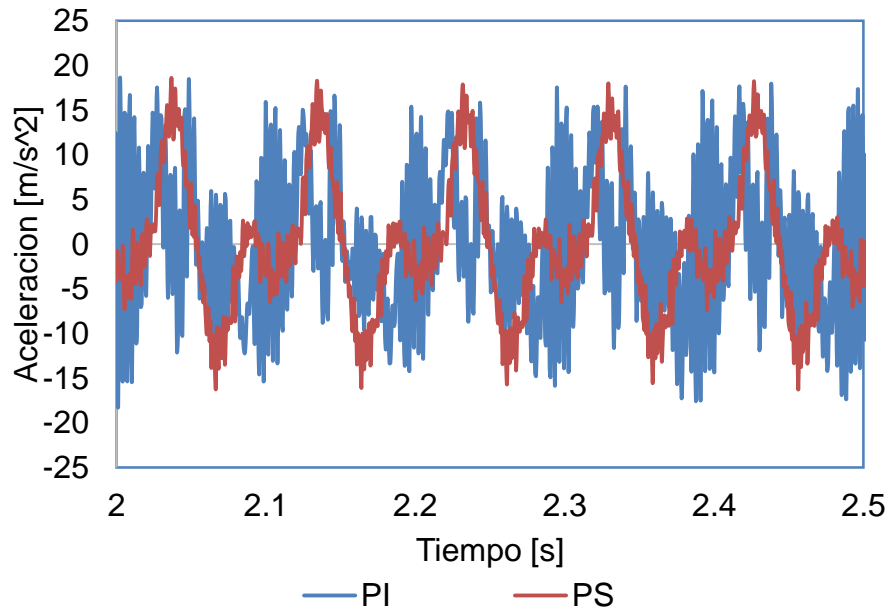
Los valores máximos para esta condición de excitación se observan en la tabla 11.

Tabla 11. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 7.5 Hz.

	A	V	D
	m/s^2	m/s	mm
Ps	21.825	0.262	5.291

5.1.2. Frecuencia de 10.5 Hz

Figura 19. Valores de Aceleración, 10.5 Hz. Sin Aisladores



Los valores máximos para esta condición de excitación se observan en la tabla 12.

Tabla 12. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 7.5 Hz.

	A	V	D
	m/s²	m/s	mm
Ps	18.633	0.183	2.215

5.1.3. Frecuencia de 16.5 Hz

Figura 20. Valores de Aceleración, 16.5 Hz. Sin Aisladores

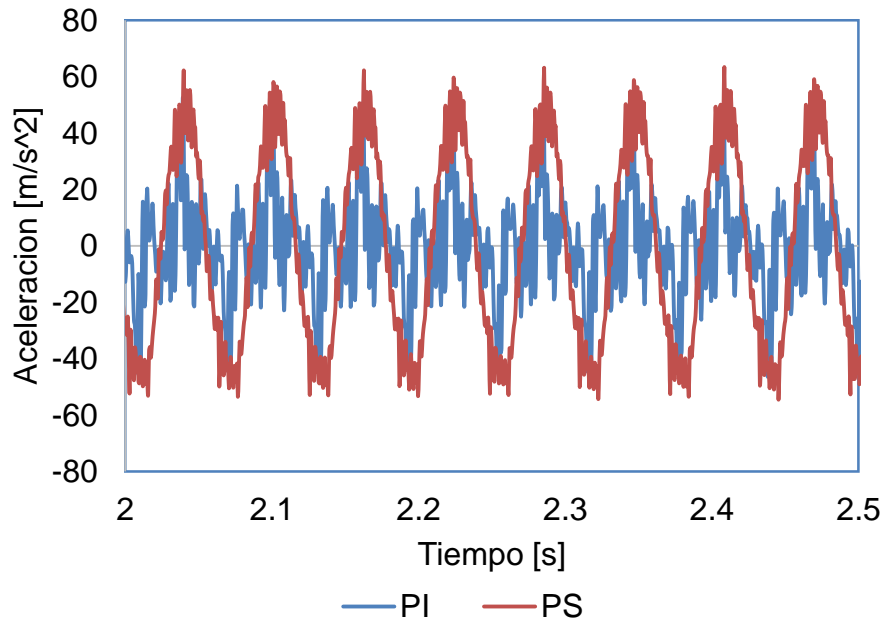
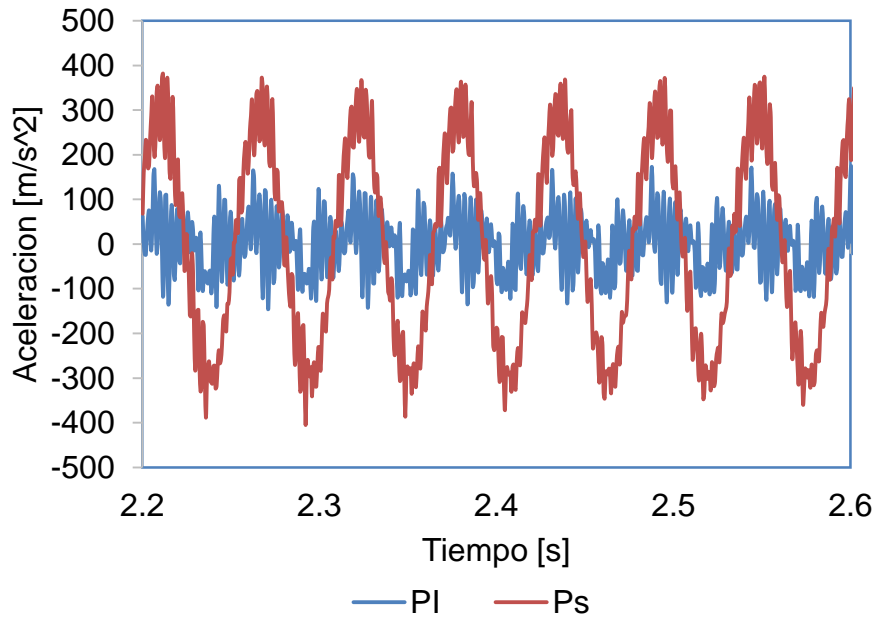


Tabla 13. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 16.5 Hz.

	A	V	D
	m/s²	m/s	mm
Ps	63.413	0.526	10.313

5.1.4. Frecuencia de 18.5 Hz

Figura 21. Valores de Aceleración, 18.5 Hz. Sin Aisladores



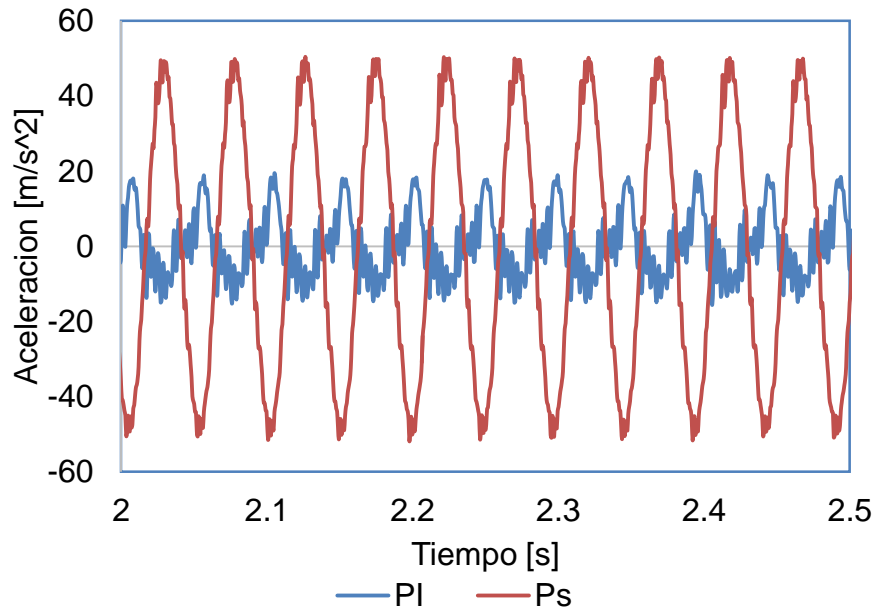
Los valores máximos para esta condición de excitación se observan en la tabla 14.

Tabla 14. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 18.5 Hz.

	A	V	D
	m/s^2	m/s	mm
Ps	405.243	2.743	26.768

5.1.5. Frecuencia de 21 Hz

Figura 22. Valores de Aceleración, 21 Hz. Sin Aisladores



Los valores máximos para esta condición de excitación se observan en la tabla 15.

Tabla 15. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 21 Hz.

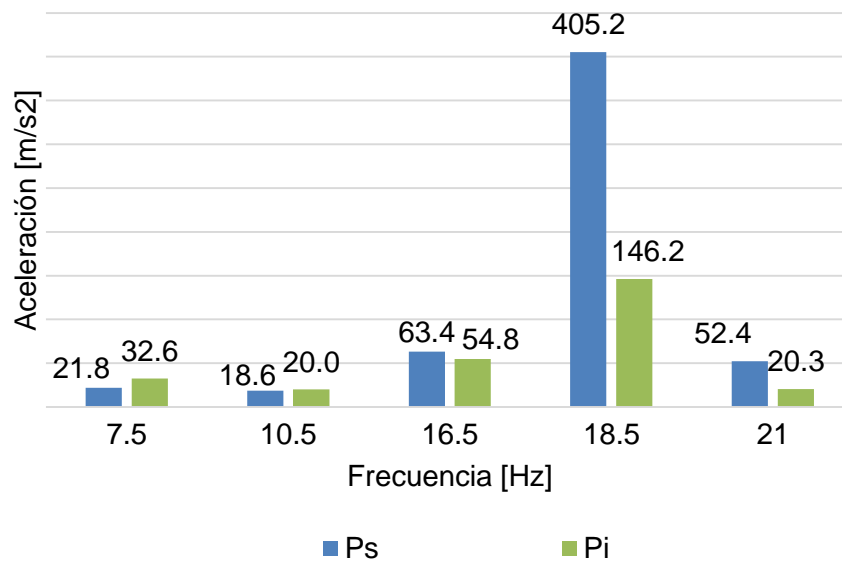
	A	V	D
	m/s²	m/s	mm
Ps	52.406	0.405	7.334

Tabla 16. Valores máximos de respuesta (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento D) en los diferentes niveles de la estructura sin aislamiento (Placa Superior: Ps, Placa Inferior: Pi), para todas las frecuencias de estudio.

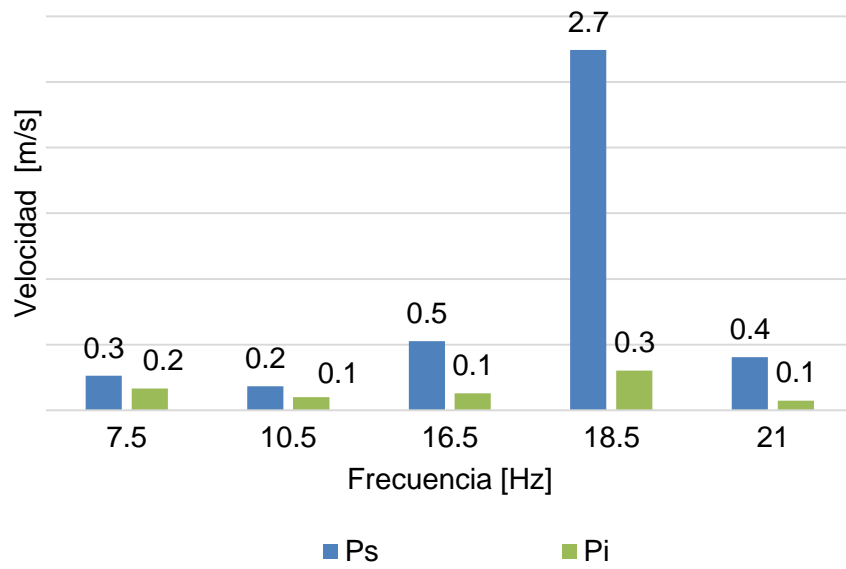
Frecuencia	Ps			Pi		
	A	V	D	A	V	D
Hz	m/s ²	m/s	mm	m/s ²	m/s	mm
7.5	21.825	0.262	5.291	32.594	0.166	4.2924
10.5	18.633	0.183	2.215	19.996	0.101	1.3261
16.5	63.413	0.526	10.313	54.791	0.130	1.7452
18.5	405.243	2.743	26.768	146.174	0.303	3.6391
21	52.406	0.405	7.334	20.338	0.074	1.1372

En la figura 23 se encuentran graficados los datos mostrados en la anterior tabla, discriminándolos por aceleración, velocidad y desplazamiento.

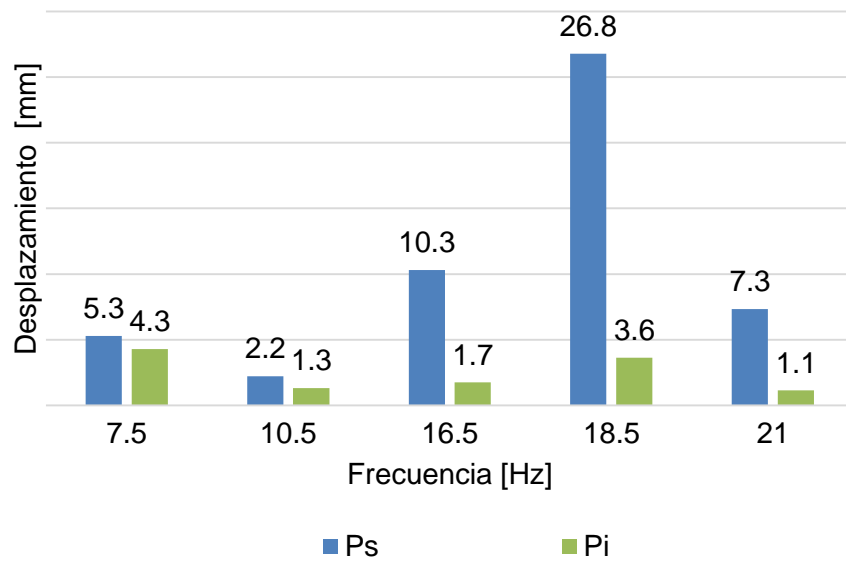
Figura 23. Valores máximos de (a) Aceleración, (b) Velocidad, y (c) desplazamiento, de la estructura sin aislamiento en la placa superior (Ps) y la placa inferior (Pi), para todas las frecuencias de estudio.



(a)



(b)



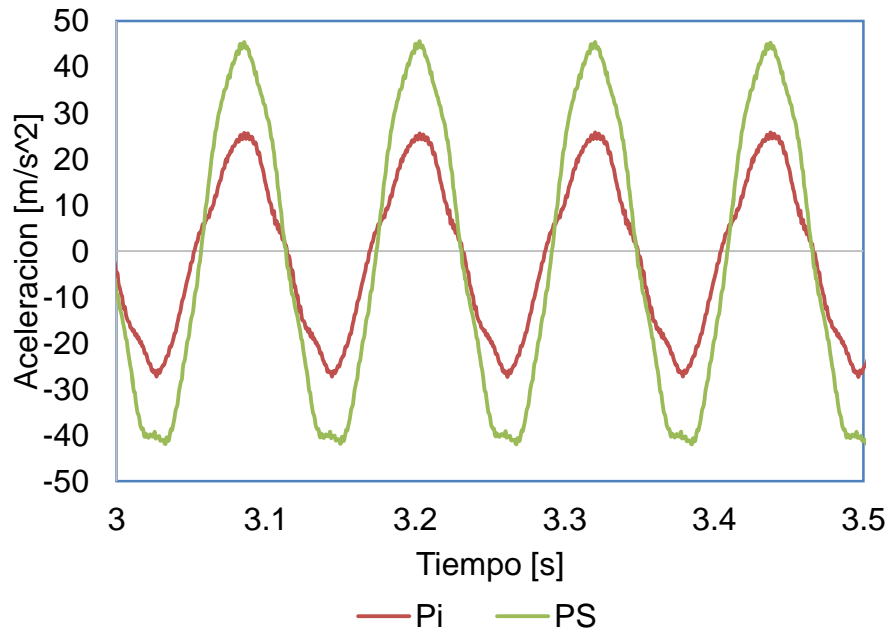
(c)

5.2. ESTRUCTURA CON AISLADORES

Se evaluaron las mismas frecuencias utilizadas en la sección 5.1, las cuales generan los resultados máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento. Estos datos se tomaron de los acelerómetros ubicados en la placa superior e inferior del pórtico metálico.

5.2.1. Frecuencia de 7.5 Hz

Figura 24. Valores de Aceleración, 7.5 Hz. Con Aisladores



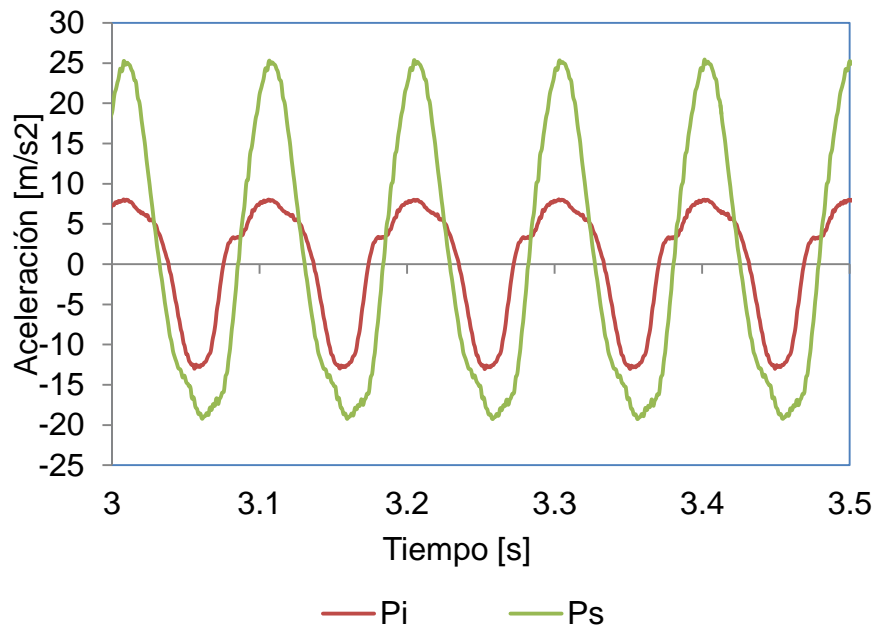
Los valores máximos para esta condición de excitación se observan en la tabla 17.

Tabla 17. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 7.5 Hz.

	A	V	D
	m/s^2	m/s	mm
Pi	27.514	0.509	8.618
Ps	45.731	0.907	15.521

5.2.2. Frecuencia de 10.5 Hz

Figura 25. Valores de Aceleración, 10.5 Hz. Con Aisladores



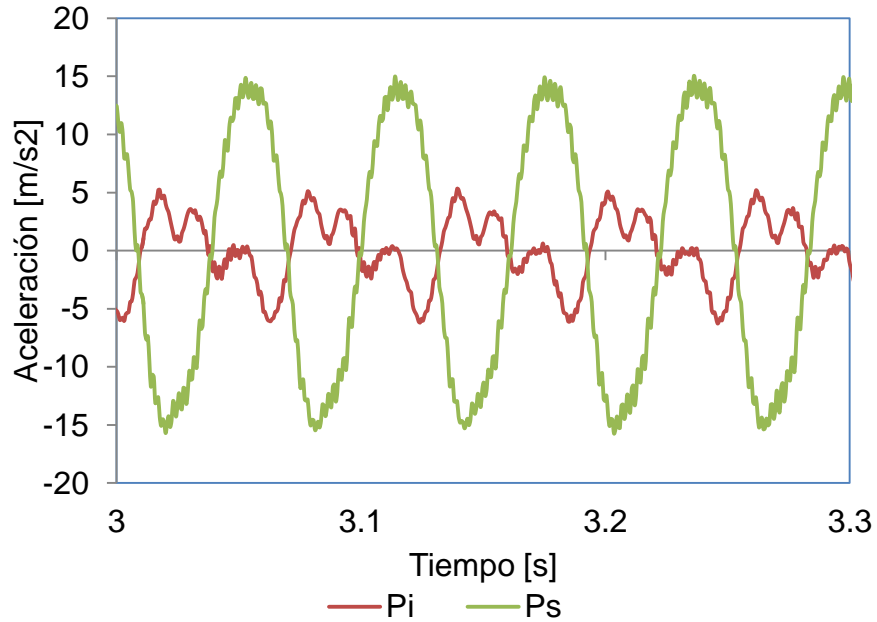
Los valores máximos para esta condición de excitación se observan en la tabla 18.

Tabla 18. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 10.5 Hz.

	A	V	D
	m/s²	m/s	mm
Pi	13.205	0.179	4.009
Ps	25.477	0.369	7.525

5.2.3. Frecuencia de 16.5 Hz

Figura 26. Valores de Aceleración, 16.5 Hz. Con Aisladores



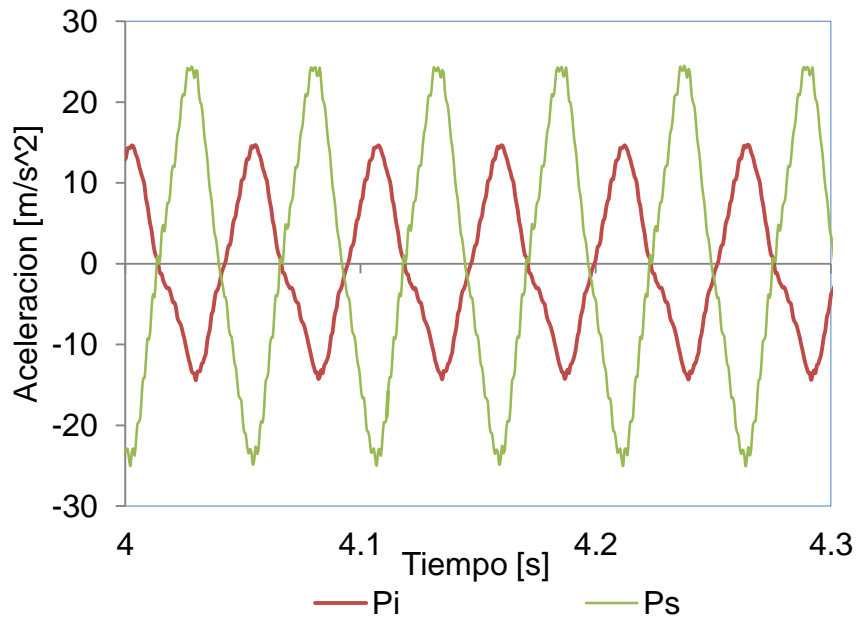
Los valores máximos para esta condición de excitación se observan en la tabla 19.

Tabla 19. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A , velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 16.5 Hz.

	A	V	D
	m/s^2	m/s	mm
Pi	6.601	0.046	0.419
Ps	15.928	0.158	2.170

5.2.4. Frecuencia de 18.5 Hz

Figura 27. Valores de Aceleración, 18.5 Hz. Con Aisladores



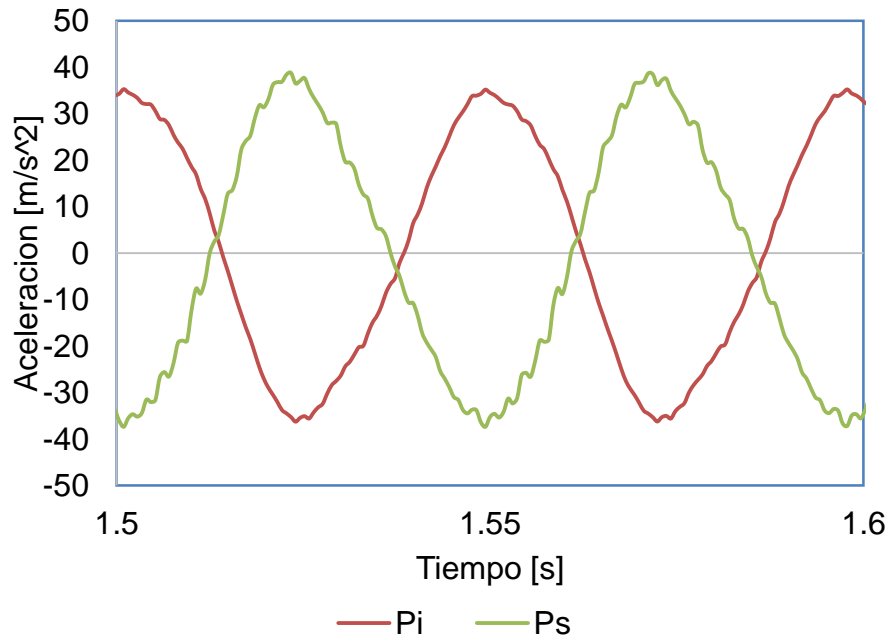
Los valores máximos para esta condición de excitación se observan en la tabla 20.

Tabla 20. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 18.5 Hz.

	A	V	D
	m/s²	m/s	mm
Pi	14.748	0.105	1.196
Ps	25.205	0.190	2.527

5.2.5. Frecuencia de 21 Hz

Figura 28. Valores de Aceleración, 21 Hz. Con Aisladores



Los valores máximos para esta condición de excitación se observan en la tabla 21.

Tabla 21. Valores Máximos de la respuesta dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento: D), para la frecuencia de 21 Hz.

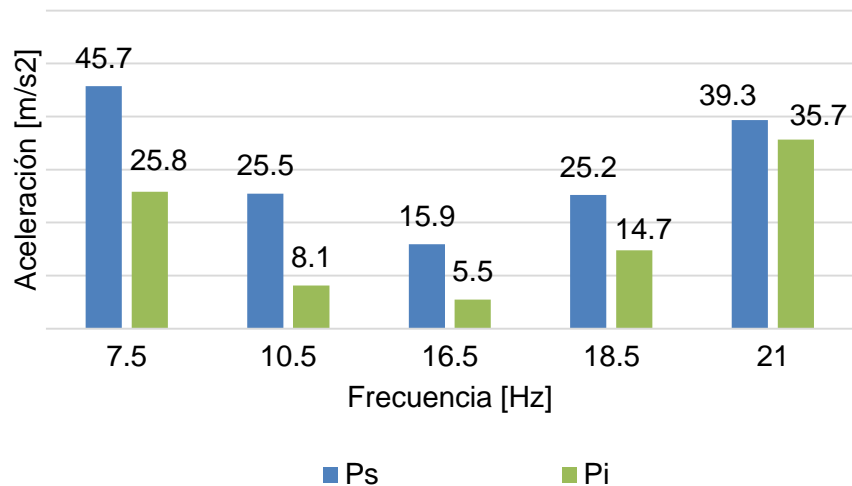
	A	V	D
	m/s²	m/s	mm
Pi	36.619	0.277	3.352
Ps	39.341	0.287	2.837

Tabla 22. Valores máximos de respuesta (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento D) en la placa superior e inferior de la estructura aislada (Placa Superior: Ps, Placa Inferior: Pi), para todas las frecuencias de estudio.

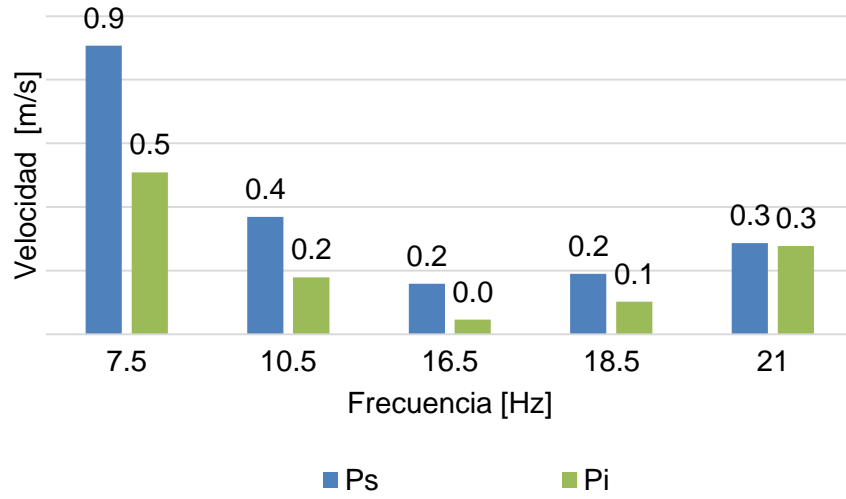
Frecuencia	Ps			Pi		
	A	V	D	A	V	D
Hz	m/s²	m/s	mm	m/s²	m/s	mm
7.5	45.731	0.907	15.521	25.807	0.509	8.618
10.5	25.477	0.369	7.525	8.135	0.179	4.009
16.5	15.928	0.158	2.170	5.496	0.046	0.419
18.5	25.205	0.190	2.527	14.748	0.102	1.196
21	39.341	0.287	2.837	35.669	0.277	3.352

A continuación se observan los diagramas respectivos para esta sección.

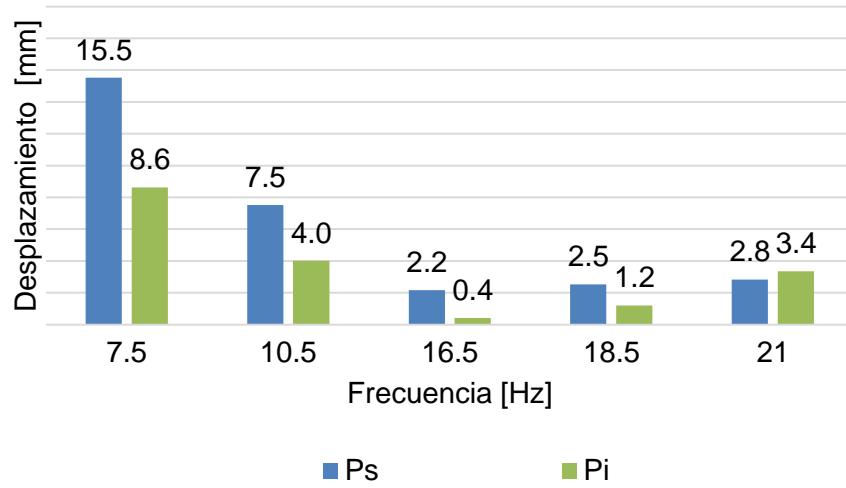
Figura 29. Valores máximos de (a) Aceleración, (b) Velocidad, y (c) desplazamiento, de la estructura aislada, para todas las frecuencias de estudio.



(a)



(b)



(c)

6. ANALISIS DE RESULTADOS

Mediante los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio se pudo corroborar la efectividad de los aisladores sísmicos de goma laminados.

Buscando obtener un balance promedio de las medidas tomadas, se calcularon las medias cuadráticas o RMS (Root Mean Square) para la comparación de la aceleración, velocidad y desplazamiento del pórtico aislado y sin aislar.

6.1. COMPARACIÓN DE LAS FRECUENCIAS NATURALES

Se pudo comprobar que las frecuencias naturales halladas teóricamente se encuentran cercanas a las observadas en el ensayo experimental, validando así el análisis que se realizó en las secciones anteriores. Esta información se puede observar en la Tabla 23.

Tabla 23. Porcentaje de error entre las frecuencias fundamentales halladas teórica y experimentalmente.

<i>Frecuencia Fundamental Teórica</i>		
Pórtico Sin Aislamiento	18.04	Hz
Pórtico Aislado	6.57	Hz
<i>Frecuencia Fundamental Experimental</i>		
Pórtico Sin Aislamiento	18.50	Hz
Pórtico Aislado	7.5	Hz
<i>Porcentaje de Error entre las frecuencias teóricas y experimentales</i>		
Pórtico Sin Aislamiento	2.554374 %	Hz
Pórtico Aislado	14.10919 %	Hz

Conociendo que el objetivo principal al usar aisladores sísmicos es incrementar el período fundamental del sistema estructural [5] se muestra en la tabla 24 el cumplimiento de esta condición en el presente caso de estudio.

Tabla 24. Período fundamental del Pórtico metálico con aislamiento sísmico y sin éste.

Período Fundamental	
Pórtico Sin Aislamiento	0.05543 seg
Pórtico Aislado	0.15215 seg

Debido a esto la respuesta de la estructura mostró que en la frecuencia fundamental se presentan los mayores valores de aceleración, velocidad y desplazamiento tanto en el pórtico aislado como sin aislar. Sin embargo, para conocer la reducción generada en el comportamiento dinámico del modelo de estudio al utilizar aisladores sísmicos, se debe comparar la respuesta obtenida en las frecuencias fundamentales del sistema.

Tabla 25. Reducción porcentual de los valores RMS de la Respuesta Dinámica (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento D) en la placa superior (PS), entre la frecuencia fundamental del sistema sin aislamiento y del sistema aislado.

RMS Frecuencia Fundamental			
Pórtico Sin Aislar	A m/s ²	V m/s	D mm
18.5 Hz	218.417	1.912	17.177
Pórtico Aislado	A m/s ²	V m/s	D mm
7.5 Hz	30.881	0.576	10.822
Reducción %	85.862	69.86	36.998

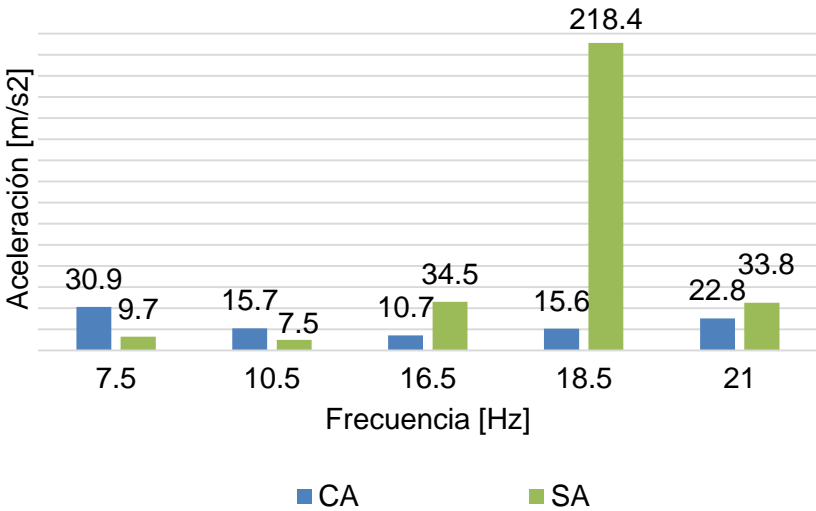
De la tabla anterior se puede observar que en la resonancia del sistema aislado se redujo de manera significativa la aceleración, velocidad y desplazamiento comparada con la respuesta que se obtuvo en el sistema sin aislamiento. Es importante resaltar que en el ensayo experimental el pórtico sin aislamiento se fracturó al excitarlo armónicamente con la frecuencia natural, en cambio al inducir

la frecuencia fundamental del sistema aislado el pórtico metálico no sufrió ningún daño estructural.

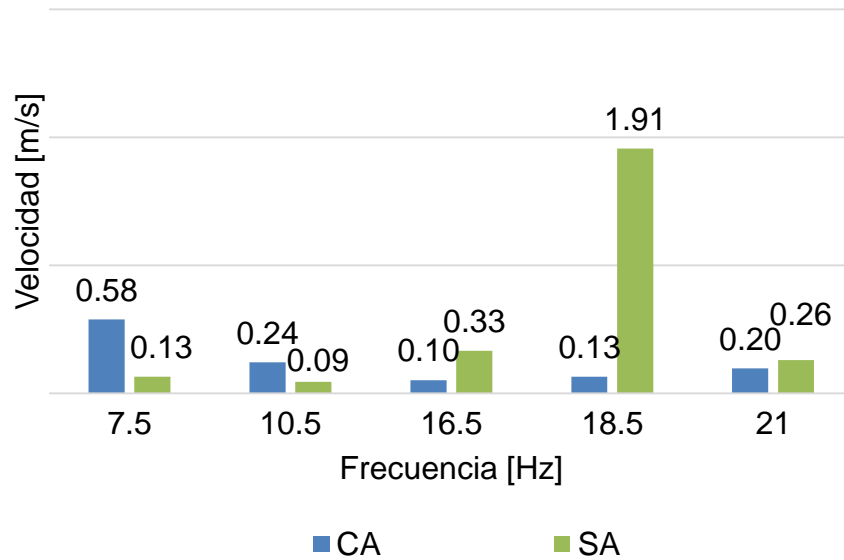
6.2. COMPARACIÓN DEL SISTEMA AISLADO EN LAS FRECUENCIAS DE ESTUDIO

Aunque ya observamos que una estructura con aislamiento de base reduce el efecto generado al presentarse resonancia tanto en el sistema con aisladores como en el sistema sin aislamiento, es importante comparar las variaciones existentes en la respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento cuando se inducen los mismos valores de frecuencia en los ensayos. En la figura 30 se puede observar la comparación realizada en los valores RMS, en esta sección la comparación se hará directamente entre la estructura sin aislamiento y la estructura aislada al someterlas al mismo valor de frecuencia.

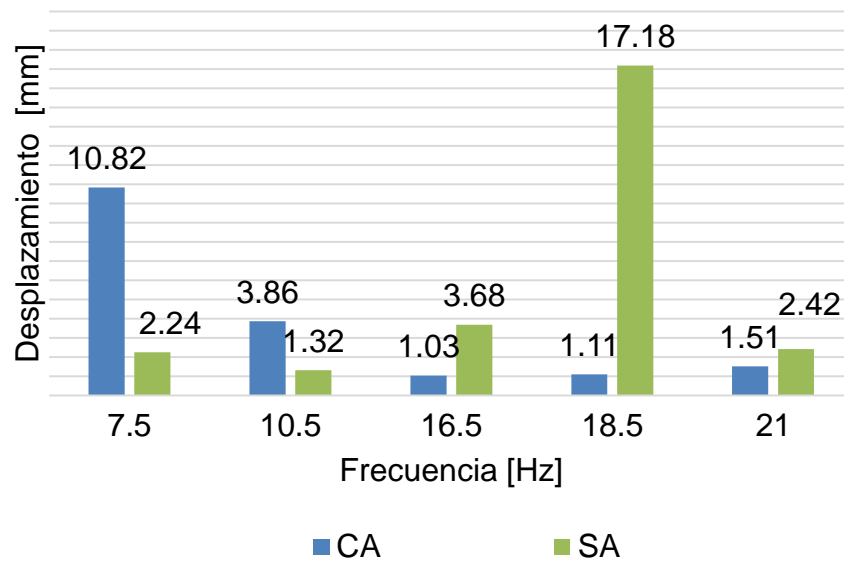
Figura 30. Comparación de las magnitudes de respuesta dinámica: (a) Aceleración, (b) Velocidad, y (c) desplazamiento, de la estructura en estado original y con los aisladores de base, para la planta superior en todas las frecuencias de estudio.



(a)



(b)



(c)

Se puede establecer que para las frecuencias de 16.5, 18.5 y 21 Hz se redujo notablemente la aceleración, velocidad y el desplazamiento cuando se colocaron los aisladores sísmicos de goma laminado en la base de la estructura, mostrando

así que el comportamiento dinámico se modificó debido a la notable disminución de la frecuencia fundamental.

En las frecuencias de 7.5 y 10.5 sucede el efecto contrario, al poner los aisladores sísmicos se evidenció un incremento en la respuesta dinámica de la estructura, justificado porque la resonancia del sistema aislado se encuentre en este rango. Como se explicó en la sección 7.1, para estas frecuencias el pórtico sin aislamiento presenta pequeños movimientos ya que se encuentra lejos de su frecuencia natural, en cambio, como el sistema aislado disminuyó la frecuencia fundamental de 18.5 a 7.5 se observa un incremento en la respuesta.

En la tabla 26 se aprecian los incrementos y reducciones porcentuales correspondientes a los RMS de la respuesta dinámica en la estructura. Teniendo en cuenta que los valores negativos representan un incremento en la magnitud de las respuestas y los valores positivos una disminución de la misma cuando se colocan los aisladores sísmicos de goma laminados.

Tabla 26. Porcentaje de variación de la respuesta dinámica en RMS (aceleración: A, velocidad: V y desplazamiento D) entre la estructura original y la estructura con el sistema de aislamiento, para todas las frecuencias de estudio.

Frecuencia	A	V	D
Hz	%	%	%
7.5	-217.026	-343.901	-382.755
10.5	-109.229	-167.851	-193.791
16.5	68.976	68.910	72.141
18.5	92.874	93.246	93.564
21	32.716	25.110	37.391

En la tabla 27 se puede observar el desplazamiento relativo entre la placa superior e inferior de la estructura de estudio, los resultados muestran que en las frecuencias cercanas a la resonancia este valor es alto. Se debe destacar el

comportamiento presentado en 21 Hz con los aisladores puestos en la base ya que evidencia el movimiento correspondiente al segundo modo de vibración.

Tabla 27. Desplazamiento Relativo entre la placa Superior e inferior del pórtico metálico.

Frecuencia Hz	<i>Desplazamiento Relativo mm</i>	
	Con Aisladores	Sin Aisladores
7.5	7.101	1.456
10.5	3.667	1.177
16.5	2.351	7.730
18.5	3.716	26.341
21	6.159	8.594

7. CONCLUSIONES

El diseño del sistema de aislamiento corresponde únicamente al modelo de estudio, por lo tanto es relevante aclarar que los resultados obtenidos y su respectivo análisis no se pueden emplear en estructuras a escala real, es decir el modelo se diseñó a escala de la mesa vibratoria utilizada en los ensayos experimentales y no guarda ninguna relación de escalamiento con estructuras aisladas con apoyos de goma laminados. Al mismo tiempo como no se tomó ningún factor de escala a la hora de establecer las dimensiones del aislador, se debe destacar que se probó el comportamiento experimental con las dimensiones que cumplieron los parámetros de diseño.

El estudio realizado se vio limitado al tamaño, rango de frecuencias aplicable y capacidad de soporte de la mesa vibratoria disponible para realizar las diferentes pruebas de laboratorio, razón por la que el pórtico metálico no podía tener un tamaño considerable debido al peso propio del mismo. También el proceso constructivo de los aisladores en goma laminados representó una limitante en el diseño de los mismos, esto se debió a la exigencia de un espesor mínimo de las capas de caucho natural en la producción del apoyo. Con las razones anteriormente expuestas se puede establecer que al definir el tamaño del aislador no se tuvo en cuenta el factor de escalamiento del modelo ya que las dimensiones del mismo no permitirían observar el comportamiento esperado debido al bajo peso de la estructura con relación a la carga crítica soportada e igualmente la vulcanización del apoyo solo se pudo realizar con valores mínimos en el espesor de las capas de goma. Sí se utilizara el factor de escalamiento del modelo las frecuencias de vibración superarían las admisibles en el laboratorio, la participación modal tendría un alto porcentaje en el segundo modo y el comportamiento experimental no sería el esperado de una estructura aislada ya que el peso de la estructura no puede superar la soportada por la mesa sísmica. Las mejoras que se pueden realizar para optimizar el estudio iniciado en el

presente trabajo son diseñar un aislador con el factor de escalamiento adecuado teniendo en cuenta que la estructura que se desea evaluar deberá tener mayor tamaño y peso (implicaría el uso de una mesa vibratoria con mayor capacidad), buscar colaboración de grupos de investigación para realizar la producción del aislador con las dimensiones requeridas y probar el comportamiento de los apoyos existentes bajo la acción de diferentes cargas con el fin de evaluar la variación de la respuesta obtenida.

Los aisladores sísmicos utilizados en el estudio fueron elaborados con caucho natural laminado, para lograr esta característica se colocaron dos láminas de acero de bajo espesor para incrementar la rigidez vertical y evitar que el sistema de aislamiento se deformara verticalmente, adicionalmente el espesor de las capas de goma garantizó que el apoyo presentara el desplazamiento lateral característico de este sistema pues cuando el sistema era excitado con 21 Hz, una frecuencia muy cercana a la frecuencia natural del segundo modo de vibración en el pórtico con aisladores sísmicos, se observó que el desplazamiento relativo entre la placa superior e inferior era mayor al presentado en las otras frecuencias diferentes a la de resonancia.

Las dimensiones establecidas al diseñar el aislador permitieron que la carga crítica soportada fuera mayor que la generada por el peso propio de la estructura metálica utilizada en los diferentes ensayos.

El periodo natural calculado de la estructura sin aisladores fue de 0.055 s. Al aislar la estructura e idealizar el modelo como un sistema de dos grados de libertad, se obtuvo que el periodo fundamental se aumentó a 0.152 s y la participación modal fue del 98.68 % en el primer modo de vibración.

Se verificó que las frecuencias fundamentales medidas experimentalmente se aproximaron a las calculadas en el análisis teórico, con un porcentaje de error del 2.55% para el pórtico sin aisladores y del 14.10% para el pórtico aislado.

El sistema de aislamiento mostró su mayor efectividad en los altos valores de frecuencia, ya que en este rango disminuyó notablemente el efecto generado por el movimiento armónico. Excitando la estructura con una frecuencia de 18.5 Hz, correspondiente a la frecuencia natural, se comparó la respuesta en la placa superior de ésta con y sin aislamiento de base, obteniendo disminuciones en la aceleración, velocidad y desplazamiento cercanas al 93%.

El sistema tuvo excelente comportamiento en ciertas frecuencias, sin embargo en la frecuencia fundamental del sistema aislado se presentó un elevado incremento en la respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento. Aunque se evidenció un fuerte movimiento en la estructura es importante destacar que la respuesta fue favorable a diferencia de lo que se observó cuando se sometió el pórtico sin aislamiento a su frecuencia natural ya que en este caso la estructura sufrió daños.

El sistema aislado mostró el cambio en el comportamiento dinámico del pórtico metálico, aunque no se anuló en su totalidad el impacto generado por la excitación armónica, sí se logró disminuir la influencia de ésta. En la sección 7.1 se observa una reducción de 85.86% en la aceleración de la placa superior del pórtico con y sin aisladores, cuando se encuentra en resonancia.

Es importante tener en cuenta que existen condiciones que no se pueden controlar en el experimento y afectan las respuestas obtenidas, es decir se presenta cierta

incertidumbre en parámetros considerados y en el funcionamiento de los diferentes equipos utilizados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] LUNA CASAZOLA, José Santos. Aislantes Sísmicos Aplicados a una Edificación de Ocho Niveles. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería, 2013. 1-83 p.
- [2] MOLINARES AMAYA, Nelson Ramón. Sistemas de control pasivos y activos de aislamiento de base para edificios sometidos a acciones sísmicas. En: Ingeniería & Desarrollo ISSN: 0122-3461. Noviembre, 2003. vol. 14, p. 60-92.
- [3] DUQUE, María del Pilar y OVIEDO, Juan Andrés. Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. En: Revista EIA ISSN 1794-1237. Diciembre, 2006. vol. 6, p. 105-120.
- [4] KORSWAGEN EGUREN, Paul Alexander, ARIAS RICSE, Julio César y HUARINGA HUAMANÍ, Pamela Grace. Análisis y Diseño de Estructuras Con Aisladores Sísmicos En El Perú. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2012. 1-9 p.
- [5] CHOPRA, A.K. Dynamics of Structures. Theory and applications to Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 817 p.
- [6] AUQUI PARRA, Marco Vinicio. Análisis de Aisladores Sísmicos Elastoméricos Construidos en el Ecuador. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército, 2010. 20-60 p.
- [7] BOROSCHEK, R. Aislación Sísmica de Edificios. VIII Seminario Internacional y Primer Congreso Nacional De Ingeniería Sísmica "Modelación Del Daño En Edificaciones Y Métodos Modernos Para Rehabilitación Sísmica". Bogotá; Colombia; 2001.
- [8] AGUIAR FALCONI, Roberto, ALMAZÁN, José Luis y DECHENT, Peter. Aisladores de Base Elastoméricos y Fps. Quito: Centro de Investigaciones Científicas Escuela Politécnica del Ejército, 2008. 34-58 p.
- [9] ANGULO PROTA, Luis. Los Apoyos en Neopreno para Puentes y Estructuras. En: Revista de Obras Públicas. Febrero, 1965. Tomo I, No 2998. p. 89-108.
- [10] MONTANARO, María Inés. Sistema de Control de Vibraciones en Edificios de Gran Altura. En: Informes de la Construcción. Enero, 2002. vol 53, no 477, p 31-39.
- [11] CHAVARRO, Johan y MARIÑO, C. Modelado y caracterización dinámica de un servoactuador hidráulico. Trabajo de grado Ingeniería Mecánica. Bucaramanga:

Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, 2010. 1- 168 p.

[12] CHAPARRO TARAZONA, Andrea y SANTAMARÍA ARIZA, Mónica; Evaluación experimental de un TLCD en un modelo a escala. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, 2010. 1- 65 p.

[13] MALDONADO RONDÓN, Esperanza y CHIO CHO, Gustavo. Análisis Sísmico de Edificaciones. Bucaramanga: División Editorial y Publicaciones Universidad Industrial de Santander, 2004. 119-146 p.

BIBLIOGRAFÍA

AGUIAR FALCONI, Roberto, ALMAZÁN, José Luis y DECHENT, Peter. Aisladores de Base Elastoméricos y Fps. Quito: Centro de Investigaciones Científicas Escuela Politécnica del Ejército, 2008.

CHOPRA, A.K. Dynamics of Structures. Theory and applications to Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

MALDONADO RONDÓN, Esperanza y CHIO CHO, Gustavo. Análisis Sísmico de Edificaciones. Bucaramanga: División Editorial y Publicaciones Universidad Industrial de Santander, 2004.