

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE AISLADORES CINEMÁTICOS DE BASE.**

**KAREN JINETH AGUDELO ACOSTA.  
MILER ANDRÉS GONZÁLEZ COMBITA.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2016**

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE AISLADORES CINEMÁTICOS DE BASE.**

**KAREN JINETH AGUDELO ACOSTA.  
MILER ANDRÉS GONZÁLEZ COMBITA.**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero civil**

**Director**

**OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO  
Ingeniero Civil, M. Sc., PhD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos primeramente a Dios por brindarnos las capacidades físicas y psicológicas para poder llevar a buen término los objetivos planteados.

A nuestros padres ya que con su ayuda y apoyo en los momentos de más adversidades logramos superar los obstáculos que se presentaron.

Al profesor Oscar Begambre por su orientación en cada etapa del proyecto.

Al señor Jairo Hernández por el apoyo prestado en el laboratorio de estructuras EABP.

Al Ingeniero Oscar Acosta por sus asesorías a lo largo del proyecto.

A todos nuestros compañeros y amigos que estuvieron presentes a lo largo de esta etapa universitaria.

**DEDICATORIA,**

**A mis padres, que son el motor de mi vida, y a ellos los tres ángeles que iluminan mi camino.**

**Karen Agudelo**

***A todos quienes lo merezcan, y en especial a mis padres que me han dado todas las herramientas necesarias para ser el hombre que soy.***

***Miler González***

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	13
1. ANÁLISIS Y RECONOCIMIENTO, DE LOS AISLADORES CINEMÁTICOS DE BASE. ....	15
1.1 ANTECEDENTES.....	15
2. DISEÑO DE LOS AISLADORES UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS. ....	20
3. MONTAJE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DINAMICO DE LAS ESTRUCTURAS APORTICADAS .....	25
3.1 PROPIEDADES FÍSICAS .....	25
3.2 ANÁLISIS DINÁMICO DE LA ESTRUCTURA .....	26
3.2.1 Matrices de Masa y rigidez .....	28
3.2.2 Determinación modos de vibración .....	30
3.2.3 Participación Modal.....	32
3.2.4 Factores Normalizados .....	32
3.3 MONTAJE EXPERIMENTAL .....	34
4. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS. ....	39
5. CONCLUSIONES .....	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Descripción Aisladores cinemáticos de base (PPP) .....	16
Figura 2. DCL aisladores cinemáticos de base (PPP) .....	17
Figura 3. Desplazamiento aisladores cinemáticos de base (PPP).....	18
Figura 4 Geometría límites de estabilidad .....	19
Figura 5. Diseño de tope aislador. ....	20
Figura 6. Curvaturas de aisladores. ....	22
Figura 7. Los aisladores instalados en la estructura. ....	23
Figura 8. DCL aisladores diseñados .....	23
Figura 9. Estructura utilizada para las pruebas.....	26
Figura 10. Modos de vibración de la estructura Modo 1 (fundamental) .....	32
Figura 11. Mesa Vibratoria.....	35
Figura 12. Motor reductor (mesa Vibratoria) .....	35
Figura 13. Tornillos 8.8x1” con los que se perno la estructura a la mesa .....	36
Figura 14. Topes de los aisladores .....	36
Figura 15. Montaje estructura en la mesa Vibratoria .....	36
Figura 16. Aisladores Diseñados en varilla de 1” .....	37
Figura 17. Tarjeta de Adquisición de datos NI-USB9234.....	37
Figura 18. Cable Coaxial .....	37
Figura 19. Acelerómetros Piezómetros modelo 352C33.....	38
Figura 20. Gráfica de Comparación de Aceleraciones Piso 1 a 2Hz .....	40
Figura 21. Gráfica de Comparación de Aceleraciones Piso 2 a 2Hz .....	41
Figura 22. Gráfica de Comparación de Aceleraciones Piso 1 a 4Hz .....	41
Figura 23. Gráfica de Comparación de Aceleraciones Piso 2 a 4Hz .....	42

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Radios de curvatura prototipos .....	22
Tabla 2. Propiedades del acero utilizado en las estructuras .....	25
Tabla 3. Masas de las placas y columnas .....	27
Tabla 4. Masas para la matriz de masas .....	27
Tabla 5. Rigidez de cada columna.....	28
Tabla 6. Frecuencias de vibración de la estructura.....	30
Tabla 7. Modos de vibración .....	31
Tabla 8. Factores Normalizados .....	32
Tabla 9. Matriz de modos normalizados .....	33
Tabla 10. Factores de participación modal .....	33
Tabla 11. Porcentaje de participación de masas en la estructura.....	34
Tabla 12. Aceleraciones y RMS de la estructura sin aisladores. ....	39
Tabla 13. Aceleraciones y RMS de la estructura con aisladores a una frecuencia de 2 Hz .....	39
Tabla 14. Aceleraciones y RMS de la estructura con aisladores a una frecuencia de 4 Hz .....	40
Tabla 15. Comparación Aceleraciones y RMS de la estructura sin Aislador y Prototipos 3 y 4. ....	43
Tabla 16. Porcentaje de Reducción Aceleraciones y valores RMS estructura sin aisladores vs Prototipos 3 y 4. ....	44

## RESUMEN

**TÍTULO:** Análisis Experimental de Aisladores cinemáticos de base

**AUTORES:** Karen Jineth Agudelo Acosta  
Miler Andrés González Combita

**PALABRAS CLAVE:** Aisladores Cinemáticos, mesa vibratoria, Asilamiento sísmico.

### DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto consistió en realizar un análisis experimental de cuatro prototipos de aisladores cinemáticos de base los cuales fueron instalados en la base de una estructura metálica a porticada de dos grados de libertad, para posteriormente hacer un análisis de aceleraciones con y sin aisladores, con el fin de hacer una comparación de datos en donde se identificó el comportamiento de esta estructura antes y después del aislamiento. Las señales armónicas fueron inducidas por medio de un prototipo de mesa vibratoria que se diseñó con un moto-reductor el cual trabajo con dos frecuencias: 2 Hertz y 4 Hertz. Con estas, se realizaron las mediciones de aceleración de la estructura, por medio de los acelerómetros suministrados por el grupo de investigación INME. Luego de realizar el análisis correspondiente a la información obtenida se pudo determinar que el sistema de aislamiento cinemático de base presenta una reducción entre el 20 y el 40 por ciento en los picos de aceleración y del 5 y 30 por ciento en valores RMS. Por ultimo cabe resaltar que este trabajo se hizo con la finalidad de probar de forma experimental las nuevas configuraciones de aislamiento sísmico para determinar cuál sería el más conveniente para este tipo de estructuras.<sup>1</sup>

El prototipo de aislador número 4 funcionó de manera correcta con un porcentaje de reducción para 2 Hertz de 32% y 20% en valores RMS, 42% y 31% en aceleraciones máximas en el piso 1 y 2 respectivamente; para 4 Hertz de 27% y 21% en valores RMS, 33% y 19% en aceleraciones máximas en el piso 1 y 2 respectivamente.

---

\*Proyecto de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo ingeniero civil, PhD.

## ABSTRACT

**TITLE:** Experimental Analysis of kinematic base insulators<sup>\*</sup>

**AUTHORS:** Karen Jineth Agudelo Acosta<sup>\*\*</sup>  
Miler Andrés González Cómbita

**KEY WORDS:** KINEMATIC ISOLATORS, VIBRATE TABLE, SEISMIC ISOLATION.

### DESCRIPTION:

The objective of this project is to perform an experimental analysis of four prototypes of kinematic base isolators, which were installed at the metal base of a an breached structure of two degrees of freedom, to subsequently make an analysis of acceleration with and without insulators, in order to identify the dynamic behavior of this structure, before and after the implementation of the isolation system. Harmonic signals were induced by a vibrating table prototype that was designed with a gear motor, which worked with two frequencies: 2 Hertz and 4 Hertz. With these, the acceleration measurements of the structure, by means of the accelerometers supplied by the research group INME, were performed. Once the data analysis was done, it was concluded that the kinematic base isolation system presents a reduction between 20 and 40 percent in peak acceleration and the 5 and 30 percent in RMS values.

The isolator No. 4 prototype worked properly with a percentage reduction for 2 Hertz 32% and 20% in RMS values, 42% and 31% in maximum accelerations on the floor 1 and 2 respectively; 4 Hertz 27% and 21% in RMS values, 33% and 19% in maximum accelerations on the floor 1 and 2 respectively.

Finally, it should be noted that this work was done in order to experimentally test new seismic isolation configurations, to determine which would be most suitable for this type of structure.

---

<sup>\*</sup> Bachelor Thesis

<sup>\*\*</sup> Faculty of Phisicist-Mechanics, school of Civil Engineering, Director: Oscar Javier Begambre Carrillo

## INTRODUCCIÓN

En Colombia la implementación de elementos que aporten mayor eficiencia en cuanto al desempeño de las estructuras frente a eventos sísmicos, es muy limitada, ya que no se conocen a profundidad los efectos y beneficios tanto constructivos como económicos que estos implican, en consecuencia, son pocas las organizaciones, empresas y/o constructoras que implementan sistemas de protección sísmica como los aisladores de base, que son de gran beneficio para salvaguardar la infraestructura existente.

Si bien su mayoría los diseños únicamente se rigen por la Norma Sismo Resistente (NSR), es cierto que esta garantiza el no colapso de la estructura frente a sismos de gran magnitud, sin embargo no se puede asegurar la continuidad de operación de la construcción debido a los grandes daños estructurales que esta pueda presentar. En la actualidad la sociedad ha tomado conciencia frente a los daños estructurales que se presentan durante y después de un evento sísmico, por tal efecto las personas involucradas en el medio constructor se han preocupado por implementar nuevas técnicas de disipación de energía, como lo son los aisladores sísmicos cuyo funcionamiento consiste en proporcionar seguridad y continuidad de operación a las estructuras sin que se vea afectada su inversión, calidad de servicio e integridad. Por tal motivo se hace necesario analizar el comportamiento de dichos aisladores, y en los que se verifique el comportamiento y funcionalidad de estos mecanismos.

El proceso investigativo del proyecto se realizó por medio de 4 etapas diferentes.

- I. Análisis y reconocimiento, de los aisladores cinemáticos de base. (basados en la bibliografía)
- II. Diseño de los aisladores utilizados en las pruebas.
- III. Montaje experimental y análisis dinámico de las estructuras a porticadas.

#### IV. Análisis y comparación de resultados.

A continuación se abordaran en detalle cada una de las etapas mencionadas.

# 1. ANÁLISIS Y RECONOCIMIENTO, DE LOS AISLADORES CINEMÁTICOS DE BASE.

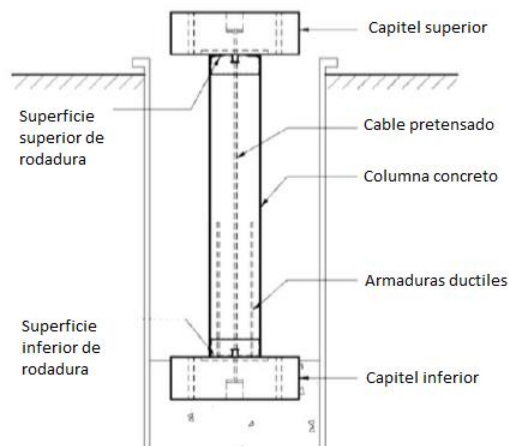
## 1.1 ANTECEDENTES

Este proyecto aborda un modelo de aislador cinemático, este tipo de aislamiento se ha presentado en diferentes tipologías de diseño por ejemplo: Lin y Hone [2] propone un sistema de aislamiento de tipo rodillo, formado por un lecho de rodillos circulares en el cual demostraron que el dispositivo podría ser muy eficaz en el control de las aceleraciones en la superestructura, más tarde, estos investigadores [2] a prueban la idea de un modelo de aisladores con rodillos soportados por rodamientos de bolas. Una versión ligeramente modificada con varillas elípticas auto centrantes fue propuesto por Jangid y Londhe [4]. En esta versión afirmaban que la acción de auto-centrado, contribuía a que los desplazamientos residuales fueran más pequeños, por lo tanto estos autores [4] concluyen que estos elementos son mejores que los rodillos circulares. Otros dispositivos cinemáticos han sido estudiados por los investigadores rusos, tales como el presentado por Beliayev et al. [5], que considera superficies de rodadura esféricas. Recientemente, Englekirk [6] desarrolló la idea de un sistema de vigas híbrido, que tiene una acción de auto-centrado producida por un cable y la energía de disipación de pre-tensado central mediante la producción de armaduras dúctiles no unidas.

Posteriormente en Chile se desarrolló un modelo de aislador cinemático basados en la superficies de curvatura y el cable pre-tensado, principalmente en proyectos de vivienda, para poder brindar un aislamiento sísmico a construcciones livianas, situadas en terrenos pobres y a un bajo costo, de esta forma se busca mejorar las condiciones de vida de las personas que habitan en las periferias de las grandes

ciudades, las cuales generalmente son las más afectadas en cuanto a estabilidad al momento en que sus viviendas se vean sometidas a movimientos telúricos, dadas las condiciones de los suelos en estas zonas los aisladores se plantearon también como fundación de pila, para alcanzar suelos estables a la hora de su construcción. Ver Figura (1).

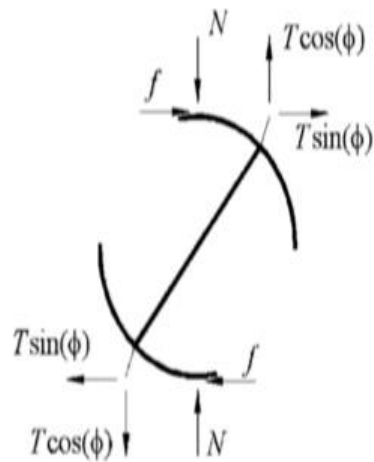
**Figura 1. Descripción Aisladores cinemáticos de base (PPP)**



Fuente: [1]

Estos aisladores [1] cuentan con un cable de pretensado central que se encarga del auto centrado del aislador, el cual genera una resistencia lateral por la proyección horizontal del cable, lo que impide el desplazamiento relativo, y aporta al sistema restricciones axiales, debe hacerse una comparación de la tensión del cable con la respuesta a la fluencia de este, y de esta manera poder asegurar su recuperación, al punto inicial, por otro lado estos aisladores [1] cuentan con superficies laminadas de acero en los extremos superior e inferior los cuales por sus componentes geométricos aportan mayor estabilidad a los aisladores gracias a la fuerza normal que ejercen los capiteles en el aislador. Ver Figura (2)

**Figura 2. DCL aisladores cinemáticos de base (PPP)**

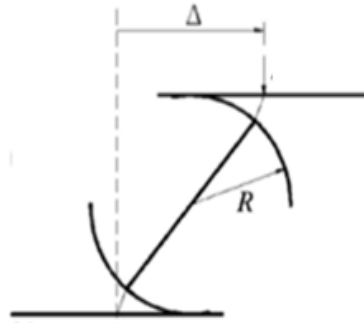


Fuente: [1]

- **N:** Fuerza Normal.
- **f:** Fuerza Unitaria.
- **T:** Fuerza de Tensión que genera el cable pre-tensado.
- **$\Phi$ :** Angulo de inclinación que se genera en el cable al inclinarse el aislador.

En la figura 3 se puede apreciar que dependiendo del radio de curvatura que tenga el aislador mayor va a ser el  $\Delta$  de desplazamiento, por tal motivo el cable tendría mayor esfuerzo para regresar a su punto inicial, y se dificultaría la estabilidad de este.

**Figura 3. Desplazamiento aisladores cinemáticos de base (PPP)**



Fuente: [1]

- Δ: Desplazamiento
- R: Radio de Curvatura

Los radios de curvatura fueron calculados partiendo del análisis geométrico que se usaron en los aisladores (PPP) en donde se asumieron los desplazamientos máximos esperados obteniendo dos ecuaciones, la primera ecuación se obtiene por medio del análisis geométrico de la figura (4).

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left( \frac{b}{2(H-R)} \right) \quad (1) [7]$$

Donde:

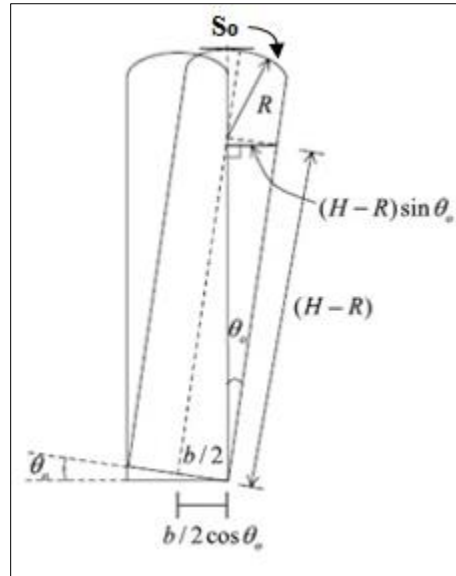
b: Diámetro de la superficie Circular

H: Altura de la columna

R: radio de curvatura del aislador

$\theta_0$ : Angulo máximo de inclinación

**Figura 4 Geometría límites de estabilidad**



Fuente: [7]

La segunda ecuación se basa en el desplazamiento máximo que puede tener el aislador con respecto al diámetro y el ángulo máximo que estos puedan tener

$$S_0 = \frac{b}{2} + R\theta_0 \quad (2) \quad [7]$$

$S_0$ : Desplazamiento máximo (aprox. Diámetro de la superficie de curvatura)

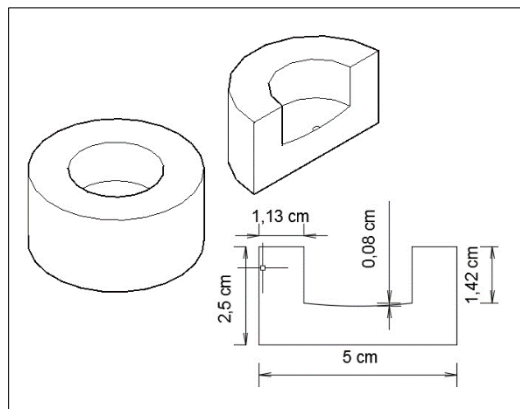
## 2. DISEÑO DE LOS AISLADORES UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS.

Se realizaron 4 prototipos de aisladores, tomando como referencia el aislador (PPP), realizando cambios en su estructura para así evidenciar la importancia de cada elemento que compone este y a su vez probar una manera diferente de llevar a cabo este tipo de aislador.

Como medida principal el cable pre tensando con el que contaba el aislador fue substituido por topes que se encargan de estabilizar la estructura, estos topes permiten un  $\Delta$  de desplazamiento mayor de los aisladores sin importar la curvatura que estos tengan, y a su vez se encargan del auto centrado de la estructura, gracias a la superficie curva que tienen en su parte interna.

Estos topes fueron diseñados en acero A-36 y figurados en un torno milimétricamente dando 1mm de separación entre el tope y la barra del aislador para liberar el movimiento. Ver Figura 5

**Figura 5. Diseño de tope aislador.**



Estos aisladores al igual que los analizados anteriormente, cuentan con dos capiteles curvos, superior e inferior,

Según la figura 4 podemos deducir la ecuación para el radio en función del ángulo máximo de inclinación y desplazamiento máximo que tenga el aislador al ser sometido a una fuerza horizontal, por lo tanto se igualaron las ecuaciones 1 y 2 obteniendo así el radio de curvatura del aislador del diseño original (ppp)

$$\frac{S_0 - \frac{b}{2}}{R} = \tan^{-1} \left( \frac{b}{2(H-R)} \right) \quad (3)$$

Reemplazando los parámetros de la ecuación 4 con los datos de nuestro diseño para los aisladores.

$$\frac{2.54 - \frac{2.54}{2}}{R} = \tan^{-1} \left( \frac{2.54}{2(13 - R)} \right)$$

Despejando el radio de curvatura obtenido fue:

$$R = 6.5002 \text{ (cm)}$$

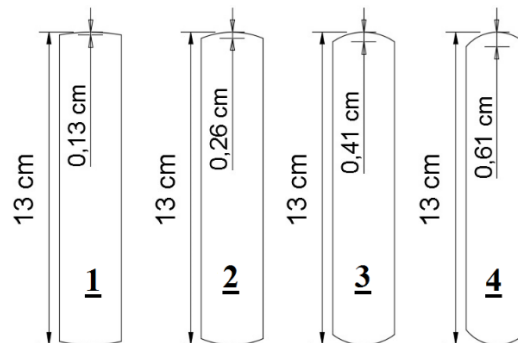
Luego para los siguientes prototipos se realizaron cambios en estos radios en escalas de  $\frac{1}{2}$  para determinar en forma empírica qué relación existe entre el radio de curvatura y el comportamiento del aislador original. De esta forma se obtuvieron las 4 curvaturas utilizadas experimentalmente para el análisis. Estos radios se presentan en la tabla (1)

**Tabla 1. Radios de curvatura prototipos**

Prototipo	1	2	3	4
Radio (cm)	6.5	3.25	2.17	1.63

Con estos radios se calculó la superficie de las barras de los aisladores Como se muestran en la figuras 6, estas fueron elaboradas en acero A-36 de 1" de diámetro y 13 cm de altura, condiciones que fueron estipuladas teniendo en cuenta la facilidad de figuración en el torno de las respectivas curvaturas y de las limitaciones de peso para las pruebas en la mesa vibratoria.

**Figura 6. Curvaturas de aisladores.**



En la figura 7 se puede apreciar la forma en la que se ensamblaron los aisladores antes de ser instalados en la estructura, para la realización de los ensayos.

Figura 7. Los aisladores instalados en la estructura.

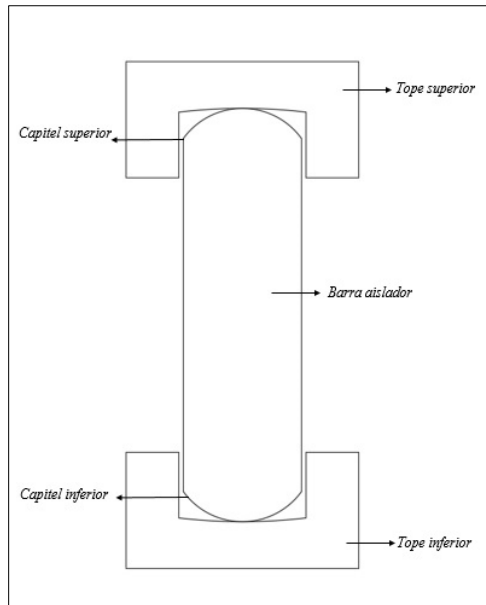
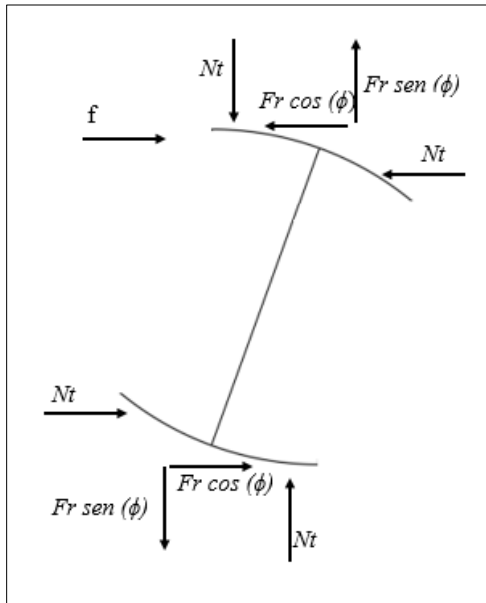


Figura 8. DCL aisladores diseñados



- **Nt:** Fuerza Normal ejercida por los topes.

- **Fr:** Fuerza de recuperación que se genera entre la superficie de curvatura de la barra del aislador y el tope, esta fuerza depende del peso de la estructura.
- **f:** Fuerza unitaria.
- **$\Phi$ :** Angulo tangente a la superficie de rodadura donde se ejerce la fuerza Fr

Teniendo en cuenta la figura 8 se observa que las fuerzas de recuperación son ejercidas gracias a la superficie de curvatura que hay entre los topes y los capiteles de los aisladores realizando el efecto de auto centrado, y las fuerzas normales que ejercen las paredes del tope controlan el desplazamiento e imposibilitan el volcamiento de dichos aisladores.

### 3. MONTAJE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DINAMICO DE LAS ESTRUCTURAS APORTICADAS

#### 3.1 PROPIEDADES FÍSICAS

La estructura utilizada para el análisis experimental correspondiente al pórtico metálico de dos pisos, de acero A-36 (ver Tabla 2), el cual fue elaborado con uniones de soldadura 6318, cuatro barras verticales, circulares, metálicas en cada piso de diámetro de 1/4" y altura de 0.65 [m] asignadas como columnas y dos placas metálicas de 0.42 [m] x 0.42 [m] soldadas respectivamente en cada piso.

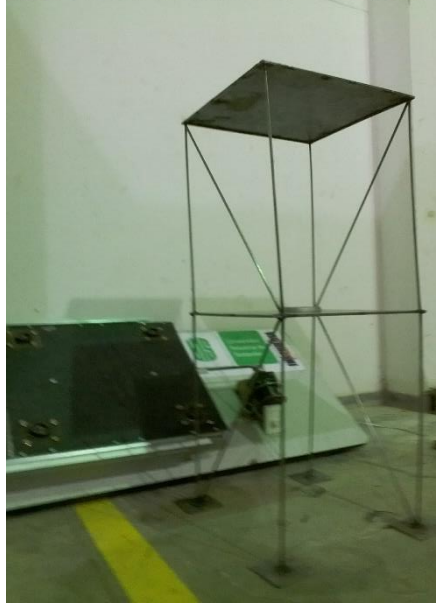
Como se debe controlar el movimiento horizontal en una sola dirección (dirección x), en la estructura se soldaron barras diagonales, circulares, metálicas de diámetro 1/4" y longitud de 0.76 [m], puestas como riostras con el fin de restringir cualquier movimiento torsional que estos presenten.

Las dimensiones anteriormente descritas, fueron escogidas con el fin de obtener una estructura cuyo comportamiento se pueda modelar usando dos grados de libertad.

**Tabla 2. Propiedades del acero utilizado en las estructuras**

Acero A-36	
Diámetro Equivalente	0.00635 m
Densidad	7850 Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidad	2.05.E+11 Pa

**Figura 9. Estructura utilizada para las pruebas**



### **3.2 ANÁLISIS DINÁMICO DE LA ESTRUCTURA**

Determinación de la masa.

$$m = \text{volumen} * \text{densidad}$$

Masa de los pisos.

$$m1 = mc + mp \quad (4)$$

$$m2 = \frac{mc}{2} + mp \quad (5)$$

Donde.

- **mc**= masa columnas.
- **mp**= masa placa.

$$mc = \#c * \pi * (r^2) * hc * d \quad [kg] \quad (6)$$

$$mp = a * hp * b * d \quad [kg] \quad (7)$$

En la tabla (3) se describe las masas de cada elemento del p3rtico

**Tabla 3. Masas de las placas y columnas**

Masas	
Masa Columnas (mc)	1.29Kg
Masa Placa (mp)	5.54Kg
Masas adicionales	4.00Kg
Total masa	10.83Kg

En la Tabla (4) se muestra las masas que se usaran en la matriz de masa para el m3todo de las masas concentradas.

**Tabla 4. Masas para la matriz de masas**

Masas	
Masa Primer Piso (m1)	4.4820Kg
Masa segundo Piso (m2)	6.1526Kg

Determinaci3n de rigidez.

$$kequ = \sum_{k=1}^n \frac{12EI}{hc^3} \quad (8)$$

Donde.

- **n**= n3mero de columnas por piso.
- **E**= m3dulo de elasticidad del material.
- **I**= inercia de las columnas circulares.
- **r**= radio

$$I = \frac{\pi * r^4}{4} \quad (9)$$

- **hc**= altura de las columnas.

Para la estructura de análisis la rigidez es igual para los dos pisos, ya que es una estructura simétrica.

$$k_1 = k_2 \quad (10)$$

**Tabla 5. Rigidez de cada columna**

Radio (m)	Inercia (m <sup>4</sup> )	Modulo E (Pa)	Altura (m)	K (N/m)
0.003175	7.98.E-11	2.05.E+11	0.65	7.15.E+02
0.003175	7.98.E-11	2.05.E+11	0.65	7.15.E+02
0.003175	7.98.E-11	2.05.E+11	0.65	7.15.E+02
0.003175	7.98.E-11	2.05.E+11	0.65	7.15.E+02
			<b>K1</b>	2.86.E+03

**3.2.1 Matrices de Masa y rigidez.** Debido a la uniformidad de las propiedades estructurales a lo largo del pórtico, suponemos las siguientes condiciones: 1) la masa de la estructura se concentra al nivel de los pisos. 2) las placas en relación con las columnas son infinitamente rígidas. 3) la deformación de la estructura es independiente de las fuerzas axiales de las columnas [8], dadas estas condiciones se establecen las matrices de masa y rigidez de la siguiente manera.

Matriz de masa:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} 4.4820 & 0 \\ 0 & 6.1526 \end{bmatrix}$$

Matriz de rigidez:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_1 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 5.7194E + 03 & -2.8597E + 03 \\ -2.8597E + 03 & 2.8597E + 03 \end{bmatrix}$$

Determinación de la frecuencia de vibración.

$$\Delta | -\omega^2[M] + [K] | = 0 \quad (13)$$

$$\Delta \left| -\omega^2 \begin{bmatrix} 11.3502 & 0 \\ 0 & 7.2955 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3.2168E + 06 & -1.6084E + 06 \\ -1.6084E + 06 & 1.6084E + 06 \end{bmatrix} \right| = 0$$

Con la ecuación (13) se despejó la frecuencia angular  $\omega^2$

$$\omega_1 = 13.8345 \text{ rad/seg}$$

$$\omega_2 = 39.3635 \text{ rad/s}$$

Procedemos a hallar la frecuencia fundamental, que es la menor de las raíces

$$\omega_1 = 13.8345 \text{ rad/s} \rightarrow \text{frecuencia fundamental}$$

$$\omega_2 = 39.3635 \text{ rad/s}$$

Periodo.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (14)$$

Entonces

$$T_1 = 0.45416 \text{ seg}$$

$$T_2 = 0.159619 \text{ seg}$$

Frecuencia natural ( $f_n$ ) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f_n = \frac{\omega}{2\pi} \quad (15)$$

Por lo tanto la frecuencia natural de la estructura sería:

$$f_n = \frac{269.0829}{2\pi}$$
$$f_n = 2.2018 \text{ Hz}$$

**Tabla 6. Frecuencias de vibración de la estructura**

Modo	$\omega$ [rad/s]	f [Hz]	T [s]
1	13.8345	2.2018	0.4542
2	39.3635	6.2649	0.1596

**3.2.2 Determinación modos de vibración.** Teniendo en cuenta los valores de  $\omega_1$  y  $\omega_2$  se remplazan en las ecuaciones de movimiento de las estructura que establece [8]

Primer piso

$$[-m_1 * \omega^2 + (k_1 + k_2)] * a_1 - k_2 * a_2 = 0 \quad (16)$$

## Segundo piso

$$-k_2 * a_1 + (m_2 * \omega^2 + k_2) * a_2 = 0 \quad (17)$$

Los valores son reemplazados en la ecuación (16), aunque en cualquiera de las dos ecuaciones se hubiera podido.

Para:  $\omega_1 = 13.8345 \text{ rad/s}$

$$(2.3950E + 06) a_{11} - (1608400) a_{21} = 0$$

Para:  $\omega_2 = 39.3635 \text{ rad/s}$

$$(-1608400) a_{12} - (1.6803E + 06) a_{22} = 0$$

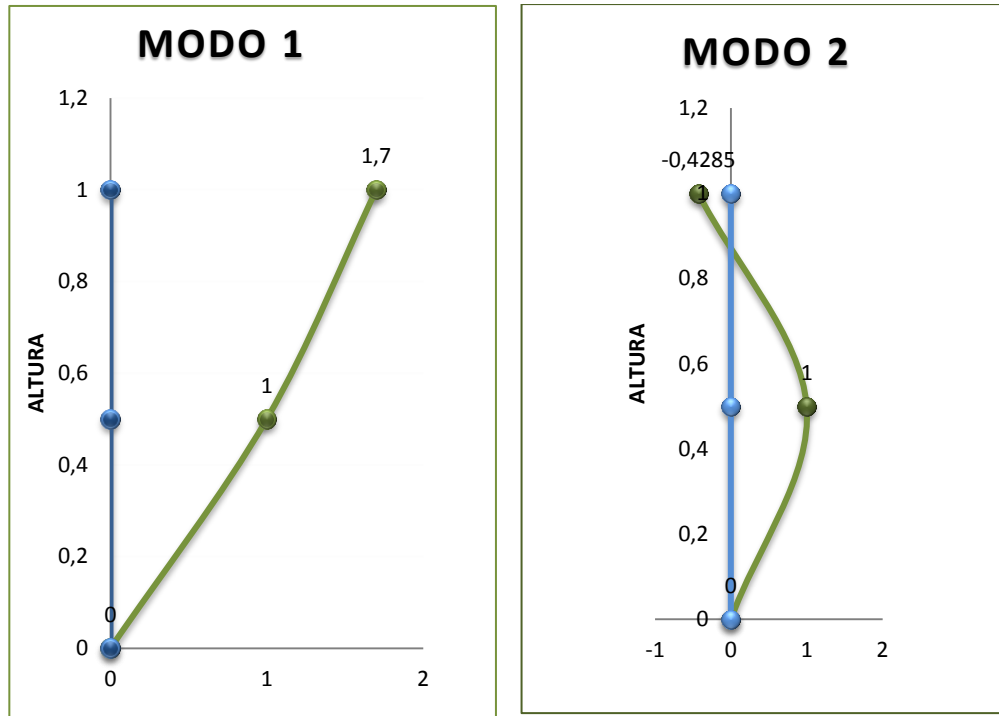
Siendo  $a_{ij}$  el valor de  $a$  en el grado de libertad  $i$  y en el modo de vibración  $j$ .

Estas ecuaciones tienen como respuesta valores relativos de  $a_{11}$  y  $a_{21}$  ó  $a_{12}$  y  $a_{22}$ , que se obtienen asignando un valor definido a uno de ellos, en este caso  $a_{11} = 1$  y se calcula  $a_{21}$  de esta manera se tiene:

**Tabla 7. Modos de vibración**

Modo 1	
<b>a11</b>	1
<b>a21</b>	1.7
Modo 2	
<b>a12</b>	1
<b>a22</b>	-0.4285

Figura 10. Modos de vibración de la estructura Modo 1 (fundamental)



### 3.2.3 Participación Modal

$$\varphi_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\{a_j\}^T [M] \{a_j\}}} \quad (18)$$

$$\varphi_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n m_k a_{kj}^2}} \quad (19)$$

### 3.2.4 Factores Normalizados

Tabla 8. Factores Normalizados

FACTORES NORMALIZADORES	
MODO 1	4.71836
MODO 2	2.36890

### 3.2.4.1 Modos Normalizados

Tabla 9. Matriz de modos normalizados

MODOS NORMALIZADOS			
$\phi_{11}$	0.2119	$\phi_{12}$	0.4221
$\phi_{21}$	0.3603	$\phi_{22}$	-0.1809

$$[\varphi] = \begin{bmatrix} 0.1906 & 0.2276 \\ 0.2838 & -0.2377 \end{bmatrix}$$

### 3.2.4.2 Verificación De Ortogonalidad

$$[\varphi]^T * [M] * [\varphi] = [I] \quad (20)$$

### 3.2.4.3 Verificación De Masas

$$[\varphi]^T * [K] * [\varphi] = [\omega^2] \quad (21)$$

### 3.2.4.4 Factores De Participación Modal.

$$\Gamma = -[\varphi]^T * [M] * \{Y\} \quad (16)$$

Tabla 10. Factores de participación modal

FACTORES DE PARTICIPACION MODAL	
$\Gamma^1$	-3.1309
$\Gamma^2$	-0.7618

El vector  $\{Y\}$  toma valores de 1 ya que la aceleración del terreno es colineal con la aceleración del grado de libertad. [8]

**Tabla 11. Porcentaje de participación de masas en la estructura**

MODO	$\Gamma$	$\Gamma^2$	%MASA
1	-3.1309	9.8025	94.4106
2	-0.7618	0.5803	5.5894

Analizando el resultado anterior podemos decir que toda la participación de las masas se encuentra en el modo 1 con frecuencia natural de 2.2 Hz

### 3.3 MONTAJE EXPERIMENTAL

La estructura metálica mencionada anteriormente se sometió a movimientos horizontales en la base, los cuales son generados, controlados y aplicados por medio de un prototipo de mesa vibratoria.

Para anclar la estructura si aislamiento se soldaron las cuatro columnas a cuatro platinas de dimensiones de 0.1 [m] x 0.1 [m] espesor de 2[mm] cada una perforada con cuatro agujeros de 3/8", los cuales permiten empotrar la estructura a la mesa con pernos de 8.8mm x 1".

Los aisladores se componen de 3 elementos, los topes superiores son instalados por medio de una platina a la base de la estructura por medio de pernos, del mismo modo los topes inferiores son pernos a la base de la mesa, y las barras de los aisladores se intercambian, para los cuatro prototipos.

A la hora de realizar las mediciones se utilizaron los siguientes equipos (ver figuras 11-19).

- Mesa Vibratoria
- Aisladores
- Equipo de Adquisición de datos
- Estructura

**Figura 11. Mesa Vibratoria**



**Figura 12. Motor reductor (mesa Vibratoria)**



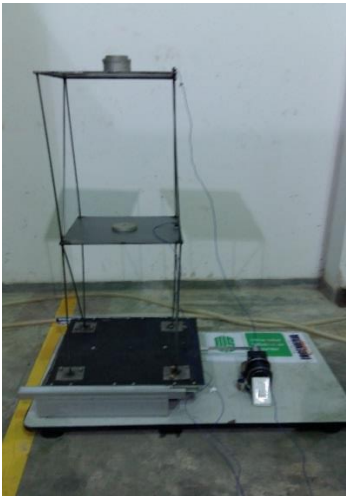
**Figura 13. Tornillos 8.8x1” con los que se perno la estructura a la mesa**



**Figura 14. Topes de los aisladores**



**Figura 15. Montaje estructura en la mesa Vibratoria**



**Figura 16. Aisladores Diseñados en varilla de 1"**



**Figura 17. Tarjeta de Adquisición de datos NI-USB9234**



**Figura 18. Cable Coaxial**



**Figura 19. Acelerómetros Piezómetros modelo 352C33**



Cabe resaltar que por causas de condiciones técnicas y de instrumentación al momento de excitar la estructura armónicamente se presentan saltos que generan picos en la aceleración en la muestra de datos, del mismo modo la cantidad de pruebas realizadas, dimensiones de la estructura, peso de la estructura y las frecuencias experimentadas en la estructura con y sin aislamiento, fueron limitadas (2 y 4 Hertz).

#### 4. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

Se realizaron dos mediciones de 2 y 4 Hertz de frecuencia con una amplitud de 1 [cm] a la estructura con y sin aislamiento, estos movimientos armónicos fueron inducidos por el prototipo de mesa vibratoria elaborado, con lo cual se obtuvo los siguientes resultados para cada ensayo estos se presentan en las tablas 12, 13 y 14

**Tabla 12. Aceleraciones y RMS de la estructura sin aisladores.**

	SIN AISLADORES			
	2Hz		4Hz	
	A. Max. [ms <sup>2</sup> ]	RMS [ms <sup>2</sup> ]	A. Max. [ms <sup>2</sup> ]	RMS [ms <sup>2</sup> ]
Piso 1	3.345696	0.937	3.072237	0.9913
Piso 2	2.890199	0.8219	2.276834	0.9454

**Tabla 13. Aceleraciones y RMS de la estructura con aisladores a una frecuencia de 2 Hz**

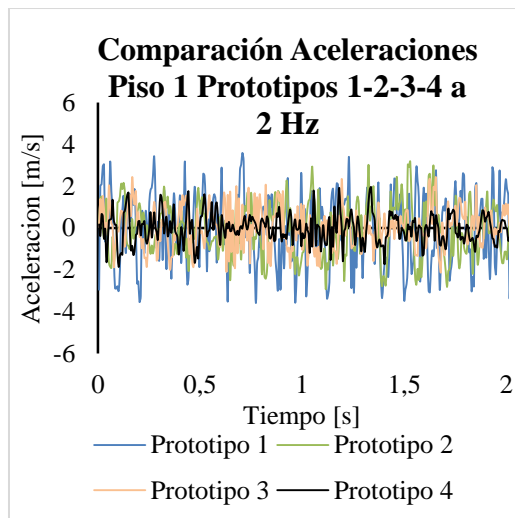
	CON AISLADORES			
	2Hz			
	Aceleración Max. [ms <sup>2</sup> ]			
	Prototipo 1.	Prototipo 2.	Prototipo 3.	Prototipo 4.
Piso 1	3.59237	3.17220	2.41973	1.95130
Piso 2	3.55620	2.84362	1.97933	1.98557
	RMS [ms <sup>2</sup> ]			
	Prototipo 1.	Prototipo 2.	Prototipo 3.	Prototipo 4.
Piso 1	1.6532	1.291	0.9631	0.6713
Piso 2	1.5631	1.1166	0.8442	0.7517

**Tabla 14. Aceleraciones y RMS de la estructura con aisladores a una frecuencia de 4 Hz**

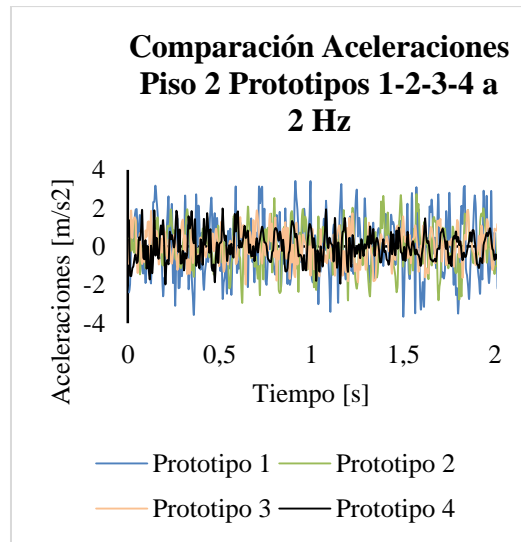
CON AISLADORES				
4Hz				
Aceleración Max. [ms <sup>2</sup> ]				
	Prototipo 1.	Prototipo 2.	Prototipo 3.	Prototipo 4.
Piso 1	3.5506	2.8576	2.0789	2.0558
Piso 2	3.8544	2.8721	1.7856	1.8359
RMS [ms <sup>2</sup> ]				
	Prototipo 1.	Prototipo 2.	Prototipo 3.	Prototipo 4.
Piso 1	1.8883	0.9463	0.8786	0.6816
Piso 2	1.8529	0.9815	0.603	0.6457

Partiendo de la información de las tablas 12, 13 y 14 y los datos obtenidos en las mediciones se realizó una comparación gráfica entre las aceleraciones que se presentaron en cada prototipo de aislador para determinar cuál de estos diseños tenía el mejor comportamiento frente a la excitación armónica. Ver figuras 20-23.

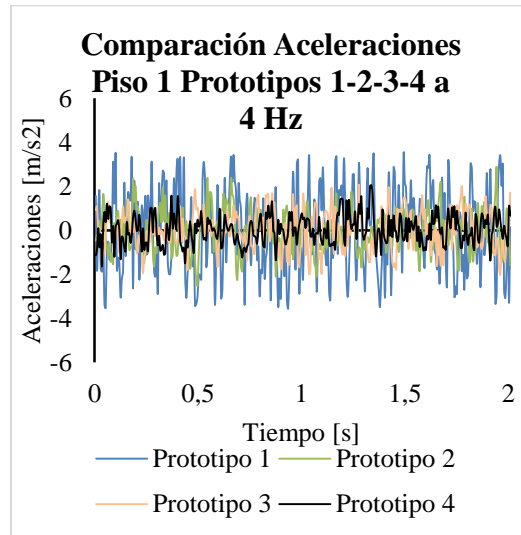
**Figura 20. Gráfica de Comparación de Aceleraciones Piso 1 a 2Hz**



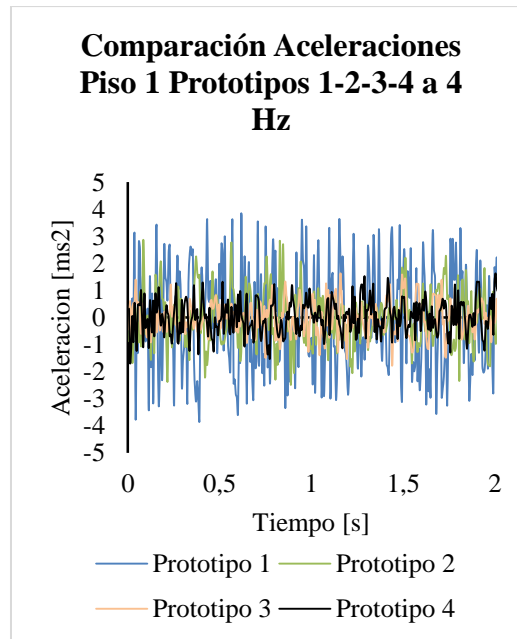
**Figura 21. Gráfica de Comparación de Aceleraciones Piso 2 a 2Hz**



**Figura 22. Gráfica de Comparación de Aceleraciones Piso 1 a 4Hz**



**Figura 23. Gráfica de Comparación de Aceleraciones Piso 2 a 4Hz**



Partiendo de la información de las tablas 13 y 14 y con el apoyo de las gráficas comparativas figuras 20, 21, 22 y 23 se identificó que el mejor comportamiento se produjo en los prototipos 3 y 4 ya que estos presentan aceleraciones más bajas, dado lo anterior se realizó la comparación de los datos obtenidos en estos con los de la estructura sin aislamiento. Como se muestra en la tabla (15).

**Tabla 15. Comparación Aceleraciones y RMS de la estructura sin Aislador y Prototipos 3 y 4.**

Frecuencia 2Hz			
	Sin Aisladores	Prototipo 3	Prototipo 4
A. [ms <sup>2</sup> ] Piso 1	3.345696	2.419737	1.951305
A. [ms <sup>2</sup> ] Piso 2	2.890199	1.979334	1.985573
RMS [ms <sup>2</sup> ] Piso 1	0.937	0.9631	0.6713
RMS [ms <sup>2</sup> ] Piso 2	0.8219	0.8442	0.7517
Frecuencia 4Hz			
	Sin Aisladores	Prototipo 3	Prototipo 4
A. [ms <sup>2</sup> ] Piso 1	3.072237	2.0788743	2.0558022
A. [ms <sup>2</sup> ] Piso 2	2.276834	1.7855928	1.8359352
RMS [ms <sup>2</sup> ] Piso 1	0.9913	0.8786	0.6816
RMS [ms <sup>2</sup> ] Piso 2	0.9454	0.603	0.6457

Con estos datos se puede evidenciar que los aisladores (prototipos 3 y 4) muestran una reducción en los valores de aceleración que se presentan en la estructura encontrando los siguientes porcentajes de reducción en aceleraciones máximas y valores RMS para cada prototipo.

**Tabla 16. Porcentaje de Reducción Aceleraciones y valores RMS estructura sin aisladores vs Prototipos 3 y 4.**

PROTOTIPO 3					
		2 Hz		4 Hz	
		Máxima	RMS	Máxima	RMS
% Reducción Piso 1		28%	3%	32%	6%
% Reducción Piso 2		32%	11%	22%	27%
PROTOTIPO 4					
		2 Hz		4 Hz	
		Máxima	RMS	Máxima	RMS
% Reducción Piso 1		42%	32%	33%	27%
% Reducción Piso 2		31%	20%	19%	21%

Con base en lo anterior se puede evidenciar una disminución aproximadamente entre el 20% y el 40% de las aceleraciones máximas de la estructura y entre el 5% y el 30% en valores RMS en la estructura aislada cuando fue sometida a frecuencias de 2 y 4 Hertz respectivamente a una amplitud de 1 [cm].

## 5. CONCLUSIONES

Los datos demostraron que el diseño del aislador realizado para las pruebas arrojó un resultado distinto al esperado ya que según las referencias bibliográficas [1y7] el prototipo 1 debería presentar un mejor comportamiento, este comportamiento se produjo por la aparición de los topes y la falta del cable pre-tensado ya que esto modifica la forma de auto centrado y hace que las fuerzas que se presentan bajo una excitación sean diferentes. Figuras [2y8]

Según los datos obtenidos es fácil evidenciar el comportamiento que presentan los aisladores (prototipo 3 y 4), esto se debe a que al tener mayor curvatura los topes ejercen mejor la fuerza de auto centrado y a su vez tienen una mayor superficie de rodadura de esta manera se libera más el movimiento de la barra dentro de los topes, cabe resaltar que la estabilidad de este tipo de aislador depende en su mayoría de los topes y el  $\Delta$  del desplazamiento que estos permitan.

El prototipo de aislador número 3 funcionó de manera correcta con un porcentaje de reducción para 2 Hertz de 3% y 11% en valores RMS, 28% y 32% en aceleraciones máximas en el piso 1 y 2 respectivamente; para 4 Hertz de 6% y 27% en valores RMS, 32% y 22% en aceleraciones máximas en el piso 1 y 2 respectivamente.

El prototipo de aislador número 4 funcionó de manera correcta con un porcentaje de reducción para 2 Hertz de 32% y 20% en valores RMS, 42% y 31% en aceleraciones máximas en el piso 1 y 2 respectivamente; para 4 Hertz de 27% y 21% en valores RMS, 33% y 19% en aceleraciones máximas en el piso 1 y 2 respectivamente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pinochet J, de la Llera JC, Lüders C. Analysis of a kinematic self-centering seismic isolator. *Earthq Eng Struct Dyn* 2006;35:1533\_61.
- [2] Lin TW, Hone CC. Base isolation by free rolling rods under basement. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1993; 22:261–273.
- [3]. Lin TW, Chern CC, Hone CC. Experimental study of base isolation by free rolling rods. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1995; 24:1645–1650.
- [4]. Jangid R, Londhe Y. Effectiveness of elliptical rolling rods for base isolation. *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 1998; 124:469–472.
- [5]. Beliayev VS, Vinogradov VV, Guskov VD. Most recent development of the studies for seismic isolation of nuclear structures in Russia. *International Post-Smirt Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures, Santiago, Chile, 1995.*
- [6]. Englekirk R. *Seismic Design of Reinforcement and Precast Concrete Buildings.* Wiley: New York, 2003.
- [7] Besa Jaime, De la LLera Juan C., Jünemann Rosita, “Experimetal Behavior and desing of a new kinematik isolator”. *Engineer Structures* 32 (2010) 508-522.
- [8] MALDONADO RONDÓN, Esperanza y CHIO CHO, Gustavo, *Análisis Sísmico de Edificaciones.* Bucaramanga: División Editorial y Publicaciones Universidad Industrial de Santander, 2004. 120-166 p.

## BIBLIOGRAFÍA

Beliayev VS, Vinogradov VV, Guskov VD. Most recent development of the studies for seismic isolation of nuclear structures in Russia. International Post-Smirt Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures, Santiago, Chile, 1995.

Besa Jaime, De la LLera Juan C., Jünemann Rosita, “Experimental Behavior and desing of a new kinematik isolator”. Engineer Structures 32 (2010) 508-522.

Englekirk R. Seismic Design of Reinforcement and Precast Concrete Buildings. Wiley: New York, 2003.

Jangid R, Londhe Y. Effectiveness of elliptical rolling rods for base isolation. Journal of Structural Engineering (ASCE) 1998; 124:469–472.

Lin TW, Chern CC, Hone CC. Experimental study of base isolation by free rolling rods. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1995; 24:1645–1650.

Lin TW, Hone CC. Base isolation by free rolling rods under basement. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1993; 22:261–273.

Maldonado Rondón, Esperanza y CHIO CHO, Gustavo, Análisis Sísmico de Edificaciones. Bucaramanga: División Editorial y Publicaciones Universidad Industrial de Santander, 2004. 120-166 p.

Pinochet J, de la Llera JC, Lüders C. Analysis of a kinematic self-centering seismic isolator. Earthq Eng Struct Dyn 2006;35:1533\_61.