

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE UNA EDIFICACIÓN MEDIANTE UN  
SISTEMA PROPUESTO DE AISLAMIENTO  
SÍSMICO DEL TIPO PÉNDULO FRICCIONAL**



**T E S I S**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR

JORGE ARTURO MESTANZA ACEVEDO

**LIMA – PERÚ**

**AÑO: 2015**

*Dedicatoria:*

*A mis padres por todo su apoyo, esfuerzo y amor para ser mejor persona día a día, a mi hermana por su apoyo y enseñanza incondicional y a Dios por darme salud, inteligencia y muchas ganas de vivir en todo momento.*

## AGRADECIMIENTOS

- A mi asesor el Dr. Carlos Zavala Toledo.
- Al Dr. Miguel Díaz, Larry Cárdenas y al resto del personal del CISMID.
- A mi mama Yolanda, a mi abuelita Irma, a mi primo Edgar, mi cuñado Miguel y al resto de la familia.
- A mis amigos con los que siempre cuento con su apoyo: Joseph Mendoza, Jorge Saldaña, Byron Corpus, Willy Álvarez, a todo el grupo de La Granja y la LP.

# TABLA DE CONTENIDOS

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO I SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA CON AISLADORES.....</b>	<b>8</b>
1.1 BREVE HISTORIA DE LOS AISLADORES SÍSMICOS EN EL MUNDO .....	8
1.2 ENFOQUE SISMORRESISTENTE TRADICIONAL.....	9
1.3 EDIFICACIONES CON SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO .....	11
1.3.1. Estructura de un grado de libertad con aislamiento en la base .....	12
1.4 TIPOS DE SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO: .....	16
1.4.1. Aislador de base de fricción:.....	16
1.4.2. Sistema del tipo péndulo friccional (Sistema FPS).....	17
1.4.3. Aislador elastomérico de bajo amortiguamiento (sistema LDRB):.....	24
1.4.4. Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB): .....	25
1.4.5. Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (HDRB):.....	25
1.4.6. Aislador de la “Electricite de France” (Sistema EDF):.....	26
1.5 COMPARACIÓN ENTRE UNA ESTRUCTURA CON AISLADORES Y UNA ESTRUCTURA TRADICIONAL.....	27
<b>CAPÍTULO II DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE UNA EDIFICACIÓN DE CONCRETO ARMADO .....</b>	<b>31</b>
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN .....	31
2.2 ANÁLISIS SISMORRESISTENTE DE LA EDIFICACIÓN .....	34
2.2.1 Carga muerta .....	34
2.2.2 Carga viva.....	35
2.2.3 Parámetros Sísmicos .....	35
2.2.4. Análisis dinámico por combinación modal espectral .....	38
2.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS .....	40
2.3.1. Periodos de vibración .....	40
2.3.2 Desplazamientos y Distorsiones .....	41
2.3.3. Reacciones en la base.....	42
<b>CAPÍTULO III ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO PROPUESTO .....</b>	<b>43</b>
3.1 OBJETIVOS DE LOS ENSAYOS .....	43
3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO .....	43
3.2.1 Descripción general.....	43

3.2.2 Comportamiento dinámico del sistema propuesto .....	46
3.2.3 Comportamiento histerético del sistema .....	47
3.3 DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO Y SU INSTRUMENTACIÓN .....	48
3.4 PROGRAMA DE ENSAYOS.....	52
3.4.1 Procedimiento del ensayo .....	55
3.5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	55
3.5.1 Curva Histerética – “Estado Normal” .....	56
3.5.2 Curva Histerética – “Estado Vulnerable” .....	59
3.5.3 Curva Histerética – “Estado de Falla”.....	61
3.5.4 Carga Axial vs Desplazamiento Vertical .....	63
3.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	65
3.6.1 Ajuste de curvas histeréticas .....	65
3.6.2 Coeficiente de fricción .....	70
3.6.3 Carga Axial vs Desplazamiento Vertical .....	74
3.6.4 Estado final del sistema.....	77
<b>CAPÍTULO IV RESPUESTA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN LA ESTRUCTURA .....</b>	<b>80</b>
4.1 UBICACIÓN DE LOS AISLADORES EN LA ESTRUCTURA.....	80
4.2 ANÁLISIS NO-LINEAL DE LA ESTRUCTURA AISLADA .....	81
4.2.1 Registros sísmicos:.....	82
4.2.2 Propiedades del sistema FPS según el software:.....	89
4.2.3 Modelamiento de la edificación en el software: .....	93
4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	104
4.3.1 Desplazamientos y distorsiones por cada piso:.....	104
4.3.2 Reacciones de cada sistema FPS: .....	108
4.3.3 Curvas Histeréticas:.....	110
4.3.4 Distribución de energía: .....	115
<b>CAPÍTULO V COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>125</b>
5.1 DESCRIPCIÓN DE LA COMPARACIÓN.....	125
5.2 DESPLAZAMIENTOS Y DISTORSIONES.....	125
5.3 CORTANTES.....	135
5.4 FUERZAS AXIALES EN LA BASE .....	136
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>142</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>144</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>145</b>

<b>ANEXOS.....</b>	<b>147</b>
A1. ANEXO N°1. PANEL FOTOGRÁFICO.....	147
A2. ANEXO N°2. PLANOS .....	155

# INTRODUCCIÓN

Las edificaciones del presente están estructuradas con sistemas de aisladores sísmicos. Este tipo de sistema se usa con mucha frecuencia en la práctica y se considera un campo abierto en la investigación sísmica.

Justamente en esta investigación se procederá a ensayar una propuesta de un sistema de aislamiento sísmico del tipo péndulo friccional (FPS) para conocer su comportamiento y obtener sus principales parámetros dinámicos. Lo que se quiere demostrar en la investigación es ver cuánto mejora la respuesta sísmica de la estructura cuando es empleada con el sistema de aislamiento propuesto.

La presente tesis se ha organizado en 5 capítulos, en el primer capítulo se hablará de la historia de los aisladores desde la antigüedad hasta el presente, en el segundo presenta un análisis de una edificación aporticada, en el tercer capítulo se describe los ensayos que se emplearon al sistema propuesto de aislamiento, en el cuarto se hace un análisis de la edificación aporticada utilizando el sistema FPS y finalmente, en el quinto capítulo, se realiza una comparación entre la edificación con el sistema de aislamiento y la edificación con base fija.

# CAPÍTULO I

## SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA CON AISLADORES

### **1.1 Breve historia de los aisladores sísmicos en el mundo**

Las estructuras antiguas tienen un comportamiento de cargas muy complejo debido a la interacción masiva y continua de cúpulas, bóvedas, arcos y pilares.

La historia de los aisladores sísmicos se remonta al año 2000 a.C. en el Palacio de Knossos, Grecia donde el sistema de aislamiento era del tipo friccional y consistía en una capa de arena fina bajo la cimentación del Palacio.

En el año 528 a.C. en la Tumba de Ciro, ubicado en Irán, está constituido por varias capas de piedra lisa y sin ningún tipo de mortero o material pegajoso entre ellos forman una especie de aislamiento de la base.

En el año 447 a.C. en el templo Partenón, ubicado en Grecia, la construcción fue sobre la base y parte de un lecho de piedra para que la fundación fuera flexible durante un terremoto.

El Ormetash, es un pilar que fue construido en el año 4 d.C. El pilar está labrado en seco y mide en 32 metros de altura, cuya base es de mármol está sobre tres capas de piedras ortostato.

El Coliseo Romano, cuyas obras empezaron entre el 70 d.C. y el 72 d.C. y se completó en el 80 d.C., tiene una capa conformado por arcilla (capa gruesa), piedras medianas y de piedras pequeñas.

La primera vez en utilizar un sistema de aislamiento en edificaciones se dio en la Escuela Heinrich Pestalozzi, en Skopje, actual Macedonia, en 1969, mediante un método suizo denominado “Aislamiento total de la base en tres direcciones” utilizando vigas de caucho



natural sin reforzar. El edificio cuenta con 54 aisladores de goma natural, de 70 x 70 cm, 20 cm de alto.

En la actualidad, en el Perú la primera experiencia en diseño con aisladores sísmicos fue en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y está en construcción la nueva biblioteca de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) usando este tipo de sistema.

## **1.2 Enfoque sismorresistente tradicional**

El diseño convencional de un edificio, según las normativas de diseño dicen que para un sismo severo, las estructuras alcancen el rango no lineal. En realidad, el la fuerza considerada por este tipo de sismo es muy superior a la que se toma en cuenta en un diseño convencional. La consecuencia de este diseño es que la estructura entre en el rango inelástico y sufra deformaciones remanentes.

Lo que se espera de una estructura es que va a tener un comportamiento elástico ante sismos leves y uno inelástico cuando este expuesto a sismos moderados o severos.

Según la norma técnica de diseño sismorresistente E.030 nos menciona que la estructura soporte un sismo severo sin llegar al colapso. Para ello, la estructura se diseña y construye proporcionándole detalles que permitan las deformaciones inelásticas esperadas durante un sismo severo, sin pérdida significativa de resistencia<sup>1</sup>.

Para tener un buen diseño se trata que la estructura tenga un peso mínimo, especialmente en los pisos altos, ductilidad, evitar irregularidades tanto en planta como en altura, deformación limitada, tener junta sísmica cuando haya estructuras vecinas, etc.

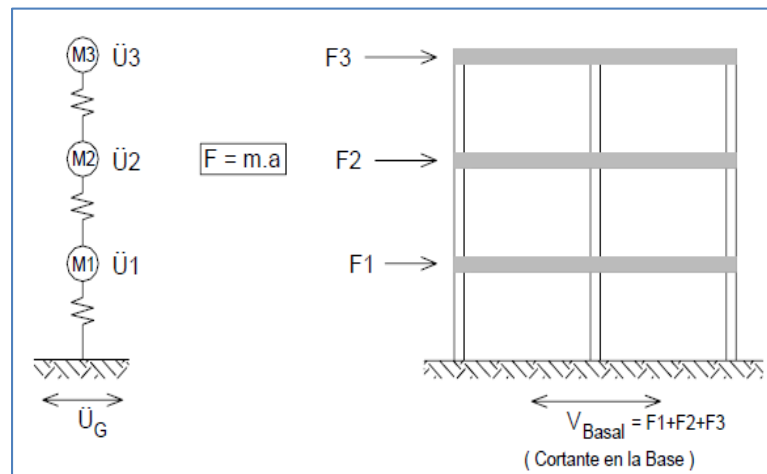
Para el diseño de edificaciones sin irregularidades y de baja altura (menos de 45 m de altura) se emplea el análisis estático. Este método representa a las fuerzas laterales actuando en cada

---

<sup>1</sup> Bozzo, Luis y Alex Barbat (2000) Diseño sismorresistente de edificios: Técnicas convencionales y avanzadas. España. Pág 102

nivel de la edificación. En la Figura 1.1 se puede apreciar las fuerzas sísmicas que actúan en una edificación empleando el análisis estático.

**Figura 1.1: Fuerza sísmica en una edificación empleando el análisis estático**



Fuente: Piqué, Javier (2011) Diapositivas del curso Ingeniería Sismorresistente.

Universidad Ricardo Palma. Facultad de Ingeniería

Para edificaciones convencionales se emplea el análisis por combinación modal espectral, que consiste en determinar todas las posibles respuestas que pueda tener una estructura a partir de sus deformadas (modos de vibración) y sus respectivas frecuencias. Luego, la respuesta final será el producto de la combinación de todas las respuestas (combinación modal) a través de un promedio (cada modo posee un factor de participación que dependerá de las masas y dirección del sismo). Para determinar las fuerzas definitivas de diseño, se calculan las fuerzas para cada modo y se realiza una combinación modal para obtener las máximas probables.

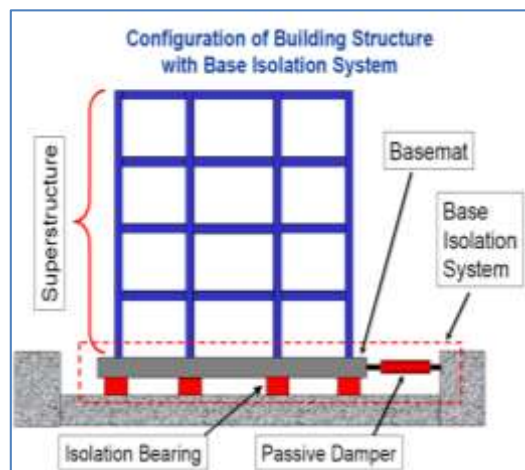
Para edificaciones especiales deberá usarse un análisis tiempo-historia, que se podrá realizar suponiendo comportamiento lineal y elástico y deberán utilizarse no menos de cinco registros de aceleraciones horizontales, correspondientes a sismos reales o artificiales. Estos registros

deberán normalizarse de manera que la aceleración máxima corresponda al valor máximo esperado en el sitio<sup>2</sup>.

### 1.3 Edificaciones con sistema de aislamiento sísmico

El aislamiento sísmico en las estructuras es el proceso para disminuir la respuesta o el impacto sísmico mediante la separación de la estructura de la tierra o suelo de fundación. De esta manera el período y coeficiente de amortiguamiento de la estructura aislada aumenta. Esto, a su vez reduce la fuerza del sismo sobre la estructura. Ver Figura 1.2.

**Figura 1.2: Edificación con sistema de aislamiento sísmico**



Fuente: Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples

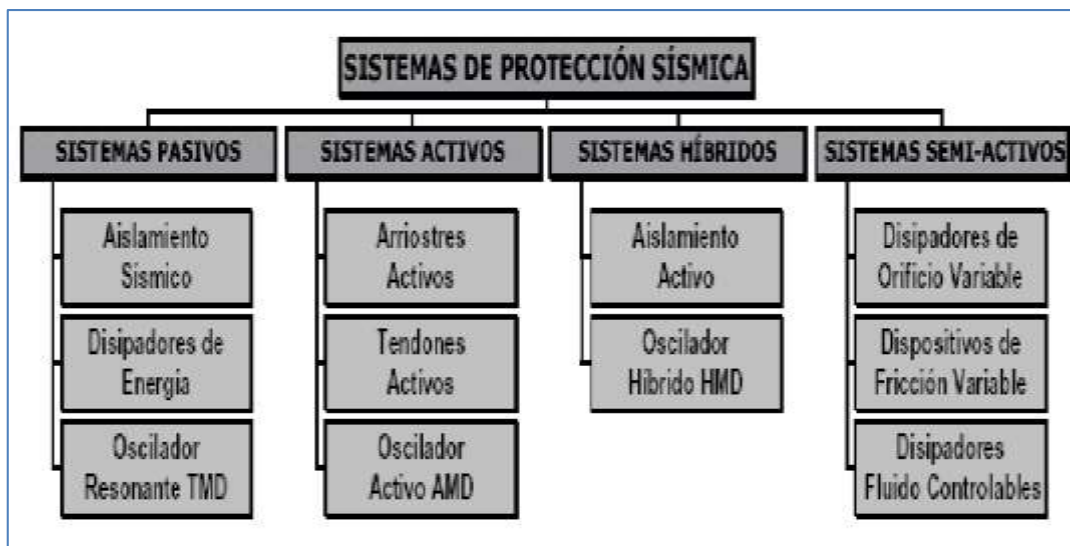
El aumento del coeficiente de amortiguamiento es una característica natural para la mayoría de aisladores, y si se desea, los dispositivos de disipación de energía adicionales también pueden ser instalados a la estructura.

---

<sup>2</sup> Norma E.030 Diseño Sismorresistente. Perú. 2003. Artículo 18.3.

Los aisladores sísmicos pertenecen al sistema de control pasivo, ya que responden de forma inercial a la acción sísmica y a diferencia del resto de sistemas no precisan de aporte energético para funcionar. Para ver los diferentes tipos de protección sísmica, ver Figura 1.3.

**Figura 1.3: Clasificación de los sistemas de protección sísmica o de control estructural ante un sismo**

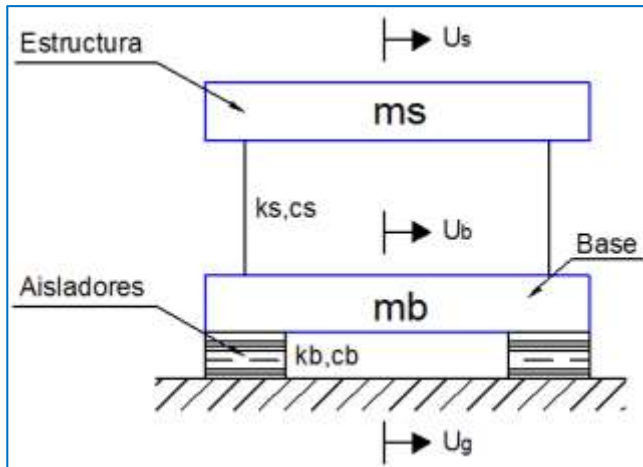


Fuente: Universidad de Chile (2011), Estudio Comparativo Económico de Edificios con Aislamiento Sísmico en la Base

### 1.3.1. Estructura de un grado de libertad con aislamiento en la base

El modelo dinámico lineal está representado por las variables  $m_s$  (Masa de la estructura),  $m_b$  (Masa de la base),  $k_s$  (Rigidez de la estructura),  $c_s$  (Amortiguamiento de la estructura),  $k_b$  (Rigidez del aislador),  $c_b$  (Amortiguamiento del aislador) y los movimientos absolutos  $U_s$ ,  $U_b$  y  $U_g$  de la estructura, base y el suelo, respectivamente (ver Figura 1.4).

**Figura 1.4: Modelo dinámico de una estructura de un grado de libertad con aislamiento en la base**



Fuente: Elaboración Propia

La ecuación de movimiento es la siguiente:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}\mathbf{J}\ddot{\mathbf{U}}_g \quad (1.3.1.1)$$

Reemplazando valores en la ecuación (1.3.1.1):

$$\begin{bmatrix} ms+mb & ms \\ ms & ms \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U}_b \\ \ddot{U}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} cb & 0 \\ 0 & cs \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} kb & 0 \\ 0 & ks \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} ms+mb & ms \\ ms & ms \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{X}_g$$

La ecuación característica del modelo es:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{X} = 0 \quad (1.3.1.2)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia del sistema y el vector  $\mathbf{X}$  representa la forma de modo del sistema.

Para obtener las frecuencias, se procede a resolver la ecuación (1.3.1.2):

$$\begin{aligned} \mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} = 0 &\rightarrow \begin{bmatrix} kb & 0 \\ 0 & ks \end{bmatrix} - \omega \begin{bmatrix} mb+ms & ms \\ ms & ms \end{bmatrix} = 0 \\ &\rightarrow \begin{bmatrix} kb - \omega(mb+ms) & -\omega ms \\ -\omega ms & ks - \omega ms \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (1.3.1.3)$$

De la ecuación 1.3.1.3, se resuelve el determinante y se obtiene:

$$\rightarrow (k_b - \omega(m_b + m_s))(k_s - \omega m_s) - (-\omega m_s)(-\omega m_s) = 0$$

$$\omega^4(1-\gamma) - \omega^2 \left( \frac{k_b}{m_s + m_b} + \frac{k_s}{m_s} \right) + \frac{k_s}{m_s} + \frac{k_b}{m_s + m_b} = 0 \quad (1.3.1.4)$$

Donde  $\gamma = m_s / (m_s + m_b)$ . Las frecuencias naturales del sistema son:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}}; \quad \omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m_s + m_b}}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (1.3.1.4) se obtiene:

$$\omega^2 = \frac{(\omega_b)^2 + (\omega_s)^2}{2(1-\gamma)} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4(1-\gamma)\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2}} \right) \quad (1.3.1.5)$$

Donde  $\varepsilon = (\omega_b)^2 / (\omega_s)^2$ , pero como la rigidez  $k_s$  es muy superior a la rigidez  $k_b$ , entonces se considera  $\varepsilon \approx 0$ . Resolviendo la ecuación (1.3.1.4) se obtiene:

$$\omega_1 = \omega_b \sqrt{1 - \gamma \varepsilon} \cong \omega_b \quad (1.3.1.6)$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_s}{\sqrt{1-\gamma}} \sqrt{1 + \frac{\gamma(\omega_b)^2}{(\omega_s)^2}} \cong \frac{\omega_s}{\sqrt{1-\gamma}} \quad (1.3.1.7)$$

Para obtener las formas de modo, volvemos a la ecuación (1.3.1.2), donde reemplazamos los valores correspondientes:

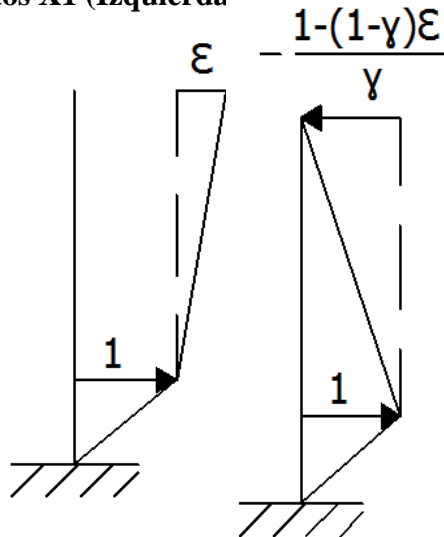
$$\begin{bmatrix} k_b - \omega(m_b + m_s) & -\omega m_s \\ -\omega m_s & k_s - \omega m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1i} \\ X_{2i} \end{bmatrix} = 0 \quad (1.3.1.8)$$

Resolviendo la ecuación (1.3.1.8) se obtiene lo siguiente:

$$X_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (1.3.1.9)$$

$$X_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{1-(1-\gamma)\epsilon}{\gamma} \end{bmatrix} \quad (1.3.1.10)$$

**Figura 1.5: Modos X1 (Izquierda) y X2 (Derecha)**



Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar en el lado izquierdo de la Figura 1.5 que la estructura es rígida a comparación de una base flexible, mientras que en el lado derecho de la Figura 1.5, la estructura comienza a vibrar de manera significativa haciendo que los desplazamientos de entrepiso sean considerables.

Los factores de participación se determinan de la siguiente manera:

$$a_1 = -\frac{X_1^T M V}{X_1^T M X_1} = 1 - \gamma \epsilon \quad (1.3.1.11)$$

$$a_2 = -\frac{X_2^T M V}{X_2^T M X_2} = \gamma \epsilon \quad (1.3.1.12)$$

Como se puede observar el factor de participación  $a_1$  del modo  $X_1$  es inferior a la unidad, mientras que el factor de participación  $a_2$  es mucho menor que el  $a_1$  ya que  $\gamma$  es siempre menor a la unidad y  $\varepsilon$  es cercano a 0.01. Ahora para determinar con coeficientes de amortiguamiento modal, se procede de la siguiente manera:

$$\xi_1 = \frac{X_1^T C X_1}{2\omega_1 A_1^T M A_1} \cong v_b \quad (1.3.1.13)$$

$$\xi_2 = \frac{X_2^T C X_2}{2\omega_2 A_2^T M A_2} \cong \frac{1}{\sqrt{1-\gamma}} [v_s + \gamma v_b \sqrt{\varepsilon}] \quad (1.3.1.14)$$

Donde:

C: Matriz de amortiguamiento.

$$v_b = \frac{c_b}{2w_b(m_b + m_s)}; \quad v_s = \frac{c_s}{2w_s m_s}$$

Estos factores son importantes ya que a mayor porcentaje de amortiguamiento la disipación de energía será mayor lo que produciría menores daños a la estructura durante una excitación sísmica.

## 1.4 Tipos de sistemas de aislamiento sísmico:

### 1.4.1. Aislador de base de fricción:

Son aisladores compuesto básicamente por dos superficies, una adherida a la estructura y la otra a la fundación, que poseen un bajo coeficiente de fricción, permitiendo los movimientos horizontales y resistir las cargas verticales.

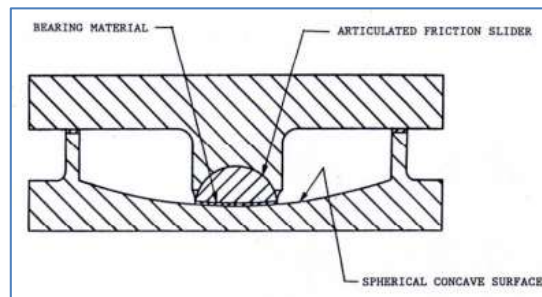


#### 1.4.2. Sistema del tipo péndulo friccional (Sistema FPS)

Este sistema fue inventado por Victor Zayas, presidente de Earthquake Protection System Inc., en 1985. En este sistema logra un movimiento de péndulo de tal manera que las propiedades de aislamiento sísmico se logran por la gravedad y la geometría. El resultado es una forma sencilla, fiable y estable respuesta sísmica.

La fuerza que se aplica en este tipo de aislador produce un desplazamiento horizontal y vertical, cuando esta fuerza desaparece, una fuerza contraria produce que el deslizador vuelva al centro de la concavidad.

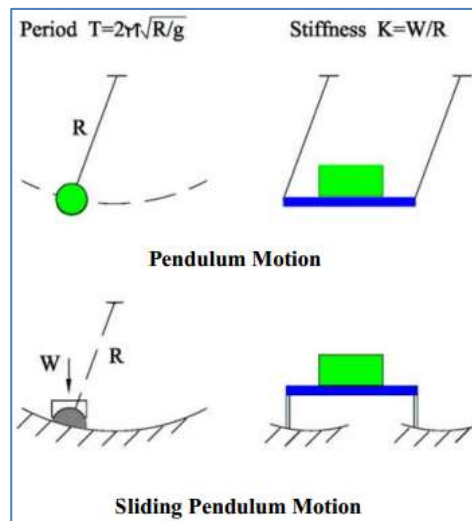
**Figura 1.6: Esquema - Aislador del Tipo péndulo - friccional**



Fuente: Bozzo, Luis y Alex Barbat (2000) Diseño Sismorresistente: Técnicas convencionales y avanzadas

En la Figura 1.6 se ve el esquema del Aislador Tipo péndulo – friccional y en la Figura 1.7 se puede ver cómo es el movimiento de este aislador.

**Figura 1.7: Movimiento del Aislador del Tipo péndulo - friccional**



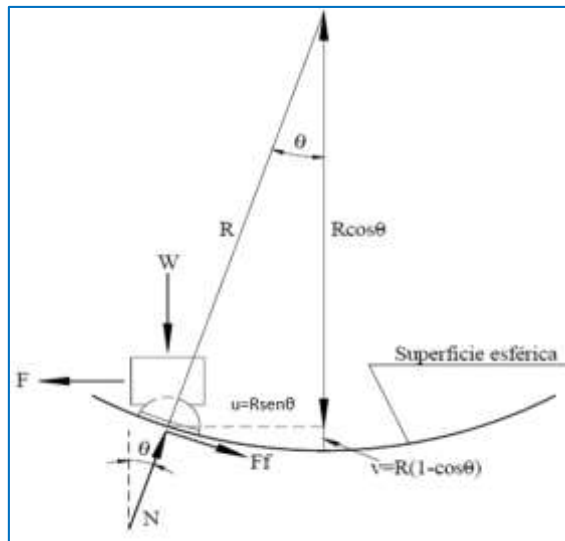
Fuente: Guerrero, José (2011) Reducción de la demanda sísmica en estructuras aporricadas empleando aisladores de Base.

El primer edificio que se construyó con este tipo de aislador fue el Hayward City Hall, ubicado en el Estado de California de los Estados Unidos de América, en esta edificación se llegaron a colocar 53 aisladores FPS.

Para la fabricación de este tipo de aislador se utiliza teflón, conocido como politetrafluoroetileno (PTFE), que al tener una presión de contacto con el acero no exceden de  $400 \text{ kg/cm}^2$ . El coeficiente de fricción entre el teflón y el acero varía generalmente entre 0.05 y 0.12 dependiendo de la velocidad y la presión de contacto.

En la Figura 1.8 se presenta un diagrama de cuerpo libre del sistema de aislamiento con la fuerza  $F$  que se necesita para producir el desplazamiento  $u$ .

**Figura 1.8: Diagrama de cuerpo libre del sistema de aislamiento FPS**



Fuente: Moreno et al. (2006) Estudio Experimental de Aisladores Sísmicos  
 Tipo Péndulo de Fricción en Modelos a Escala Reducida

La fuerza \$F\$ es dada por las ecuaciones de equilibrios tanto horizontal como vertical:

$$W - N \cos \theta + F_f \sin \theta = 0 \quad (1.4.2.1)$$

$$F - N \sin \theta - F_f \cos \theta = 0 \quad (1.4.2.2)$$

Igualando las ecuaciones (1.4.2.1) y (1.4.2.2):

$$W - N \cos \theta + F_f \sin \theta = F - N \sin \theta - F_f \cos \theta$$

$$F = W \tan \theta + \frac{F_f}{\cos \theta} \quad (1.4.2.3)$$

Como el ángulo \$\theta\$ es de un valor muy pequeño, entonces se tiene:

$$N = \frac{W}{\cos \theta} \cong W \quad (1.4.2.4)$$

$$F_f = \mu N \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (1.4.2.5)$$

Donde:

$\text{sgn}(\dot{u})$ : Es el signo de la velocidad deslizante; +1 ó -1.

Reemplazando las ecuaciones (1.4.2.4) y (1.4.2.5) en la ecuación (1.4.2.3):

$$F = \frac{Wu}{R} + \mu W \text{sgn}(\dot{u}) \quad (1.4.2.6)$$

Para calcular el desplazamiento vertical, se procede de la siguiente manera:

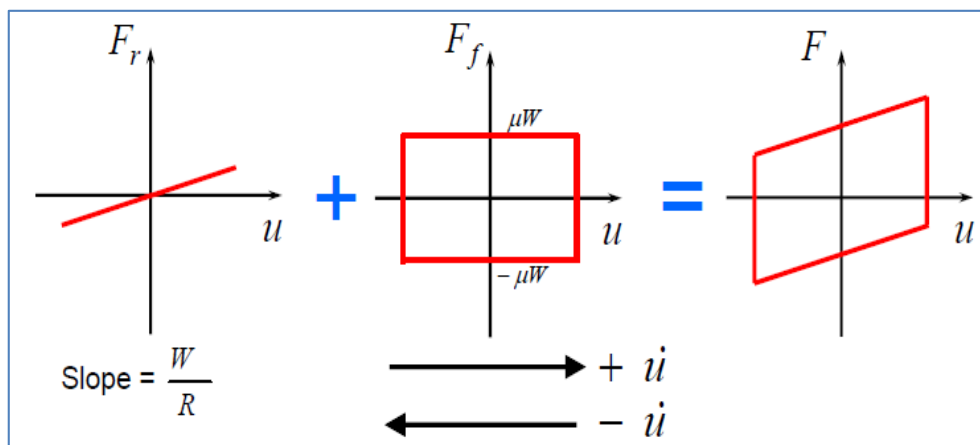
$$v = R(1 - \cos \theta) = R \left[ 1 - \cos \left( \sin^{-1} \left( \frac{u}{R} \right) \right) \right] \cong \frac{u^2}{2R} \quad (1.4.2.7)$$

De la ecuación (1.4.2.6) se puede apreciar que la fuerza  $F$  está compuesta por la fuerza restauradora y la fuerza de fricción:

$$F = \frac{Wu}{R} + \mu W \text{sgn}(\dot{u}) = F_r + F_f \quad (1.4.2.8)$$

En la Figura 1.9 se puede apreciar gráficamente la fuerza restauradora y la fuerza de fricción.

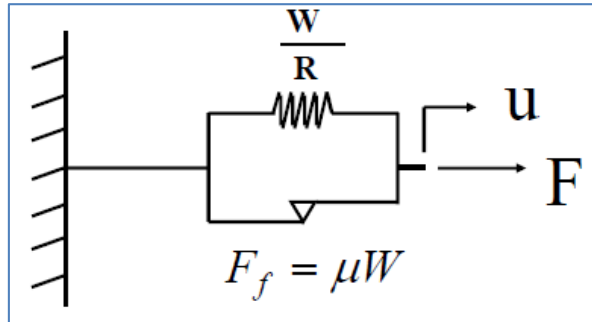
**Figura 1.9: Combinación de la fuerza restauradora  $F_r$  y la fuerza de fricción  $F_f$**



Fuente: Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples

El modelo mecánico del sistema péndulo fricción se representa en la Figura 1.10:

**Figura 1.10: Modelo mecánico del sistema péndulo-friccional**



Fuente: Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples

El coeficiente de fricción dinámico del sistema péndulo friccional para acero – teflón (PTFE) se escribe de la siguiente manera:

$$\mu = \mu_{\text{máx}} - (\mu_{\text{máx}} - \mu_{\text{mín}})e^{-a|\dot{u}|} \quad (1.4.2.9)$$

Donde:

$\mu$ : Coeficiente dinámico de fricción.

$\mu_{\text{máx}}$ : Coeficiente de fricción calculados a alta velocidad.

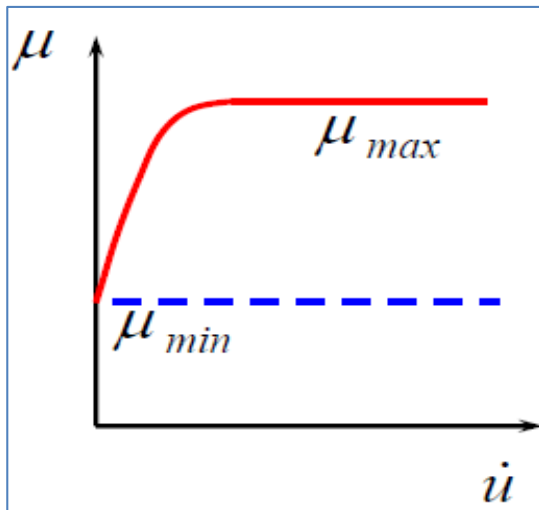
$\mu_{\text{mín}}$ : Coeficiente de fricción calculados a baja velocidad.

$a$ : Inversa de la velocidad de deslizamiento, parámetro que controla la transición de  $\mu_{\text{máx}}$  a  $\mu_{\text{mín}}$ .

$\dot{u}$ : Velocidad de movimiento del aislador.

En la figura 1.11 se aprecia la variación del coeficiente de fricción con respecto a la velocidad.

**Figura 1.11: Coeficiente de fricción vs. Velocidad de movimiento del aislador FPS**



Fuente: Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples

En los sistemas FPS, la fuerza restitutiva se puede proporcionar mediante resortes externos o definir el periodo de la conexión, T (periodo de una estructura perfectamente rígida que desliza sobre la conexión).

$$T=2\pi\sqrt{R/g} \quad (1.4.2.10)$$

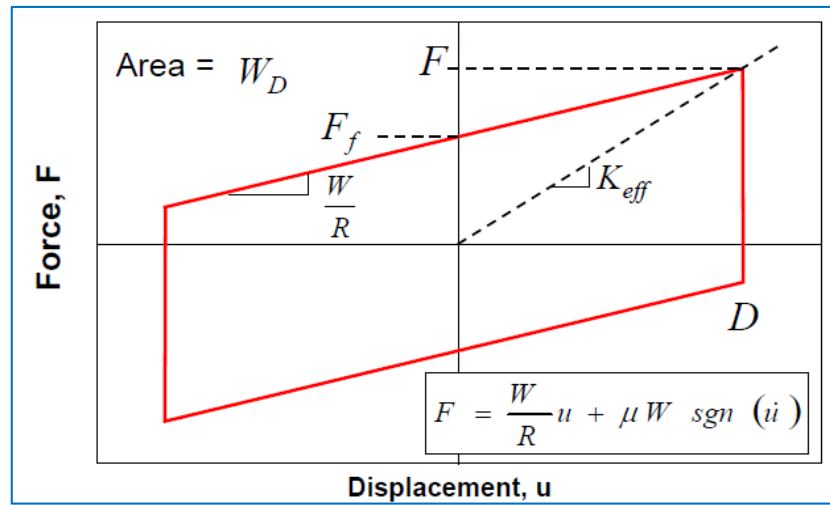
Donde:

R= Radio de curvatura de las placas.

g= Aceleración de la gravedad.

El modelo bilineal histerético puede reflejar las características del sistema de fricción pendular. El modelo del comportamiento no lineal fuerza-deformación del sistema de aislamiento a través de la curva de histéresis bilineal sirve para obtener parámetros muy importantes como la rigidez efectiva ( $K_{eff}$ ), la energía disipada ( $E_d$ ) y el amortiguamiento efectivo ( $\beta_{eff}$ ). En la Figura 1.12 se puede apreciar el modelo bilineal para un sistema péndulo friccional:

**Figura 1.12: Curva histerética idealizada para un aislador FPS**



Fuente: Curva histerética idealizada para un aislador FPS.

La rigidez efectiva, que se define como la relación entre la fuerza última durante el ciclo entre el desplazamiento, está dada por:

$$K_{eff} = \frac{F}{u} \quad (1.4.2.11)$$

Reemplazando la ecuación 1.4.2.6 en la ecuación 1.4.2.11, se obtiene:

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{u} \quad (1.4.2.12)$$

La energía disipada para un aislador FPS se define:

$$E_d = 4\mu W u \quad (1.4.2.13)$$

El amortiguamiento efectivo es:

$$\beta_{eff} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{E_d}{k_{eff} u^2} \right) \quad (1.4.2.14)$$

Reemplazando la ecuación 1.4.2.12 y la ecuación 1.4.2.13 en la ecuación 1.4.2.14 se obtiene:

$$\beta_{eff} = \frac{2\mu R}{\pi(\mu R + u)} \quad (1.4.2.15)$$

### 1.4.3. Aislador elastomérico de bajo amortiguamiento (sistema LDRB):

Los aisladores elastoméricos está conformado por láminas planas de elastómeros intercaladas con capas de acero, éstas láminas son vulcanizadas a las capas de acero. La rigidez vertical que presenta este tipo de aisladores es comparable con la de una columna de concreto armado.

Este sistema presenta bajo amortiguamiento, 2% - 5% como máximo, por lo que se utiliza en conjunto con otros disipadores de energía para proveer un amortiguamiento adicional al sistema. En la Imagen 1.1 se puede apreciar un aislador con el sistema LDRB.

**Imagen 1.1: Aislador con el Sistema LDRB**



Fuente: Página Web de Sismica Chile, “Productos”,

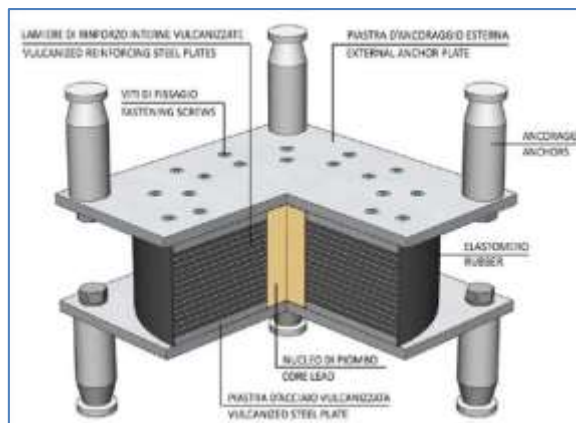
<http://www.sismica.cl/?portfolio=aisladores-elastomericos-con-nucleo-de-plomo-lrb>



#### 1.4.4. Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB):

Es similar a los aisladores LDRB pero contiene un núcleo de plomo en el centro del aislador. Por medio de la disipación de energía pasiva, la energía sísmica al entrar a la superestructura se disipa eficazmente por la amortiguación adicional dentro del núcleo principal del sistema LRB, aliviando toda la estructura de una presión adicional. Después de un evento sísmico, la goma del aislador retorna la estructura a su posición original y así el sistema queda listo para un nuevo evento sísmico. En la Imagen 1.2 se puede apreciar un aislador con el sistema LRB.

**Imagen 1.2: Aislador con el Sistema LRB**



Fuente: Página Web de ArchiFan Business Connection, “Productos”,  
<http://www.archifan.com/es/producto/61320/algasism-lrb>

#### 1.4.5. Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (HDRB):

Son aisladores cuyas láminas de elastómeros son fabricados adicionando elementos como carbón, aceites y resinas, con ello se puede aumentar el amortiguamiento de la goma aproximadamente al 10-15%. Estos aisladores combinan la flexibilidad y disipación de energía en un solo elemento. En la imagen 1.3 se puede apreciar un aislador con el sistema HDRB.

**Imagen 1.3: Aislador con el Sistema HDRB**

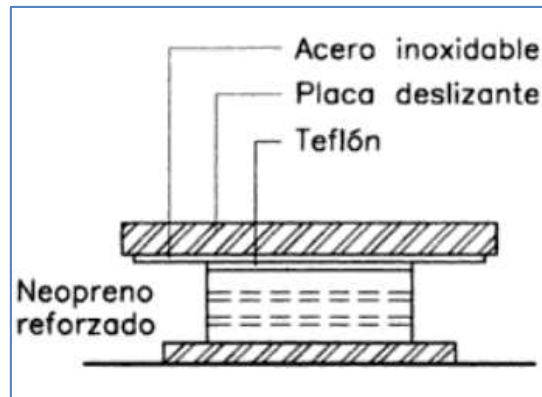


Fuente: Página Web de Direct Industry, “Productos”,  
[http://www.directindustry.es/prod/mageba/amortiguadores-resistentes-seismos-38983-1037645.html#product-item\\_1037637](http://www.directindustry.es/prod/mageba/amortiguadores-resistentes-seismos-38983-1037645.html#product-item_1037637)

#### 1.4.6. Aislador de la “Electricite de France” (Sistema EDF):

El Sistema eléctrico De-France (EDF) es el sistema de aislamiento de base tipo de fricción desarrollado en Francia en el año 1970. El sistema ha sido estandarizado para las centrales nucleares en la región de alta sismicidad. El sistema consta de laminado de una almohadilla de neopreno coronado por una placa de plomo, que está en contacto de fricción con la placa de acero anclada a la base de la estructura. Por lo tanto, su sección transversal es similar al sistema de LRB. La almohadilla de neopreno tiene muy baja capacidad de desplazamiento (5 cm aprox.) Y cuando esta capacidad es excedida, el elemento deslizante proporciona el movimiento necesario. El sistema no incluye ningún dispositivo de restauración y por lo tanto el desplazamiento permanente podría ocurrir. El sistema ha sido implementado en la planta de energía nuclear de Koeberg en Sudáfrica. En la Figura 1.13 se puede apreciar un aislador con el sistema EDF.

**Figura 1.13: Aislador con el Sistema EDF**



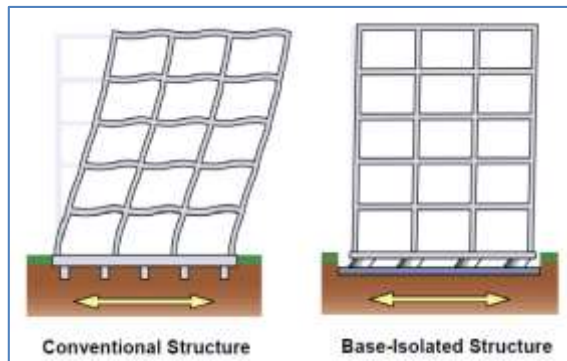
Fuente: Bozzo, Luis y Alex Barbat (2000) Diseño Sismorresistente: Técnicas convencionales y avanzadas

## 1.5 Comparación entre una estructura con aisladores y una estructura tradicional

En el diseño de edificios con aisladores sísmicos busca que la estructura esté dentro del rango lineal elástico durante el sismo.

Una edificación común experimenta deformaciones entre cada piso (deriva o distorsión) y aceleraciones amplificadas a nivel del piso superior. Las estructuras aisladas experimentan deformación en la base de la estructura (es decir, dentro del sistema de aislamiento). Los edificios con aislamiento sísmico se comportan como estructuras rígidas y concentran los desplazamientos máximos en los aisladores como se puede apreciar en la Figura 1.14.

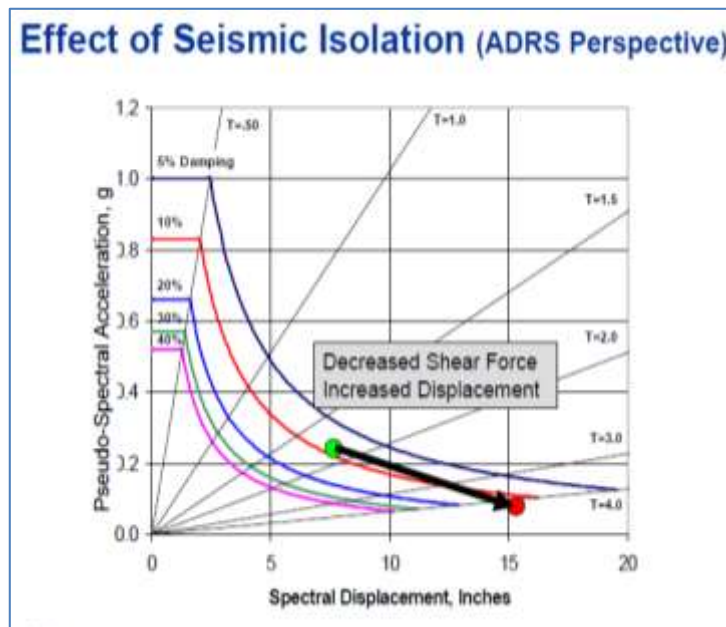
**Figura 1.14: Comparación gráfica de una edificación con Aisladores y sin aislamiento**



Fuente: Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples

La estructura es al menos 5 veces más segura que una estructura de base fija. Los esfuerzos producidos por el sismo en la estructura aislada son 10 veces menores que la estructura con base fija.

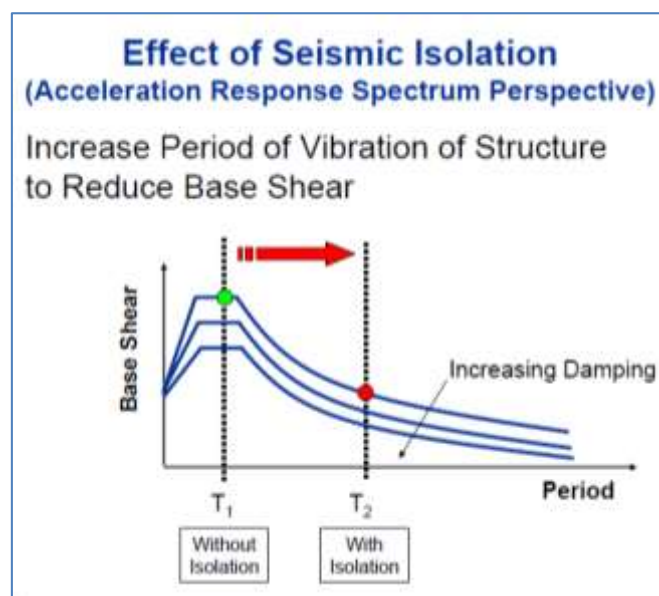
**Figura 1.15: Efecto del aislamiento sísmico (Pseud-Espectro de aceleraciones vs Espectro de desplazamiento) según FEMA (Federal Emergency Management Agency)**



Fuente: Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples

La figura 1.15 muestra una serie de espectros de respuesta elástica de diseño en forma de curvas de ADRS (Espectro de respuesta de aceleración-desplazamiento). En un ADRS, las líneas de período constante nacen desde el origen. Una estructura elástica de un solo grado de libertad tiene un periodo natural de 1.50 segundos y un coeficiente de amortiguamiento de 5% como un pico de respuesta pseudo-aceleración y desplazamiento, como se indica en el círculo verde. Un sistema de aislamiento es instalado de tal manera que el periodo natural aumenta a 3 segundos (aproximadamente 75% de reducción en la rigidez), lo que resulta en un aumento en desplazamiento máximo y la reducción del pico de pseudo-aceleración (y por tanto una reducción de la fuerza de corte), como se indica por el círculo rojo. El aumento del desplazamiento se produce a través del sistema de aislamiento en lugar de dentro de la estructura. Como indica la flecha, la respuesta a lo largo del 5% amortiguado del diseño del espectro de respuesta.

**Figura 1.16: Efecto del aislamiento sísmico – Incremento del periodo de vibración para reducir el cortante basal según FEMA (Federal Emergency Management Agency)**



Fuente: Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples

La figura 1.16 muestra el diseño típico espectro de respuesta de aceleración para tres niveles de amortiguación diferentes. El principal efecto de aislamiento sísmico es aumentar el periodo natural que reduce la aceleración y por lo tanto la demanda de fuerza en la estructura.

En términos de energía, un sistema de aislamiento cambia el periodo fundamental de una estructura lejos de los componentes más fuertes del movimiento sísmico del suelo, reduciendo así la cantidad de energía transferida en la estructura (es decir, un sistema de aislamiento "refleja" la energía de entrada afuera de la estructura). La energía que se transmite a la estructura se disipa en gran medida por mecanismos de disipación de energía eficientes dentro del sistema de aislamiento.

## CAPÍTULO II

# DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE UNA EDIFICACIÓN DE CONCRETO ARMADO

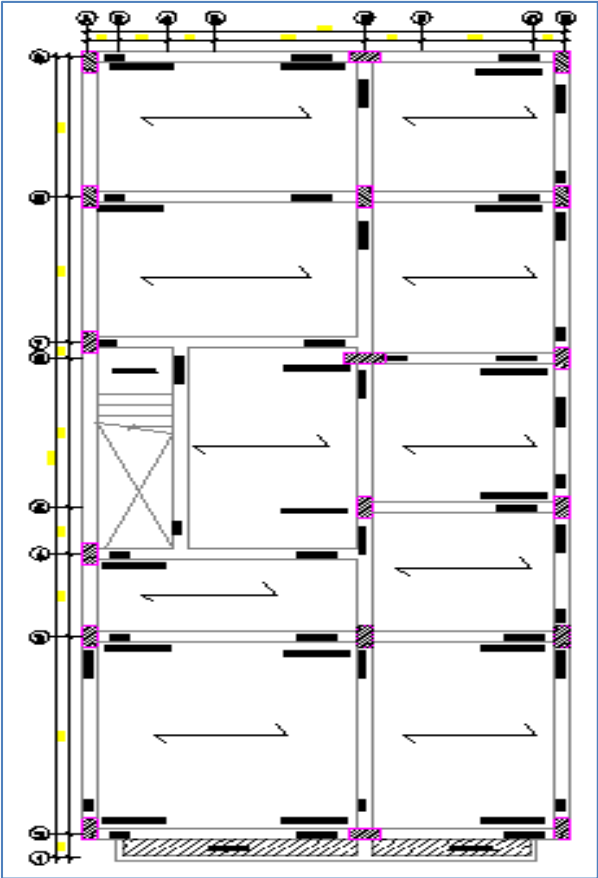
### **2.1 Descripción de la edificación**

La edificación que se eligió para el análisis consta de 5 pisos, está destinado a tener un uso de oficinas. Está ubicado en el distrito de Miraflores, provincia de Lima, departamento de Lima.

La estructura está conformada por pórticos de concreto armado en la tanto en la dirección X como en la dirección Y. Para el techo se ha considerado losas aligeradas de 20 cm y losas macizas de 20cm en la zona contigua a la caja de escalera y al balcón de la fachada.

En la figuras 2.1 se puede apreciar los encofrados del Primer al cuarto piso y en Figura 2.2 el encofrado el quinto piso. En la Figura 2.3, se ve en su totalidad el edificio en una vista 3D. En el Anexo N°2 se puede ver con mayor claridad los encofrados de la edificación.

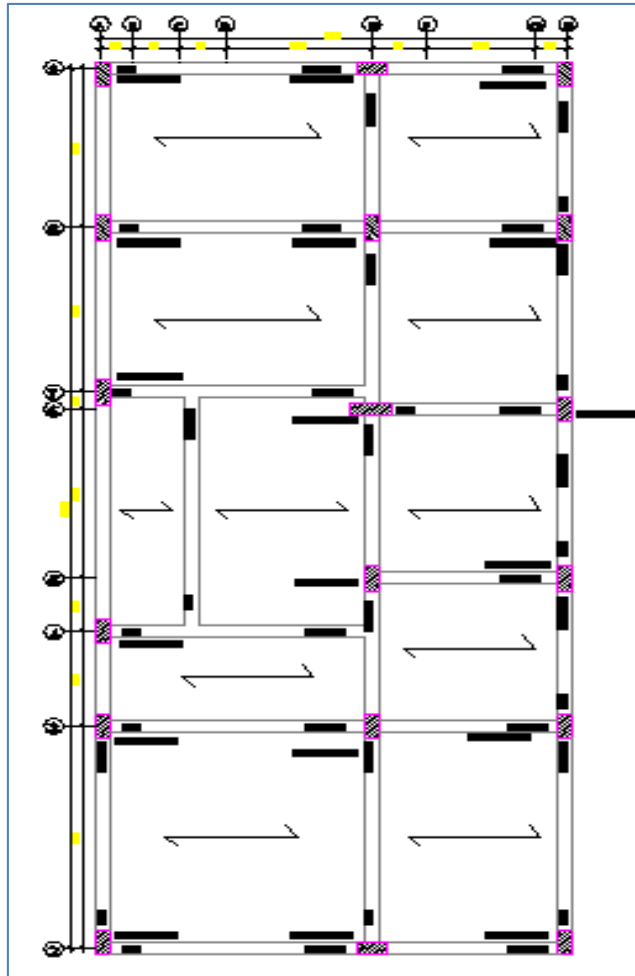
Figura 2.1: Planta del encofrado del Primer al cuarto piso de la edificación



Fuente: Empresa X

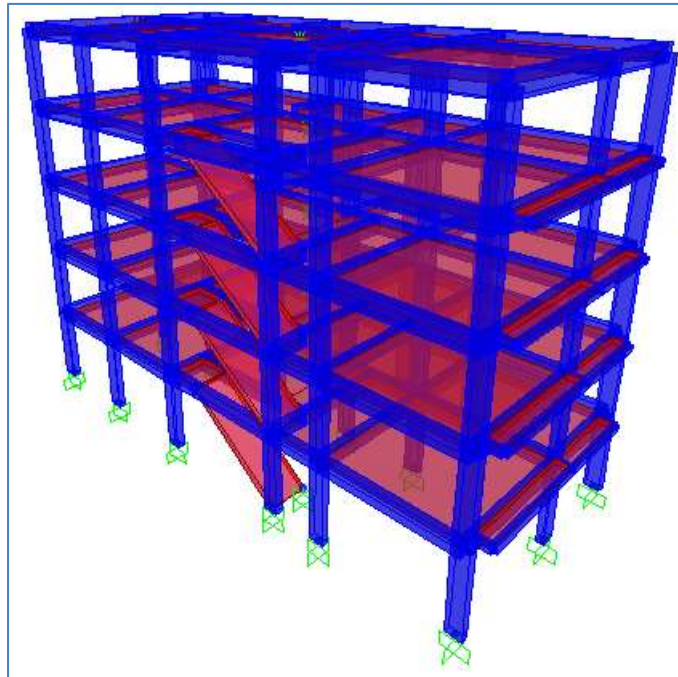


Figura 2.2: Planta del encofrado del Quinto piso



Fuente: Empresa X

Figura 2.3: Vista en 3D de la edificación



Fuente: Elaboración Propia

## 2.2 Análisis sismorresistente de la edificación

### 2.2.1 Carga muerta

Se considerará el peso real de los materiales que conforman la estructura y de los que deberá soportar la edificación, calculados en base a los siguientes pesos unitarios.

Concreto Armado : 2400 kg/m<sup>3</sup>

Piso Terminado : 100 kg/m<sup>2</sup>

Tabiquería : 100 kg/m<sup>2</sup>

### 2.2.2 Carga viva

Es el peso de todos los ocupantes, materiales, equipos y otros elementos móviles soportados por la edificación.

La carga viva de acuerdo al Reglamento Nacional de Edificaciones (Norma E.020) es:

Sobrecarga (Oficinas): 250 kg/m<sup>2</sup>

Escaleras : 400 kg/m<sup>2</sup>

### 2.2.3 Parámetros Sísmicos

Para realizar un análisis sísmico a la estructura descrita tenemos que tener los parámetros sísmicos según la Norma Perú de Diseño Sismorresistente E.030. Los cuales son los siguientes:

**Z:** Factor que se interpreta como la aceleración máxima del terreno con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años. En la tabla 2.1 se puede ver los valores que tiene el factor Z según la Norma E. 030.

Tabla 2.1: Valores de Z

Tabla N°1 FACTORES DE ZONA	
ZONA	Z
3	0,4
2	0,3
1	0,15

Fuente: Norma E.030 Diseño Sismorresistente (2003), Tabla N°1

**U:** Coeficiente de uso e importancia. Se define según la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Valores de U

Tabla N° 3 CATEGORÍA DE LAS EDIFICACIONES		
CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	FACTOR U
A Edificaciones Esenciales	Edificaciones esenciales cuya función no debería interrumpirse inmediatamente después que ocurra un sismo, como hospitales, centrales de comunicaciones, cuarteles de bomberos y policía, subestaciones eléctricas, reservorios de agua. Centros educativos y edificaciones que puedan servir de refugio después de un desastre. También se incluyen edificaciones cuyo colapso puede representar un riesgo adicional, como grandes hornos, depósitos de materiales inflamables o tóxicos.	1,5
B Edificaciones Importantes	Edificaciones donde se reúnen gran cantidad de personas como teatros, estadios, centros comerciales, establecimientos penitenciarios, o que guardan patrimonios valiosos como museos, bibliotecas y archivos especiales. También se considerarán depósitos de granos y otros almacenes importantes para el abastecimiento	1,3
C Edificaciones Comunes	Edificaciones comunes, cuya falla ocasionaría pérdidas de cuantía intermedia como viviendas, oficinas, hoteles, restaurantes, depósitos e instalaciones industriales cuya falla no acarree peligros adicionales de incendios, fugas de contaminantes, etc.	1,0
D Edificaciones Menores	Edificaciones cuyas fallas causan pérdidas de menor cuantía y normalmente la probabilidad de causar víctimas es baja, como cercos de menos de 1,50m de altura, depósitos temporales, pequeñas viviendas temporales y construcciones similares.	(*)

(\*) En estas edificaciones, a criterio del proyectista, se podrá omitir el análisis por fuerzas sísmicas, pero deberá proveerse de la resistencia y rigidez adecuadas para acciones laterales.

Fuente: Norma E.030 Diseño Sismorresistente (2003), Tabla N°3

**C:** Factor de amplificación sísmica. Se define por la siguiente expresión:

$$C = 2.5 * \left( \frac{T_p}{T} \right); C \leq 2.5$$

**S:** Factor suelo. Se define según el tipo de suelo donde está ubicado la estructura. El valor de S, se define según la Tabla 2.3:

Tabla 2.3: Valores de S

Tabla N°2 Parámetros del Suelo			
Tipo	Descripción	$T_p$ (s)	S
S <sub>1</sub>	Roca o suelos muy rígidos	0,4	1,0
S <sub>2</sub>	Suelos intermedios	0,6	1,2
S <sub>3</sub>	Suelos flexibles o con estratos de gran espesor	0,9	1,4
S <sub>4</sub>	Condiciones excepcionales	*	*

Fuente: Norma E.030 Diseño Sismorresistente (2003), Tabla N°2

**R:** Coeficiente de reducción sísmica. Se define el sistema estructural de la edificación.

En caso que la estructura sea irregular, el factor debe ser multiplicado por  $\frac{3}{4}$ . Los valores de R se obtienen de la siguiente tabla:

Tabla 2.4: Valores de R

Tabla N° 6 SISTEMAS ESTRUCTURALES	
Sistema Estructural	Coefficiente de Reducción, R Para estructuras regulares (*) (**)
Acero	
Pórticos dúctiles con uniones resistentes a momentos.	9,5
Otras estructuras de acero:	
Arriostres Excéntricos.	6,5
Arriostres en Cruz.	6,0
Concreto Armado	
Pórticos <sup>(1)</sup> .	8
Dual <sup>(2)</sup> .	7
De muros estructurales <sup>(3)</sup> .	6
Muros de ductilidad limitada <sup>(4)</sup> .	4
Albañilería Armada o Confinada <sup>(5)</sup> .	3
Madera (Por esfuerzos admisibles)	7

Fuente: Norma E.030 Diseño Sismorresistente (2003), Tabla N°6

Para la edificación, se tiene los siguientes parámetros:

Z= 0.4 (Zona III, Lima)

U= 1.0 (Uso de Oficinas)

S= 1.0 (Roca o suelos muy rígidos)

Rx= 7 (Estructura regular a base de pórticos)

Ry= 7 (Estructura regular a base de pórticos)

#### 2.2.4. Análisis dinámico por combinación modal espectral

Se analizó la estructura mediante un espectro de respuesta según como indica la norma E.030:

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} g$$

El espectro va a ser el mismo para ambas direcciones ya que el coeficiente “R” es el mismo para la dirección X e Y.

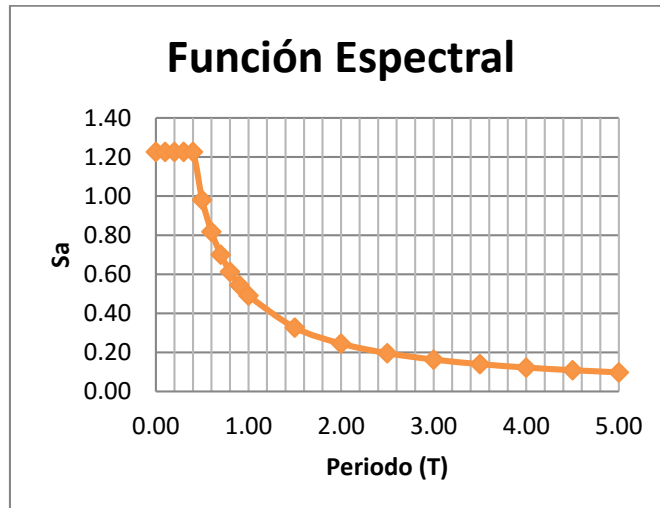
En la Tabla 2.5 se va obteniendo el valor del espectro de respuesta (Sa) según la variación del periodo (T) y en el gráfico 2.1 se puede ver el espectro Sa ya elaborado.

Tabla 2.5: Valores de Sa

C	T	Sa
2.50	0.00	1.23
2.50	0.10	1.23
2.50	0.20	1.23
2.50	0.30	1.23
2.50	0.40	1.23
2.00	0.50	0.98
1.67	0.60	0.82
1.43	0.70	0.70
1.25	0.80	0.61
1.11	0.90	0.55
1.00	1.00	0.49
0.67	1.50	0.33
0.50	2.00	0.25
0.40	2.50	0.20
0.33	3.00	0.16
0.29	3.50	0.14
0.25	4.00	0.12
0.22	4.50	0.11
0.20	5.00	0.10

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 2.1: Función Espectral de la edificación



Fuente: Elaboración Propia

## 2.3 Resultados del análisis

El análisis de la edificación se realizó con el software SAP2000 v15 y se obtuvieron los resultados de los periodos de vibración, desplazamientos, distorsiones y cortante basal.

### 2.3.1. Periodos de vibración

Se consideró para el análisis 18 modos de vibración ya que es una estructura que consta de 5 pisos. En la Tabla 2.6 se puede apreciar el porcentaje de participación de la masa en la edificación según el análisis en el software.

Tabla 2.6: Periodos de vibración de la edificación

N° Modo	Periodo (s)	%Masa	
		X	Y
<b>1</b>	<b>0.82</b>	<b>78.483%</b>	<b>0.164%</b>
2	0.64	1.708%	6.305%
<b>3</b>	<b>0.41</b>	<b>0.012%</b>	<b>75.993%</b>
4	0.26	11.204%	0.004%
5	0.21	0.095%	0.391%
6	0.14	3.570%	2.306%
7	0.14	1.341%	7.727%
8	0.12	0.006%	0.000%
9	0.10	2.419%	0.021%
10	0.09	0.092%	4.001%
11	0.08	0.001%	0.010%
12	0.07	0.800%	0.001%
13	0.07	0.030%	0.001%
14	0.06	0.001%	0.047%
15	0.06	0.002%	0.108%
16	0.06	0.024%	1.349%
17	0.06	0.001%	0.038%
18	0.06	0.004%	0.035%

Fuente: Elaboración Propia

Los periodos de la estructura se identifican según la distribución de masas de la estructura. Estos son los periodos según la dirección indicada:

$$T_x = 0.82 \text{ s}; T_y = 0.41 \text{ s}$$



### 2.3.2 Desplazamientos y Distorsiones

Como se puede apreciar en la Tabla 2.7, en la columna de distorsiones, en la dirección Y cumple, más no en la dirección X según tabla N°8 de la norma E.030.

Tabla 2.7: Desplazamientos y distorsiones de la edificación

	NIVEL	Desplaz. Rel. Al suelo (m)	Desplaz. Rel. Al suelo $\times 0.75 \times R$ (m)	Desplaz. De entrepiso (m)	Altura entrepiso (m)	Distorsiones
SISMOX	PISO5	0.0131	0.079	0.009	2.65	0.0034
	PISO4	0.0116	0.070	0.016	2.65	0.0059
	PISO3	0.0090	0.054	0.020	2.65	0.0075
	PISO2	0.0057	0.034	0.022	2.65	0.0082
	PISO1	0.0021	0.013	0.013	2.65	0.0048
SISMOY	PISO5	0.0063	0.038	0.005	2.65	0.0018
	PISO4	0.0055	0.033	0.007	2.65	0.0027
	PISO3	0.0043	0.026	0.008	2.65	0.0032
	PISO2	0.0029	0.017	0.010	2.65	0.0038
	PISO1	0.0012	0.007	0.007	2.65	0.0027

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2.8: Desplazamientos y distorsiones permitidos según la norma

Tabla N° 8	
LÍMITES PARA DESPLAZAMIENTO LATERAL DE ENTREPISO	
Estos límites no son aplicables a naves industriales	
Material Predominante	( $\Delta_x / h_{e_i}$ )
Concreto Armado	0,007
Acero	0,010
Albañilería	0,005
Madera	0,010

Fuente: Norma E.030 Diseño Sismorresistente (2003), Tabla N°8

De los resultados se puede ver que en la dirección X son mayores a 0.007, se tienen valores de 0.0075 y de 0.0082.

### 2.3.3. Reacciones en la base

En las reacciones se consideran los cortantes basales, la fuerza axial y los momentos en todas las direcciones. En la Tabla 2.9 se puede ver fuerzas que actúan en la base según la dirección.

Tabla 2.9: Reacciones de la edificación con base fija

<b>CARGA</b>	<b>Vx</b>	<b>Vy</b>	<b>Fz</b>	<b>Mx</b>	<b>My</b>	<b>Mz</b>
	<b>t</b>	<b>t</b>	<b>t</b>	<b>t-m</b>	<b>t-m</b>	<b>t-m</b>
SISMO X	39.5095	2.7671	0.637	26.12129	357.9726	327.03413
SISMO Y	2.7671	74.1425	1.4442	708.25456	24.28475	190.17405

Fuente: Elaboración Propia

Los cortantes basales son los valores de las columnas  $V_x$  y  $V_y$ , para la dirección X e Y. Según los resultados se obtuvieron el cortante basal en la dirección X es  $V_x = 39.50$  ton, mientras que el cortante en la dirección Y es  $V_y = 74.14$  ton.

# CAPÍTULO III

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO PROPUESTO

### 3.1 Objetivos de los ensayos

Los ensayos del aislador propuesto se realizaron en el Laboratorio de Estructuras del CISMID (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres).

El ensayo se simulará para ver cómo sería comportamiento del sistema instalado en una estructura cuando esté sometido a cargas tanto axial como lateral.

Los ensayos se realizaron con el motivo de obtener los siguientes objetivos:

- Obtener sus parámetros principales.
- Conocer el comportamiento histerético del aislador.
- Determinar los diferentes coeficientes de fricción dinámica del aislador con el paso de los ciclos.
- Obtener otras curvas características del tipo de aislador propuesto.

### 3.2 Descripción del sistema propuesto

#### 3.2.1 Descripción general

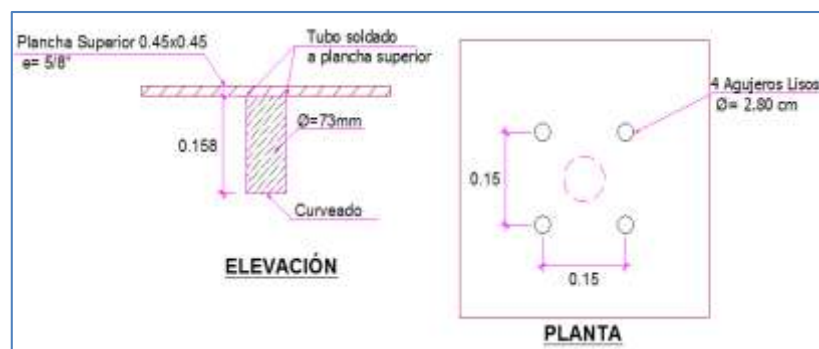
El aislador propuesto es del tipo péndulo friccional, el cual está constituido por dos planchas bases, uno superior y otro inferior, un tubo redondo macizo de 73 mm; el aislador también tiene una plancha rolada de 1/2". La función principal del sistema propuesto es disipar energía por fricción.

La plancha superior tiene medidas de 45 cm por 45 cm y de 5/8" de espesor; la plancha inferior tiene medidas de 45 cm por 55 cm y 1" de espesor, en la parte central tiene una

circunferencia de 35 cm de diámetro curvado hacia abajo. El tubo está soldado junto con la plancha superior y en la parte inferior está curvado de tal forma de que se pueda deslizar y friccionar con la plancha inferior. Finalmente, se tendrá una plancha rolada de 1/2" que tendrá forma de una circunferencia de diámetro de 35 cm que servirá como tope máximo de desplazamiento. En el Anexo N°1 se puede ver el proceso de fabricación del sistema propuesto.

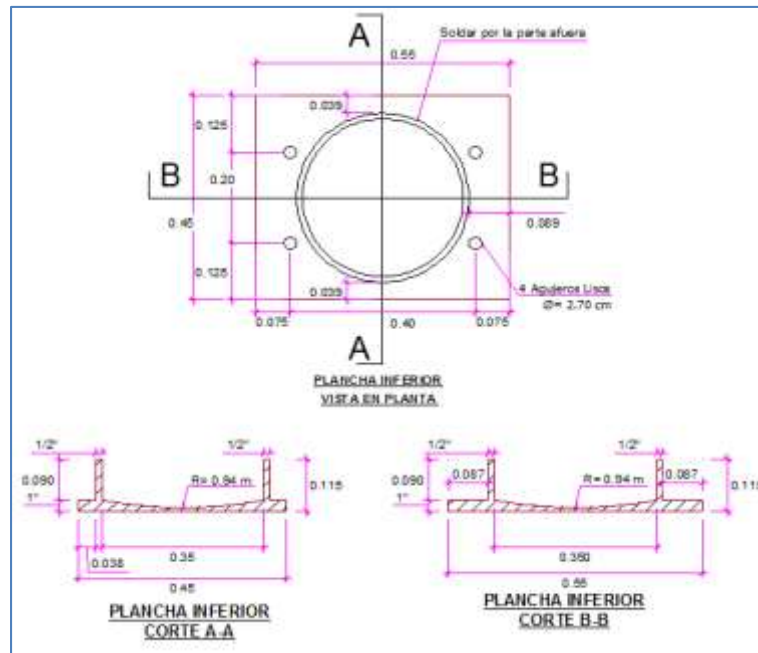
En las figuras 3.1 y 3.2 se pueden apreciar mejor las dimensiones del sistema propuesto y en la imagen 3.1 se puede ver el sistema antes de proceder a los ensayos de laboratorio.

Figura 3.1: Sistema Propuesto: Plancha superior soldado con el tubo macizo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.2: Sistema Propuesto: Plancha Inferior



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.1: Sistema Propuesto: Plancha superior hacia arriba



Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.2 Comportamiento dinámico del sistema propuesto

Como se pudo apreciar en el diagrama de cuerpo libre de un sistema de péndulo friccional (Ver Figura 1.8) la carga vertical que se le aplica al sistema más un componente de la fuerza de fricción, se le va a oponer una componente de la Normal. Por otra parte, la fuerza horizontal que fuerza el movimiento al sistema se le opondrá una componente de la fuerza Normal más una componente de la fuerza de fricción. La fuerza horizontal va ir variando con respecto al tiempo y se obtendrá de la siguiente manera:

$$F(t) = \frac{Wu}{R} + \mu W \text{sgn}(\dot{u}) \quad (3.2.2.1)$$

La fuerza lateral aplicada al sistema, producirá que el sistema se deslice (se deslizará la plancha superior junto con el tubo macizo sobre la superficie curva de la plancha inferior) hasta que el sistema llegue a su tope máximo, una vez que la fuerza disminuya, el sistema se detendrá y volverá a deslizarse (pero esta vez para el sentido contrario) cuando la fuerza se incremente de nuevo.

El coeficiente de fricción para este sistema es de acero – acero a comparación del sistema FPS convencional que es de acero - teflón (PTFE). Este coeficiente también va a variar con respecto al tiempo y se obtiene despejando la ecuación (3.2.2.1):

$$\mu(t) = \frac{1}{\text{sgn}(\dot{u})} \left( \frac{F}{W} - \frac{U}{R} \right) \quad (3.2.2.2)$$

Donde:

F: Fuerza Horizontal aplicada al sistema.

W: Carga axial aplicada a la estructura.

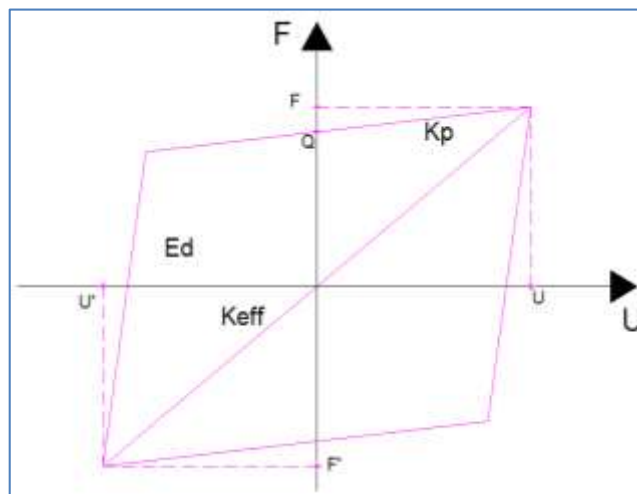
U: Máximo desplazamiento alcanzado durante el ciclo.

### 3.2.3 Comportamiento histerético del sistema

Las características mecánicas de un aislador sísmico dependen de la carga axial, velocidad, deformación bilateral, la temperatura o el desgaste, entonces los valores de la rigidez y amortiguación se utilizan en múltiples análisis del modelo para determinar el rango y sensibilidad de los parámetros de diseño.

El modelo histerético se ha investigado intensamente para hacer un uso seguro de las propiedades mecánicas de los aisladores. Este modelo expresa la relación entre la fuerza cortante y el desplazamiento lateral, en la figura 3.3 se puede apreciar que los desplazamientos máximos y mínimos ocurren al cortante máximo y mínimo respectivamente.

Figura 3.3: Comportamiento histerético de un aislador



Fuente: Elaboración Propia

Donde:

Q: Fuerza característica del aislador.

F, F': Fuerza última alcanzado en el ciclo.

U: Desplazamiento de inicio de deslizamiento.

U': Desplazamiento último alcanzado.

E<sub>d</sub>: Energía disipada en el ciclo (área encerrada bajo la curva).

U, U': Máximo desplazamiento alcanzado durante el ciclo.

La rigidez  $k_p$ , también conocido como rigidez post-fluencia, se obtiene de la siguiente manera:

$$k_p = \frac{F - Q}{U} \quad (3.2.3.1)$$

La rigidez efectiva se determina de la siguiente manera:

$$k_{\text{eff}} = \frac{|F| + |F|}{|U| + |U'|} \quad (3.2.3.3)$$

El amortiguamiento efectivo del sistema, se obtiene:

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{2(E_D)}{\pi k_{\text{eff}} (|U| + |U'|)^2} \quad (3.2.3.4)$$

### **3.3 Descripción del laboratorio y su instrumentación**

Las instalaciones del Laboratorio de Estructuras del CISMID cuentan con un muro de reacción y una losa de carga, también cuenta con puentes grúa con capacidad de 5 y 15 t que sirven para armar y acomodar las piezas mecánicas que se van a utilizar para el ensayo.



Entre las piezas mecánicas e instrumentos que cuenta el laboratorio están:

1. Marco de carga.
2. Rodillos metálicos.
3. Pedestales metálicos.
4. Vigas metálicas.
5. Pernos estructurales.
6. Gatas con celdas de cargas.
7. Transductores.
8. Convertidor A-D.
9. Computadora de control.

También se cuenta con una unidad de bomba hidráulica que mediante unos cables conectados a las gatas hace que el aceite circule en las gatas para su buen funcionamiento. En la imagen 3.2 se puede ver el exterior del laboratorio de estructuras, mientras que en las imágenes del 3.3 al 3.7 se puede ver los instrumentos y unidades que se encuentran dentro del laboratorio.

Imagen 3.2: Laboratorio de Estructuras Ing. Roberto Morales



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Imagen 3.3: Unidad de bomba hidráulica



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Imagen 3.4: Celda de carga



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Imagen 3.5: Puente grúa



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Imagen 3.6: Computadora de control y convertidor A-D



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Imagen 3.7: Pedestal y viga metálica



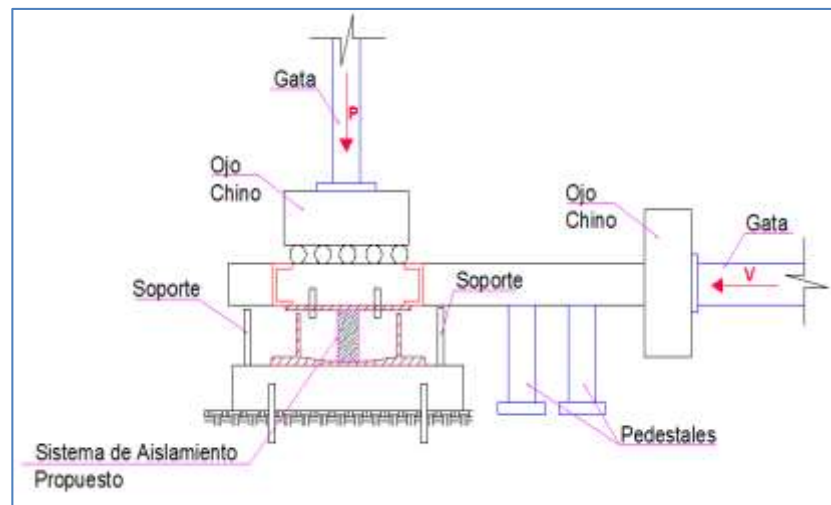
Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

### **3.4 Programa de ensayos**

Se realizó varios ensayos cíclicos que consistía en que tanto la gata horizontal empuje al sistema propuesto para que se desplace hasta cierta distancia y luego empuje pero para el sentido contrario hasta que alcance aproximadamente la misma distancia recorrida en el inicio, mientras que el sistema estaba siendo empujado, la gata vertical aplicaba una carga axial variaba con el tiempo.

Las gatas que aplican cargas tanto horizontales y verticales del tipo JA-20, tienen una capacidad de 20 t, una presión de 565.60 kg/cm<sup>2</sup> y una carrera  $\pm 20$  cm; el equipo también contará con celdas de carga del tipo TCLP-20BW que tienen una capacidad 20 t. Las gatas se sostendrán mediante rodillos, bases, parantes, ojos chinos y vigas metálicas. El esquema del montaje de las gatas, se puede ver en la Figura 3.4.

Figura 3.4: Esquema del montaje del ensayo cíclico



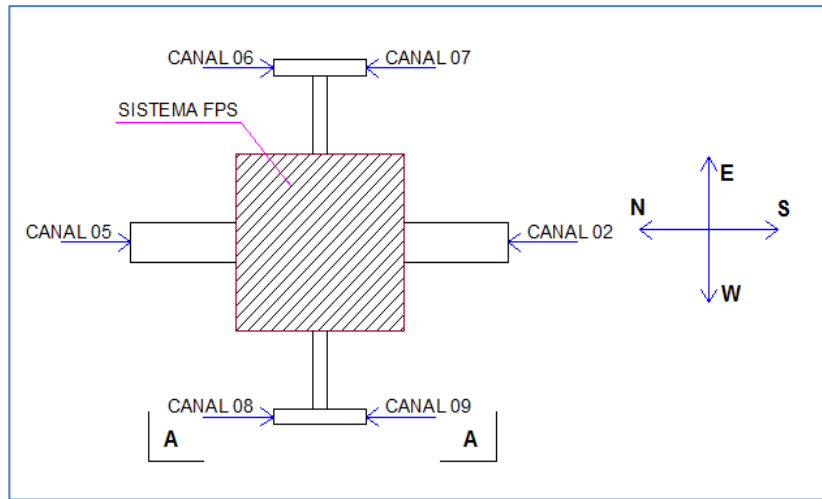
Fuente: Elaboración Propia

Para el ensayo se consideró 11 canales al inicio, pero un transductor no estaba en equilibrio así que se procedió a retirarlo y al final se utilizaron 10 canales:

- 1) Canal 1: Carga Vertical, Gata Vertical
- 2) Canal 2: Carga Horizontal, Gata Horizontal – Compresión
- 3) Canal 3: Carga Horizontal, Gata Horizontal – Tensión
- 4) Canal 4: Desplazamiento Vertical, Transductor
- 5) Canal 6: Desplazamiento Horizontal, Transductor – Dirección NE
- 6) Canal 7: Desplazamiento Horizontal, Transductor – Dirección NW
- 7) Canal 8: Desplazamiento Horizontal, Transductor – Dirección SE
- 8) Canal 9: Desplazamiento Horizontal, Transductor – Dirección SW
- 9) Canal 10: Desplazamiento Vertical, Transductor
- 10) Canal 11: Desplazamiento Vertical, Transductor

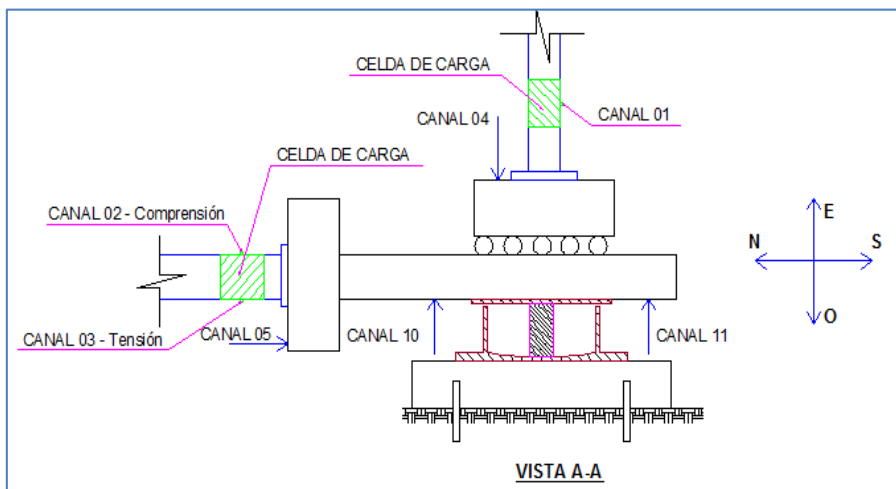
En las figuras 3.5 y 3.6 se pueden ver las ubicaciones de los canales en el sistema propuesto de aislamiento.

Figura 3.5: Esquema de las ubicaciones de los canales,  
Vista en planta



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.6: Esquema de las ubicaciones de los canales,  
Vista A-A



Fuente: Elaboración Propia

Los transductores son dispositivos que convierten una energía de entrada en otra diferente de salida, para el ensayo se colocaron transductores de desplazamiento de voltaje lineal. Se colocó un transductor para medir el desplazamiento vertical en la parte superior de la viga de transferencia. Para los desplazamientos horizontales en el dispositivo se utilizaron un

juego de 4 transductores ubicados a cada lado de la plancha superior. Los transductores que se utilizaron para los ensayos tienen una amplitud de 100 mm por lo que la carrera del sistema tenía que ser menor a esa cantidad.

### **3.4.1 Procedimiento del ensayo**

Para cada ensayo se varió tanto la carga lateral como la vertical de manera manual. La carga vertical, en teoría, debió ser constante pero ante el empuje que daba a la plancha superior del aislador hacia arriba cada vez que había un desplazamiento, hizo que la gata vertical aumente la carga durante cada ensayo.

El procedimiento del ensayo fue el siguiente:

1. Verificar que el sistema FPS este nivelado y su desplazamiento sea de 0 mm (ubicado en la mitad).
10. Aplicar una carga Axial hasta llegar a un valor determinado según lo programado.
11. Aplicar lentamente carga horizontal para que el sistema proceda a desplazarse con carreras de  $\pm 20$  mm,  $\pm 40$  mm y  $\pm 60$  mm cada una con 4 repeticiones para cada ensayo.
12. Una vez cumplido las 12 repeticiones, se procede a colocar el sistema en el valor de 0 mm (ubicado en la mitad) y luego se repite nuevamente los pasos pero con diferente carga axial según lo programado.

### **3.5 Resultados de los ensayos**

Antes de realizar los ensayos, se hicieron pruebas al sistema FPS sin proporcionarle carga axial para ver si el sistema deslizaba sin algún problema. Estos registros no se analizaron ya que lo primordial era ver el comportamiento actuando tanto bajo cargas laterales como axiales.

Estos fueron los ensayos que se tomaron en cuenta para el análisis:

Tabla 3.1: Ensayos Cíclicos para el Sistema propuesto FPS

Ensayo	Amplitudes	Carga Vertical Inicial	Carga Vertical Final	Nombre del archivo
N°	(mm)	(t)	(t)	N°
1	20, 40, 60	5.00	3.30	004
2	20, 40, 60	7.50	6.00	005
3	20, 40, 60	2.50	2.84	007

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se presentaran los resultados de los ensayos según la tabla 3.1; se decidió nombrar a cada archivo por un nombre que represente el estado con el que se presentaba el sistema FPS durante el ensayo, por lo que el archivo 004 se llamará “Estado Normal”, el archivo 005 “Estado Vulnerable” y el archivo 007 “Estado de Falla”.

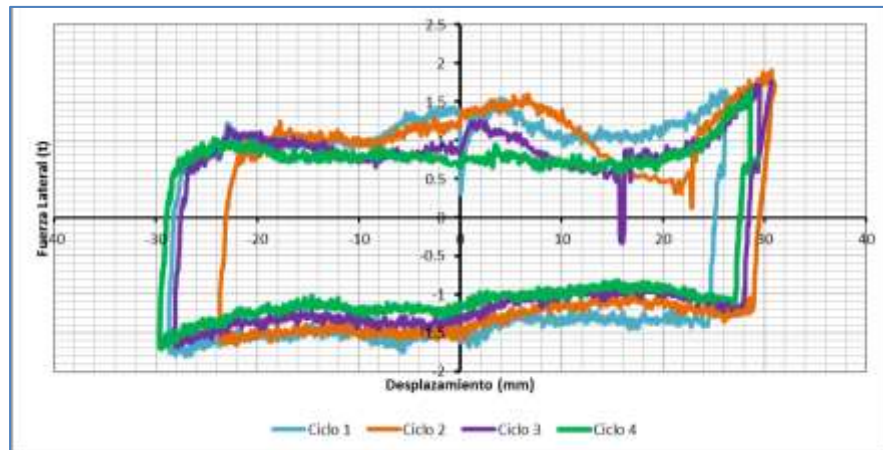
Para los estados Normal y Vulnerable se realizaron 12 ciclos cada uno, mientras para el estado de Falla sólo se realizaron 8 ciclos ya que el sistema ya no podía seguir avanzando porque la superficie curva ya estaba raspado y desgastado para que se siga deslizando. Según la tabla 3.1 las amplitudes que realizó el sistema fueron de 20 (Ciclos del 1 al 4), 40 (Ciclos del 5 al 8) y 60 mm (Ciclos del 9 al 12) pero en la realidad como el empuje de la carga lateral fue de manera manual no se llegó alcanzar con precisión las amplitudes mencionadas.

### 3.5.1 Curva Histerética – “Estado Normal”

En el gráfico 3.1 se puede apreciar que los desplazamientos para la dirección Norte-Sur no varían notoriamente mientras que para la dirección Sur-Norte el desplazamiento que se produjo en el ciclo 2 varía 8 mm con respecto a los demás ciclos. La carga lateral está entre -1.5 y 1.5 ton.



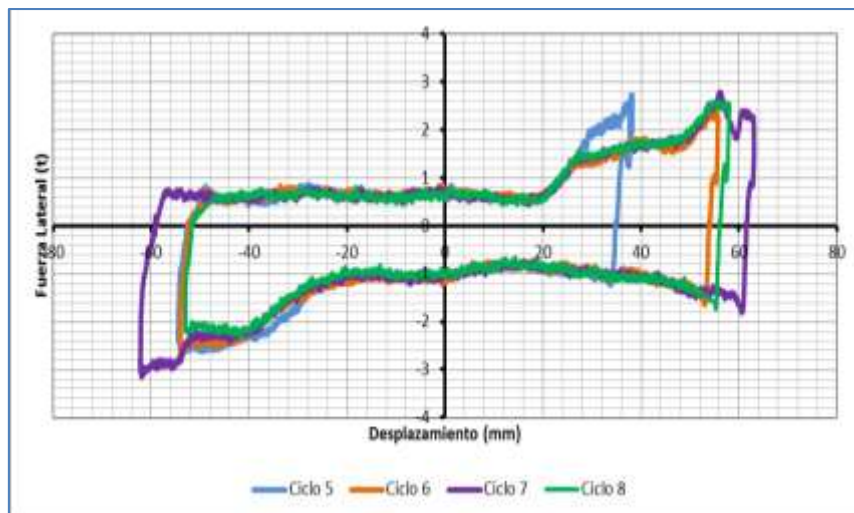
Gráfico 3.1: Curva Histerética – Estado Normal – Ciclos 1-4



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 3.2 se puede apreciar que los desplazamientos para la dirección Norte-Sur varían entre los ciclos 5 al 6 varían unos 18 mm aproximadamente, mientras que del ciclo 6 al 7 no varían mucho, del ciclo 7 al 8 varían aproximadamente 8 mm. Para la dirección Sur-Norte la variación más notoria es del ciclo 6 al 7 con 8 mm aproximadamente. La carga lateral varía entre -3.20 a 2.80 ton.

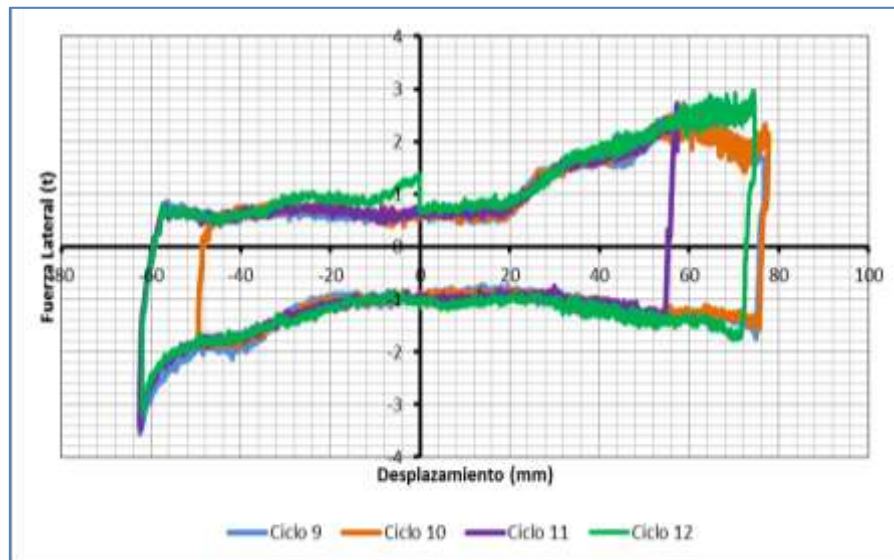
Gráfico 3.2: Curva Histerética – Estado Normal – Ciclos 5-8



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 3.3 la variación es para la dirección Norte-Sur varían notoriamente entre el ciclo 11 y el 12 con 17 mm aproximadamente, mientras que en la dirección Sur-Norte la variación más notoria es del ciclo 10 al 11 con 12 mm aproximadamente. La carga lateral varía entre -3.80 hasta 3.00 ton.

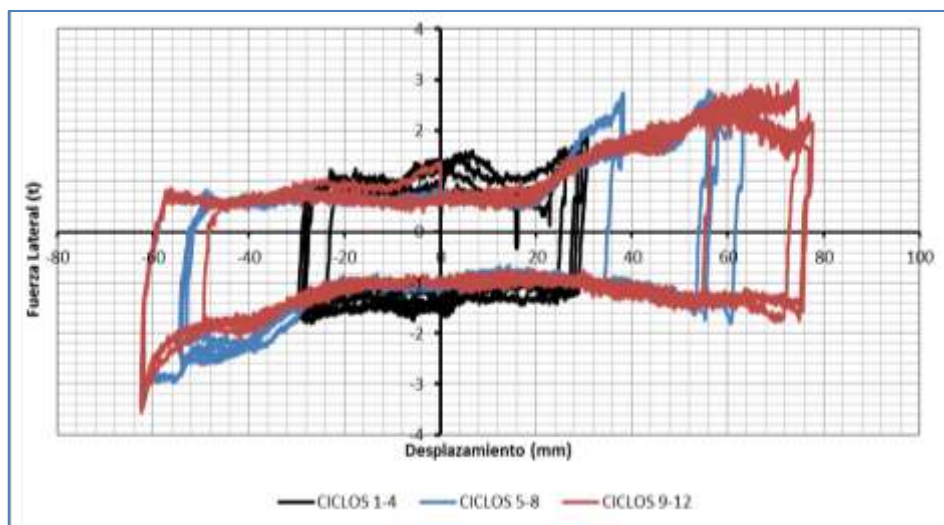
Gráfico 3.3: Curva Histerética – Estado Normal – Ciclos 9-12



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 3.4 se ve las curvas histeréticas de cada ciclo una, continuación de la otra desde ciclo 1 al ciclo 12 para el estado “Normal”.

Gráfico 3.4: Curva Histerética – Estado Normal – Ciclos 1-12

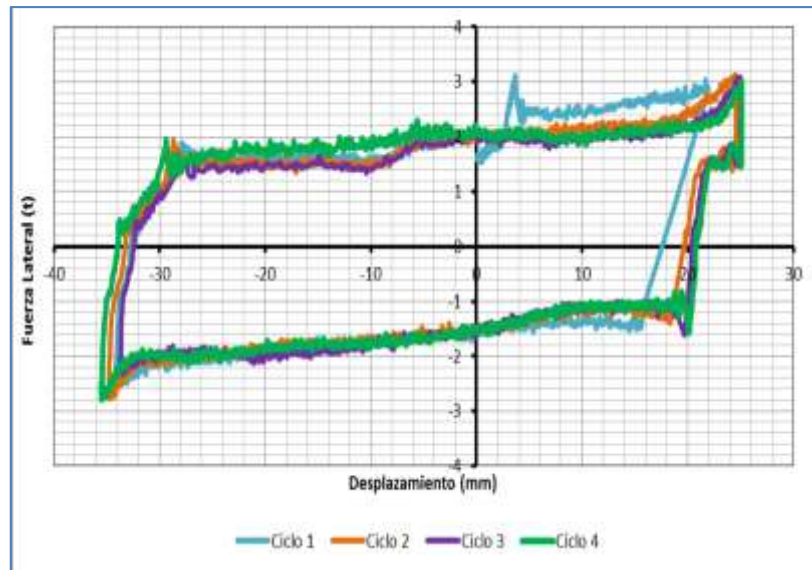


Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.2 Curva Histerética – “Estado Vulnerable”

En el gráfico 3.5 se puede apreciar que los desplazamientos tanto para la dirección Norte-Sur como la dirección Sur-Norte no varían notoriamente. La carga lateral está entre -2.90 y 3.00 ton.

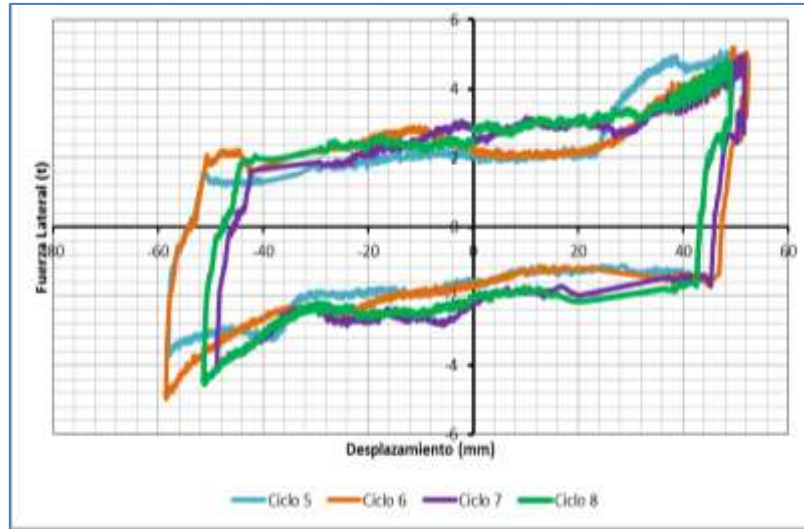
Gráfico 3.5: Curva Histerética – Estado Vulnerable – Ciclos 1-4



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 3.6 la variación es para la dirección Norte-Sur no varían notoriamente, mientras que en la dirección Sur-Norte la variación más notoria son los desplazamientos que se dan en los ciclos 7 y 8 de 6 mm con respecto a los ciclos 5 y 6. La carga lateral varía entre -4.60 hasta 4.60 ton.

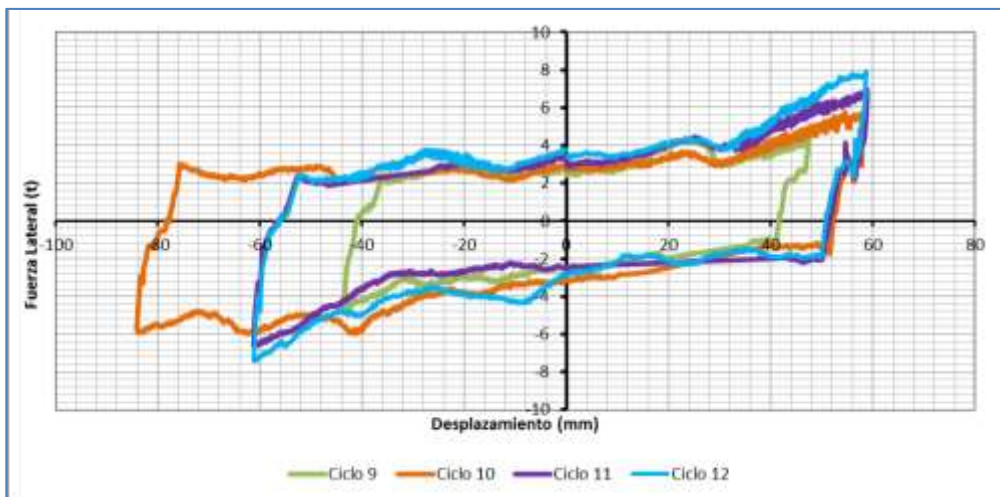
Gráfico 3.6: Curva Histerética – Estado Vulnerable – Ciclos 5-8



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 3.7 la variación es para la dirección Norte-Sur varían el ciclo 9 con respecto a los ciclos 11 y 12 es de 6 mm aproximadamente, mientras que en la dirección Sur-Norte la variación más notoria son los desplazamientos que se dan en los ciclos 11 y 12 con respecto al ciclo 9 de 18 mm. La carga lateral varía entre -7.80 hasta 8.00 ton.

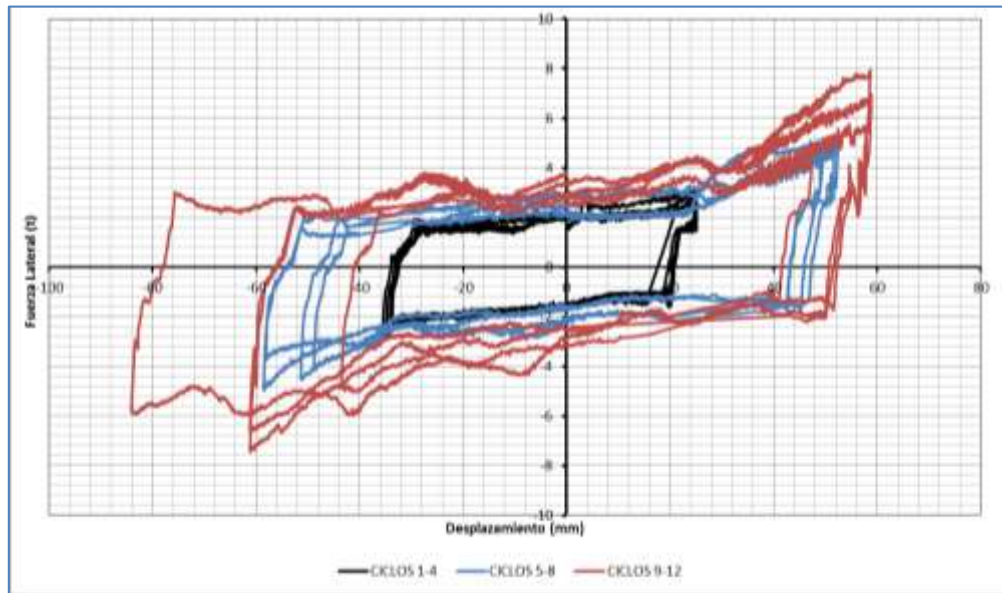
Gráfico 3.7: Curva Histerética – Estado Vulnerable – Ciclos 9-12



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 3.8 se ve las curvas histeréticas de cada ciclo una, continuación de la otra desde ciclo 1 al ciclo 12 para el estado “Normal”.

Gráfico 3.8: Curva Histerética – Estado Vulnerable – Ciclos 1-12

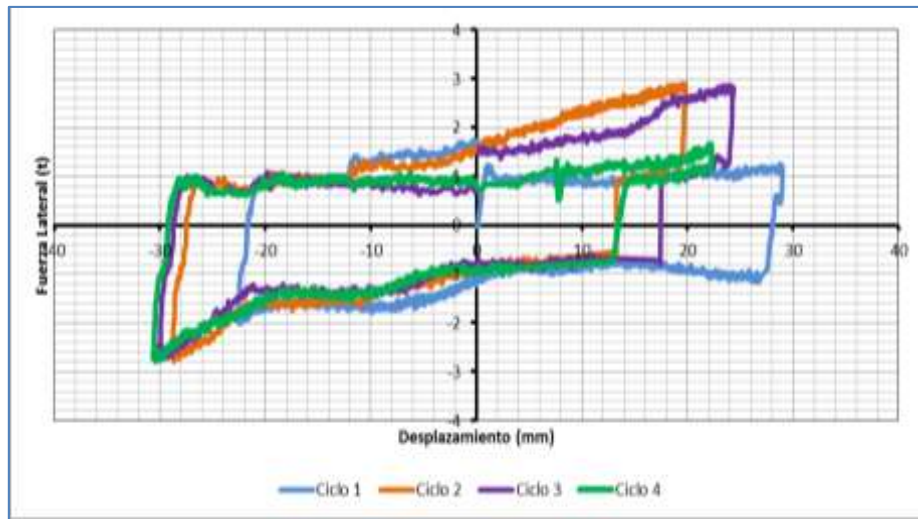


Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.3 Curva Histerética – “Estado de Falla”

En el gráfico 3.9 se puede apreciar que los desplazamientos para la dirección Norte-Sur varían de manera brusca a partir del ciclo 2 ya que la superficie de deslizamiento ya estaba raspada a comparación de la dirección Sur-Norte los desplazamientos fueron más fluidos, sólo varió el desplazamiento del ciclo 1 con respecto al 3 y al 4 unos 12 mm aproximadamente. La carga lateral está entre -2.80 y 3.00 ton.

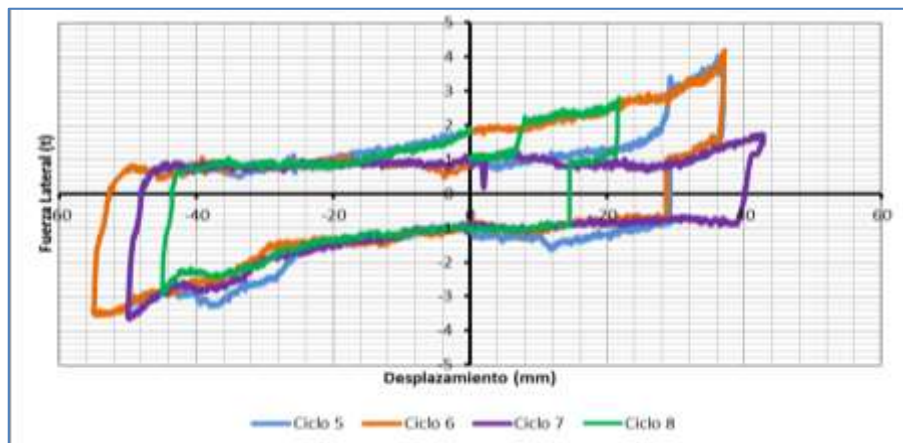
Gráfico 3.9: Curva Histerética – Estado de Falla – Ciclos 1-4



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 3.10, al igual que los anteriores ciclos, los desplazamientos para la dirección Norte-Sur varían de manera brusca, mientras que en la dirección Sur-Norte los desplazamientos variaron los ciclos 5 y 7 unos 6 mm y el ciclo 6 varía 5 mm con respecto a los ciclos 5 y 7, y 9 mm con respecto al ciclo 8. La carga lateral está entre -3.80 y 4.20 ton.

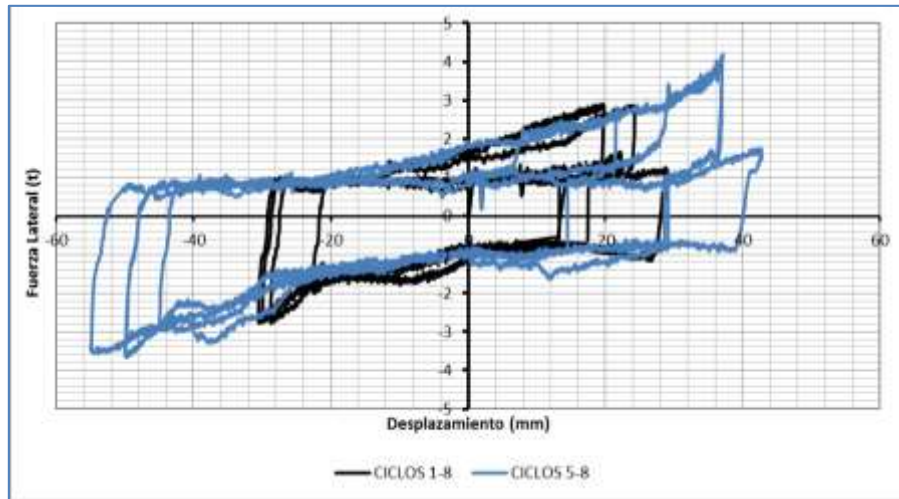
Gráfico 3.10: Curva Histerética – Estado de Falla – Ciclos 5-8



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 3.11 se ve las curvas histeréticas de cada ciclo una, continuación de la otra desde ciclo 1 al ciclo 8 para el estado de “Falla”. Se realizaron 8 ciclos ya que el sistema ya no podía deslizarse más ya que la superficie estaba desgastada y raspada.

Gráfico 3.11: Curva Histerética – Estado de Falla – Ciclos 1-8



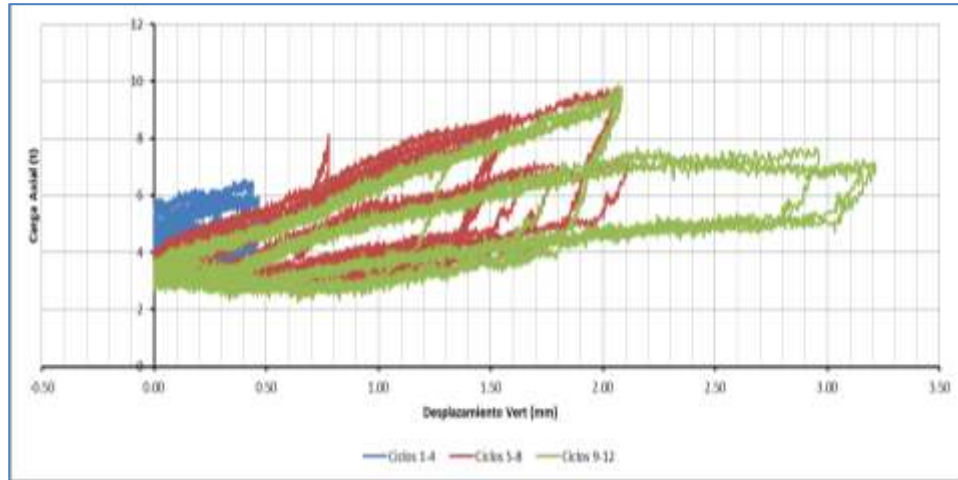
Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.4 Carga Axial vs Desplazamiento Vertical

En los siguientes gráficos (gráfico 3.12, 3.13 y 3.14) se podrá apreciar cómo varía los desplazamientos verticales conforme va aumentando la carga axial. La carga axial varía de ciclo en ciclo para cada estado ya que cuando el sistema se desliza, ya sea para la dirección Norte-Sur o viceversa, la plancha superior empuja la gata vertical haciendo que esta aumente la carga solicitada.

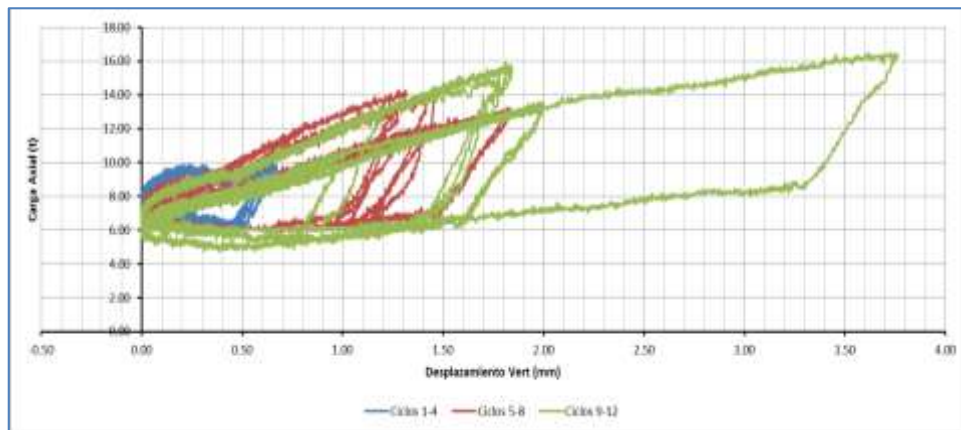
Para el estado Normal se llegó a un máximo de carga axial 9.89 ton y un desplazamiento vertical de 3.21 mm, para el estado Vulnerable se llegó a un máximo de 16.48 ton y 3.76 de desplazamiento vertical y para el estado de Falla un máximo de 8.48 ton y 1.61 mm de desplazamiento vertical.

Gráfico 3.12: Carga Axial vs Desplaz. Vert. –  
Estado Normal – Ciclos 1-12



Fuente: Elaboración Propia

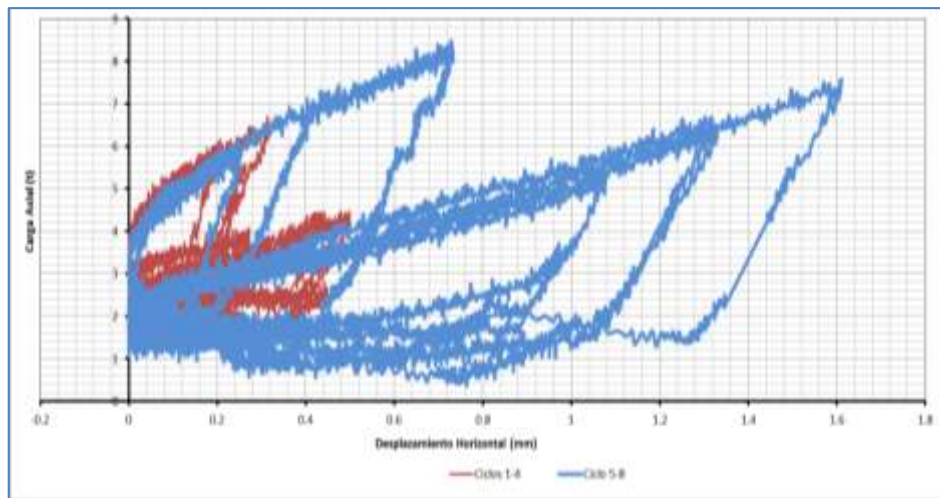
Gráfico 3.13: Carga Axial vs Desplaz. Vert. –  
Estado Vulnerable – Ciclos 1-12



Fuente: Elaboración Propia



Gráfico 3.14: Carga Axial vs Desplaz. Vert. –  
Estado de falla – Ciclos 1-8



Fuente: Elaboración Propia

## 3.6 Análisis de los resultados

### 3.6.1 Ajuste de curvas histeréticas

Una vez obtenido los gráficos de las curvas histeréticas de cada ciclo, se procede a dar un ajuste a cada curva para simplificar y obtener las propiedades del sistema propuesto FPS como la rigidez efectiva, energía disipada y amortiguamiento efectivo. En la imagen 3.8 se puede ver el sistema propuesto en pleno ensayo cíclico:

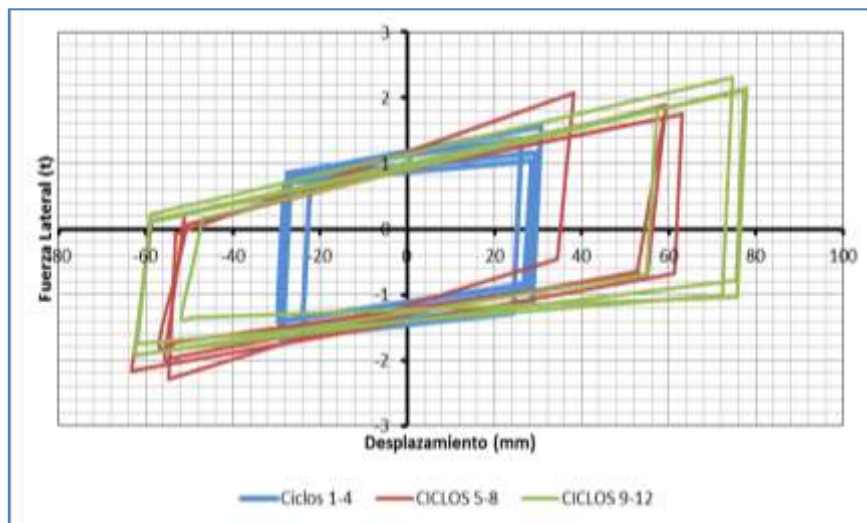
Imagen 3.8: Sistema FPS durante los ensayos cíclicos



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

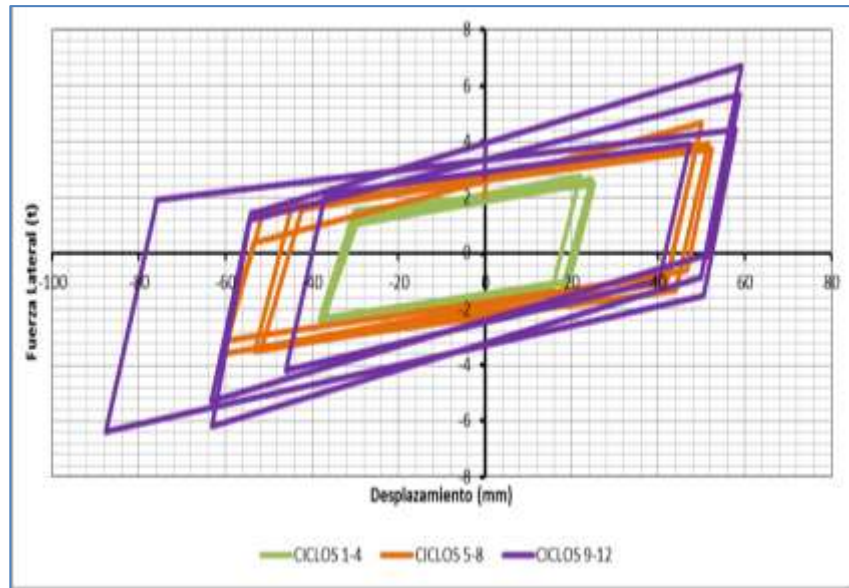
En los gráficos 3.15, 3.16 y 3.17 se puede ver las curvas histeréticas con una tendencia más lineal para cada estado a partir del ciclo 1 al 12 para los estados Normal y Vulnerable mientras que para el estado de falla va desde el ciclo 1 al 8 una a continuación de otra.

Gráfico 3.15: Curvas histeréticas – Estado Normal – Ciclos 1-12



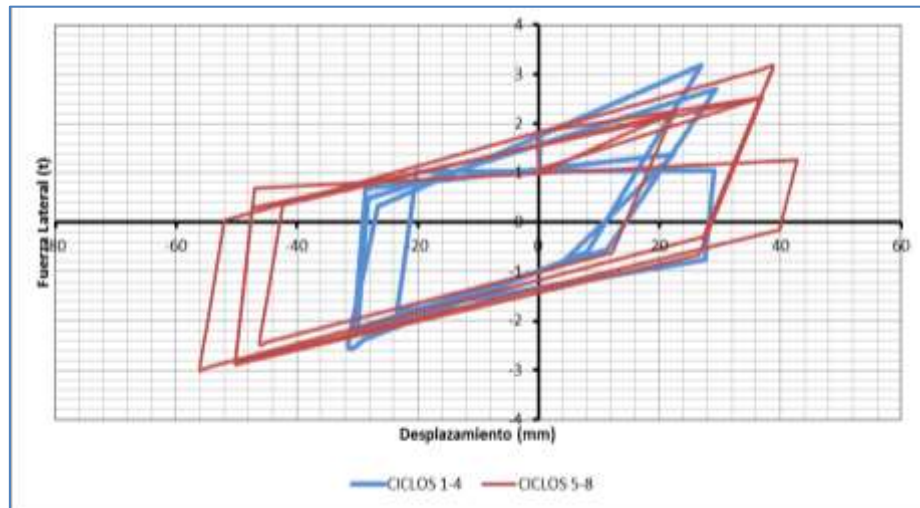
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.16: Curvas histeréticas – Estado Vulnerable  
– Ciclos 1-12



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.17  
Curvas histeréticas – Estado de Falla – Ciclos 1-12



Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenidos los gráficos se proceden a calcular las propiedades, para el cálculo se necesita conocer la fuerza característica del sistema ( $Q$ ), fuerza última ( $F^-$  y  $F^+$ ),

desplazamiento de inicio, desplazamiento último alcanzado ( $U^-$  y  $U^+$ ) y la energía disipada (área encerrada bajo la curva,  $E_d$ ), como se puede ver en las tablas 3.2, 3.4 y 3.6. Se utilizaran las ecuaciones 3.2.3.1, 3.2.3.3, 3.2.3.4 y los resultados se presentaran en las tablas 3.3, 3.5 y 3.7 (También ver Figura 3.3):

Tabla 3.2: Fuerzas y desplazamiento del sistema FPS – Estado Normal

Archivo	N°	Q	F-	F+	U-	U+	Ed
		t	t	t	mm	mm	t-mm
ESTADO NORMAL	1	1.12	-1.67	1.38	-28.79	26.20	137.80
	2	1.18	-1.58	1.57	-23.73	30.71	135.41
	3	0.97	-1.51	1.16	-28.15	29.50	122.66
	4	0.87	-1.41	1.04	-29.61	28.58	112.72
	5	1.18	-2.28	2.08	-54.52	38.24	208.89
	6	0.91	-1.96	1.65	-54.08	55.80	239.00
	7	0.91	-2.15	1.76	-62.24	63.08	285.51
	8	0.91	-1.73	1.87	-53.10	58.07	234.81
	9	0.97	-1.92	2.10	-62.59	77.00	332.11
	10	0.91	-1.35	2.15	-49.52	77.73	291.83
	11	1.00	-1.93	1.84	-62.53	57.37	264.18
	12	1.14	-1.74	2.31	-61.90	74.62	349.83

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.3: Propiedades del sistema FPS – Estado Normal

$F^+ - Q$	$F = F^+ - F^-$	$U = U^- - U^+$	$\pi(F)(U)$	$\beta_{eff}$	$K_{eff}$	$K_p$
t	t	mm	t-mm		t/mm	t/mm
0.256	3.05	54.99	526.02	0.53	0.06	0.01
0.3857	3.14	54.43	537.65	0.50	0.06	0.01
0.1841	2.67	57.65	483.60	0.51	0.05	0.01
0.1641	2.45	58.18	448.00	0.50	0.04	0.01
0.895	4.36	92.76	1269.40	0.33	0.05	0.02
0.741	3.62	109.88	1248.63	0.38	0.03	0.01
0.847	3.91	125.32	1538.98	0.37	0.03	0.01
0.963	3.60	111.17	1257.99	0.38	0.03	0.02
1.131	4.02	139.59	1761.13	0.37	0.03	0.01
1.235	3.50	127.25	1397.59	0.42	0.03	0.02
0.842	3.77	119.90	1419.73	0.37	0.03	0.01
1.167	4.05	136.52	1736.95	0.40	0.03	0.02

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.4: Fuerzas y desplazamiento del sistema FPS

– Estado Vulnerable

Archivo	N°	Q t	F- t	F+ t	U- mm	U+ mm	Ed t-mm
ESTADO VULNERABLE	1	2.11	-2.25	2.77	-34.19	21.97	186.111
	2	2.00	-2.32	2.65	-34.88	24.57	189.978
	3	1.86	-2.22	2.54	-33.78	24.99	179.939
	4	2.04	-2.31	2.46	-35.53	25.11	198.013
	5	2.60	-3.08	4.66	-58.18	49.77	435.242
	6	2.62	-3.55	3.73	-58.62	52.36	477.748
	7	2.64	-3.32	3.93	-48.91	51.60	463.838
	8	2.72	-3.46	3.90	-51.42	48.97	456.424
	9	2.92	-4.09	3.92	-43.56	47.36	455.478
	10	3.34	-6.26	4.43	-84.09	57.85	928.123
	11	3.35	-5.19	5.69	-61.24	58.84	654.909
	12	3.95	-6.10	6.68	-61.23	58.70	808.126

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.5: Propiedades del sistema FPS – Estado Vulnerable

F <sup>+</sup> - Q t	F= F <sup>+</sup> - F <sup>-</sup> t	U= U <sup>-</sup> - U <sup>+</sup> mm	Ed t-mm	2Ed t-mm	$\pi(F)(U)$ t-mm	$\beta_{eff}$	K <sub>eff</sub> t/mm	K <sub>p</sub> t/mm
0.661	5.023	56.160	186.111	372.222	886.217	0.420	0.089	0.030
0.651	4.972	59.450	189.978	379.956	928.609	0.409	0.084	0.027
0.679	4.762	58.772	179.939	359.878	879.245	0.409	0.081	0.027
0.416	4.768	60.644	198.013	396.026	908.393	0.436	0.079	0.017
2.060	7.737	107.950	435.242	870.484	2623.887	0.332	0.072	0.041
1.111	7.279	110.975	477.748	955.495	2537.738	0.377	0.066	0.021
1.292	7.254	100.503	463.838	927.676	2290.374	0.405	0.072	0.025
1.176	7.354	100.388	456.424	912.849	2319.291	0.394	0.073	0.024
1.004	8.016	90.912	455.478	910.957	2289.438	0.398	0.088	0.021
1.090	10.685	141.941	928.123	1856.246	4764.664	0.390	0.075	0.019
2.338	10.880	120.085	654.909	1309.818	4104.569	0.319	0.091	0.040
2.728	12.781	119.928	808.126	1616.251	4815.432	0.336	0.107	0.046

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.6: Fuerzas y desplazamiento del sistema FPS – Estado de Falla

Archivo	N°	Q t	F- t	F+ t	U- mm	U+ mm	Ed t-mm
ESTADO DE FALLA	1	1.04	-1.80	1.05	-22.62	29.01	114.773
	2	1.76	-2.37	2.81	-28.84	19.85	119.840
	3	1.59	-2.15	2.52	-30.04	24.36	124.872
	4	1.08	-2.27	1.38	-30.63	22.29	99.728
	5	1.55	-2.87	2.54	-49.79	36.97	241.640
	6	1.84	-2.95	3.11	-55.03	37.13	258.465
	7	0.99	-2.83	1.27	-49.99	42.75	217.446
	8	1.57	-2.43	2.20	-45.04	21.69	159.975

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.7: Propiedades del sistema FPS  
– Estado Vulnerable

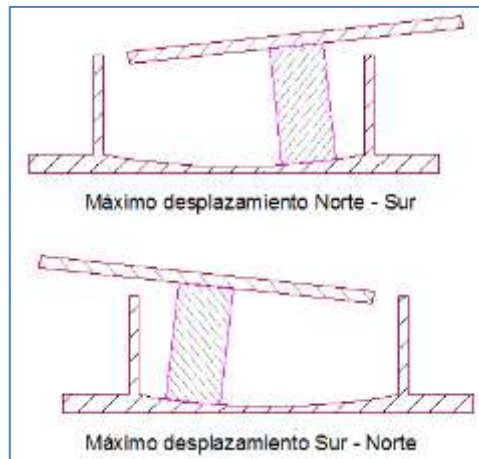
$F^+ - Q$ t	$F = F^+ - F^-$ t	$U = U^- - U^+$ mm	$\pi(F)(U)$ t-mm	$\beta_{eff}$	$K_{eff}$ t/mm	$K_p$ t/mm
0.007	2.844	51.632	461.316	0.498	0.055	0.000
1.048	5.180	48.688	792.322	0.303	0.106	0.053
0.925	4.661	54.394	796.489	0.314	0.086	0.038
0.297	3.648	52.922	606.514	0.329	0.069	0.013
0.987	5.407	86.760	1473.757	0.328	0.062	0.027
1.266	6.054	92.150	1752.619	0.295	0.066	0.034
0.275	4.096	92.744	1193.426	0.364	0.044	0.006
0.626	4.624	66.732	969.397	0.330	0.069	0.029

Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.2 Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción del sistema FPS varía con respecto al tiempo ya que por cada segundo que registra el transductor se genera una carga axial y una carga lateral por lo que se decidió de manera práctica obtener los coeficientes de fricción cuando el sistema llegue a su máximo desplazamiento ya sea por la dirección Norte-Sur o Sur-Norte, como se puede ver en la figura 3.7:

Figura 3.7: Máximo desplazamiento del sistema según la dirección



Fuente: Elaboración Propia

En la siguiente tabla se mostrará el coeficiente de fricción que se da en cada ciclo cuando alcanza su punto máximo según la dirección a donde se dirige con la respectiva velocidad con que se llegó a ese punto; el coeficiente de fricción se obtuvo según la ecuación 3.2.2.2.

Tabla 3.8: Coeficiente de fricción del sistema FPS por ciclo  
 – Estado Normal

Archivo	N°	W (t)	F (t)	R (mm)	u (mm)	t (s)	$\dot{u}$ (mm/s)	$\mu$
ESTADO NORMAL	0	4.95	1.12	940.00	0.00	251.06	0.00	0.23
	1 →	5.02	1.38	940.00	26.20	267.25	1.62	0.25
	1 ←	6.35	1.67	940.00	28.79	275.99	6.29	0.23
	2 →	5.18	1.57	940.00	30.71	282.47	9.18	0.27
	2 ←	5.85	1.58	940.00	23.73	327.06	1.22	0.24
	3 →	4.57	1.16	940.00	29.50	332.25	10.26	0.22
	3 ←	5.83	1.51	940.00	28.15	338.82	8.77	0.23
	4 →	4.49	1.04	940.00	28.58	343.87	11.24	0.20
	4 ←	5.88	1.41	940.00	29.61	350.04	9.43	0.21
	5 →	7.91	2.08	940.00	38.24	384.33	1.98	0.22
	5 ←	8.55	2.28	940.00	54.52	418.98	2.68	0.21
	6 →	6.59	1.65	940.00	55.80	427.97	12.27	0.19
	6 ←	8.47	1.96	940.00	54.08	436.96	12.22	0.17
	7 →	6.96	1.76	940.00	63.08	446.53	12.24	0.19
	7 ←	9.63	2.15	940.00	62.24	456.55	12.50	0.16
	8 →	6.42	1.87	940.00	58.07	466.31	12.33	0.23
	8 ←	7.96	1.73	940.00	53.10	475.36	12.28	0.16
	9 →	6.47	2.10	940.00	77.00	485.76	12.50	0.24
	9 ←	9.59	1.92	940.00	62.59	497.31	12.09	0.13
	10 →	6.88	2.14	940.00	77.73	508.94	12.07	0.23
	10 ←	7.37	1.35	940.00	49.52	519.07	12.56	0.13
	11 →	6.63	1.84	940.00	57.37	528.71	11.09	0.22
	11 ←	9.55	1.93	940.00	62.53	541.07	9.70	0.14
	12 →	7.36	2.28	940.00	74.62	553.34	11.17	0.23
12 ←	8.50	1.74	940.00	61.90	565.18	11.53	0.14	

Fuente: Elaboración Propia



Tabla 3.9: Coeficiente de fricción del sistema FPS por ciclo  
– Estado Vulnerable

Archivo	N°	W (t)	F (t)	R (mm)	u (mm)	t (s)	$\dot{u}$ (mm/s)	$\mu$
ESTADO VULNERABLE	0	7.38	2.11	940.00	0.00	160.01	0.00	0.29
	1 →	9.61	2.77	940.00	21.97	177.15	1.28	0.26
	1 ←	9.70	2.25	940.00	34.19	185.49	6.74	0.20
	2 →	9.81	2.65	940.00	24.57	191.33	10.05	0.24
	2 ←	9.60	2.32	940.00	34.88	199.22	7.54	0.20
	3 →	9.61	2.54	940.00	24.99	204.89	10.55	0.24
	3 ←	9.55	2.22	940.00	33.78	211.12	9.44	0.20
	4 →	9.47	2.46	940.00	25.11	216.76	10.44	0.23
	4 ←	9.79	2.31	940.00	35.53	223.88	8.51	0.20
	5 →	13.94	4.66	940.00	49.77	247.11	3.67	0.28
	5 ←	13.04	3.08	940.00	58.18	256.85	11.08	0.17
	6 →	14.26	3.73	940.00	52.36	270.49	8.10	0.21
	6 ←	12.94	3.55	940.00	58.62	282.96	8.90	0.21
	7 →	13.88	3.93	940.00	51.60	293.01	10.96	0.23
	7 ←	11.23	3.32	940.00	48.91	301.98	11.21	0.24
	8 →	12.37	3.90	940.00	48.97	311.17	10.65	0.26
	8 ←	11.61	3.46	940.00	51.42	319.65	11.83	0.24
	9 →	12.84	3.92	940.00	47.36	328.79	10.81	0.25
	9 ←	10.75	4.09	940.00	43.56	337.15	10.87	0.33
	10 →	15.11	4.43	940.00	57.85	351.37	7.13	0.23
	10 ←	16.38	6.25	940.00	84.09	370.75	7.32	0.29
	11 →	15.57	5.69	940.00	58.84	383.58	11.14	0.30
	11 ←	13.13	5.19	940.00	61.24	395.39	10.16	0.33
	12 →	15.29	6.68	940.00	58.70	414.58	6.25	0.37
12 ←	13.39	6.10	940.00	61.23	426.97	9.68	0.39	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.10: Coeficiente de fricción del sistema FPS por ciclo  
– Estado de Falla

Archivo	N°	W (t)	F (t)	R (mm)	u (mm)	t (s)	$\dot{u}$ (mm/s)	$\mu$
ESTADO DE FALLA	0	2.81	1.04	940.00	0.00	111.74	0.00	0.37
	1 →	2.44	1.05	940.00	29.01	120.11	3.46	0.40
	1 ←	3.88	1.80	940.00	22.62	135.71	3.31	0.44
	2 →	5.78	2.81	940.00	19.85	164.67	1.47	0.47
	2 ←	4.39	2.37	940.00	28.84	173.41	5.57	0.51
	3 →	6.20	2.51	940.00	24.36	180.29	7.74	0.38
	3 ←	4.43	2.15	940.00	30.04	187.08	8.01	0.45
	4 →	5.51	1.38	940.00	22.29	193.16	8.61	0.23
	4 ←	4.32	2.27	940.00	30.63	201.23	6.56	0.49
	5 →	8.19	2.54	940.00	36.97	218.66	3.88	0.27
	5 ←	6.54	2.87	940.00	49.79	229.65	7.89	0.39
	6 →	8.00	3.11	940.00	37.13	239.61	8.72	0.35
	6 ←	7.57	2.95	940.00	55.03	250.19	8.71	0.33
	7 →	3.70	1.27	940.00	42.75	258.35	11.98	0.30
	7 ←	6.35	2.83	940.00	49.99	268.54	9.11	0.39
	8 →	5.57	2.20	940.00	21.69	317.28	1.47	0.37
8 ←	5.29	2.43	940.00	45.04	332.26	4.45	0.41	

Fuente: Elaboración Propia

En las tablas 3.8, 3.9 y 3.10 se puede ver el número del ciclo seguido del símbolo → ó también de ←, por ejemplo: el 1← significa en el ciclo 1 el sistema llegó a un punto máximo cuando se deslizaba de Sur a Norte se obtuvo el coeficiente de fricción que se muestra en la última columna de la tabla, cuando el símbolo es → significa lo mismo, sólo el sistema se deslizaba para la dirección contraria.

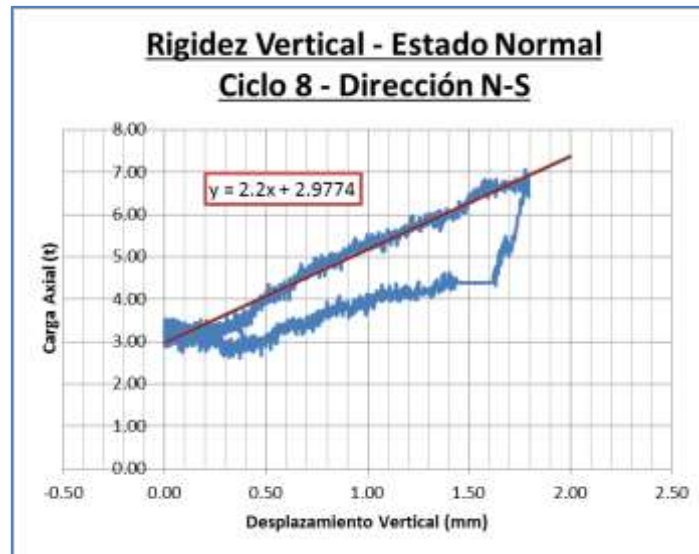
### 3.6.3 Carga Axial vs Desplazamiento Vertical

De los gráficos de carga axial vs desplazamiento vertical se obtiene la rigidez vertical que viene a ser tangente de la curva.

Como la carga axial varía con el tiempo, por lo que se van a tener dos tipos de rigidez en cada ciclo, ya que por la dirección Norte-Sur se va a obtener una rigidez y por la dirección contrario Sur-Norte se va a tener otra rigidez.

Según el gráfico 3.18, vemos como la carga axial va variando según el desplazamiento vertical cuando el sistema se desplaza hacia la dirección N-S, entonces la tendencia lineal que tiene la curva es una recta y la pendiente de esta recta viene a ser la rigidez vertical, que en este caso viene a ser 2.20 ton/mm.

Gráfico 3.18: Rigidez Vertical – Sistema propuesto FPS



Fuente: Elaboración Propia

El mismo procedimiento se realizó cuando el sistema se desplazaba hacia la dirección Sur-Norte, por lo que se van a obtener dos rigideces por cada ciclo ( $K_{v1}$  y  $K_{v2}$ ). En las tablas 3.11, 3.12 y 3.13 se mostrarán las rigideces que hay en cada ciclo según su estado:

Tabla 3.11: Rigidez Vertical por ciclo – Estado Normal

Estado	Ciclo	Kv1 t/mm	Kv2 t/mm
<b>ESTADO NORMAL</b>	1	0.35	2.64
	2	3.88	4.56
	3	2.50	3.40
	4	0.95	3.30
	5	5.01	3.19
	6	2.30	3.17
	7	2.12	3.01
	8	2.20	3.01
	9	2.22	2.93
	10	1.90	2.90
	11	2.08	2.84
	12	1.80	2.84

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.12: Rigidez Vertical por ciclo – Estado Vulnerable

Estado	Ciclo	Kv1 t/mm	Kv2 t/mm
<b>ESTADO VULNERABLE</b>	1	5.71	3.33
	2	5.83	3.46
	3	5.77	3.49
	4	5.58	3.44
	5	6.37	3.33
	6	4.76	3.53
	7	4.50	3.51
	8	4.42	3.56
	9	5.07	3.68
	10	4.36	2.14
	11	4.56	3.55
	12	4.59	3.56

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.13: Rigidez Vertical por ciclo – Estado de Falla

Estado	Ciclo	Kv1 t/mm	Kv2 t/mm
<b>ESTADO DE FALLA</b>	1	0.21	3.56
	2	9.21	4.21
	3	6.59	3.71
	4	28.04	3.76
	5	20.27	3.26
	6	4.24	3.12
	7	2.87	3.07
	8	6.34	2.85

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 3.13 se pueden ver rigideces de 20.27 ton/mm y de 28.04 ton/mm son rigideces que no se tomarán en cuenta para cálculos posteriores ya que son valores exagerados y que no tienen relación con las demás rigideces obtenidas.

### 3.6.4 Estado final del sistema

Durante los ensayos el sistema se fue desgastando de poco a poco ya que la fricción que se daba es de acero-acero. La superficie del sistema se raspo o desgaste de forma más notoria durante los últimos ciclos de carga del estado Vulnerable y ya en los ciclos de carga en el estado de Falla (se le aplicó menos carga para que el sistema no tenga daños severos) el sistema ya no podía más llegando a la mitad del noveno ciclo como se puede ver en las imágenes 3.9, 3.10 y 3.11.

Imagen 3.9: Superficie raspada del sistema después de los ensayos cíclicos



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Gráfico 3.10: Superficie raspada del sistema – longitud (23 cm apróx)



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Gráfico 3.11: Desgaste del tubo macizo del sistema FPS



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

## CAPÍTULO IV

# RESPUESTA DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN LA ESTRUCTURA

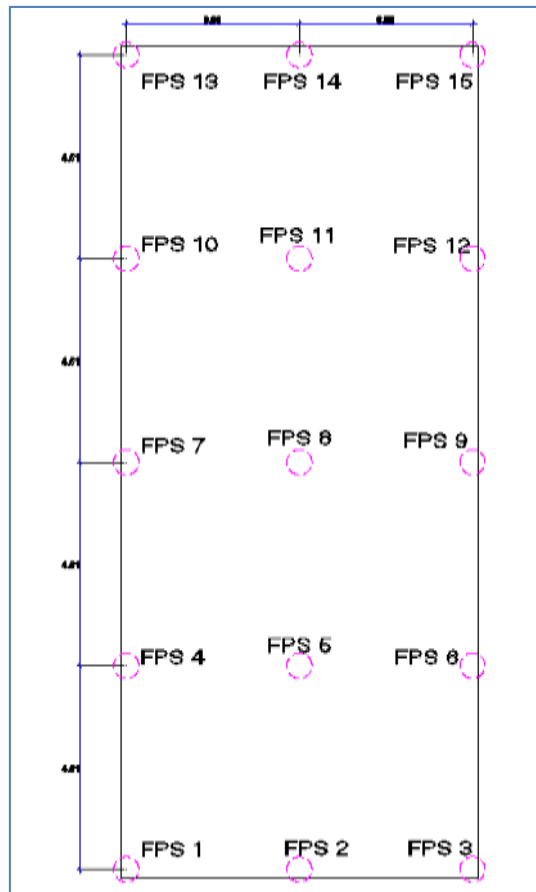
### **4.1 Ubicación de los aisladores en la estructura**

Se propuso que la distancia entre aisladores sea simétrica y conservadora para que haya una mejor respuesta sísmica. La longitud de la edificación a lo largo del eje Y es de 18.45 m, entonces se ubicaron 5 aisladores conservando una separación entre ellos de 4.51 m; la longitud de la edificación a lo largo del eje X es de 7.75 m, entonces se ubicaron 3 aisladores, conservando una distancia entre ellos de 3.83 m.

En el Figura 4.1 se puede ver la ubicación de los aisladores en la planta de la edificación siendo un total de 15 aisladores, cada uno con una denominación de FPS. Para el análisis de la edificación se consideró que vigas de cimentación se apoyen sobre los aisladores para que actúen de manera conjunta cuando haya sollicitación sísmica.



Figura 4.1: Ubicación del sistema propuesto FPS en la base de la edificación



Fuente: Elaboración Propia

## 4.2 Análisis No-lineal de la estructura aislada

El análisis que se realizó a la edificación es la del Tiempo-Historia, es un análisis que para definir la excitación sísmica se emplean acelerogramas de sismos ocurridos a lo largo de los años y no espectros.

Para este análisis se consideró un comportamiento no-lineal y se utilizaron 5 registros sísmicos ya que es lo mínimo que indica la norma E.030. Cada uno de los registros que se mencionaran a continuación han sido debidamente normalizados y luego se escalaron a una aceleración de 400 gal.

## 4.2.1 Registros sísmicos:

### a) Ancash 1970:

**Localización de la estación:** Parque de la Reserva - Lima

**Fecha del sismo:** 17 de Octubre de 1966

**Tipo del suelo:** Grava Gruesa

**Epicentro:** Océano Pacífico, frente a las costas del departamento de Ancash.

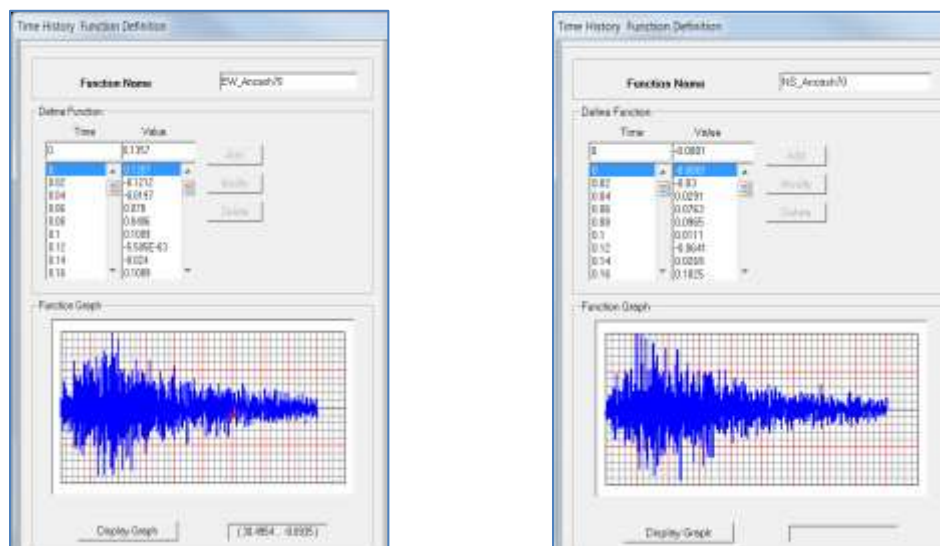
**Orientación, canal 1/ canal 2/ canal 3:** E-W/ N-S/ U-D

**Acel. máx. (gal), canal1/ canal2/ canal3:** -180.60/ -269.3/ 94.20

**Unidades de los datos:** Gal (cm/s/s)

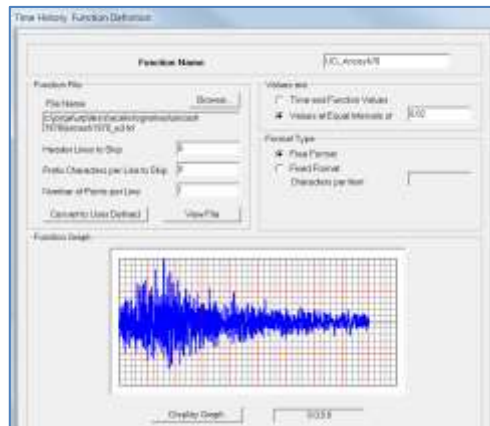
En las figuras 4.2 y 4.3 se pueden ver la aceleración del suelo con respecto al tiempo para el sismo de Ancash de 1970.

Figura 4.2: Tiempo-Historia – Ancash 1970 – Orientación E-W, N-S



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Figura 4.3: Tiempo-Historia – Ancash 1970 – Orientación U-D



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

**b) Lima 1966:**

**Localización de la estación:** Parque de la Reserva - Lima

**Fecha del sismo:** 31 de Mayo 1970

**Tipo del suelo:** Grava Gruesa

**Epicentro:** Océano Pacífico, frente a las costas de Huacho y Barranca, departamento de Lima.

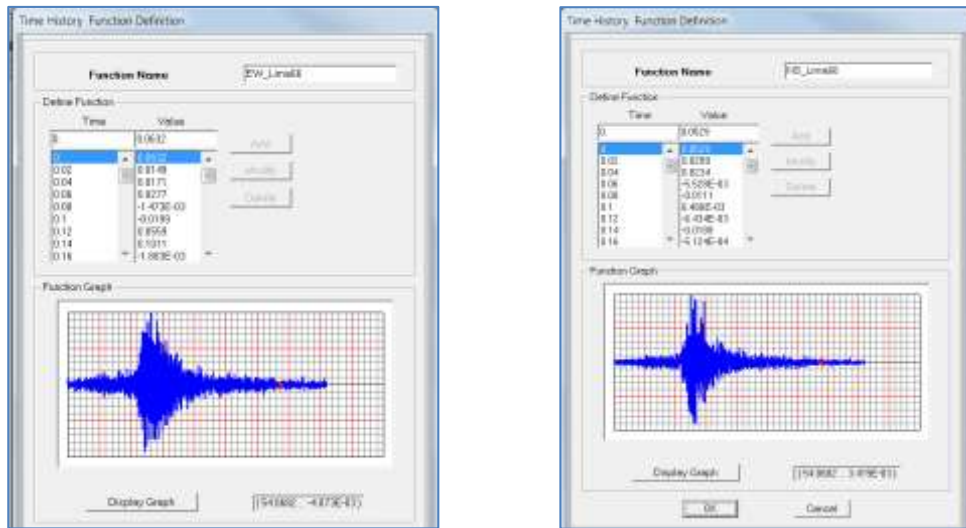
**Orientación, canal 1/ canal 2/ canal 3:** E-W/ N-S/ U-D

**Acel. máx. (gal), canal1/ canal2/ canal3:** -104.80/ -97.70/ 73.50

**Unidades de los datos:** Gal (cm/s/s)

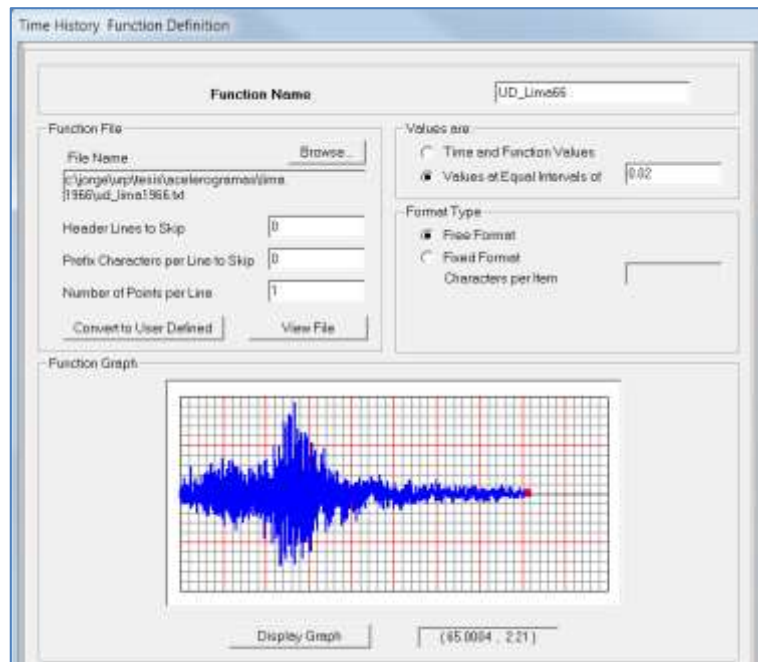
En las figuras 4.4 y 4.5 se pueden ver la aceleración del suelo con respecto al tiempo para el sismo de Lima de 1966.

Figura 4.4: Tiempo-Historia – Lima 1966 – Orientación E-W, N-S



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Figura 4.5: Tiempo-Historia – Lima 1966 – Orientación U-D



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

**c) Lima 1974:**

**Localización de la estación:** Parque de la Reserva - Lima

**Fecha del sismo:** 3 de Octubre de 1974

**Tipo del suelo:** Grava Gruesa

**Epicentro:** Al Oeste de la Región Central, en la costa sur del departamento de Lima

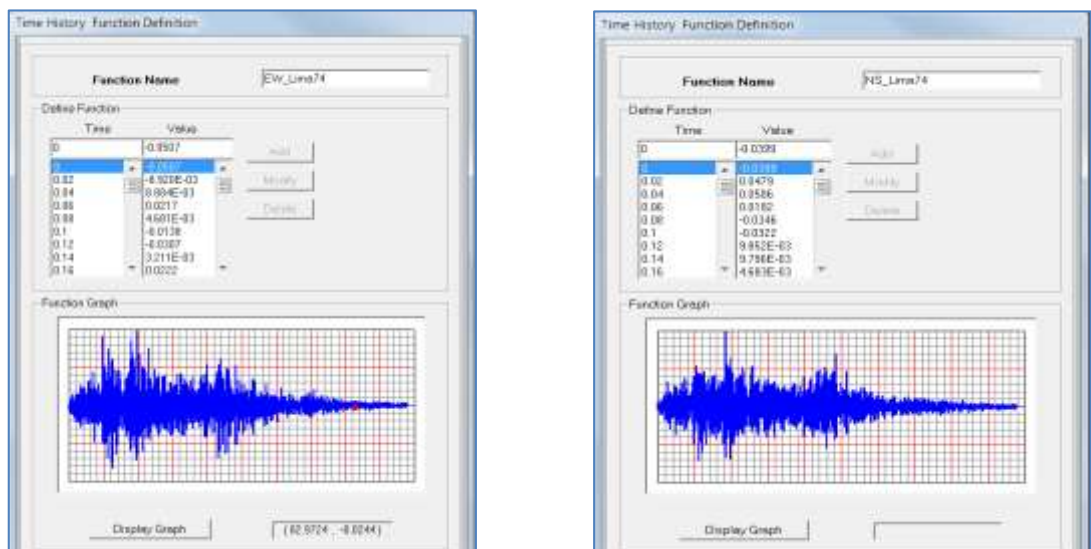
**Orientación, canal 1/ canal 2/ canal 3:** E-W/ N-S/ U-D

**Acel. máx. (gal), canal1/ canal2/ canal3:** -192.50/ 179.00/ 99.70

**Unidades de los datos:** Gal (cm/s/s)

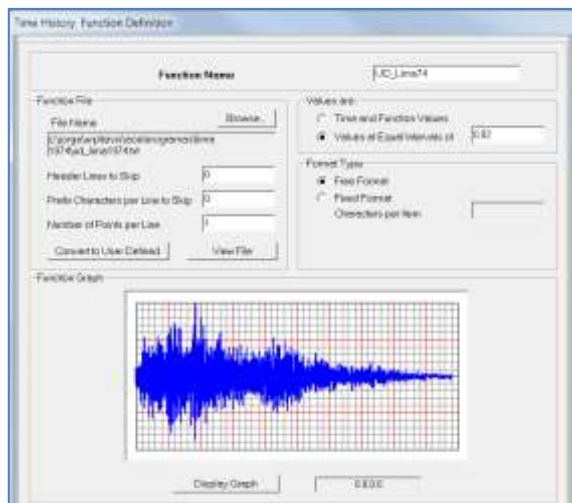
En las figuras 4.6 y 4.7 se pueden ver la aceleración del suelo con respecto al tiempo para el sismo de Lima de 1974.

Figura 4.6: Tiempo-Historia – Lima 1974 – Orientación E-W, N-S



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Figura 4.7: Tiempo-Historia – Lima 1974 – Orientación U-D



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

**d) Norte del Perú 2005:**

**Localización de la estación:** Jorge Alva Hurtado - CISMID - UNI/LIMA

**Fecha del sismo:** 25 de Setiembre de 2005

**Tipo del suelo:** Grava Gruesa

**Epicentro:** 90 km al NE de Moyobamba, departamento de San Martín

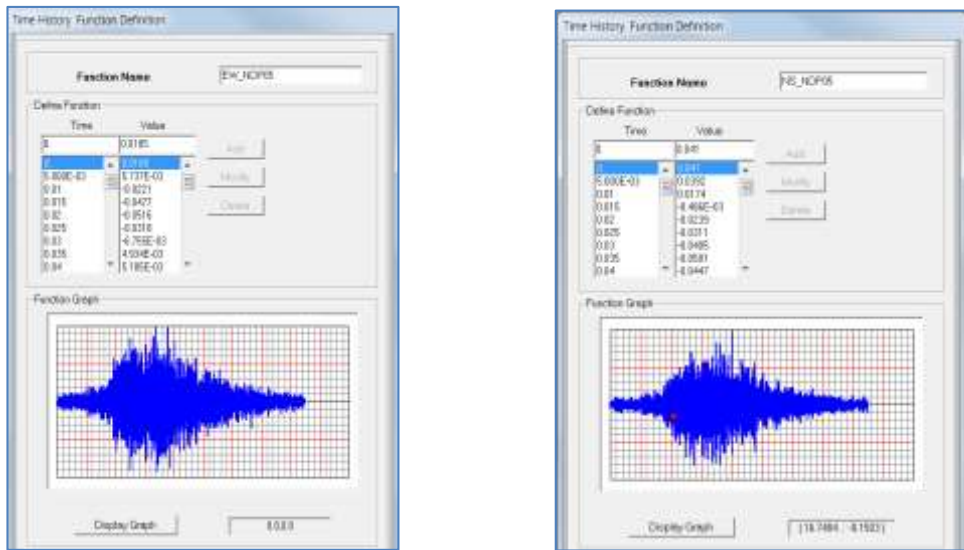
**Orientación, canal 1/ canal 2/ canal 3:** E-W/ N-S/ U-D

**Acel. máx. (gal), canal1/ canal2/ canal3:** 13.945/ 14.66/ -5.086

**Unidades de los datos:** Gal (cm/s/s)

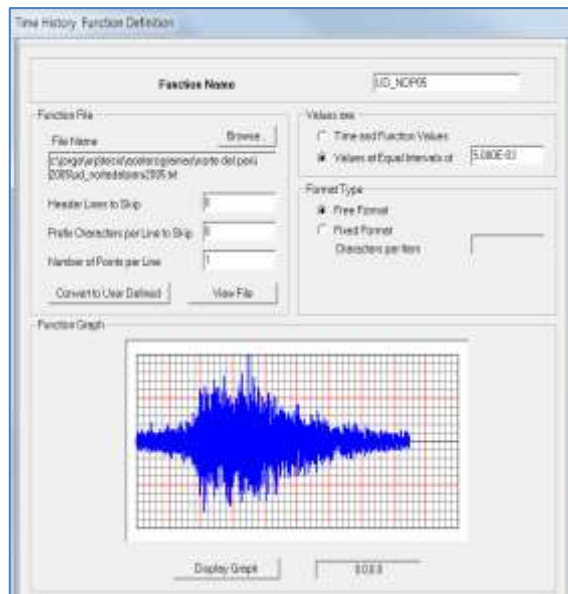
En las figuras 4.8 y 4.9 se pueden ver la aceleración del suelo con respecto al tiempo para el sismo del Norte del Perú en el 2005.

Figura 4.8: Tiempo-Historia – NDP 2005 – Orientación E-W, N-S



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Figura 4.9: Figura Tiempo-Historia – NDP 2005 – Orientación U-D



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

**e) Pisco 2007:**

**Localización de la estación:** Jorge Alva Hurtado - CISMID - UNI/LIMA

**Fecha del sismo:** 15 de Agosto del 2007

**Tipo del suelo:** Grava Gruesa

**Epicentro:** Océano Pacífico, a 40 km al Oeste de Chincha Alta, departamento de Ica.

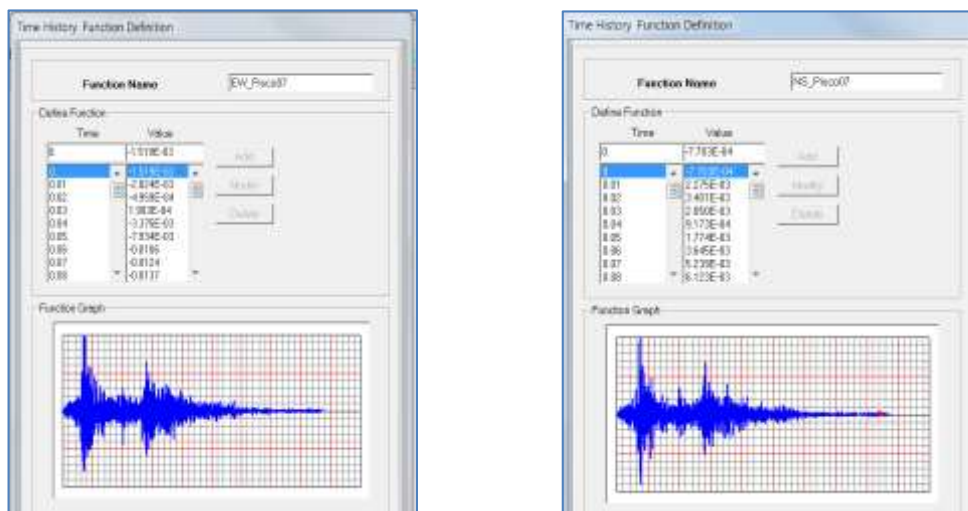
**Orientación, canal 1/ canal 2/ canal 3:** E-W/ N-S/ U-D

**Acel. máx. (gal), canal1/ canal2/ canal3:** 73.90/ 45.10/ 32.90

**Unidades de los datos:** Gal (cm/s/s)

En las figuras 4.10 y 4.11 se pueden ver la aceleración del suelo con respecto al tiempo para el sismo de Pisco del 2007.

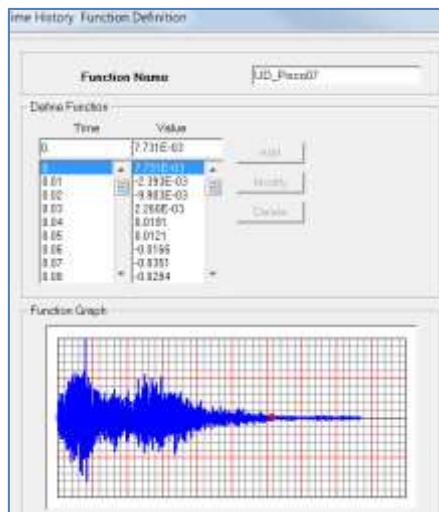
Figura 4.10: Tiempo-Historia – Pisco 2007 – Orientación E-W, N-S



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.



Figura 4.11: Tiempo-Historia – Pisco 2007 – Orientación U-D



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

#### 4.2.2 Propiedades del sistema FPS según el software:

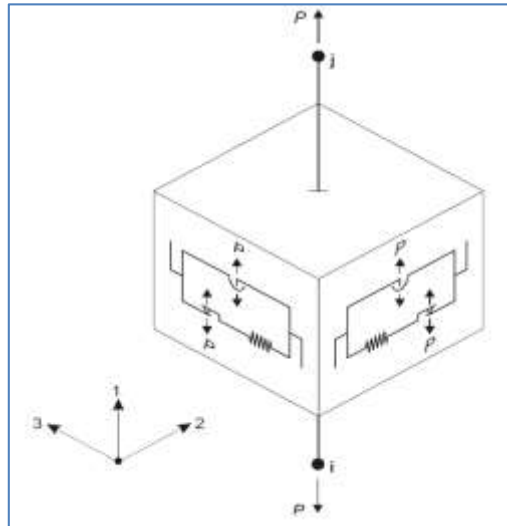
La edificación se modeló, como se mencionó en el capítulo II, en el software SAP2000 versión 15.00.00; este software tiene 3 opciones para modelar aisladores (elemento Link) como:

- Rubber Isolator (Aislador Elastomérico)
- Friction Isolator (Aislador de fricción)
- T/C Friction Isolator (Aislador de fricción con capacidad a tensión)

Como el aislador propuesto es del tipo péndulo friccional se modeló como Friction Isolator, el aislador cuenta con propiedades como la rigidez post-deslizamiento en las direcciones de corte debido a los radios de las superficies de deslizamiento, de comportamiento gap (Resortes a compresión) en la dirección axial, y propiedades lineales de rigidez efectiva para

los tres momentos de deformaciones<sup>3</sup>. En la figura 4.12, se puede ver el modelo dinámico del aislador péndulo – friccional según el software SAP2000:

Figura 4.12: Modelo dinámico para el sistema Péndulo - friccional



Fuente: Computers & Structures (2011), CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSIBridge.

El modelo de fricción se basa en el comportamiento histerético propuesto por Wen (1976), Wen and Ang (1986), y recomendado para analizar como aislamiento en la base por Nagarajaiah, Reinhorn y Constantinou (1991). El comportamiento del péndulo es recomendado por Zayas y Low (1990)<sup>4</sup>.

La fuerza axial para el aislador péndulo friccional se define:

$$f_{u1}=P= \begin{cases} K_1 d_{u1} & \text{si } d_{u1} < 0 \\ 0 & \text{si } d_{u1} > 0 \end{cases} \quad (4.2.2.1)$$

<sup>3</sup> COMPUTERS & STRUCTURES INC. “CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSIBridge”. California .2011. Pág. 268

<sup>4</sup> COMPUTERS & STRUCTURES INC. “CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSIBridge”. California .2011. Pág. 269

Dónde:

$f_{u1}$ : Fuerza en la dirección 1.

$K_1$ : Rigidez en la dirección 1, debe ser positiva.

$P$ : Fuerza Axial, debe ser negativa (compresión).

$d_{u1}$ : Desplazamiento en la dirección 1.

La fuerza cortante para la dirección 2 y 3 se define de la siguiente manera:

$$f_{u2} = f_{u2f} + f_{u2p} \quad (4.2.2.2)$$

$$f_{u3} = f_{u3f} + f_{u3p} \quad (4.2.2.3)$$

Donde:

$f_{u2}$ ,  $f_{u3}$ : Fuerza cortante en la dirección 2 y 3.

$f_{u2f}$ ,  $f_{u3f}$ : Fuerza de fricción en la dirección 2 y 3.

$f_{u2p}$ ,  $f_{u3p}$ : Relación fuerza-deformación en la dirección 2 y 3.

La fuerza de fricción se define de la siguiente manera:

$$f_{u2f} = -P\mu_2 z_2 \quad (4.2.2.4)$$

$$f_{u3f} = -P\mu_3 z_3 \quad (4.2.2.5)$$

Donde:

$\mu_2$ ,  $\mu_3$ : Coeficiente de fricción en las direcciones 2 y 3.

$z_2$ ,  $z_3$ : Variables histeréticas.

Los coeficientes de fricción, según el SAP2000, se define con la siguiente expresión:

$$\mu_2 = \mu_{\text{máx}2} - (\mu_{\text{máx}2} - \mu_{\text{mín}2})e^{-Tv} \quad (4.2.2.6)$$

$$\mu_3 = \mu_{\text{máx}3} - (\mu_{\text{máx}3} - \mu_{\text{mín}3})e^{-Tv} \quad (4.2.2.7)$$

Donde  $\mu_{\text{mín}2}$  y  $\mu_{\text{mín}3}$  son los coeficientes de fricción cuando la velocidad es cero;  $\mu_{\text{máx}2}$  y  $\mu_{\text{máx}3}$  son los coeficientes de fricción a velocidades altas,  $v$  es la velocidad resultante de deslizamiento:

$$v = \sqrt{d_{u2}^2 + d_{u3}^2} \quad (4.2.2.8)$$

Mientras que  $r$  es la velocidad efectiva inversa, definida por:

$$r = \frac{r_2 d_{u2}^2 + r_3 d_{u3}^2}{v^2} \quad (4.2.2.9)$$

donde  $r_2$  y  $r_3$  son las inversas de la velocidades características de deslizamiento. Para interacción teflón-acero la fricción normalmente incrementa con la velocidad de deslizamiento<sup>5</sup>.

Las variables internas histeréticas tienen un rango de  $\sqrt{z_2^2 + z_3^2} \leq 1$ , con la superficie de fluencia se representa por  $\sqrt{z_2^2 + z_3^2} = 1$ . Los valores iniciales de  $z_2$  y  $z_3$  son cero, y ellos evolucionan de acuerdo a las ecuaciones diferenciales:

---

<sup>5</sup> COMPUTERS & STRUCTURES INC. "CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSIBrigde". California .2011. Pág. 271

$$\begin{Bmatrix} \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-a_2 z_2^2 & -a_3 z_2 z_3 \\ -a_2 z_2 z_3 & 1-a_3 z_3^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{k_2}{P\mu_2} \dot{d}_{u2} \\ \frac{k_3}{P\mu_3} \dot{d}_{u3} \end{Bmatrix} \quad (4.2.2.10)$$

Donde  $k_2$  y  $k_3$  son las rigideces de corte elásticas del aislador ante la ausencia de deslizamiento, y

$$a_2 = \begin{cases} 1, & \dot{d}_{u2} z_2 > 0 \\ 0, & \dot{d}_{u2} z_2 \leq 0 \end{cases} \quad (4.2.2.11)$$

$$a_3 = \begin{cases} 1, & \dot{d}_{u3} z_3 > 0 \\ 0, & \dot{d}_{u3} z_3 \leq 0 \end{cases} \quad (4.2.2.12)$$

La relación fuerza-deformación está dado por:

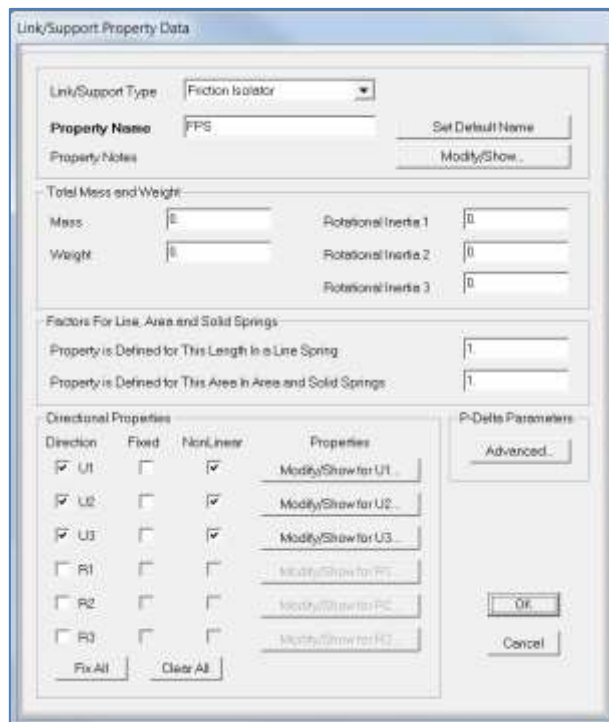
$$f_{u2p} = -P \frac{d_{u2}}{\text{radio}_2} \quad (4.2.2.13)$$

$$f_{u3p} = -P \frac{d_{u3}}{\text{radio}_3} \quad (4.2.2.14)$$

### 4.2.3 Modelamiento de la edificación en el software:

Para la edificación, se modeló primero una losa de cimentación junto con vigas de cimentación y a la vez estas vigas se apoyaran sobre los aisladores; los aisladores se van ubicar como se describió en anteriores párrafos y se definen como elemento Link del tipo Friction Isolator tal como se ve en la figura 4.13:

Figura 4.13: Definición del aislador péndulo friccional en SAP2000



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Se realizó un cálculo aproximado y conservador para escalar las propiedades del sistema propuesto FPS para que se comporte sísmicamente ante las solicitaciones que va recibir la edificación analizada en el capítulo II.

Asumiendo que el periodo de la estructura aislada sea de 2.50 s, entonces se sabe por la ecuación 1.4.2.10:

$$T=2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$$

Reemplazando T por 2.50 s y g por 9.81 m/s<sup>2</sup>:

$$2.50=2\pi \sqrt{\frac{R}{9.81}} \rightarrow R= 1.55 \text{ m}$$

Se define la rigidez lineal como:

$$K_L = W/R \quad (4.2.3.1)$$

Donde W viene a ser el peso de la estructura, según el cálculo se obtiene que el peso de la edificación es de 1029.09 ton, por lo tanto la rigidez lineal va a ser:

$$K_e = W/R = 1029.09/1.55 = 0.664 \text{ t/mm}$$

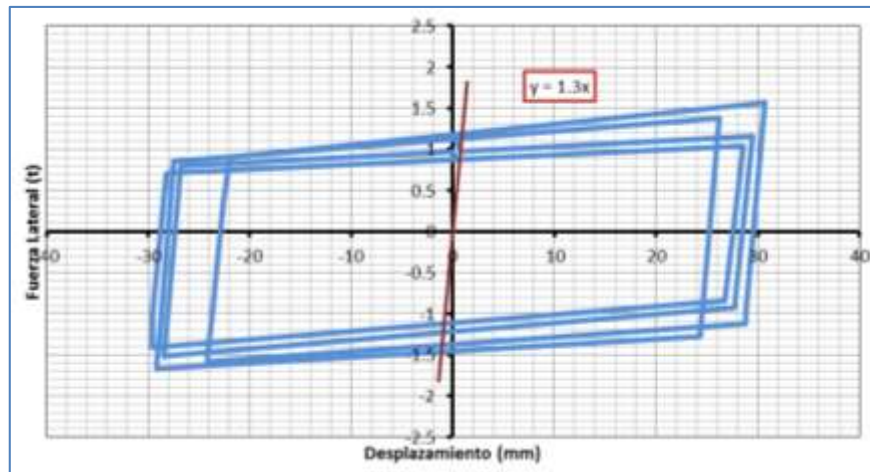
Pero como se tiene un total de 15 aisladores, se divide el valor de  $K_e$  entre 15:

$$K_L = 0.664/15 = 0.044 \text{ t/mm}$$

Según el SAP2000, se tiene que digitar los valores de las propiedades de no lineales del sistema de aislamiento según la dirección que indique. Como se pudo ver en el Figura 4.2, la dirección 1 viene a ser el eje Z, la dirección 2 es el eje X y la dirección 3 es el eje Y.

Para la obtener las rigideces no lineales de las direcciones 2 y 3 cada sistema se tuvo que hallar las pendientes de las curvas histeréticas, ya que el software reconoce a estas pendientes como las rigideces no lineales.

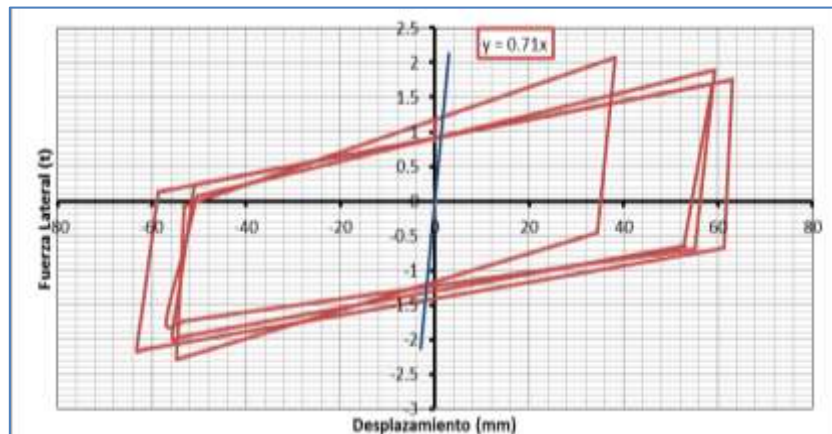
Gráfico 4.1: Pendiente de Curva Histerética – Ciclos 1-4 - Estado Normal



Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede ver en el Gráfico 4.1, la pendiente de la curva histerética es de 1.30 ton/mm, y así se obtendrá diferentes pendientes para las curvas histeréticas por cada 4 ciclos y por cada Estado como se puede ver en los gráficos 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8.

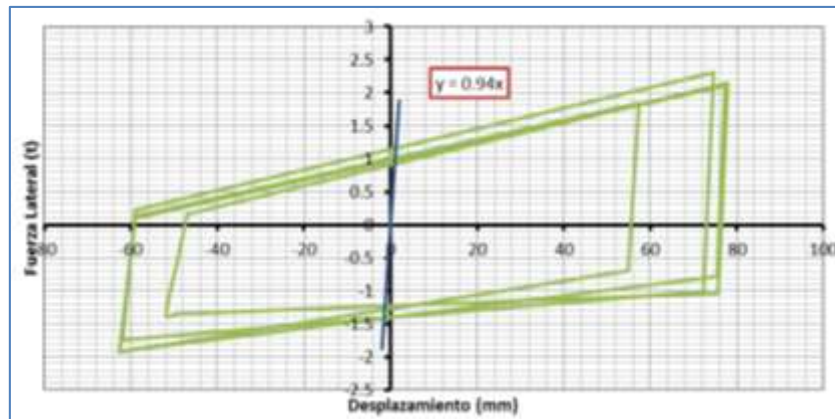
Gráfico 4.2: Pendiente de Curva Histerética – Ciclos 5-8 - Estado Normal



Fuente: Elaboración Propia.

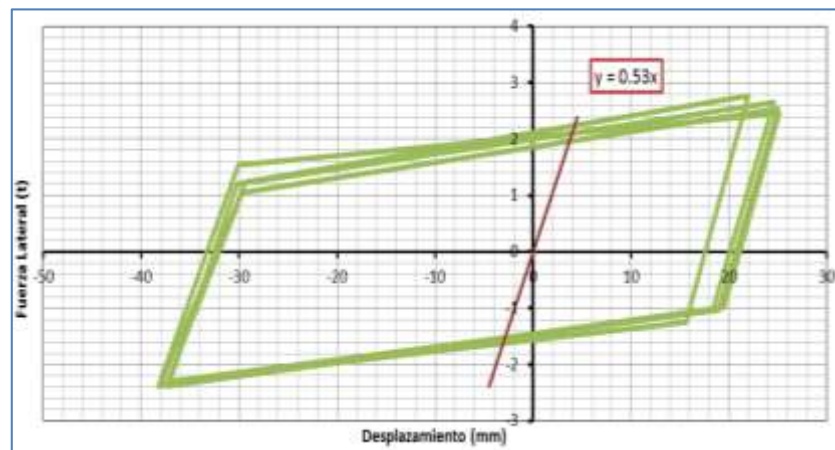


Gráfico 4.3: Pendiente de Curva Histerética – Ciclos 8-12 - Estado Normal



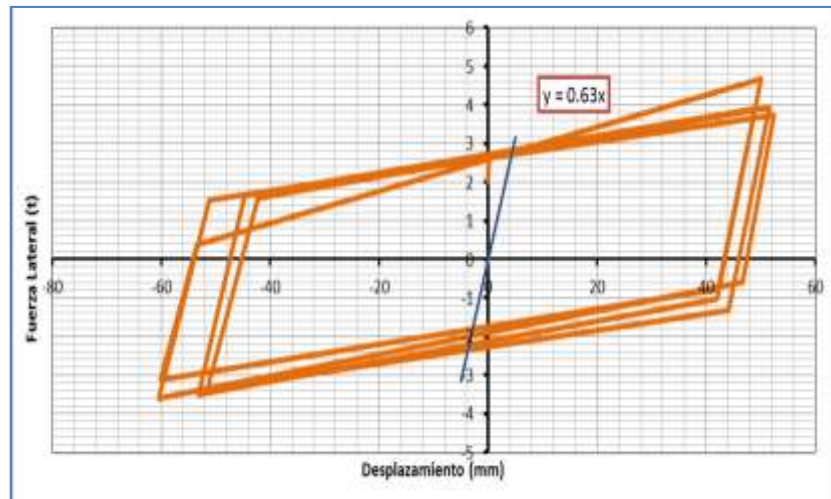
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 4.4: Pendiente de Curva Histerética – Ciclos 1-4 - Estado Vulnerable



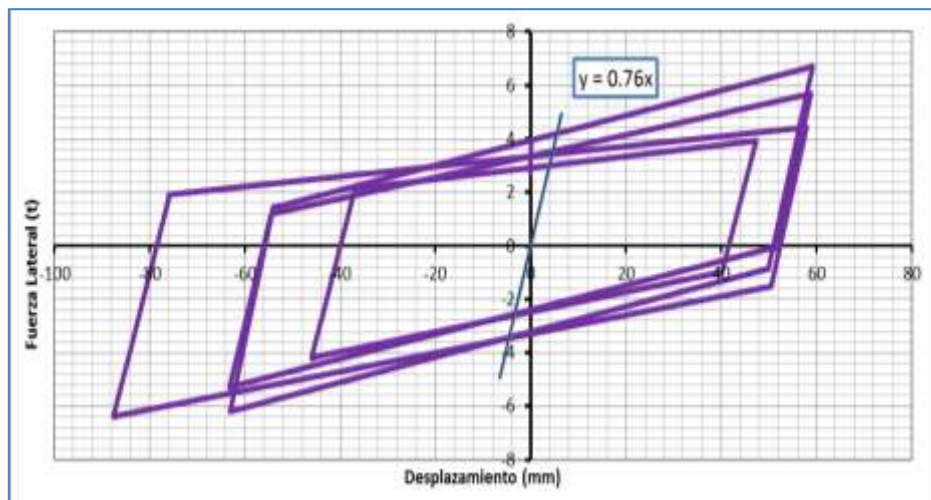
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 4.5: Pendiente de Curva Histerética – Ciclos 5-8 - Estado Vulnerable



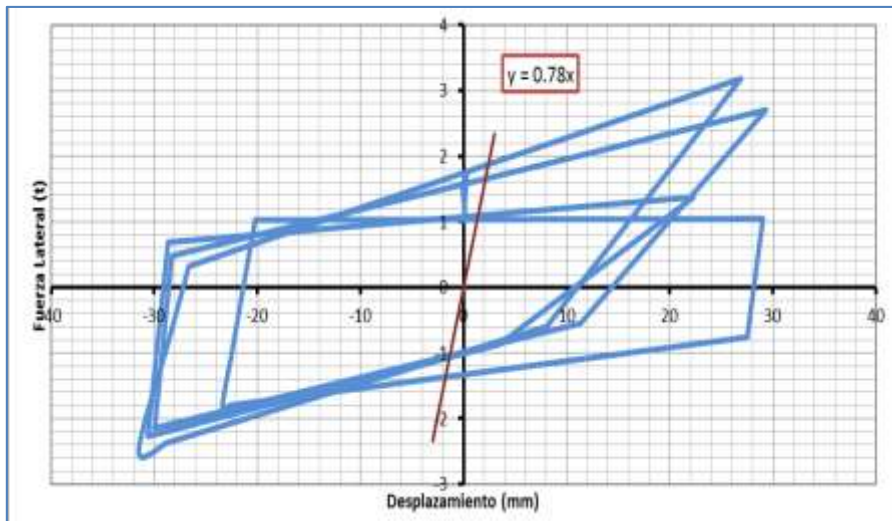
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 4.6: Pendiente de Curva Histerética – Ciclos 9-12 - Estado Vulnerable



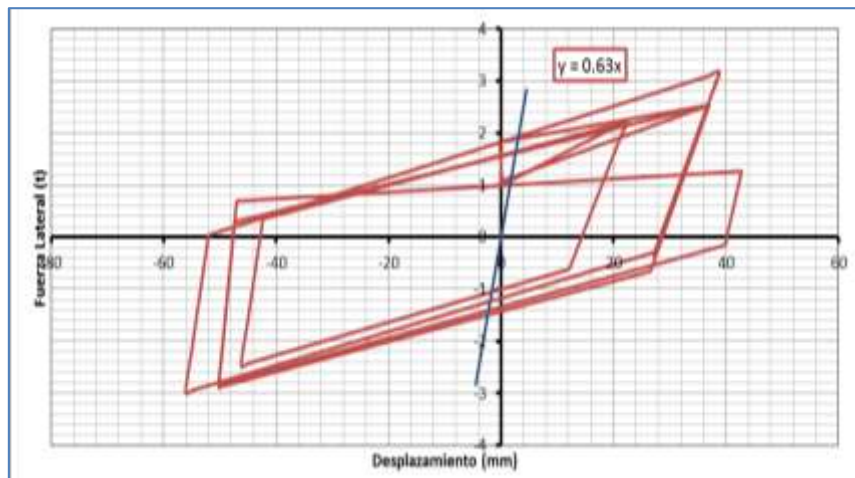
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 4.7: Pendiente de Curva Histerética – Ciclos 1-4 - Estado de Falla



Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico 4.8: Pendiente de Curva Histerética – Ciclos 5-8 - Estado de Falla



Fuente: Elaboración Propia.

Para la dirección 1, se tomará el promedio de las rigideces verticales que se obtuvieron en las curvas de Carga Axial vs Desplazamiento Vertical (ver capítulo III) y se puede ver en la tabla 4.1:

Tabla 4.1: Rigideces No lineales y Verticales por cada Estado

ESTADO	CICLOS	$K_{NL}$	$K_v$
		t/mm	t/mm
Normal	1-4	1.30	3.48
	5-8	0.71	3.10
	9-12	0.94	2.88
Vulnerable	1-4	0.53	3.431
	5-8	0.63	3.484
	9-12	0.76	3.234
Falla	1-4	0.78	3.809
	5-8	0.63	3.075

Fuente: Elaboración Propia

Para los coeficientes de fricción, el software aplica la ecuación 4.2.2.6 y 4.2.2.7 para cada dirección; el ensayo que se le hizo al sistema en el laboratorio sólo fue en una dirección, así que se asumió que las propiedades son las mismas tanto para la dirección 2 y 3.

De las tablas 3.8, 3.9 y 3.10 del capítulo III, se toma tanto los valores mínimos como los máximos de cada coeficiente de fricción por cada Estado y a su vez se eligieron valores de coeficientes de fricción que se encuentren entre los valores mínimos y máximos con su respectiva velocidad de deslizamiento como se puede ver en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2: Coeficientes de fricción por cada Estado

ESTADO	$\mu_{min}$	$\mu_{max}$	$\mu$	$v$ (mm/s)
<b>NORMAL</b>	0.13	0.27	0.23	6.29
<b>VULNERABLE</b>	0.17	0.39	0.33	10.16
<b>FALLA</b>	0.23	0.51	0.41	4.45

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.3 se puede ver que para el Estado Normal según la tabla 3.8, el coeficiente de fricción mínimo es 0.13, el máximo es 0.27 y el coeficiente de fricción de 0.23 es un valor intermedio entre estos dos valores que le corresponde una velocidad de 6.29 mm/s; el mismo criterio se usó para los otros Estados.

Si despejamos la velocidad inversa de la ecuación 4.2.2.6, tenemos:

$$r = -\frac{1}{v} \ln \left( \frac{\mu - \mu_{\max}}{\mu_{\min} - \mu_{\max}} \right) \quad (4.2.3.2)$$

Empleando la ecuación 4.2.3.2 para los coeficientes de fricción de cada Estado, se obtiene:

Tabla 4.3: Coeficientes de fricción con su respectiva velocidad inversa

ESTADO	$\mu_{\min}$	$\mu_{\max}$	$\mu$	v (mm/s)	r (s/mm)
<b>NORMAL</b>	0.13	0.27	0.23	6.29	0.199
<b>VULNERABLE</b>	0.17	0.39	0.33	10.16	0.128
<b>FALLA</b>	0.23	0.51	0.41	4.45	0.231

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente para obtener de forma conservadora y práctica la rigidez no lineal de cada aislador, se hizo un promedio de las rigideces para cada Estado y luego las rigideces promedio para cada Estado se vuelven a promediar para obtener una rigidez no-lineal final. Lo mismo se aplicó para los coeficientes de fricción  $\mu_{\min}$ ,  $\mu_{\max}$  y la inversa de la velocidad de deslizamiento, esto se puede ver en las Tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.4: Promedio de las propiedades del aislador FPS por Estado

ESTADO	$K_{NL}$	$K_v$	$\mu_{\min}$	$\mu_{\max}$	a
	t/mm	t/mm			s/mm
<b>Normal</b>	0.98	3.15	0.13	0.27	0.199
<b>Vulnerable</b>	0.64	3.38	0.17	0.39	0.128
<b>Falla</b>	0.71	3.44	0.23	0.51	0.231

Fuente: Elaboración Propia

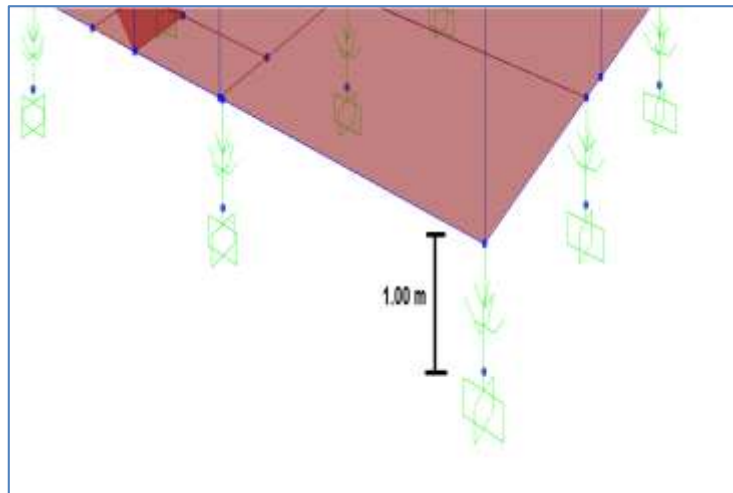
Tabla 4.5: Promedio final de las propiedades del sistema FPS

$K_{NL}$	$K_v$	$\mu_{mín}$	$\mu_{máx}$	$a$
t/mm	t/mm			s/mm
0.78	3.32	0.18	0.39	0.186

Fuente: Elaboración Propia

Se procedió a digitar los valores de la rigidez lineal, las rigideces no lineales, coeficientes de fricción e inversa de la velocidad en el SAP2000 para proceder a realizar el análisis.

Figura 4.14: Elemento Link del tipo Friction Isolator en la base de la edificación



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Como se puede ver en el Figura 4.14, se asumió una distancia de profundidad del sistema de aislamiento de 1.00 m (Es el nudo donde está la restricción de empotramiento).

Para el análisis se considera que la rigidez vertical es constante tanto en el rango lineal como en el rango no-lineal como se puede ver en la Figura 4.15.

Figura 4.15: Rigidez Vertical para el sistema FPS

Link/Support Directional Properties	
Identification	
Property Name	FPS
Direction	J1
Type	Friction Isolator
NonLinear	Yes
Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	1.32
Effective Damping	0
Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	1.32
Damping Coefficient	0

Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Figura 4.16: Propiedades del sistema FPS – Dirección 2 y 3

Link/Support Directional Properties	
Identification	
Property Name	FPS
Direction	J2
Type	Friction Isolator
NonLinear	Yes
Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	0.044
Effective Damping	0
Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0
Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	0.79
Friction Coefficient, Slow	0.18
Friction Coefficient, Fast	0.39
Rate Parameter	0.186
Radius of Sliding Surface	1550

Link/Support Directional Properties	
Identification	
Property Name	FPS
Direction	J3
Type	Friction Isolator
NonLinear	Yes
Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	0.044
Effective Damping	0
Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0
Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	0.79
Friction Coefficient, Slow	0.18
Friction Coefficient, Fast	0.39
Rate Parameter	0.186
Radius of Sliding Surface	1550

Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Como se mencionó anteriormente, las propiedades tanto para la dirección 2 como para la dirección 3 van a ser las mismas (Ver Figura 4.16).

### **4.3 Análisis de los resultados**

Se procedió con el análisis no-lineal tiempo-historia de la edificación, los registros sísmicos se escalaron a 400 gal. Se mostrará los resultados de desplazamiento, distorsiones y reacciones en la base.

#### **4.3.1 Desplazamientos y distorsiones por cada piso:**

Los resultados varían según la carga sísmica solicitada, en las tablas 4.6, 4.7 y 4.8 se podrá ver en una de las columnas los desplazamientos de cada nivel de la edificación y en otra columna las distorsiones calculadas según esos desplazamientos.



Tabla 4.6: Desplazamiento y distorsiones de la edificación

Carga Sísmica	NIVEL	Desplaz. Rel. Al suelo (m)	Desplaz. De entrepiso (m)	Altura entrepiso (m)	Distorsión con aislamiento
EW_Ancash70X	PISO5	0.0485	0.0011	2.65	<b>0.0004</b>
	PISO4	0.0474	0.0004	2.65	<b>0.0002</b>
	PISO3	0.0470	0.0002	2.65	<b>0.0001</b>
	PISO2	0.0472	0.0004	2.65	<b>0.0002</b>
	PISO1	0.0468	0.0007	2.65	<b>0.0003</b>
	BASE	0.0461	0.0461	2.65	<b>0.0174</b>
EW_Ancash70Y	PISO5	0.0410	0.0002	2.65	<b>0.0001</b>
	PISO4	0.0408	0.0006	2.65	<b>0.0002</b>
	PISO3	0.0402	0.0007	2.65	<b>0.0003</b>
	PISO2	0.0395	0.0005	2.65	<b>0.0002</b>
	PISO1	0.0390	0.0004	2.65	<b>0.0002</b>
	BASE	0.0386	0.0386	2.65	<b>0.0146</b>
EW_Lima66X	PISO5	0.0718	0.0017	2.65	<b>0.0006</b>
	PISO4	0.0701	0.0034	2.65	<b>0.0013</b>
	PISO3	0.0667	0.0044	2.65	<b>0.0017</b>
	PISO2	0.0623	0.0043	2.65	<b>0.0016</b>
	PISO1	0.0580	0.0022	2.65	<b>0.0008</b>
	BASE	0.0558	0.0558	2.65	<b>0.0211</b>
EW_Lima66Y	PISO5	0.0517	0.0002	2.65	<b>0.0001</b>
	PISO4	0.0515	0.0003	2.65	<b>0.0001</b>
	PISO3	0.0512	0.0005	2.65	<b>0.0002</b>
	PISO2	0.0507	0.0007	2.65	<b>0.0003</b>
	PISO1	0.0500	0.0006	2.65	<b>0.0002</b>
	BASE	0.0494	0.0494	2.65	<b>0.0186</b>
EW_Lima74X	PISO5	0.1071	0.0021	2.65	<b>0.0008</b>
	PISO4	0.1050	0.0025	2.65	<b>0.0009</b>
	PISO3	0.1025	0.0031	2.65	<b>0.0012</b>
	PISO2	0.0994	0.0022	2.65	<b>0.0008</b>
	PISO1	0.0972	0.0011	2.65	<b>0.0004</b>
	BASE	0.0961	0.0961	2.65	<b>0.0363</b>
EW_Lima74Y	PISO5	0.1205	0.0002	2.65	<b>0.0001</b>
	PISO4	0.1203	0.0000	2.65	<b>0.0000</b>
	PISO3	0.1203	0.0004	2.65	<b>0.0002</b>
	PISO2	0.1207	0.0002	2.65	<b>0.0001</b>
	PISO1	0.1209	0.0000	2.65	<b>0.0000</b>
	BASE	0.1209	0.1209	2.65	<b>0.0456</b>

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.7: Desplazamiento y distorsiones de la edificación

Carga Sísmica	NIVEL	Desplaz. Rel. Al suelo (m)	Desplaz. De entrepiso (m)	Altura entrepiso (m)	Distorsión con aislamiento
EW_NDP05X	PISO5	0.0161	0.0008	2.65	0.0003
	PISO4	0.0153	0.0010	2.65	0.0004
	PISO3	0.0143	0.0011	2.65	0.0004
	PISO2	0.0132	0.0012	2.65	0.0005
	PISO1	0.0120	0.0008	2.65	0.0003
	BASE	0.0112	0.0112	2.65	0.0042
EW_NDP05Y	PISO5	0.0129	0.0000	2.65	0.0000
	PISO4	0.0129	0.0002	2.65	0.0001
	PISO3	0.0127	0.0001	2.65	0.0000
	PISO2	0.0126	0.0003	2.65	0.0001
	PISO1	0.0123	0.0002	2.65	0.0001
	BASE	0.0121	0.0121	2.65	0.0046
EW_PISCO07X	PISO5	0.2083	0.0010	2.65	0.0004
	PISO4	0.2073	0.0016	2.65	0.0006
	PISO3	0.2057	0.0022	2.65	0.0008
	PISO2	0.2035	0.0023	2.65	0.0009
	PISO1	0.2012	0.0016	2.65	0.0006
	BASE	0.1996	0.1996	2.65	0.0753
EW_PISCO07Y	PISO5	0.2247	0.0001	2.65	0.0000
	PISO4	0.2246	0.0001	2.65	0.0000
	PISO3	0.2245	0.0002	2.65	0.0001
	PISO2	0.2243	0.0005	2.65	0.0002
	PISO1	0.2238	0.0005	2.65	0.0002
	BASE	0.2233	0.2233	2.65	0.0843
NS_Ancash70X	PISO5	0.0745	0.0002	2.65	0.0001
	PISO4	0.0743	0.0006	2.65	0.0002
	PISO3	0.0737	0.0016	2.65	0.0006
	PISO2	0.0721	0.0021	2.65	0.0008
	PISO1	0.0700	0.0007	2.65	0.0003
	BASE	0.0693	0.0693	2.65	0.0262
NS_Ancash70Y	PISO5	0.0566	0.0002	2.65	0.0001
	PISO4	0.0564	0.0004	2.65	0.0002
	PISO3	0.0560	0.0006	2.65	0.0002
	PISO2	0.0554	0.0006	2.65	0.0002
	PISO1	0.0548	0.0005	2.65	0.0002
	BASE	0.0543	0.0543	2.65	0.0205
NS_Lima66X	PISO5	0.0590	0.0003	2.65	0.0001
	PISO4	0.0593	0.0021	2.65	0.0008
	PISO3	0.0614	0.0019	2.65	0.0007
	PISO2	0.0633	0.0010	2.65	0.0004
	PISO1	0.0643	0.0000	2.65	0.0000
	BASE	0.0643	0.0643	2.65	0.0243
NS_Lima66Y	PISO5	0.0556	0.0002	2.65	0.0001
	PISO4	0.0554	0.0004	2.65	0.0002
	PISO3	0.0550	0.0004	2.65	0.0002
	PISO2	0.0546	0.0004	2.65	0.0002
	PISO1	0.0542	0.0003	2.65	0.0001
	BASE	0.0539	0.0539	2.65	0.0203

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.8: Desplazamiento y distorsiones de la edificación

Carga Sísmica	NIVEL	Desplaz. Rel. Al suelo (m)	Desplaz. De entrepiso (m)	Altura entrepiso (m)	Distorsión con aislamiento
NS_Lima74X	PISO5	0.0439	0.0020	2.65	0.0008
	PISO4	0.0419	0.0009	2.65	0.0003
	PISO3	0.0410	0.0001	2.65	0.0000
	PISO2	0.0411	0.0005	2.65	0.0002
	PISO1	0.0406	0.0007	2.65	0.0003
	BASE	0.0399	0.0399	2.65	0.0151
NS_Lima74Y	PISO5	0.0517	0.0001	2.65	0.0000
	PISO4	0.0518	0.0001	2.65	0.0000
	PISO3	0.0519	0.0001	2.65	0.0000
	PISO2	0.0520	0.0001	2.65	0.0000
	PISO1	0.0519	0.0002	2.65	0.0001
	BASE	0.0517	0.0517	2.65	0.0195
NS_NDP05X	PISO5	0.0140	0.0010	2.65	0.0004
	PISO4	0.0130	0.0022	2.65	0.0008
	PISO3	0.0108	0.0025	2.65	0.0009
	PISO2	0.0083	0.0019	2.65	0.0007
	PISO1	0.0064	0.0010	2.65	0.0004
	BASE	0.0054	0.0054	2.65	0.0020
NS_NDP05Y	PISO5	0.0152	0.0002	2.65	0.0001
	PISO4	0.0150	0.0000	2.65	0.0000
	PISO3	0.0150	0.0002	2.65	0.0001
	PISO2	0.0148	0.0002	2.65	0.0001
	PISO1	0.0146	0.0003	2.65	0.0001
	BASE	0.0143	0.0143	2.65	0.0054
NS_PISCO07X	PISO5	0.3413	0.0000	2.65	0.0000
	PISO4	0.3413	0.0000	2.65	0.0000
	PISO3	0.3413	0.0005	2.65	0.0002
	PISO2	0.3408	0.0012	2.65	0.0005
	PISO1	0.3396	0.0012	2.65	0.0005
	BASE	0.3384	0.3384	2.65	0.1277
NS_PISCO07Y	PISO5	0.3497	0.0001	2.65	0.0000
	PISO4	0.3496	0.0003	2.65	0.0001
	PISO3	0.3493	0.0004	2.65	0.0002
	PISO2	0.3489	0.0006	2.65	0.0002
	PISO1	0.3483	0.0005	2.65	0.0002
	BASE	0.3478	0.3478	2.65	0.1312

Fuente: Elaboración Propia

### **4.3.2 Reacciones de cada sistema FPS:**

Las reacciones de cada sistema FPS consiste en la fuerza cortante y momentos que va a representar cada uno de los sistemas. En los siguientes cuadros se mostrará las reacciones y los desplazamientos según la dirección que experimenta cada sistema FPS, estos resultados son varían según la carga sísmica solicitada.

En la Tabla 4.9 se puede ver que la edificación tiene mayor cortante basal de 36.54 ton en el eje X cuando se aplica la carga NS\_PISCO07X, para el eje Y se registra el mayor cortante basal de 97.01 ton cuando se aplica la carga NS\_PISCO07Y.

Tabla 4.9: Fuerzas Basales

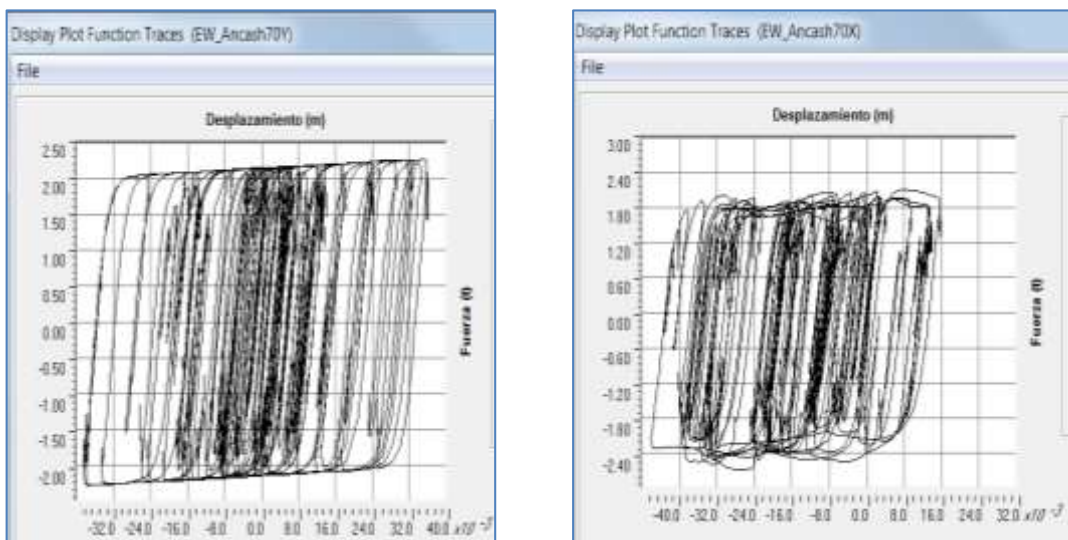
	CARGA	F <sub>x</sub> t	F <sub>y</sub> t	F <sub>z</sub> t	M <sub>x</sub> t-m	M <sub>y</sub> t-m	M <sub>z</sub> t-m
EW_ANCASH70X	Máx	25.13	1.92	60.51	534.05	-188.43	213.25
	Mín	-23.77	-2.34	59.04	516.48	-243.70	-225.49
EW_ANCASH70Y	Máx	0.91	24.97	61.09	554.54	-212.70	94.71
	Mín	-0.87	-24.54	58.78	493.77	-217.71	-93.28
EW_LIMA66X	Máx	23.55	1.96	60.48	533.81	-188.48	224.69
	Mín	-25.18	-1.86	59.00	515.99	-243.75	-209.73
EW_LIMA66Y	Máx	1.25	24.07	60.84	547.15	-213.20	94.64
	Mín	-1.20	-25.06	58.98	494.88	-217.47	-92.19
EW_LIMA74X	Máx	26.93	2.10	60.58	535.17	-185.23	224.55
	Mín	-25.66	-2.28	59.13	517.05	-240.35	-236.62
EW_LIMA74Y	Máx	0.83	28.20	60.81	548.77	-212.97	109.09
	Mín	-0.82	-25.43	58.88	494.79	-217.40	-99.64
EW_NDP05X	Máx	23.45	1.33	60.16	529.60	-202.98	202.81
	Mín	-22.63	-1.40	59.36	520.44	-230.31	-205.05
EW_NDP05Y	Máx	0.91	23.21	60.48	542.87	-213.21	87.28
	Mín	-0.88	-23.47	59.15	507.13	-216.94	-85.41
EW_PISCO07X	Máx	31.13	2.28	60.60	534.80	-184.76	270.40
	Mín	-30.31	-2.48	59.13	517.33	-239.32	-273.03
EW_PISCO07Y	Máx	1.19	30.50	60.76	550.12	-212.97	110.70
	Mín	-0.96	-31.68	58.91	498.96	-217.08	-115.02
NS_ANCASH70X	Máx	24.89	1.61	60.46	533.53	-189.64	226.84
	Mín	-25.81	-1.66	59.17	517.79	-239.69	-219.23
NS_ANCASH70Y	Máx	1.27	23.78	60.77	550.87	-212.79	93.35
	Mín	-1.27	-25.37	58.78	497.05	-217.25	-95.28
NS_LIMA66X	Máx	25.78	1.63	60.38	531.95	-194.38	209.43
	Mín	-23.97	-1.59	59.26	519.13	-234.93	-226.67
NS_LIMA66Y	Máx	0.73	25.45	60.71	543.70	-213.28	102.42
	Mín	-0.90	-24.60	59.14	499.41	-217.35	-92.70
NS_LIMA74X	Máx	24.93	1.71	60.39	532.60	-193.40	213.15
	Mín	-24.24	-2.09	59.16	517.25	-238.96	-222.18
NS_LIMA74Y	Máx	0.95	25.28	60.78	546.97	-213.12	96.19
	Mín	-1.31	-24.47	58.96	500.08	-217.42	-94.48
NS_NDP05X	Máx	22.14	1.96	60.15	529.89	-203.48	199.17
	Mín	-22.36	-1.75	59.39	520.55	-229.17	-196.20
NS_NDP05Y	Máx	0.78	22.48	60.34	540.70	-213.53	85.38
	Mín	-0.69	-23.52	59.24	511.12	-216.55	-86.89
NS_PISCO07X	Máx	36.54	2.25	60.45	533.84	-192.17	287.26
	Mín	-32.68	-1.93	59.08	516.63	-242.38	-323.78
NS_PISCO07Y	Máx	1.14	37.01	60.59	549.23	-213.07	132.16
	Mín	-1.36	-32.78	58.97	503.51	-216.91	-118.33

Fuente: Elaboración Propia

### 4.3.3 Curvas Histeréticas:

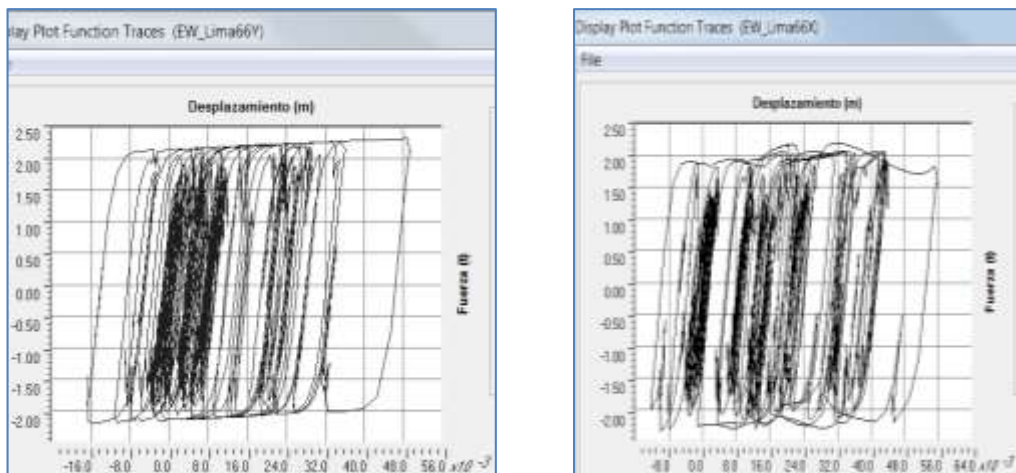
En los Figuras que se van a mostrar a continuación son las curvas histeréticas que se registraron según las cargas que se aplicaron en el análisis no-lineal. Las curvas representan la energía disipada del sistema FPS durante el movimiento sísmico, para las Figuras 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18 se tomaron en consideración los aisladores más representativos según la carga sísmica.

Gráfico 4.9: Curva Histerética EW\_Ancash70 – Direcciones X y Y



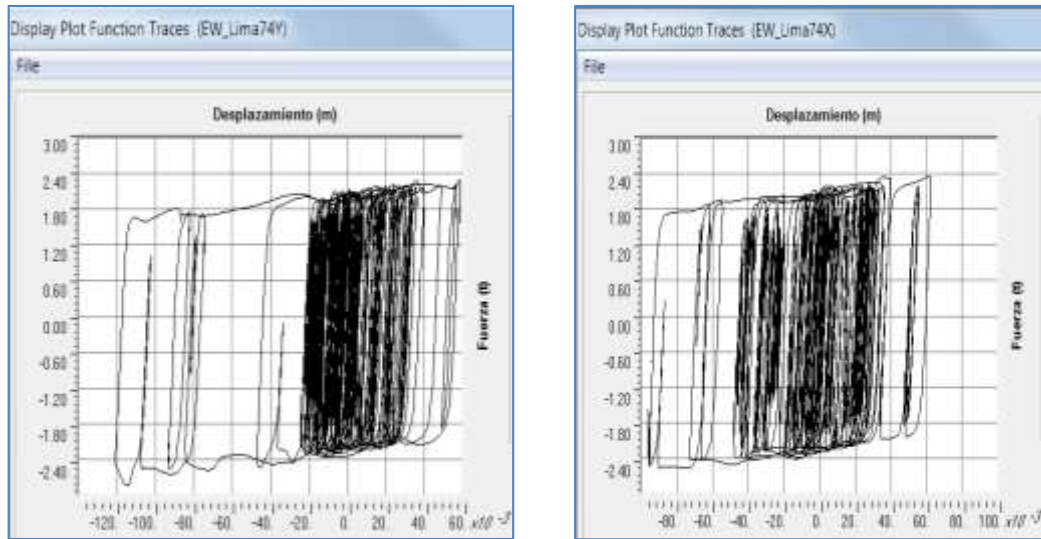
Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Gráfico 4.10: Curva Histerética EW\_Lima66 – Direcciones X y Y



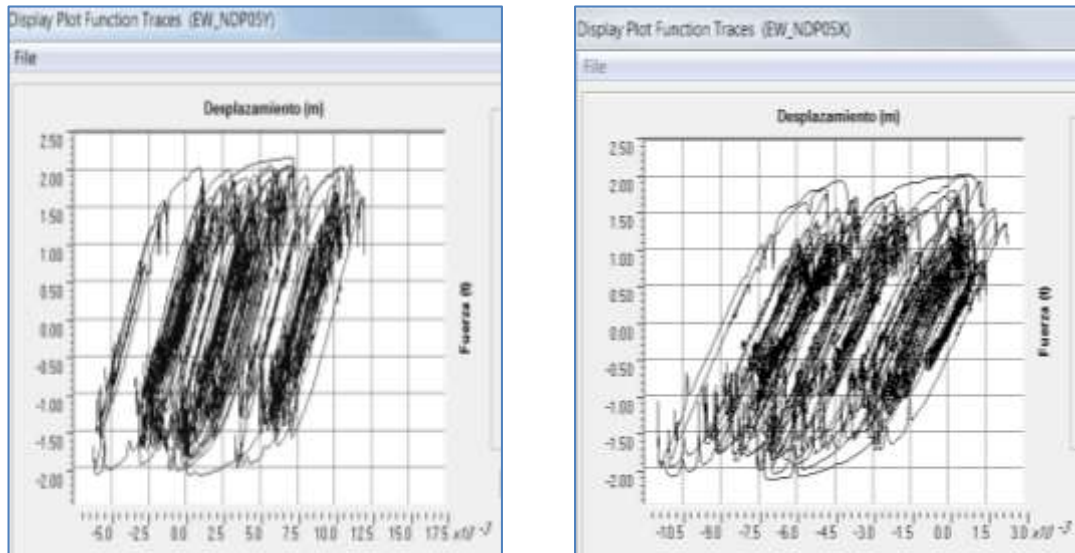
Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Gráfico 4.11: Curva Histerética EW\_Lima74 – Direcciones X y Y



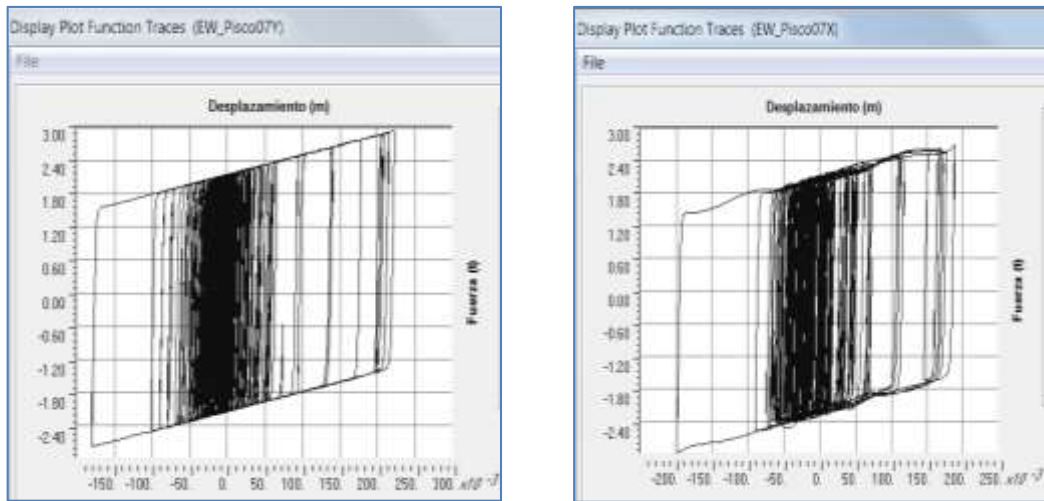
Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Gráfico 4.12: Curva Histerética EW\_NDP05 – Direcciones X y Y



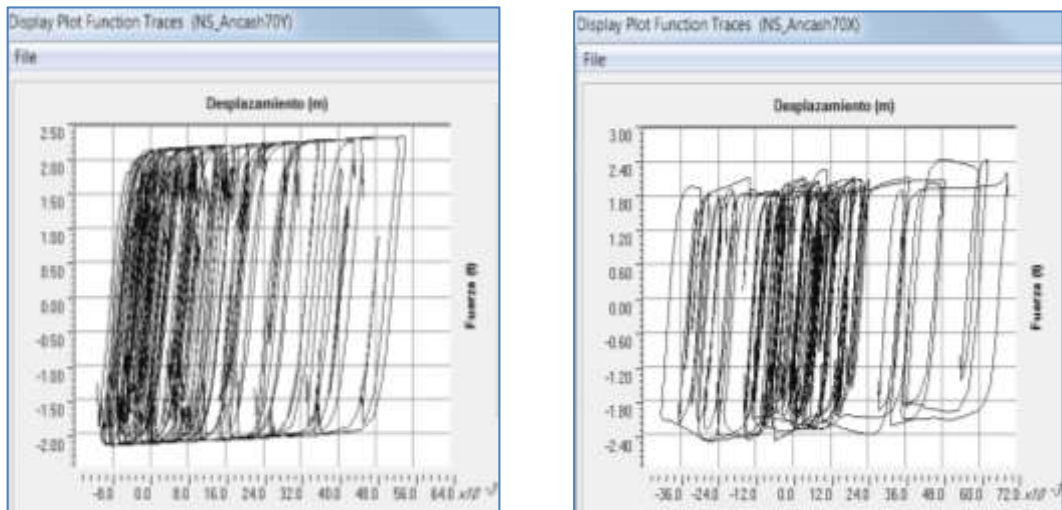
Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Gráfico 4.13: Curva Histerética EW\_PISCO07 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

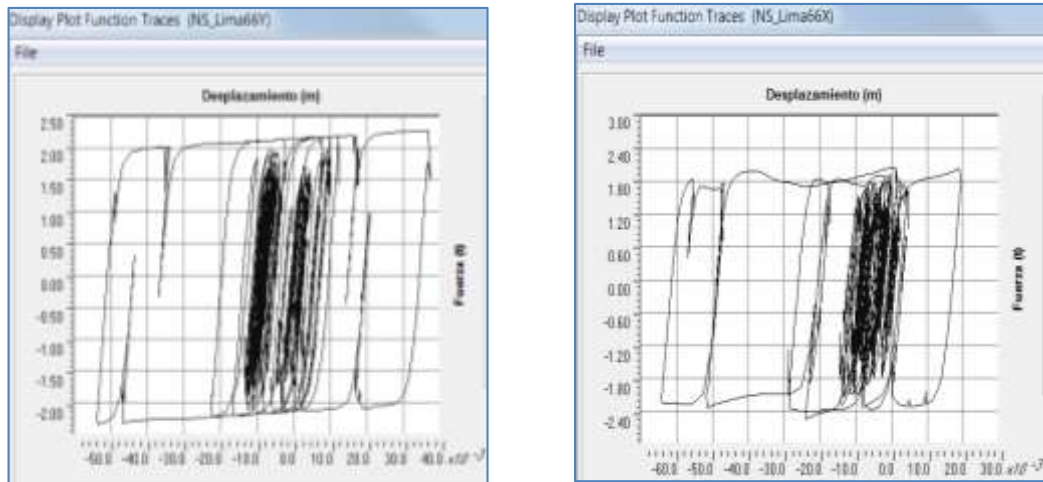
Gráfico 4.14: Curva Histerética NS\_ANCASH70 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

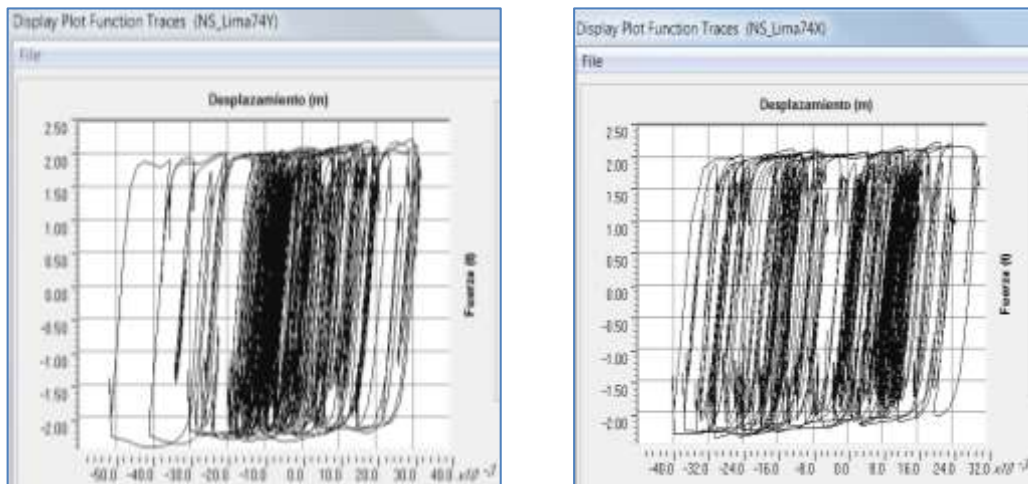


Gráfico 4.15: Curva Histerética NS\_LIMA66 – Direcciones X y Y



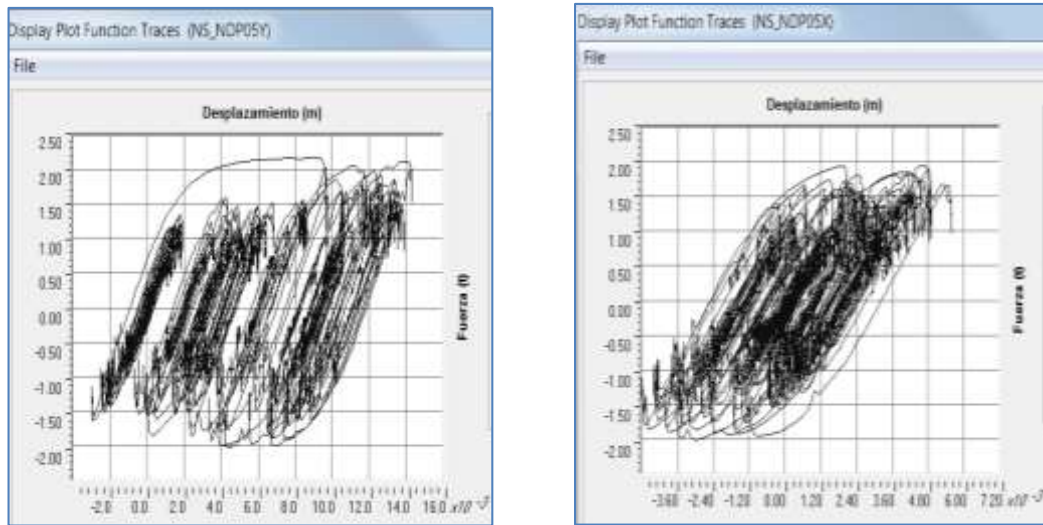
Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Gráfico 4.16: Curva Histerética NS\_LIMA74 – Direcciones X y Y



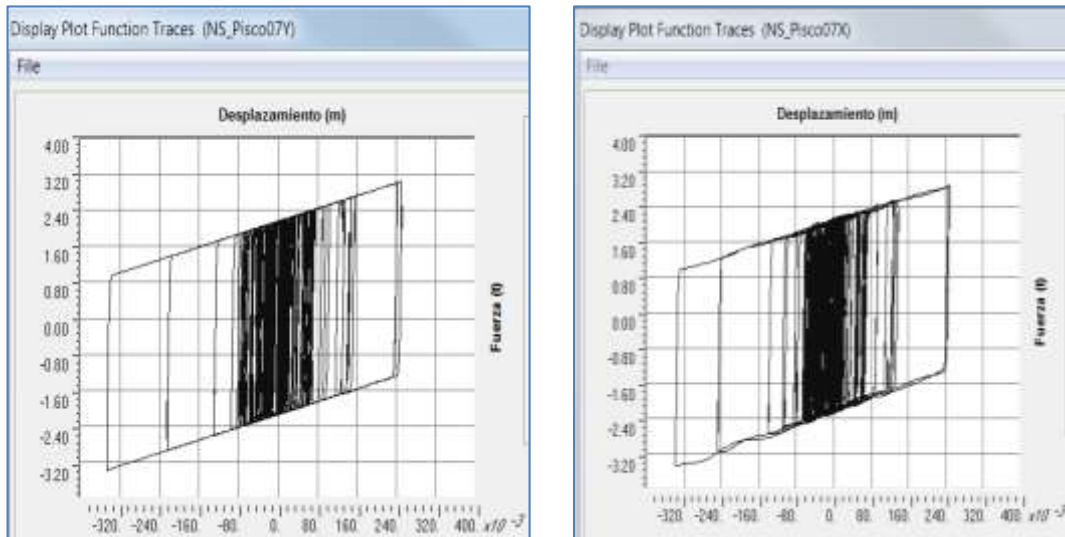
Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Gráfico 4.17: Curva Histerética NS\_NDP05 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

Gráfico 4.18: Curva Histerética NS\_PISCO07 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

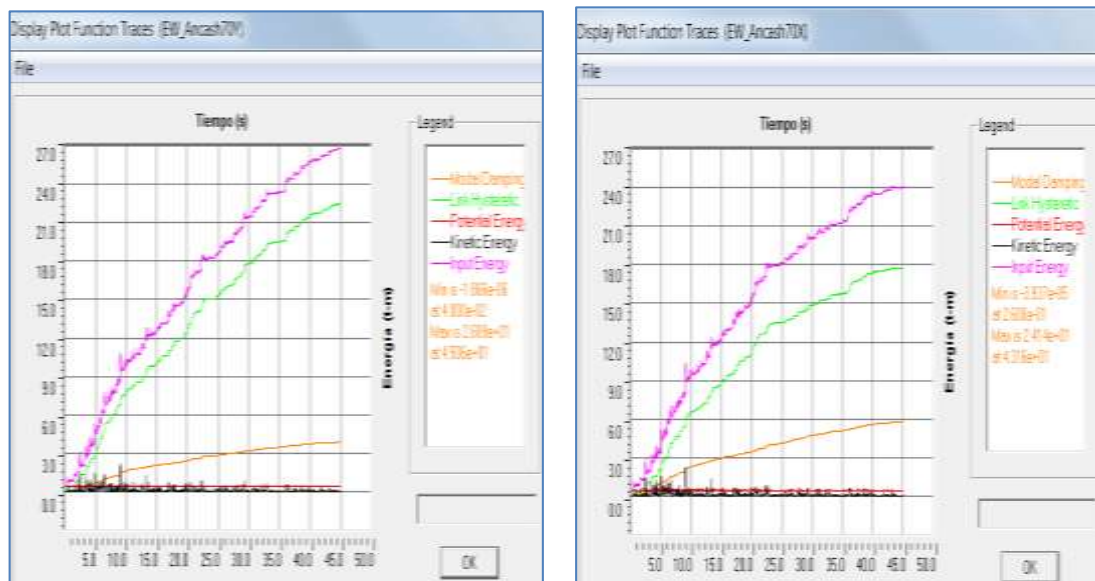
#### 4.3.4 Distribución de energía:

La energía se disipa a través del tiempo durante el movimiento sísmico y a su vez se divide diferentes tipos como:

1. Energía de ingreso del sismo (Input Energy)
13. Energía modal de amortiguamiento (Modal Damping), es la energía que absorbe el material de construcción en este caso es el concreto.
14. Energía que absorbe el aislador (Link Hysteretic)
15. Energía Potencial (Potencial Energy)
16. Energía Cinética (Kinetic Energy)

En los siguientes Figuras se mostrará la distribución de energía según la carga sísmica aplicada.

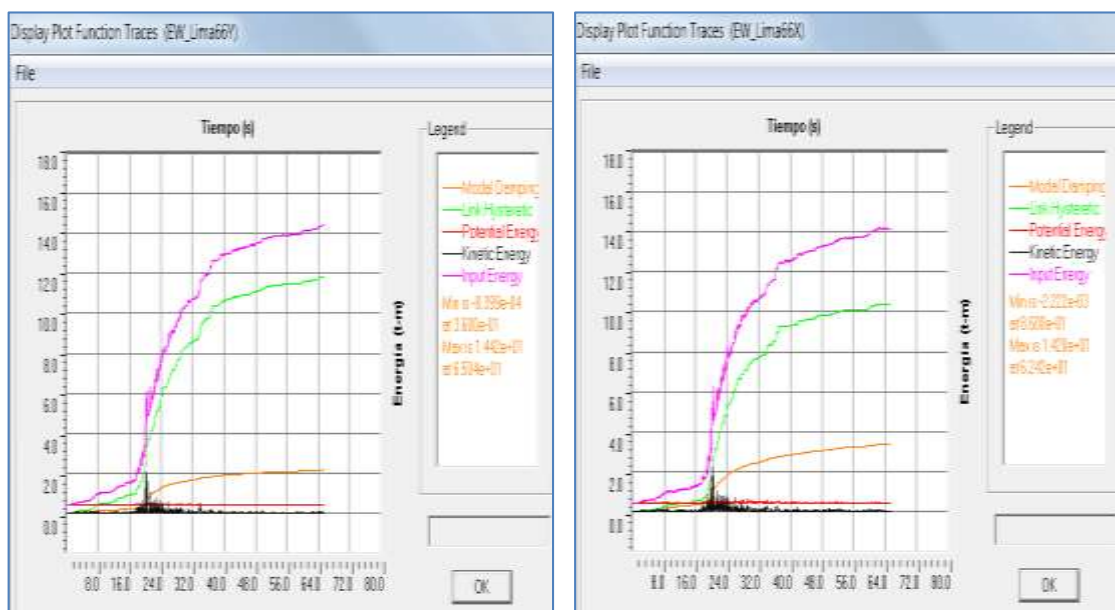
Gráfico 4.19: Distribución de energía EW\_ANCASH70 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

En el Gráfico 4.19, para la carga EW\_Ancash70X se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 74.56% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 24.90%. Para la carga EW\_Ancash70Y se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 81.81% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 14.88%.

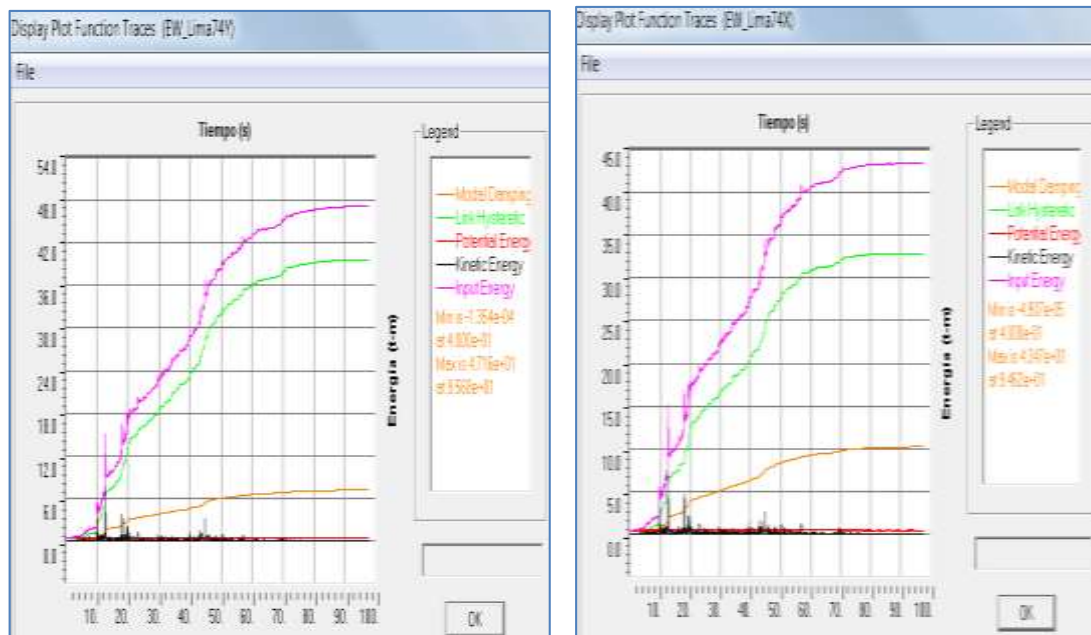
Gráfico 4.20: Distribución de energía EW\_LIMA66 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

En el Gráfico 4.20, para la carga EW\_Lima66X se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 73.94% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 26.76%. Para la carga EW\_Lima66Y se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 82.52% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 15.26%.

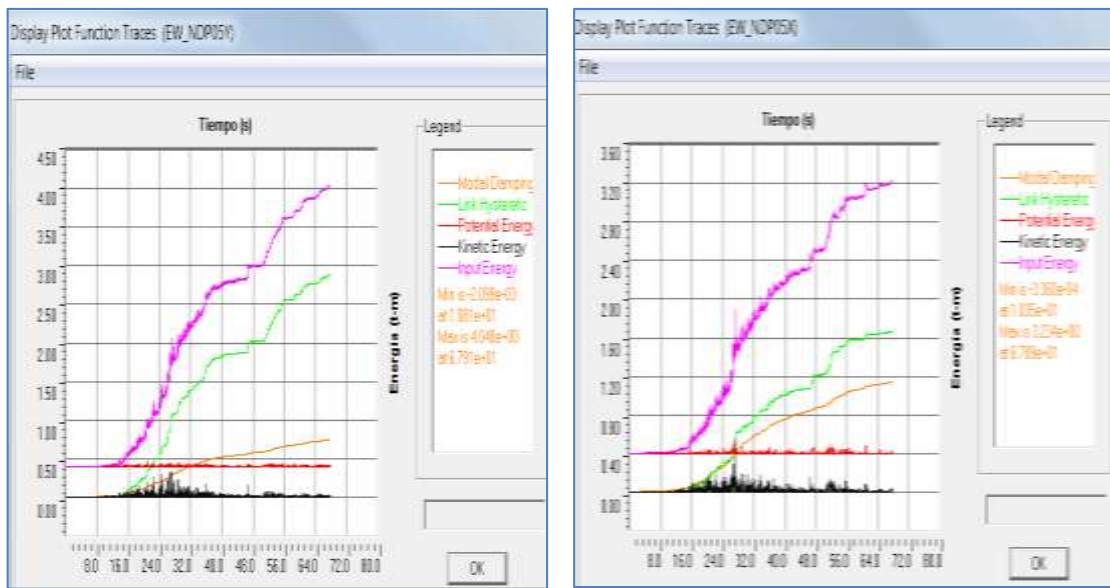
Gráfico 4.21: Distribución de energía EW\_LIMA74 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

En el Gráfico 4.21, para la carga EW\_Lima74X se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 73.61% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 23.00%. Para la carga EW\_Lima74Y se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 78.46% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 12.93%.

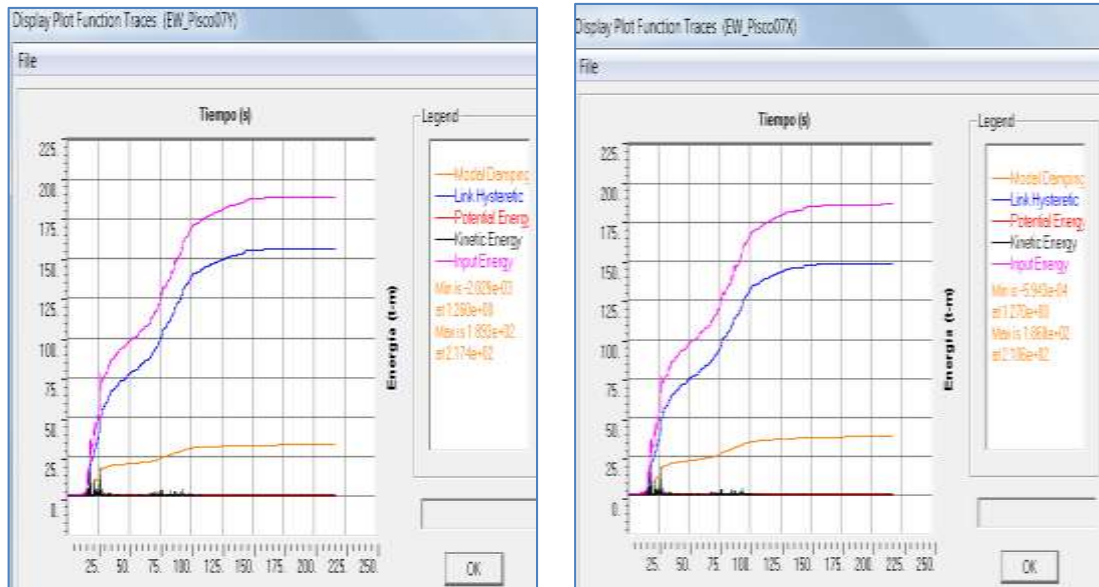
Gráfico 4.22: Distribución de energía EW\_NDP05 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

En el Gráfico 4.22, para la carga EW\_NDP05X se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 50.15% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 36.53%. Para la carga EW\_NDP05Y se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 69.17% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 17.29%.

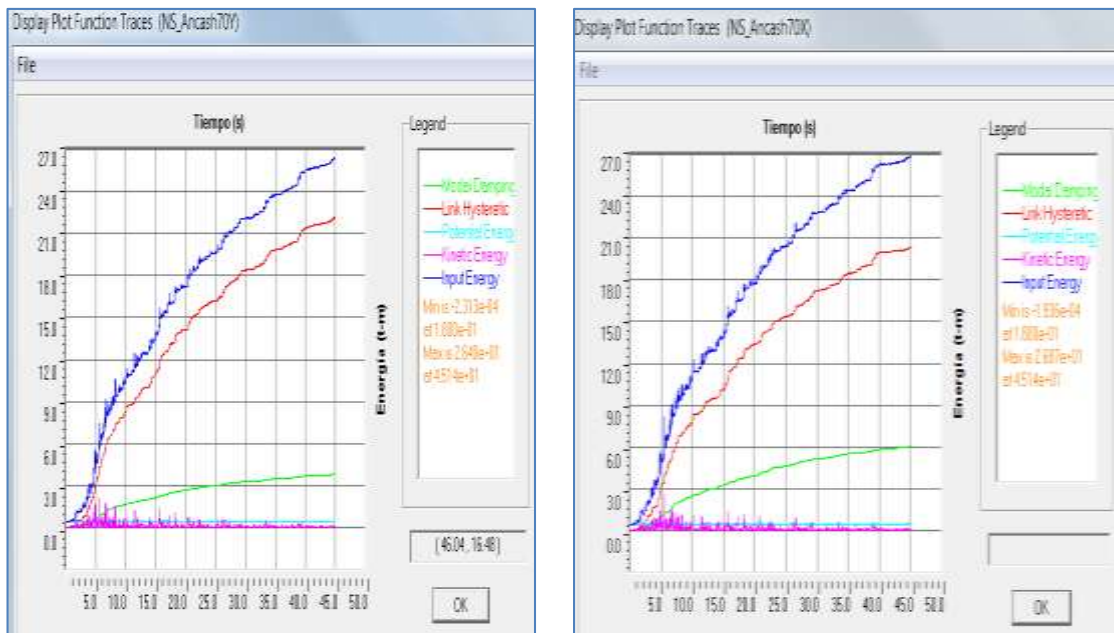
Gráfico 4.23: Distribución de energía EW\_PISCO07 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

En el Gráfico 4.23, para la carga EW\_Pisco07X se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 79.76% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 14.99%. Para la carga EW\_Pisco07Y se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 84.52% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 18.49%.

Gráfico 4.24: Distribución de energía NS\_ANCASH70 – Direcciones X y Y

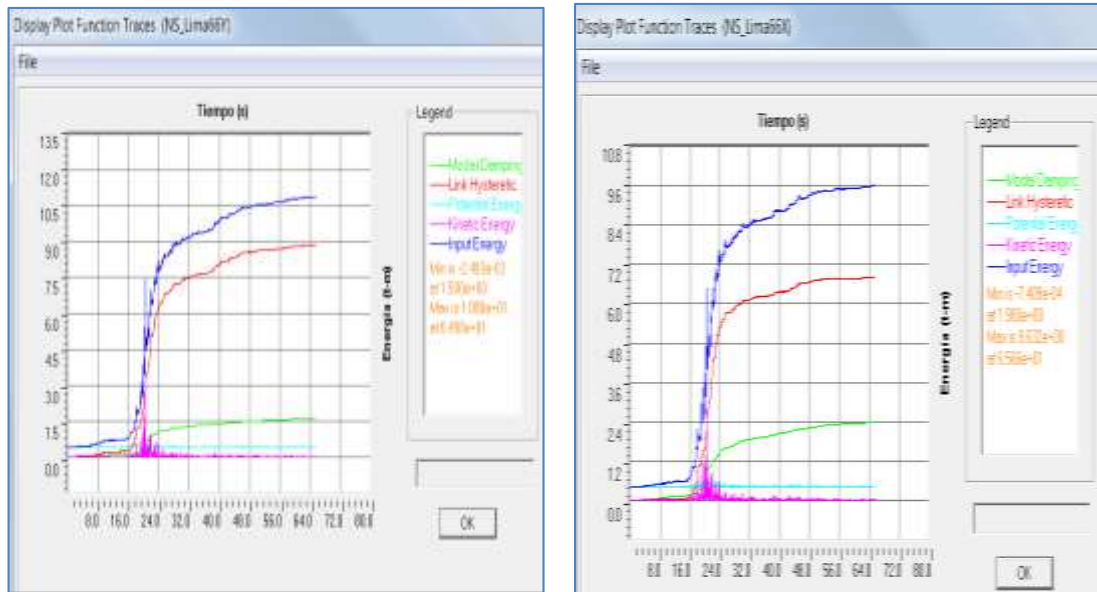


Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

En el Gráfico 4.24, para la carga NS\_Ancash70X se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 83.33% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 22.33%. Para la carga NS\_Ancash70Y se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 83.33% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 15.53%.



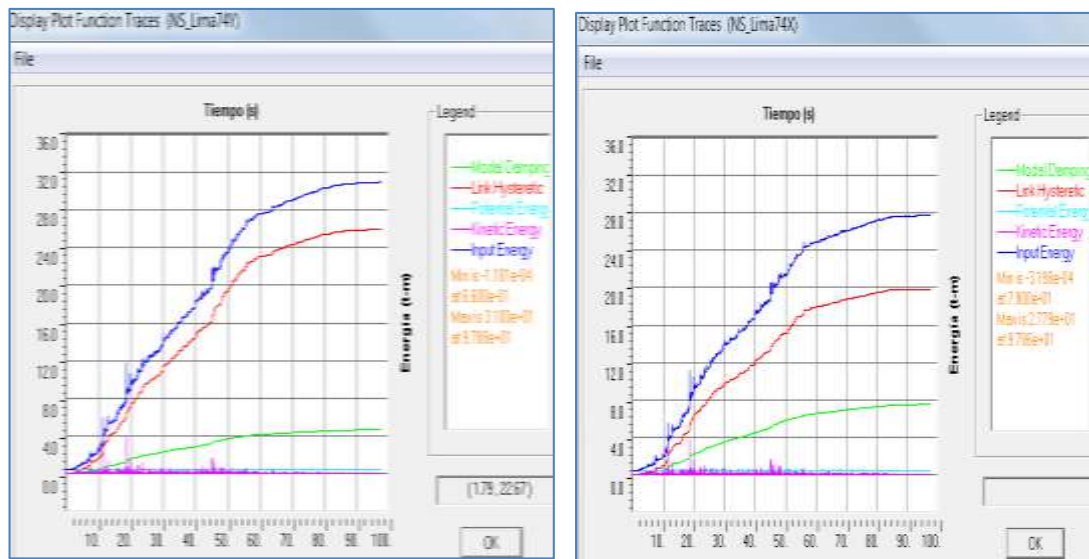
Gráfico 4.25: Distribución de energía NS\_Lima66 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

En el Gráfico 4.25, para la carga NS\_Lima66X se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 70.60% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 24.92%. Para la carga NS\_Lima66Y se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 82.72% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 13.79%.

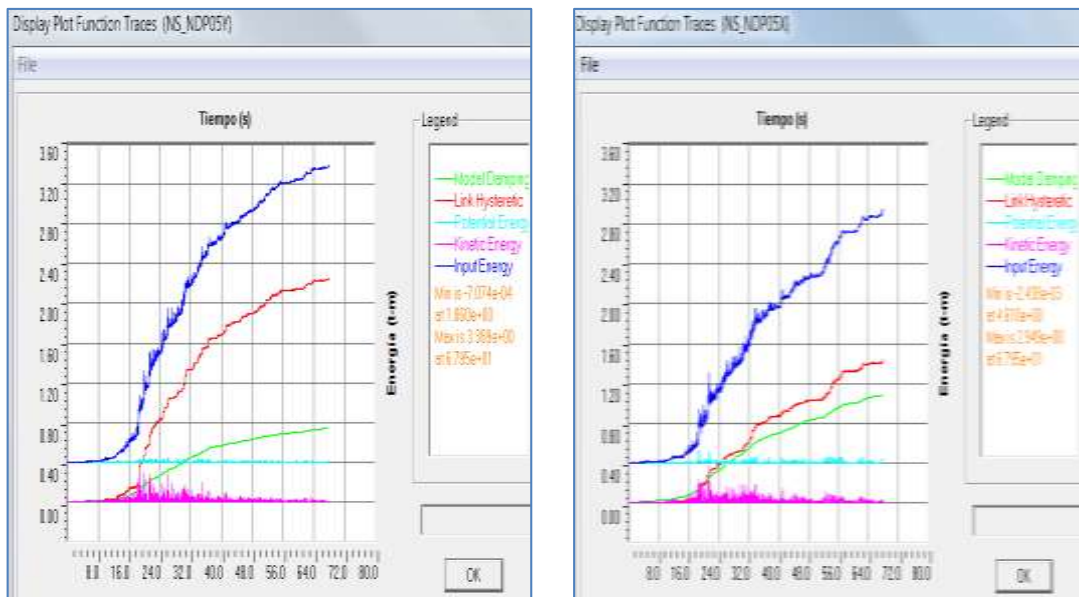
Gráfico 4.26: Distribución de energía NS\_Lima74 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

En el gráfico 4.26, para la carga NS\_Lima74X se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 71.61% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 28.79%. Para la carga NS\_Lima74Y se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 83.87% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 16.13%.

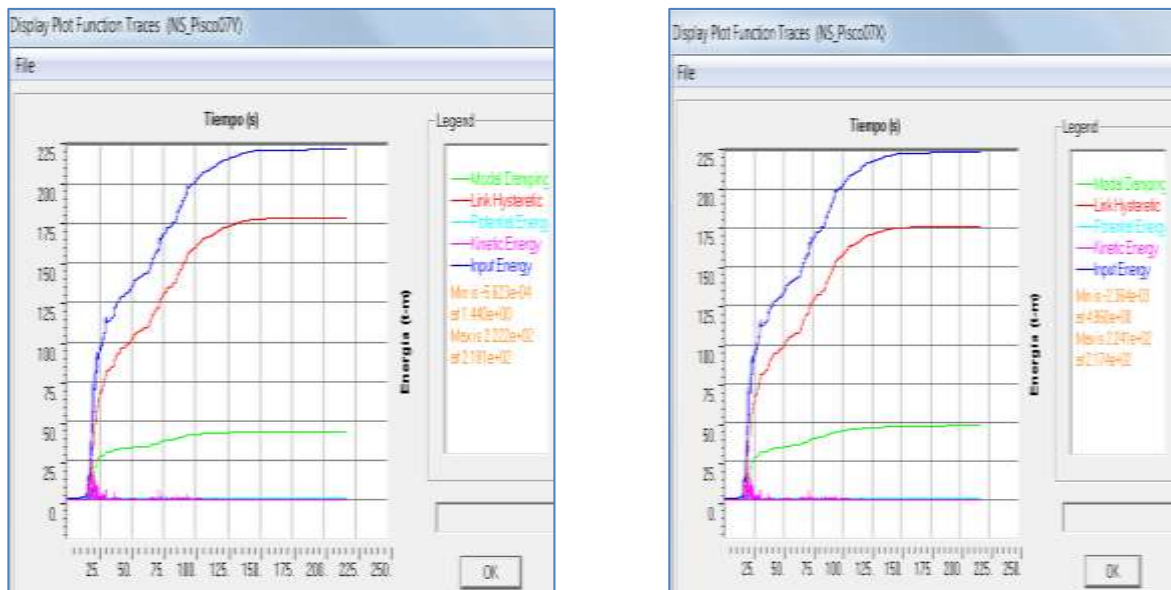
Gráfico 4.27: Distribución de energía NS\_NDP05 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

En el Gráfico 4.27, para la carga NS\_NDP05X se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 51.02% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 37.41%. Para la carga NS\_NDP05Y se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 66.37% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 20.65%.

Gráfico 4.28: Distribución de energía NS\_PISCO07 – Direcciones X y Y



Fuente: SAP2000 v15 (2011), Computers and Structures Inc.

En el Gráfico 4.28, para la carga NS\_Pisco07X se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 79.28% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 22.22%. Para la carga NS\_Pisco07Y se puede ver que la energía disipada de los aisladores tiene valor de 81.01% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor de 18.23%.

# CAPÍTULO V

## COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Descripción de la comparación

En este capítulo se detallará la efectividad que tiene la edificación con un sistema de aislamiento en la base (Capítulo IV) con respecto a la edificación con base fija (Capítulo II).

Se hicieron comparaciones de los desplazamientos, distorsiones de entrepiso, fuerzas cortantes y fuerzas axiales en la base. Las comparaciones se sustentaran mediante gráficos, tablas y porcentajes.

### 5.2 Desplazamientos y distorsiones

En las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 se podrán apreciar un porcentaje que representará que tan efectivo son las distorsiones en la edificación con aislamiento ( $D_a$ ) en la base con respecto a las distorsiones de la edificación con base fija ( $D_f$ ).

Posteriormente se mostrarán gráficos que mostrarán los desplazamientos y distorsiones que se dan por cada piso de la edificación.

El porcentaje de efectividad se va a definir de la siguiente manera:

$$\%_{\text{Efec}} = \frac{D_f - D_a}{D_f} \times 100 \quad (5.2.1)$$

Tabla 5.1: Comparación de desplazamientos y distorsiones (Base Fija vs Base con Aislamiento)

Carga Sísmica	NIVEL	Desplaz. Rel. Al suelo (Aislamiento) (m)	Desplaz. Rel. Al suelo (Fija) (m)	Distorsión con aislamiento	Distorsión sin aislamiento	Diferencia de distorsiones (m)	Porcentaje de efectividad
EW_Ancash70X	PISO5	0.0485	0.0786	0.0004	0.0034	0.0030	88%
	PISO4	0.0474	0.0696	0.0002	0.0059	0.0057	97%
	PISO3	0.0470	0.0540	0.0001	0.0075	0.0074	99%
	PISO2	0.0472	0.0342	0.0002	0.0082	0.0080	98%
	PISO1	0.0468	0.0126	0.0003	0.0048	0.0045	94%
	BASE	0.0461		0.0174			
EW_Ancash70Y	PISO5	0.0410	0.0378	0.0001	0.0018	0.0017	94%
	PISO4	0.0408	0.0330	0.0002	0.0027	0.0025	93%
	PISO3	0.0402	0.0258	0.0003	0.0032	0.0029	91%
	PISO2	0.0395	0.0174	0.0002	0.0038	0.0036	95%
	PISO1	0.0390	0.0072	0.0002	0.0027	0.0025	93%
	BASE	0.0386		0.0146			
EW_Lima66X	PISO5	0.0718	0.0786	0.0006	0.0034	0.0028	82%
	PISO4	0.0701	0.0696	0.0013	0.0059	0.0046	78%
	PISO3	0.0667	0.0540	0.0017	0.0075	0.0058	77%
	PISO2	0.0623	0.0342	0.0016	0.0082	0.0066	80%
	PISO1	0.0580	0.0126	0.0008	0.0048	0.0040	83%
	BASE	0.0558		0.0211			
EW_Lima66Y	PISO5	0.0517	0.0378	0.0001	0.0018	0.0017	94%
	PISO4	0.0515	0.0330	0.0001	0.0027	0.0026	96%
	PISO3	0.0512	0.0258	0.0002	0.0032	0.0030	94%
	PISO2	0.0507	0.0174	0.0003	0.0038	0.0035	92%
	PISO1	0.0500	0.0072	0.0002	0.0027	0.0025	93%
	BASE	0.0494		0.0186			
EW_Lima74X	PISO5	0.1071	0.0786	0.0008	0.0034	0.0026	76%
	PISO4	0.1050	0.0696	0.0009	0.0059	0.0050	85%
	PISO3	0.1025	0.0540	0.0012	0.0075	0.0063	84%
	PISO2	0.0994	0.0342	0.0008	0.0082	0.0074	90%
	PISO1	0.0972	0.0126	0.0004	0.0048	0.0044	92%
	BASE	0.0961		0.0363			
EW_Lima74Y	PISO5	0.1205	0.0378	0.0001	0.0018	0.0017	94%
	PISO4	0.1203	0.0330	0.0000	0.0027	0.0027	100%
	PISO3	0.1203	0.0258	0.0002	0.0032	0.0030	94%
	PISO2	0.1207	0.0174	0.0001	0.0038	0.0037	97%
	PISO1	0.1209	0.0072	0.0000	0.0027	0.0027	100%
	BASE	0.1209		0.0456			
EW_NDP05X	PISO5	0.0161	0.0786	0.0003	0.0034	0.0031	91%
	PISO4	0.0153	0.0696	0.0004	0.0059	0.0055	93%
	PISO3	0.0143	0.0540	0.0004	0.0075	0.0071	95%
	PISO2	0.0132	0.0342	0.0005	0.0082	0.0077	94%
	PISO1	0.0120	0.0126	0.0003	0.0048	0.0045	94%
	BASE	0.0112		0.0042			
EW_NDP05Y	PISO5	0.0129	0.0378	0.0000	0.0018	0.0018	100%
	PISO4	0.0129	0.0330	0.0001	0.0027	0.0026	96%
	PISO3	0.0127	0.0258	0.0000	0.0032	0.0032	100%
	PISO2	0.0126	0.0174	0.0001	0.0038	0.0037	97%
	PISO1	0.0123	0.0072	0.0001	0.0027	0.0026	96%
	BASE	0.0121		0.0046			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.2: Comparación de desplazamientos y distorsiones (Base Fija vs Base con Aislamiento)

Carga Sísmica	NIVEL	Desplaz. Rel. Al suelo (m)	Desplaz. Rel. Al suelo (Fija) (m)	Distorsión con aislamiento	Distorsión sin aislamiento	Diferencia de distorsiones (m)	Porcentaje de efectividad
EW_PISCO07X	PISO5	0.2083	0.0786	0.0004	0.0034	0.0030	88%
	PISO4	0.2073	0.0696	0.0006	0.0059	0.0053	90%
	PISO3	0.2057	0.0540	0.0008	0.0075	0.0067	89%
	PISO2	0.2035	0.0342	0.0009	0.0082	0.0073	89%
	PISO1	0.2012	0.0126	0.0006	0.0048	0.0042	88%
	BASE	0.1996		0.0753			
EW_PISCO07Y	PISO5	0.2247	0.0378	0.0000	0.0018	0.0018	100%
	PISO4	0.2246	0.0330	0.0000	0.0027	0.0027	100%
	PISO3	0.2245	0.0258	0.0001	0.0032	0.0031	97%
	PISO2	0.2243	0.0174	0.0002	0.0038	0.0036	95%
	PISO1	0.2238	0.0072	0.0002	0.0027	0.0025	93%
	BASE	0.2233		0.0843			
NS_Ancash70X	PISO5	0.0745	0.0786	0.0001	0.0034	0.0033	97%
	PISO4	0.0743	0.0696	0.0002	0.0059	0.0057	97%
	PISO3	0.0737	0.0540	0.0006	0.0075	0.0069	92%
	PISO2	0.0721	0.0342	0.0008	0.0082	0.0074	90%
	PISO1	0.0700	0.0126	0.0003	0.0048	0.0045	94%
	BASE	0.0693		0.0262			
NS_Ancash70Y	PISO5	0.0566	0.0378	0.0001	0.0018	0.0017	94%
	PISO4	0.0564	0.0330	0.0002	0.0027	0.0025	93%
	PISO3	0.0560	0.0258	0.0002	0.0032	0.0030	94%
	PISO2	0.0554	0.0174	0.0002	0.0038	0.0036	95%
	PISO1	0.0548	0.0072	0.0002	0.0027	0.0025	93%
	BASE	0.0543		0.0205			
NS_Lima66X	PISO5	0.0590	0.0786	0.0001	0.0034	0.0033	97%
	PISO4	0.0593	0.0696	0.0008	0.0059	0.0051	86%
	PISO3	0.0614	0.0540	0.0007	0.0075	0.0068	91%
	PISO2	0.0633	0.0342	0.0004	0.0082	0.0078	95%
	PISO1	0.0643	0.0126	0.0000	0.0048	0.0048	100%
	BASE	0.0643		0.0243			
NS_Lima66Y	PISO5	0.0556	0.0378	0.0001	0.0018	0.0017	94%
	PISO4	0.0554	0.0330	0.0002	0.0027	0.0025	93%
	PISO3	0.0550	0.0258	0.0002	0.0032	0.0030	94%
	PISO2	0.0546	0.0174	0.0002	0.0038	0.0036	95%
	PISO1	0.0542	0.0072	0.0001	0.0027	0.0026	96%
	BASE	0.0539		0.0203			

Fuente: Elaboración Propia

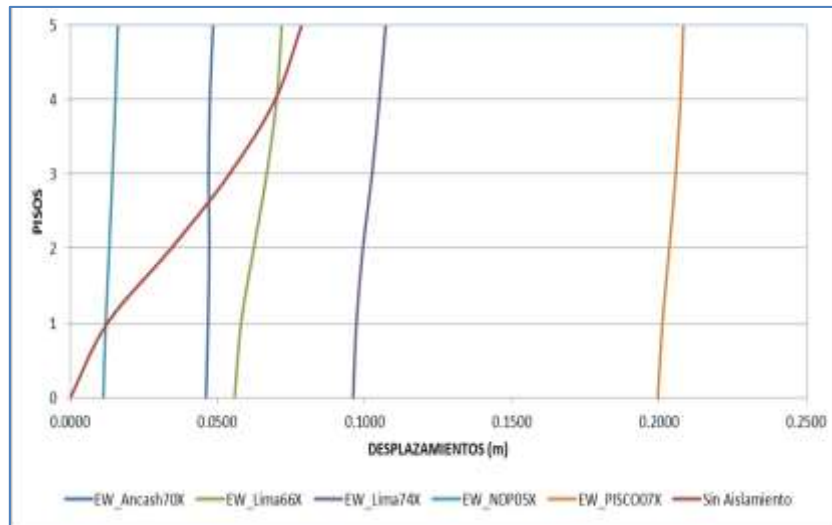
Tabla 5.3: Comparación de desplazamientos y distorsiones (Base Fija vs Base con Aislamiento)

Carga Sísmica	NIVEL	Desplaz. Rel. Al suelo (m)	Desplaz. Rel. Al suelo (Fija) (m)	Distorsión con aislamiento	Distorsión sin aislamiento	Diferencia de distorsiones (m)	Porcentaje de efectividad
NS_Lima74X	PISO5	0.0439	0.0786	0.0008	0.0034	0.0026	76%
	PISO4	0.0419	0.0696	0.0003	0.0059	0.0056	95%
	PISO3	0.0410	0.0540	0.0000	0.0075	0.0075	100%
	PISO2	0.0411	0.0342	0.0002	0.0082	0.0080	98%
	PISO1	0.0406	0.0126	0.0003	0.0048	0.0045	94%
	BASE	0.0399		0.0151			
NS_Lima74Y	PISO5	0.0517	0.0378	0.0000	0.0018	0.0018	100%
	PISO4	0.0518	0.0330	0.0000	0.0027	0.0027	100%
	PISO3	0.0519	0.0258	0.0000	0.0032	0.0032	100%
	PISO2	0.0520	0.0174	0.0000	0.0038	0.0038	100%
	PISO1	0.0519	0.0072	0.0001	0.0027	0.0026	96%
	BASE	0.0517		0.0195			
NS_NDP05X	PISO5	0.0140	0.0786	0.0004	0.0034	0.0030	88%
	PISO4	0.0130	0.0696	0.0008	0.0059	0.0051	86%
	PISO3	0.0108	0.0540	0.0009	0.0075	0.0066	88%
	PISO2	0.0083	0.0342	0.0007	0.0082	0.0075	91%
	PISO1	0.0064	0.0126	0.0004	0.0048	0.0044	92%
	BASE	0.0054		0.0020			
NS_NDP05Y	PISO5	0.0152	0.0378	0.0001	0.0018	0.0017	94%
	PISO4	0.0150	0.0330	0.0000	0.0027	0.0027	100%
	PISO3	0.0150	0.0258	0.0001	0.0032	0.0031	97%
	PISO2	0.0148	0.0174	0.0001	0.0038	0.0037	97%
	PISO1	0.0146	0.0072	0.0001	0.0027	0.0026	96%
	BASE	0.0143		0.0054			
NS_PISCO07X	PISO5	0.3413	0.0786	0.0000	0.0034	0.0034	100%
	PISO4	0.3413	0.0696	0.0000	0.0059	0.0059	100%
	PISO3	0.3413	0.0540	0.0002	0.0075	0.0073	97%
	PISO2	0.3408	0.0342	0.0005	0.0082	0.0077	94%
	PISO1	0.3396	0.0126	0.0005	0.0048	0.0043	90%
	BASE	0.3384		0.1277			
NS_PISCO07Y	PISO5	0.3497	0.0378	0.0000	0.0018	0.0018	100%
	PISO4	0.3496	0.0330	0.0001	0.0027	0.0026	96%
	PISO3	0.3493	0.0258	0.0002	0.0032	0.0030	94%
	PISO2	0.3489	0.0174	0.0002	0.0038	0.0036	95%
	PISO1	0.3483	0.0072	0.0002	0.0027	0.0025	93%
	BASE	0.3478		0.1312			

Fuente: Elaboración Propia



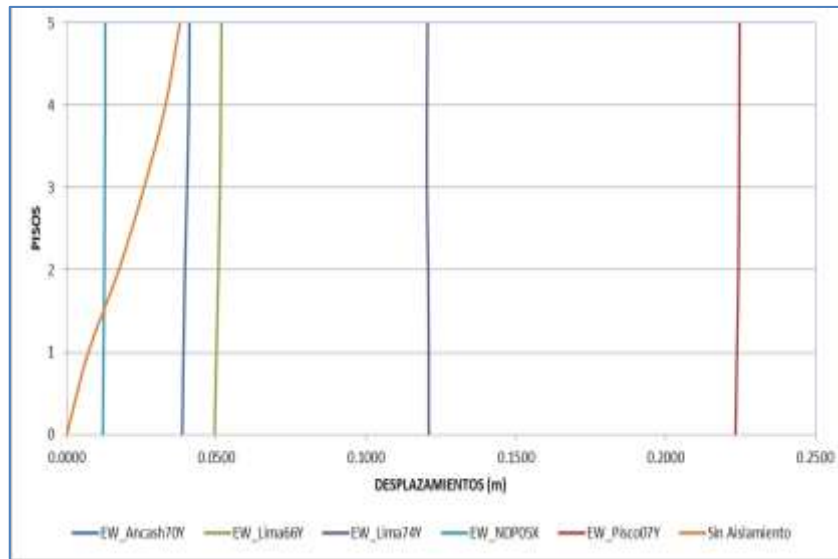
Gráfico 5.1: Desplazamientos – Orientación E-W – Dirección X



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 5.1 se puede apreciar que los desplazamientos de la edificación con base fija son mayores a los desplazamientos de la edificación con base aislada con las cargas sísmicas de EW\_NDP05X, EW\_Ancash70X y EW\_Lima66X. Los desplazamientos de la edificación con la carga de EW\_Pisco07X son mucho mayor a todos desplazamientos anteriormente mencionado llegando a un máximo de 0.2073 m.

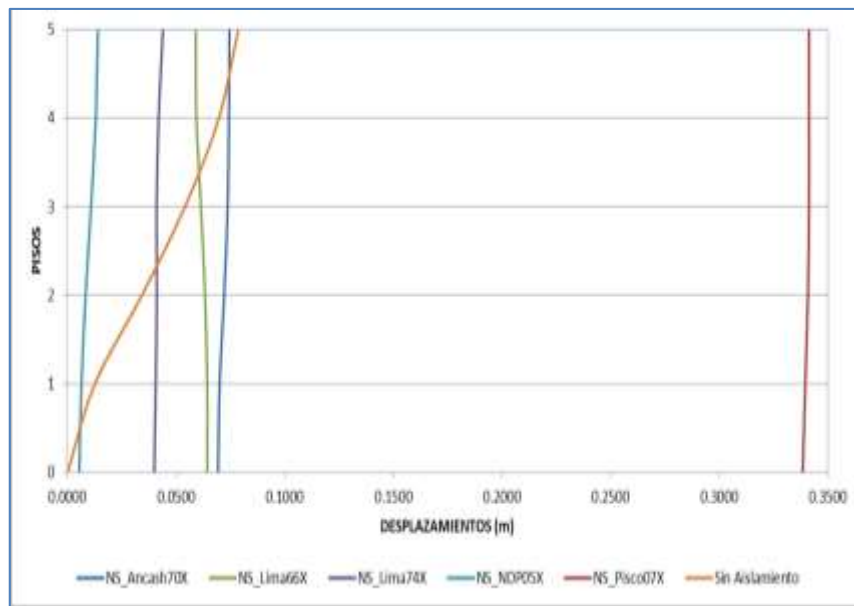
Gráfico 5.2: Desplazamientos – Orientación E-W – Dirección Y



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 5.2 se puede apreciar que los desplazamientos de la edificación con base fija son mayores a los desplazamientos de la edificación con base aislada con las cargas sísmicas de EW\_NDP05Y. Los desplazamientos de la edificación con la carga de EW\_Pisco07Y son mayores a todos los demás desplazamientos según las diferentes cargas sísmicas aplicadas, aplicando la carga sísmica EW\_Pisco07Y la edificación llegó a un máximo de 0.2247 m.

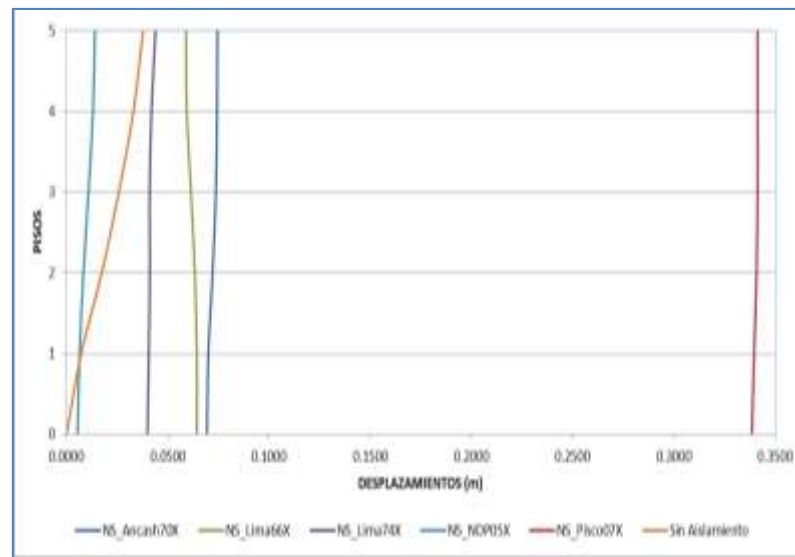
Gráfico 5.3: Desplazamientos – Orientación N-S – Dirección X



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 5.3 se puede apreciar el desplazamiento de la edificación con base fija es mayor en el 5to piso (desplazamiento de 0.0786 m) a comparación de los desplazamientos de la edificación con cargas sísmicas de NS\_Ancash70X, NS\_Lima66X, NS\_Lima74X y NS\_NDP05X. En cambio los desplazamientos de la edificación con la carga sísmica NS\_Pisco07X superan a todos los desplazamientos mencionado anteriormente llegando a un máximo de 0.3413 m.

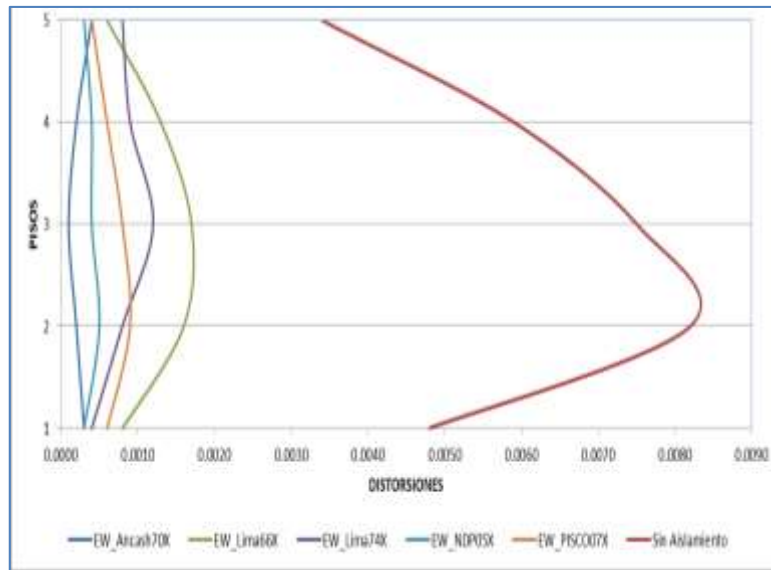
Gráfico 5.4: Desplazamientos – Orientación N-S – Dirección Y



Fuente: Elaboración Propia

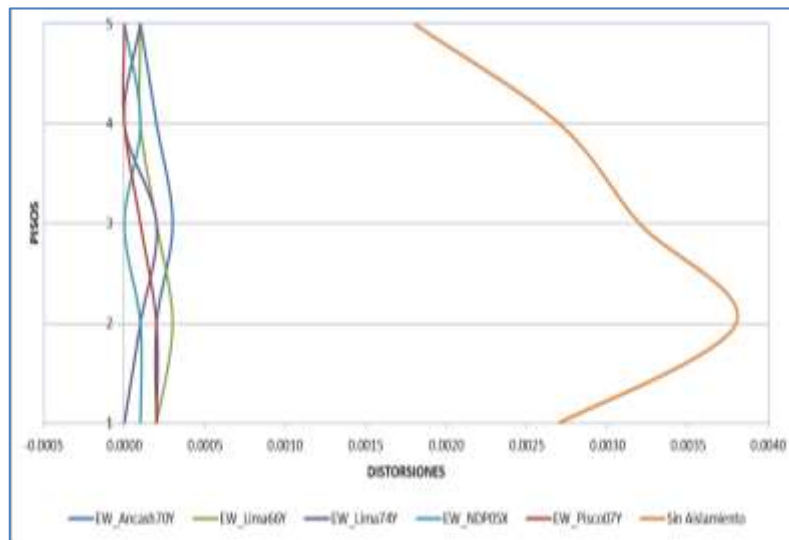
En el gráfico 5.4 se puede apreciar que los desplazamientos de la edificación con base fija son mayores a los desplazamientos de la edificación con base aislada con las cargas sísmicas de NS\_NDP05Y. Los desplazamientos de la edificación con la carga de NS\_Pisco07Y son mayores a todos los demás desplazamientos según las diferentes cargas sísmicas aplicadas, aplicando la carga sísmica NS\_Pisco07Y la edificación llegó a un máximo de 0.3497 m.

Gráfico 5.5: Distorsiones – Orientación E-W – Dirección X



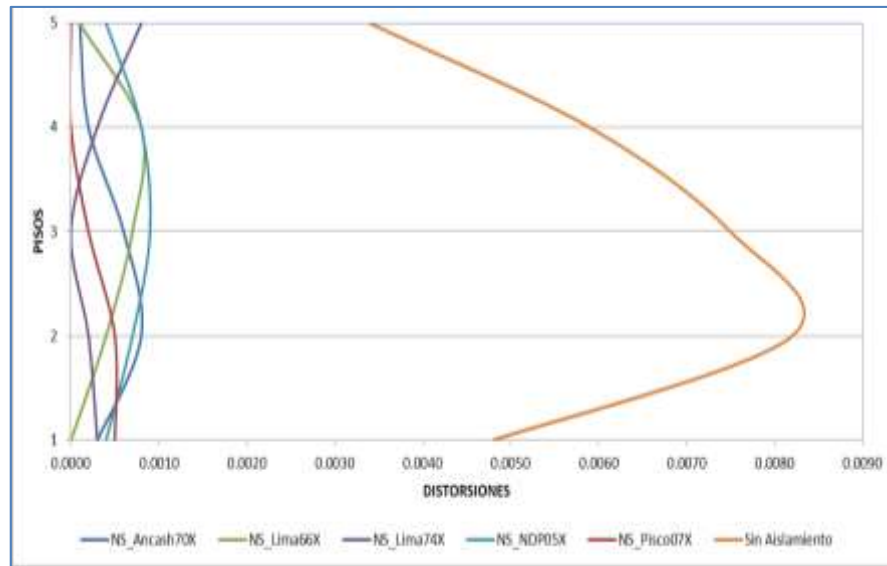
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 5.6: Distorsiones – Orientación E-W – Dirección Y



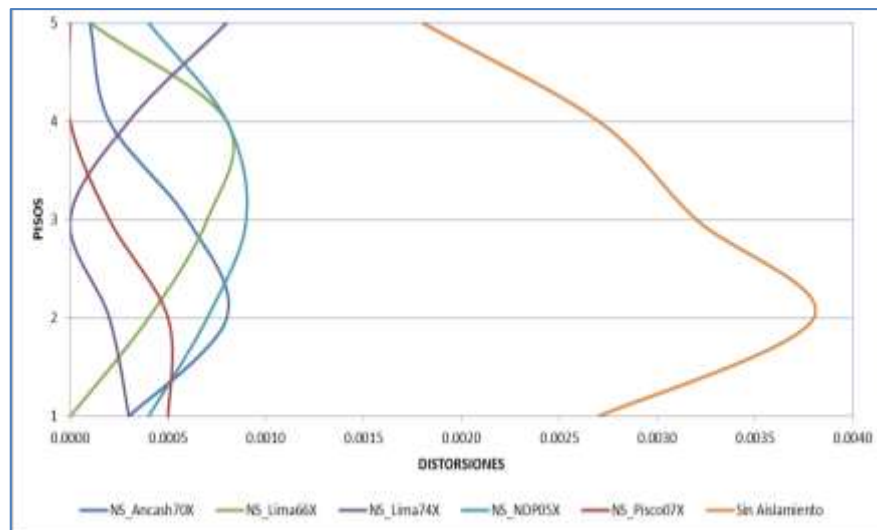
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 5.7: Distorsiones – Orientación N-S – Dirección X



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 5.8: Distorsiones – Orientación N-S – Dirección Y



Fuente: Elaboración Propia

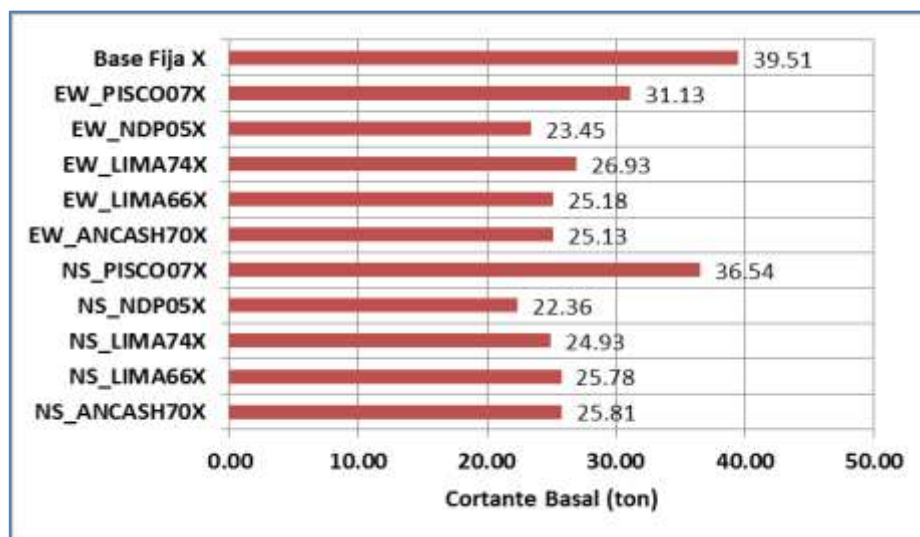
En los gráficos 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8, en general, las distorsiones son muy dispares mientras se va subiendo de piso pero son mucho menores que las distorsiones de la edificación con

base fija que en la dirección X llegó a un máximo de 0.0082 y en la dirección Y llegó a un máximo de 0.0038.

### 5.3 Cortantes

En este ítem se mostrará mediante gráficos las diferentes fuerzas cortantes que se dan en la base de la edificación. La fuerzas cortantes que se van a mostrar en los gráficos son los máximos valores que se dan según la carga sísmica aplicada.

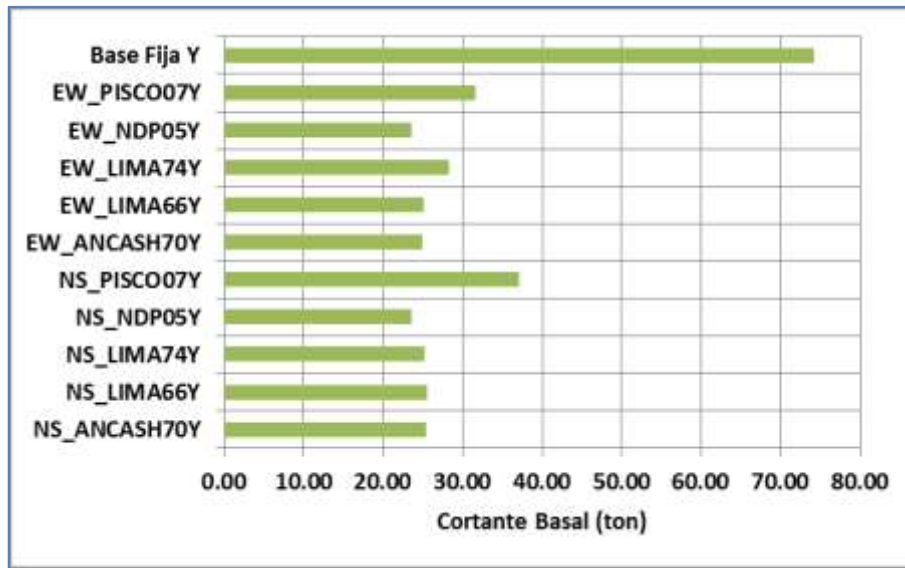
Gráfico 5.9: Comparación de Cortantes Basales – Dirección X



Fuente: Elaboración Propia

En el Gráfico 5.9 se puede ver que el cortante basal de la carga sísmica con orientación E-W de mayor valor es EW\_Pisco07X con 31.13 ton, mientras que para la orientación N-S el mayor valor es de la carga NS\_Pisco07X con 36.54 ton. El cortante basal de la edificación con base fija es mayor que los dos valores mencionados con 39.51 ton.

Gráfico 5.10: Comparación de Cortantes Basales – Dirección Y



Fuente: Elaboración Propia

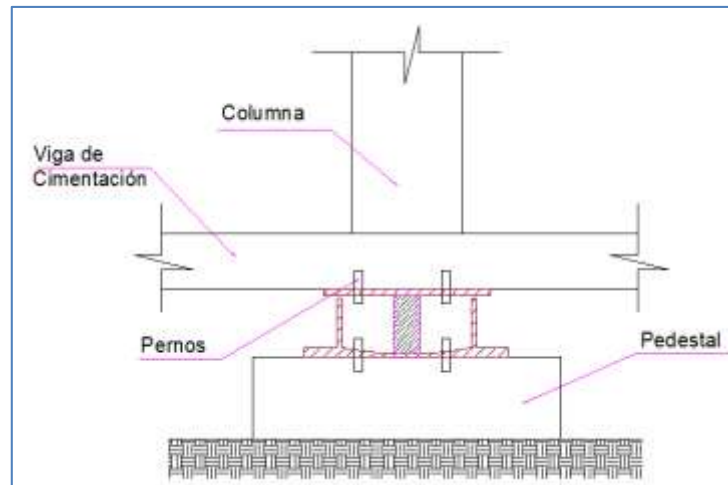
En el Gráfico 5.10 se puede ver que el cortante basal de la carga sísmica con orientación E-W de mayor valor es EW\_Pisco07Y con 31.68 ton, mientras que para la orientación N-S el mayor valor es de la carga NS\_Pisco07Y con 37.01 ton. El cortante basal de la edificación con base fija es mucho mayor que los dos valores mencionados con 74.14 ton.

#### 5.4 Fuerzas axiales en la base

Las fuerzas axiales aumentaron en las columnas en la edificación con la base aislada ya que su apoyo no era fijo sino más bien se apoyan sobre una viga de cimentación o un aislador (Ver Figura 5.1). Para la comparación, se tomarán dos casos, la fuerza axial de una columna que se apoya sobre viga de cimentación y de una columna que se apoya sobre un aislador.

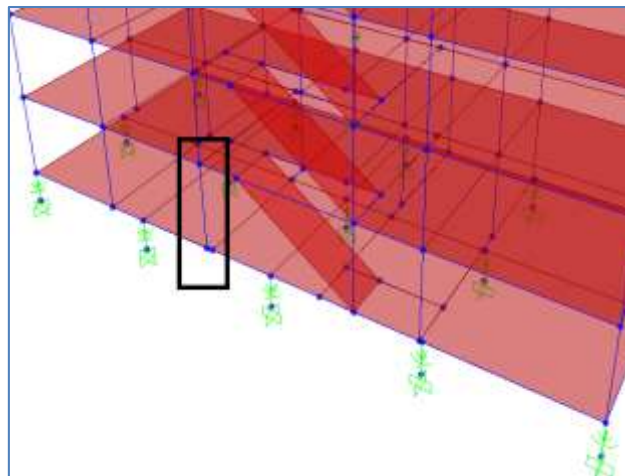


Figura 5.1: Bosquejo de unión del sistema de aislamiento con la edificación



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.2: Columna seleccionada para el análisis



Fuente: Elaboración Propia

La columna que se mostró en la figura 5.2 es una columna que se apoya sobre viga de cimentación y en la Tabla 5.4 se mostrará los resultados de la comparación de la fuerza axial de la columna cuando es sometida a cargas sísmicas.

Tabla 5.4: Comparación de fuerzas axiales en columna  
Columna sobre viga – Orientación E-W

COLUMNA BASE FIJA		COLUMNA SOBRE VIGA BASE AISLADA		Reducción de Fuerzas (%)
CARGA	FUERZA (t)	CARGA	FUERZA (t)	
Sismo X	15.94	EW_Ancash70X	9.21	<b>42.22%</b>
Sismo Y	42.62	EW_Ancash70Y	13.25	<b>68.92%</b>
Sismo X	15.94	EW_Lima66X	9.15	<b>42.57%</b>
Sismo Y	42.62	EW_Lima66Y	12.92	<b>69.69%</b>
Sismo X	15.94	EW_Lima74X	9.21	<b>42.19%</b>
Sismo Y	42.62	EW_Lima74Y	12.92	<b>69.68%</b>
Sismo X	15.94	EW_NDP05X	8.72	<b>45.32%</b>
Sismo Y	42.62	EW_NDP05Y	11.29	<b>73.50%</b>
Sismo X	15.94	EW_Pisco07X	9.19	<b>42.33%</b>
Sismo Y	42.62	EW_Pisco07Y	12.33	<b>71.08%</b>

Fuente: Elaboración Propia

Las fuerzas axiales disminuyeron en las columnas en la edificación con la base aislada como se puede ver en la columna que dice reducción de fuerzas, el mayor porcentaje de reducción para el eje X fue de 73.50% aplicando la carga EW\_Pisco07X, y el mayor porcentaje de reducción en el eje Y fue de 73.50% aplicando la carga EW\_NDP05Y.

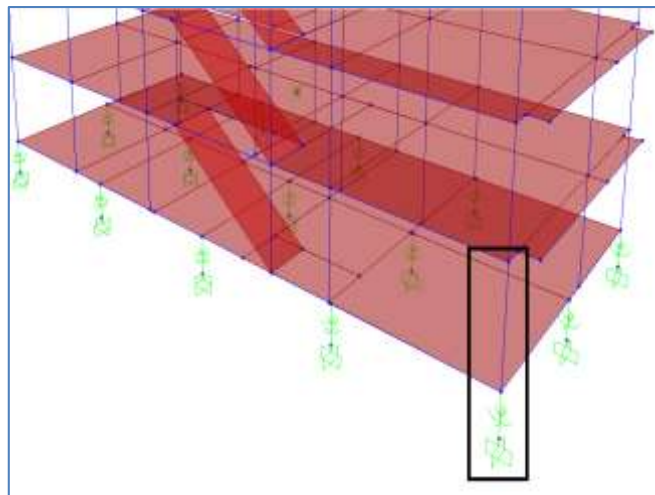
Tabla 5.5: Comparación de fuerzas axiales en columna  
Columna sobre viga – Orientación N-S

COLUMNA		COLUMNA SOBRE VIGA		Reducción de Fuerzas (%)
CARGA	FUERZA (t)	CARGA	FUERZA (t)	
Sismo X	15.94	NS_Ancash70X	9.20	<b>42.28%</b>
Sismo Y	42.62	NS_Ancash70Y	12.70	<b>70.21%</b>
Sismo X	15.94	NS_Lima66X	8.97	<b>43.74%</b>
Sismo Y	42.62	NS_Lima66Y	12.31	<b>71.13%</b>
Sismo X	15.94	NS_Lima74X	9.23	<b>42.10%</b>
Sismo Y	42.62	NS_Lima74Y	12.28	<b>71.19%</b>
Sismo X	15.94	NS_NDP05X	8.75	<b>45.10%</b>
Sismo Y	42.62	NS_NDP05Y	10.64	<b>75.03%</b>
Sismo X	15.94	NS_Pisco07X	9.27	<b>41.86%</b>
Sismo Y	42.62	NS_Pisco07Y	11.76	<b>72.41%</b>

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 5.5 las fuerzas axiales disminuyeron en las columnas en la edificación con la base aislada como se puede ver en la columna que dice reducción de fuerzas, el mayor porcentaje de reducción para el eje X fue de 45.10% aplicando la carga NS\_NDP05X, y el mayor porcentaje de reducción en el eje Y fue de 73.030% aplicando la carga EW\_NDP05Y.

Figura 5.3: Columna seleccionada para el análisis



Fuente: Elaboración Propia

La columna que se mostró en la figura 5.2 es una columna que se apoya sobre una viga de cimentación y esta viga de cimentación se apoya sobre un aislador como se puede ver en la figura 5.3; a continuación se mostrará los resultados de la comparación de la fuerza axial de la columna cuando es sometida a cargas sísmicas.

Tabla 5.6: Comparación de fuerzas axiales en columna  
Columna Aislador – Orientación E-W

COLUMNA BASE FIJA		COLUMNA SOBRE AISLADOR BASE FIJA		
CARGA	FUERZA (t)	CARGA	FUERZA (t)	Reducción de Fuerzas (%)
Sismo X	3.94	EW_Ancash70X	4.48	<b>-13.74%</b>
Sismo Y	5.66	EW_Ancash70Y	4.32	<b>23.72%</b>
Sismo X	3.94	EW_Lima66X	4.32	<b>-9.72%</b>
Sismo Y	5.66	EW_Lima66Y	4.27	<b>24.57%</b>
Sismo X	3.94	EW_Lima74X	4.52	<b>-14.68%</b>
Sismo Y	5.66	EW_Lima74Y	4.31	<b>23.93%</b>
Sismo X	3.94	EW_NDP05X	4.07	<b>-3.39%</b>
Sismo Y	5.66	EW_NDP05Y	4.09	<b>27.83%</b>
Sismo X	3.94	EW_Pisco07X	4.52	<b>-14.65%</b>
Sismo Y	5.66	EW_Pisco07Y	4.24	<b>25.21%</b>

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 5.6 las fuerzas axiales disminuyen (porcentaje con signo positivo) y en otros casos aumentan (porcentaje con signo negativo); en caso de disminución el mayor porcentaje se ve cuando se aplica la carga EW\_NDP05Y con 27.83% y en el caso de aumento de fuerza se puede ver el mayor porcentaje cuando se aplica la carga EW\_Lima74X con 14.68%.

Tabla 5.7: Comparación de fuerzas axiales en columna  
Columna Aislador – Orientación N-S

COLUMNA BASE FIJA		COLUMNA SOBRE AISLADOR BASE FIJA		
CARGA	FUERZA (t)	CARGA	FUERZA (t)	Reducción de Fuerzas (%)
Sismo X	3.94	NS_Ancash70X	4.41	<b>-11.97%</b>
Sismo Y	5.66	NS_Ancash70Y	4.26	<b>24.81%</b>
Sismo X	3.94	NS_Lima66X	4.30	<b>-9.12%</b>
Sismo Y	5.66	NS_Lima66Y	4.22	<b>25.42%</b>
Sismo X	3.94	NS_Lima74X	4.34	<b>-10.07%</b>
Sismo Y	5.66	NS_Lima74Y	4.22	<b>25.49%</b>
Sismo X	3.94	NS_NDP05X	4.10	<b>-3.97%</b>
Sismo Y	5.66	NS_NDP05Y	3.98	<b>29.67%</b>
Sismo X	3.94	NS_Pisco07X	4.41	<b>-11.84%</b>
Sismo Y	5.66	NS_Pisco07Y	4.11	<b>27.35%</b>

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 5.7 las fuerzas axiales disminuyen (porcentaje con signo positivo) y en otros casos aumentan (porcentaje con signo negativo); en caso de disminución el mayor porcentaje se ve cuando se aplica la carga NS\_NDP05Y con 29.67% y en el caso de aumento de fuerza se puede ver el mayor porcentaje cuando se aplica la carga NS\_Ancash70X con 11.97%.

# CONCLUSIONES

1. El sistema de aislamiento propuesto se realizó de la manera más sencilla posible. No se utilizó teflón (material que se usa normalmente para aisladores del tipo péndulo friccional) es por eso que el sistema se desgastó y no pudo resistir más ciclos de ensayos que los descritos en la tesis.
2. Definitivamente se concluye que el sistema no puede ser utilizado en ninguna edificación o estructura importante, esto se debe a su alta fricción entre material acero – acero lo cual produce un alto desgaste entre las superficies del sistema.
3. El sistema propuesto se desgastó de manera más notoria en los últimos ciclos de carga cuando estaba en “Estado Vulnerable” y luego en los ciclos de carga cuando estaba en “Estado de Falla” finalmente el sistema ya no podía deslizarse más por el desgaste de la superficie.
4. La energía disipada para el Estado Normal tiene un mínimo de 112.72 ton-mm y máximo de 332.11 ton-mm; para el Estado Vulnerable tiene un mínimo de 186.11 ton-mm y máximo de 928.123 ton-mm; para el Estado de Falla tiene un mínimo 114.773 ton-mm y un máximo de 258.465 ton-mm.
5. El coeficiente de fricción que se calculó para el Estado Normal tiene un mínimo de 0.13 y un máximo 0.25; para el Estado Vulnerable tiene un mínimo de 0.17 y un máximo 0.39; para el Estado de Falla se obtuvo un mínimo de 0.23 y un máximo de 0.49.
6. La energía disipada por los aisladores para la dirección X y para la orientación E-W como para la orientación N-S sólo para cuando se aplicó la carga EW\_NDP05X tiene un valor menor del 60% de la energía de entrada sísmica, mientras para las demás cargas tienen un valor mayor de 70%; para la orientación N-S cuando se aplicó la carga NS\_NDP05X la energía tiene un valor del 51.02% de la energía de entrada sísmica, mientras para las demás cargas se obtuvo un valor mayor al 70%.
7. Para la dirección Y con orientación E-W, la energía disipada por los aisladores son mayores al 80% de la energía de entrada sísmica a excepción de cuando se aplicaron las cargas EW\_Lima74Y (78.46% de la energía de entrada) y EW\_NDP05Y (69.17% de la energía de entrada sísmica); para la orientación N-S el porcentaje de disipación de energía es mayor al 80% cuando se aplicaron todas las cargas a excepción de la carga NS\_NDP05Y que se obtuvo un 66.37% de la energía de entrada sísmica.
8. La edificación está modelado con un aislador del tipo péndulo friccional (FPS) el cual tiene un mayor radio de superficie, las propiedades de la rigidez lineal según el peso total de la edificación y una fricción teflón-acero esto hace que el movimiento de la estructura sea el esperado en el análisis. Si en caso no se hubiera considerado estas características en el modelamiento, simplemente el movimiento de la edificación no hubiera sido el esperado.
9. El porcentaje de efectividad de la edificación aislada con respecto a la edificación con base varía para el eje X orientación E-W entre 76% - 99%; para el eje X orientación N-

S varía entre 76% - 100%. El porcentaje de efectividad para el eje Y orientación E-W varía entre 91% - 100%, mientras que para la orientación N-S varía entre 93% - 100%.

10. Los desplazamientos de la edificación con base aislada son mucho mayor que el de una base fija, pero la edificación se mueve como si fuera un cuerpo rígido haciendo que no se formen distorsiones de valores muy elevados.
11. Colocar un sistema de aislamiento en la base de una edificación reduce en alto porcentaje las distorsiones a comparación de una edificación con base fija.
12. El sistema propuesto no tiene una fuerza que restablezca al aislador a su posición original a comparación de otros sistemas de aislamiento como los aisladores elastomérico.

## RECOMENDACIONES

1. Usar un material como el teflón para que este debajo del tubo macizo para que el deslizamiento en la superficie base sea más liso y se produzca un coeficiente de fricción bajo, y así el coeficiente puede reducirse y variar entre 0.05 y 0.12.
2. Realizar más ensayos al sistema propuesto para obtener más información sobre su comportamiento y llegar a una mejor conclusión sobre los resultados obtenidos.
3. Para el análisis no-lineal en el software, la carga muerta “DEAD” tiene que cambiarse de carga estática a carga no-lineal del tipo Tiempo-Historia; y posteriormente cada carga del tipo tiempo-historia (EW\_Ancash70, EW\_Lima66, EW\_Lima74, NS\_Pisco07, etc) tiene que elegir la opción continuar del estado de la carga muerta “DEAD”. Este procedimiento se realiza para que el análisis tiempo-historia se realice en menos tiempo, también conocido como Fast Nonlinear Analysis (FNA).
4. Cuando se realiza el FNA, se tiene que cambiar la carga Modal del tipo tipo Eigen Vectors a Ritz Vector.



## BIBLIOGRAFÍA

- BEDRIÑANA MERA, LUIS ALBERTO. “Propuesta de un sistema económico de aislamiento sísmico para viviendas”. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 2009.
- BOZZO L. M., BARBAT A. H. “Diseño Sismorresistente de Edificios”. Reverte S.A. Barcelona, 2000.
- KORSWAGEN P., ARIAS J., HUARINGA P. “Análisis y diseño de estructuras con aisladores sísmicos en el Perú”. Editorial PUCP. Lima, 2012.
- SYMANS, MICHAEL D. “Seismic Protective Systems: Seismic Isolation”. Instructional Material Complementing FEMA 451. Estados Unidos, 2012.
- MEZA BLANDÓN, R. “Análisis de aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento con SAP2000”. Nicaragua, 2010.
- TORUNBALEI N., OZPALANLAR G. “Earthquake Response Analysis of Mid-Story Buildings Isolated with various seismic Isolation Techniques”. World Conference on Earthquake Engineering. China, 2008.
- QUAGLINI V., GANDELLI E., DUBINI P., VAZZANA G. y FARINA G. “Re-Centring Capability of Friction Pendulum System: Experimental Investigation”. Second European conference on Earthquake Engineering and Seismology. Istanbul, 2014.
- MORENO D., YAMIN I. y REYES J. “Estudio Experimental de Aisladores Sísmicos Tipo Péndulo de Fricción en Modelos a Escala Reducida”. Universidad de los Andes. Colombia, 2006.
- CONSTANTINO, MICHAEL C. “Friction Pendulum Double Concave Bearing”. State University of New York. Estados Unidos, 2004.
- COMPUTERS & STRUCTURES INC. “CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSI BRIDGE”. California, 2011.
- ARRIAGADA ROSAS, JAIME ANDRES. “Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos. (Análisis Comparativo de Comportamiento y Costos con un Edificio Tradicional)”. Universidad Austral de Chile. Chile. 2005.

- SMIRNOV V., EISENBERG J. y VASIL'EVA A. "Seismic Isolation of Buildings and Historical Monuments. Recent Developments in Russia". 13th World Conference on Earthquake Engineering. Canadá, 2004
- NADERZADEH, AHMAD. "Historical Aspects of Seismic Base Isolation Application". JSSI 15th Anniversary International Symposium on Seismic Response Controlled Buildings for Sustainable Society. Japón, 2009.
- PROAÑO TATAJE, LUIS RICARDO. "Diseño Estructural con Aisladores de base de la Nueva Biblioteca de la FIC UNI (2da parte)". Boletín Informativo Asocem. Perú, 2011.
- VILLARREAL G., OVIEDO R. "Edificaciones con Disipadores de Energía". Lima, 2009.

## ANEXOS

### A1. ANEXO N°1. PANEL FOTOGRÁFICO

Imagen A1-1: Fabricación de la plancha superior



Fuente: Taller de mecánica

Imagen A1-2: Fabricación del tubo macizo



Fuente: Taller de mecánica

Imagen A1-3: Fabricación de la plancha inferior



Fuente: Taller de mecánica

Imagen A1-4: Colocación y previa soldadura a plancha de tope



Fuente: Taller de mecánica

Imagen A1-5: Colocación de pintura al sistema de aislamiento



Fuente: Taller de mecánica

Imagen A1-6: Soldadura de los aleros a la plancha superior



Fuente: Taller de mecánica

Imagen A1-7: Sistema de aislamiento propuesto del tipo FPS



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Imagen A1-8: Montaje de piezas mecánicas para el ensayo



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Imagen A1-9: Montaje de piezas mecánicas para el ensayo



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Imagen A1-10: Montaje Final de las piezas mecánicas



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras



Imagen A1-11: Raspadura o desgaste de la superficie después del ensayo



Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Imagen A1-12: Raspadura o desgaste de la superficie de deslizamiento



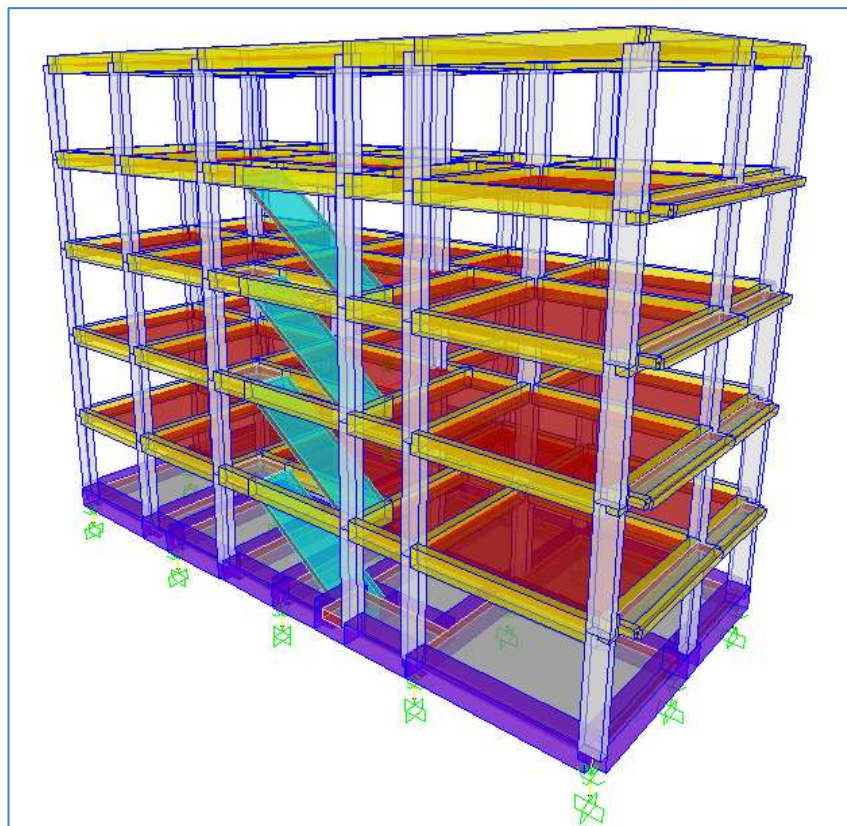
Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Imagen A1-13: Raspadura o desgaste del tubo macizo



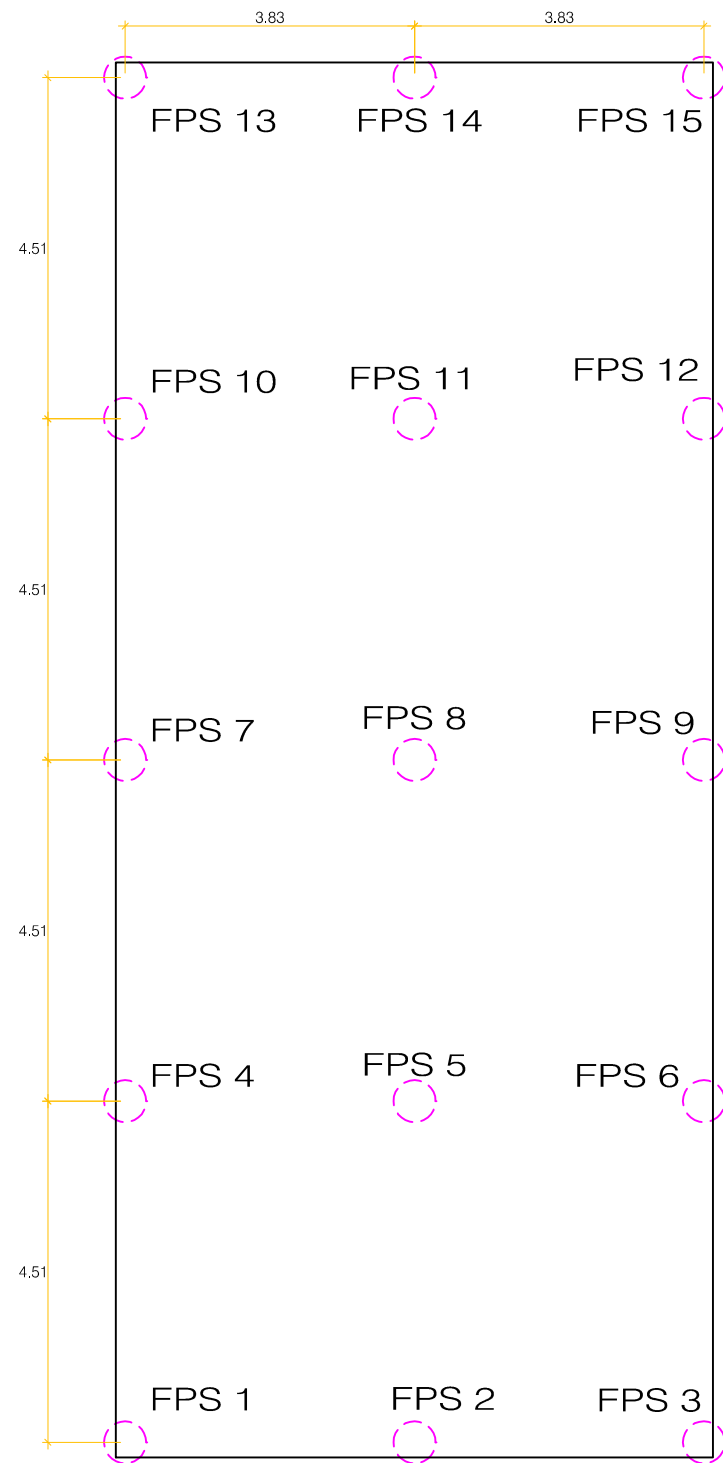
Fuente: CISMID (2014) Laboratorio de Estructuras

Figura A1-1: Vista 3D – Edificación con aisladores del Tipo péndulo Friccional

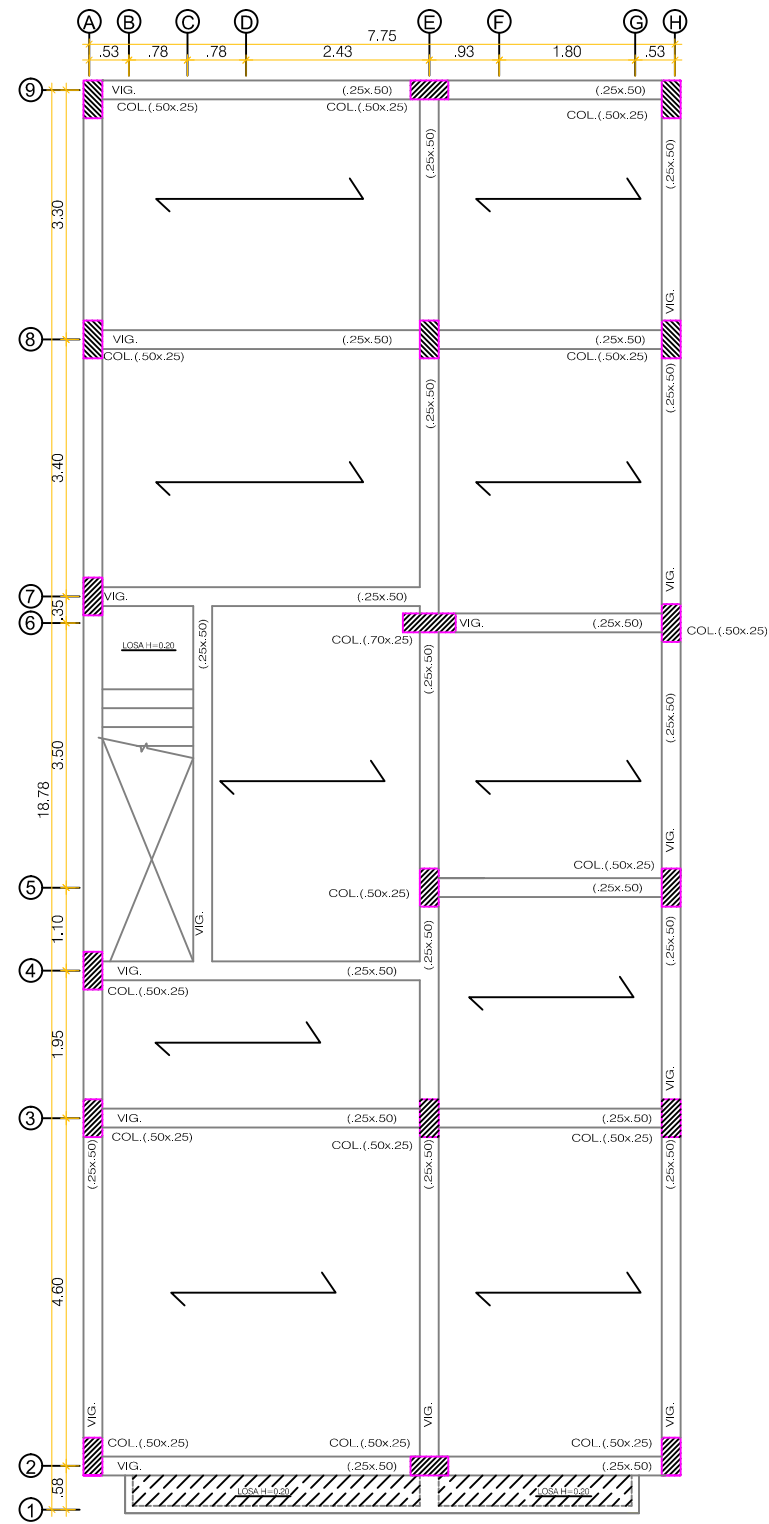


Fuente: Elaboración Propia

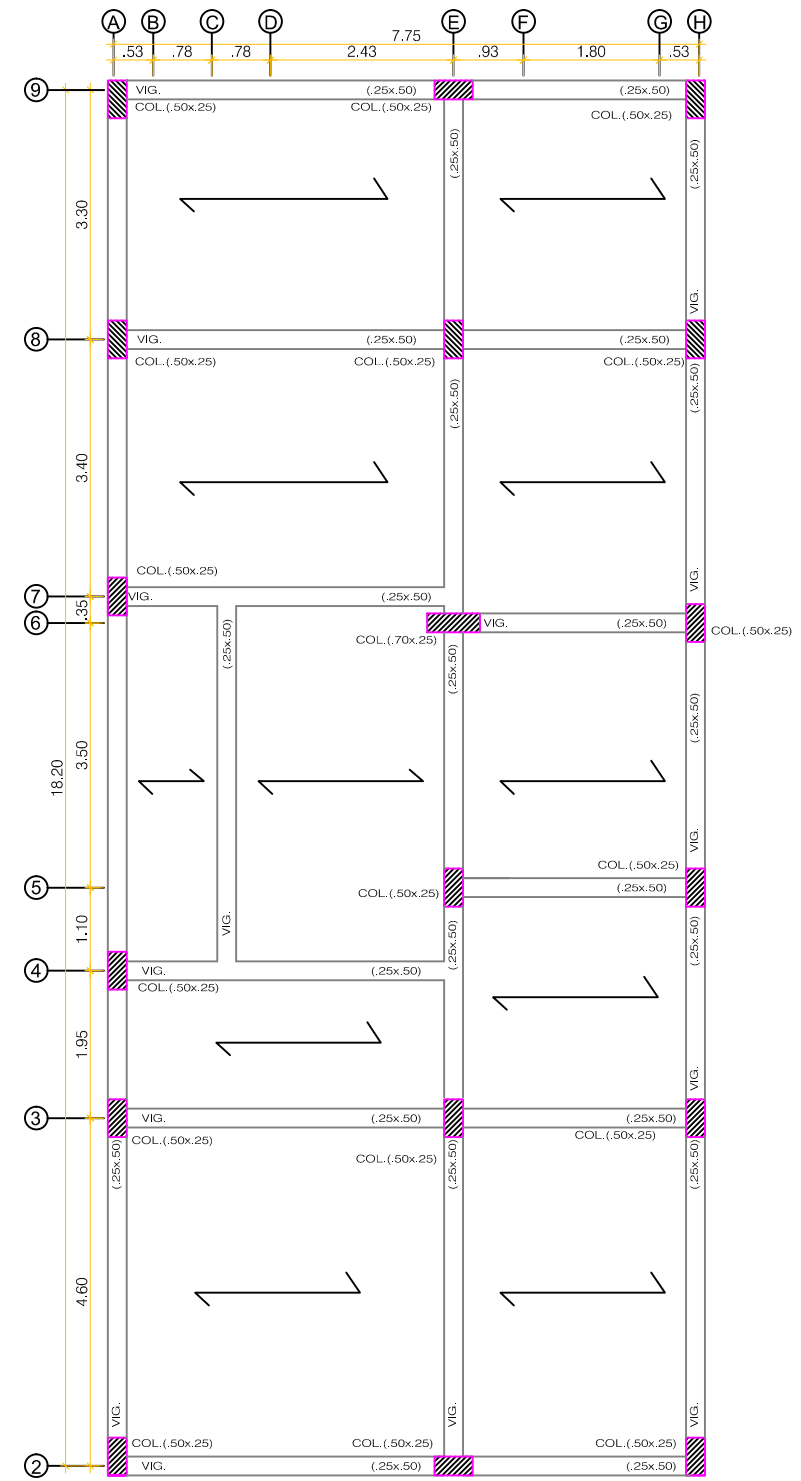
## A2. ANEXO N°2. PLANOS



**UBICACIÓN DE LOS AISLADORES FPS**  
N.F.P. +0.00



**ENCOFRADO 1°, 2°, 3° y 4° PISO**  
S/C=250 Kg/m<sup>2</sup>  
N.F.P. +2.65  
N.F.P. +5.30  
N.F.P. +7.95  
N.F.P. +10.60



**ENCOFRADO 5° PISO**  
S/c=100 Kg/m<sup>2</sup> N.F.P. +13.25



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**PROYECTO:**

Análisis de una Edificación Mediante un Sistema Propuesto de Aislamiento del Tipo Pendulo Friccional

**PLANO:**

Cimentación - Encofrados

**DISEÑO:**

Jorge Mestanza Acevedo

**ESCALA:**

1:100

**E-01**