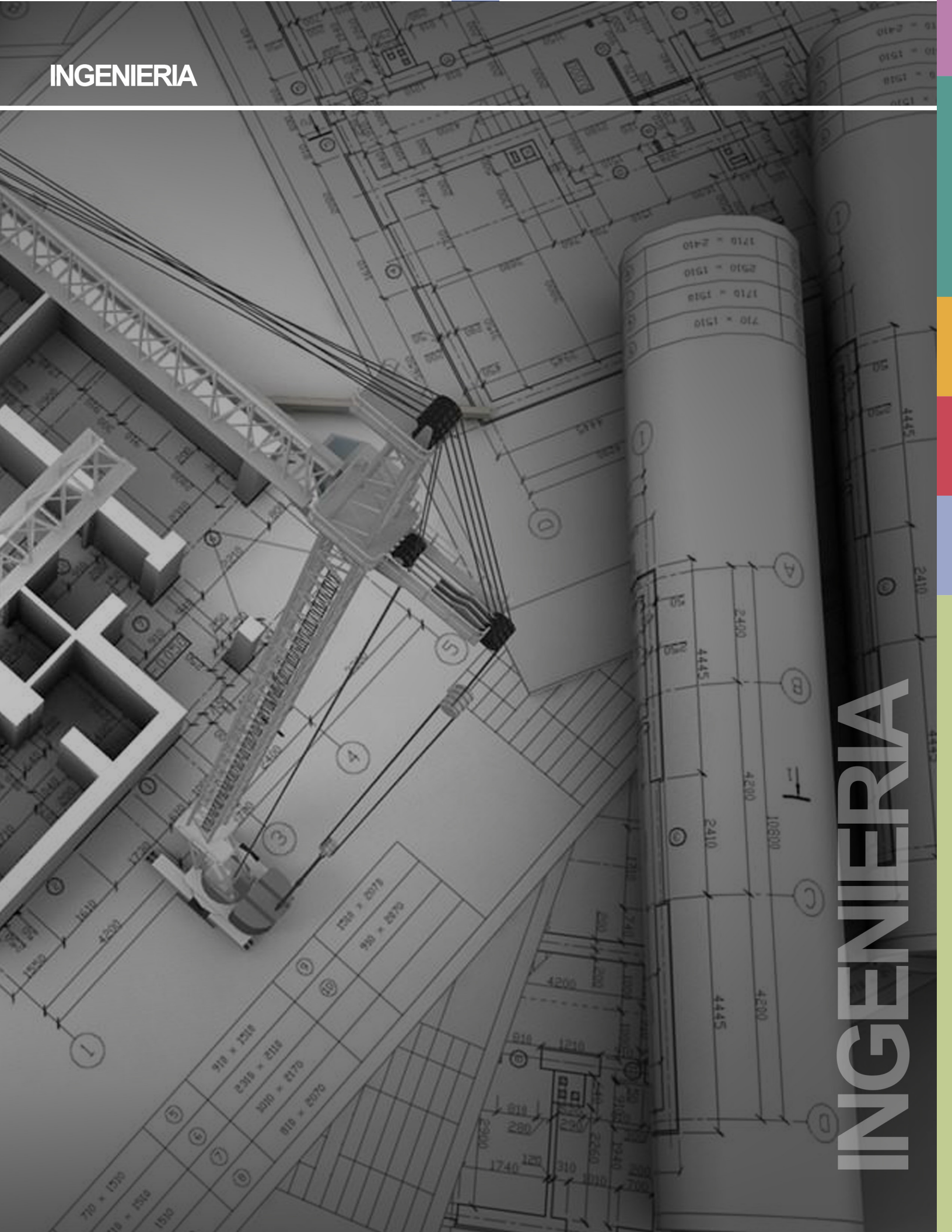


INGENIERIA



INGENIERIA

# IMPLEMENTACIÓN DE AISLADORES SÍSMICOS EN BLOQUE ESTRUCTURAL 1 DEL NUEVO CENTRO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS DE LA UNIVERSIDAD DE FUERZAS ARMADAS ESPE

Roberto Aguiar<sup>1</sup>, Byron Guaygua<sup>2</sup>, Pablo Caiza<sup>1</sup>, Enrique Morales<sup>1,3</sup>, y Marcelo Marcial<sup>4</sup>

## Resumen

Recibido: 12 de mayo de 2015  
Evaluado: 15 de julio de 2015  
Aceptado: 03 de agosto de 2015

La Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, planificó la construcción del nuevo Centro de Investigaciones Científicas y de Post grados, para el efecto se diseñaron 8 bloques estructurales en acero, en la forma tradicional, sin sistemas de control pasivo. Considerando que es una obra emblemática dentro de la universidad y, sobre todo, teniendo en cuenta los laboratorios y equipos informáticos que tendrán, se decidió en algunos bloques estructurales colocarles aisladores sísmicos para limitar los desplazamientos laterales y aceleraciones. En este artículo se comparan los resultados obtenidos en el bloque estructural 1 sin aisladores, que corresponde al diseño original, y con aisladores, que es la nueva propuesta de cálculo. En este contexto se presenta brevemente el marco teórico con el que se realizó el análisis sísmico en las estructuras sin y con aisladores; donde, además, se empleó el método de superposición modal.

**Palabras clave:** aisladores sísmicos, método de superposición modal, estructura aislada.

<sup>1</sup>Ecuatoriano. Doctor. en Ingeniería. Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de Fuerzas Amadas ESPE. Correo electrónico: rraguiar@espe.edu.ec

<sup>2</sup>Ecuatoriano. Ingeniero. Departamento de Construcciones. Cuerpo de Ingenieros del Ejército, Quito, Ecuador

<sup>3</sup>Ecuatoriano. Candidato a Doctor. Graduate Research Assistant. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, 14260, U.S.A.

<sup>4</sup>Ecuatoriano. Ingeniero. Consultor estructural

## SEISMIC ISOLATION IMPLEMENTED FOR THE STRUCTURAL BLOCK 1 IN THE NEW SCIENTIFIC RESEARCH CENTER ESPE UNIVERSITY OF ARMED FORCES

Roberto Aguiar<sup>1</sup>, Byron Guaygua<sup>2</sup>, Pablo Caiza<sup>1</sup>, Enrique Morales<sup>1,3</sup>, y Marcelo Marcial<sup>4</sup>

### Abstract

Universidad de Fuerzas Armadas ESPE planned the construction of the new Scientific Research and Posgrades Center. Eighth steel structural blocks were designed in the traditional way, without passive control systems. Since this is a flag building inside the university and, taking into account the cost of the laboratories and hardware equipment, it was decided that some structural blocks will work with seismic isolators to limit the lateral displacements and accelerations. In this paper, the results are compared in the structural block 1 without isolators, the original design, and with isolators, the new proposed design. In this way, the seismic analysis theoretical frame is briefly presented for structures without and with isolators. The modal superposition method is employed for this purpose.

**Key words:** seismic isolators, modal superposition method, seismic isolated structure

# IMPLEMENTAÇÃO DE ISOLADORES SÍSMICOS NO BLOCO ESTRUTURAL 1 DO NOVO CENTRO DE PESQUISAS CIENTÍFICAS DA UNIVERSIDAD DE FUERZAS ARMADAS, ESPE.

Roberto Aguiar<sup>1</sup>, Byron Guaygua<sup>2</sup>, Pablo Caiza<sup>1</sup>, Enrique Morales<sup>1,3</sup>, y Marcelo Marcial<sup>4</sup>

## Resumo

A Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, planejou a construção do novo Centro de Pesquisas Científicas e pós-graduação; para isto, foram desenhados 8 blocos de aço estrutural, na forma tradicional, sem sistemas de controle passivo. Levando em conta de que é uma obra emblemática dentro da universidade e, sobretudo, ponderando os laboratórios e equipamentos informáticos que terão, decidiu-se, em alguns blocos estruturais, colocar isoladores sísmicos para impedir os movimentos laterais e acelerações. Neste artigo, apresenta-se o marco teórico com o que realizou-se a análise sísmica nas estruturas sem e com isoladores, onde – além disto – usou-se o método de superposição modal.

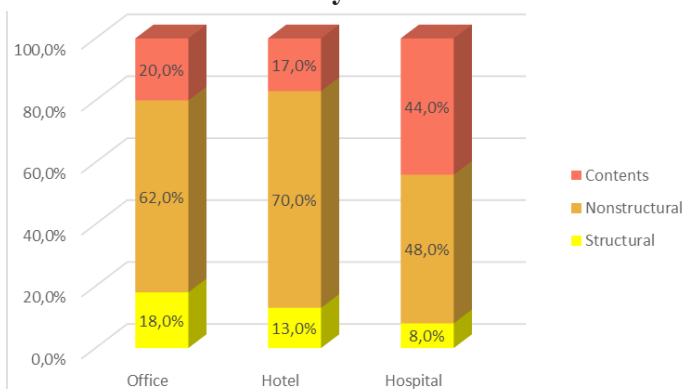
**Palavras-chave:** isoladores sísmicos, método de sobreposição modal, estrutura isolada.

## Introducción

A partir de las millonarias pérdidas dejadas por los sismos de Northridge (Los Ángeles, Estados Unidos, en 1994) y en Kobe (Japón, en 1995), se cambió la filosofía de diseño y se pasó al análisis sísmico por desempeño, debido a que las estructuras diseñadas en el siglo pasado tenían un buen comportamiento estructural pero el gran daño que experimentaban los elementos no estructurales y los contenidos de los mismos era demasiado alto FEMA-E74 (2011), Aguiar (2003).

En la figura 1 se presenta un trabajo desarrollado por Miranda y Taghavi (2003) en el que se aprecia el porcentaje que representa cada una de las partes que conforman una edificación, en tres tipos de estructuras comunes, según el uso de las mismas y la referencia: oficinas, hoteles y hospitales. En base a esto se podría indicar que, en caso de que exista daño, el mayor porcentaje corresponderá a los componentes y los elementos no estructurales, ya que el porcentaje estructural en todas ellas es bastante bajo. De esta forma, se cumple con los criterios de diseño que se tenían en el siglo pasado, de que ante un sismo severo las estructuras sufren daño pero no colapsan.

**Figura 1. Porcentaje de pérdidas en función del uso de las estructuras y clasificadas en: estructural, no estructural y contenidos**



Fuente: Miranda, 2003

El daño estructural es bajo pero el daño no estructural es alto y por ende las pérdidas que implican la reparación de los mismos. Las pérdidas en los contenidos (equipos que se caen; instalaciones de aire acondicionado, etc.) son bastante altas, especialmente en hospitales y oficinas.

En la figura 2 se aprecia una vista de lo que será el nuevo Centro de Investigaciones y de Post grados de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE y se observa que en sus fachadas el elemento que predomina es el vidrio, Al decidirse que la estructura fuese de acero, con alturas de piso de 4.94 m. y luces que están alrededor de los 10 m., es lógico pensar que se tienen estructuras que se van a desplazar demasiado. Claro está que las derivas de piso son menores al 2% permitidas por la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2015, NEC-15.

**Figura 2. Vista panorámica del nuevo Centro de Investigaciones y Post Grados de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.**



Fuente: Álvarez (2015)

Al tener la estructura original grandes desplazamientos laterales, que se encuentran dentro de lo permitido por el NEC-15, el daño en los elementos no estructurales va a ser alto al igual que las pérdidas en los componentes. Por este motivo es que se decidió colocar aisladores sísmicos para que las derivas de piso de la estructura sean bajas y de esta manera se controla el daño no estructural y sus contenidos, Aguiar *et al.* (2008), FEMA-E74 (2011); Christopoulos y Filiatrault (2006).

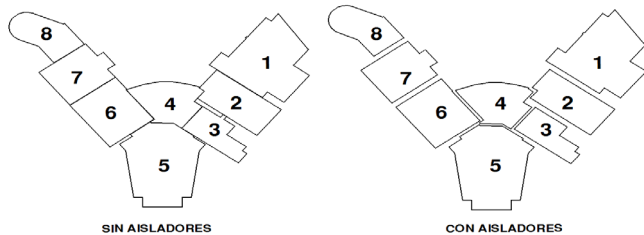
## Descripción de la Estructura

A la izquierda de la figura 3, se aprecian los 8 bloques estructurales de la estructura sin aisladores sísmicos, las juntas de construcción que existen son de 30 cm., en cambio a la derecha se presentan los bloques estructurales más separados ya que corresponde a las estructuras con aisladores sísmicos.

En la estructura aislada, entre bloque y bloque estructural la separación es de 1.20 m. Se van a aislar los bloques 1, 2, 3, 6, 7 y 8. En este artículo se analiza el bloque 1 que está destinado al Centro de Investigaciones de Ciencias de la Tierra y la Construcción, y de Mecánica.

Los bloques estructurales 4 y 5 no se aíslan, pero las juntas de construcción con respecto a los bloques 2, 3 y 6 son de 80 cm.

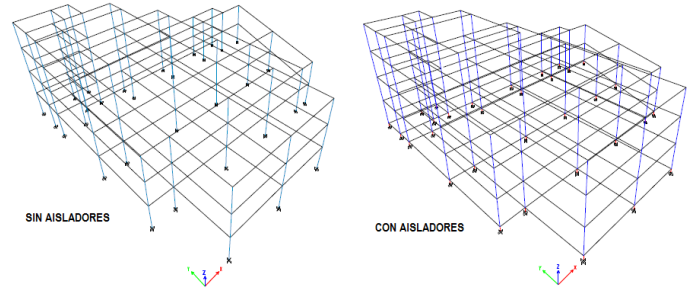
**Figura 3. Vista en planta de los bloques estructurales del nuevo Centro de Investigaciones Científicas y de Post Grados. A la izquierda se muestra el diseño sin aisladores y a la derecha con aisladores.**



**Fuente:** Aguiar, Guaygua, Caiza, Morales y Marcial, 2015

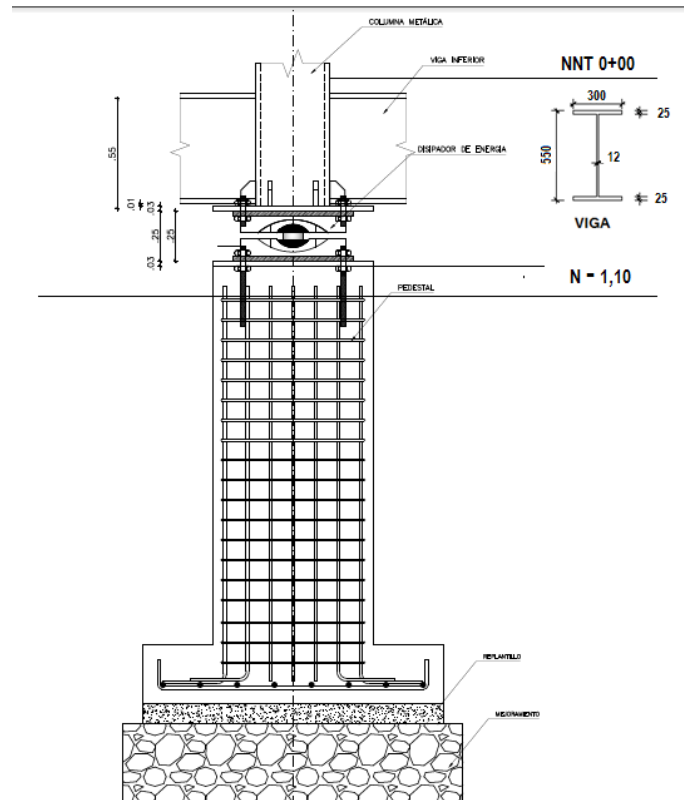
En la figura 4 se presenta otra panorámica del bloque estructural 1, sin aisladores, a la izquierda y con aisladores a la derecha, los mismos que van colocados sobre los pedestales de la cimentación.

**Figura 4. Panorámica del bloque estructural 1, sin aisladores sísmicos a la izquierda y con aisladores sísmicos a la derecha**



**Fuente:** Aguiar, et al., 2015

**Figura 5. Detalle constructivo de la unión del aislador con el pedestal de cimentación y con la viga de acero de la losa de aislación.**



**Fuente:** Aguiar, et al., 2015

Se define nivel natural del terreno NNT, a aquel nivel horizontal que queda luego de conformar las plataformas sobre las que van cada bloque estructural.

Este NNT es el nivel N 0+00. Ahora bien, a partir de este nivel se debe realizar una excavación de 1.10 m., para a partir de esta cota, sobresalir el pedestal de la cimentación 15 cm., como se aprecia en la figura 5; el aislador FPS (Frictional Pendulum System) tiene una altura de 25 cm., incluido el espesor de las placas del mismo que son de 2.5 cm., en la parte superior e inferior. El aislador a su vez se encuentra sobre una placa de acero de 3 cm., de espesor tanto en la parte superior como inferior; la placa inferior se encuentra sobre el pedestal y debe ser fundida monolíticamente con el hormigón, en cambio la placa de acero superior se encuentra bajo la viga de acero tipo "I" de la viga de aislación que tiene una altura de 55 cm., en la parte superior derecha de la figura 5 se muestra la sección transversal de la viga.

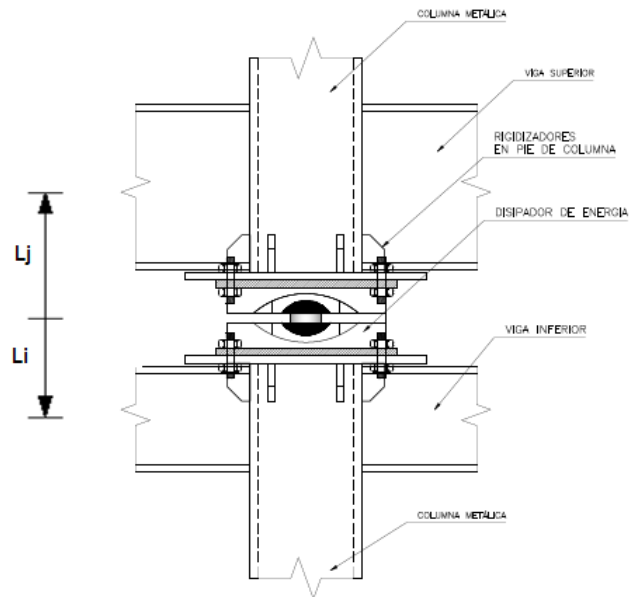
Sobre la viga del sistema de aislación va una losa de placa colaborante tipo deck que tiene una altura promedio de 10 cm. Sobre esta losa se tiene el Nivel 0+00 del Proyecto.

### Marco Teórico

Tanto para el análisis sísmico de la estructura, sin y con aisladores sísmicos, se utilizó el método de superposición modal, considerando tres grados de libertad por planta: dos componentes de desplazamiento horizontal y una rotación de piso con relación a un plano perpendicular a la losa.

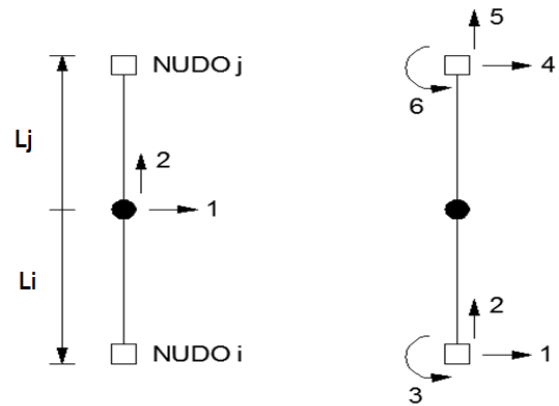
En general el aislador se modela como un elemento corto cuya longitud  $LL$  va desde la mitad de la viga inferior hasta la mitad de la viga superior, como se observa en la figura 6; para este elemento corto se debe encontrar la matriz de rigidez en coordenadas globales, Aguiar (2012), ASCE 7-10.

Figura 6. Aislador sísmico entre dos vigas de acero de diferente altura. Modelo como elemento corto



Fuente: Aguiar, et al., 2015

Figura 7. Elemento corto en coordenadas locales y globales.



Fuente: Aguiar, et al., 2015

A la izquierda de la figura 7, se indica el sistema de coordenadas locales del elemento aislador, cuya matriz de rigidez es  $k_o k_o$  y a la derecha el sistema de coordenadas globales, cuya matriz de rigidez es  $k_3 k_3$ . Aguiar (2014).

$$k_o = \begin{bmatrix} k_{ef} & 0 \\ 0 & k_v \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde  $k_{ef}$  es la rigidez efectiva del aislador, también conocida como rigidez secante, se obtiene del diagrama de histéresis que relaciona la fuerza con el desplazamiento lateral;  $k_v$  es la rigidez vertical del aislador.

La matriz de paso del sistema de coordenadas locales a globales  $T$ , también conocida como matriz cinemática es la siguiente:

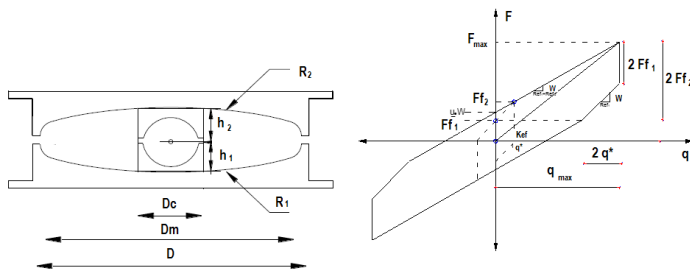
$$T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & L_i & 1 & 0 & L_j \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$k_3 = T^t k_o T \quad (3)$$

El significado de las variables  $L_i, L_j, L_v, L_p$ , está indicado en la figura 6.

El análisis sísmico se realizó con un aislador FPS (Frictional Pendulum System) de la segunda generación, que tiene dos superficies cóncavas como se observa a la izquierda de la figura 8. La concavidad inferior tiene un radio de curvatura  $R_1$  y un coeficiente de roce  $\mu_1$ ; la concavidad superior tiene un radio  $R_2$  y un coeficiente de roce  $\mu_2$ . El cojinete tiene un diámetro  $D_c$ ; la superficie cóncava un diámetro  $D_m$ , y el aislador un diámetro  $D$ . No se ha acotado la longitud de las placas exteriores, Constantinou *et al.* (2011).

**Figura 8. Aislador FPS de la segunda generación.**



Fuente: Aguiar, et al., 2015

A la derecha de la figura 8 se presenta un modelo simplificado del diagrama de histéresis de la segunda generación (Fenz y Constantinou, 2008). Inicialmente el

aislador empieza a trabajar en uno de las concavidades, en la figura 8 se ha indicado la superficie cóncava inferior, a esto se denomina fase I; luego cuando alcanza un desplazamiento lateral  $q^*$ , empieza a trabajar también la otra superficie cóncava, con una rigidez tangente  $\frac{W}{R_{ef1} + R_{ef2}}$ , a esto se denomina fase II. Existe una fase III que involucra a los topes del aislador, la cual se puede suprimir porque el sismo debería ser sumamente intenso para que trabajen los topes.

Con esta simplificación, se tiene que la rigidez efectiva  $k_{ef}$  es igual a la fuerza  $F_{max}$  en el ciclo de histéresis dividida para  $q_{max}$ . El cálculo se realiza en forma interactiva por que no se conoce el desplazamiento  $q_{max}$ , uno se impone un desplazamiento inicial en base a este valor se determina el diagrama de histéresis y básicamente la rigidez efectiva, el período efectivo  $T_{ef}$ , y el amortiguamiento efectivo  $\zeta_{ef}$ . (Fadi y Constantinou, 2010).

$$k_{ef} = \frac{F_{max}}{q_{max}} \quad (4)$$

$$T_{ef} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g k_{ef}}} \quad (5)$$

$$\zeta_{ef} = \frac{E_D}{4\pi E_E} \quad (6)$$

Las variables todavía no definidas son:  $W$  que es el peso que gravita sobre el aislador;  $E_D$ , es la energía disipada en un ciclo de histéresis;  $E_E$  es la energía elástica.

Con el período encontrado  $T_{ef}$  se ingresa al espectro hallado para el  $\zeta_{ef}$ , que es mayor al 5%, y se halla el nuevo desplazamiento  $q$ , se compara este valor con el impuesto  $q_{max}$ , y si es menor que una tolerancia



dada habrá finalizado el cálculo, caso contrario se repite el procedimiento descrito en este apartado. En Aguiar *et al.* 2014, está muy bien detallado el cálculo de la rigidez y amortiguamiento efectivo; al igual que la determinación de las dimensiones del aislador con base en las cargas verticales y a las propiedades del material. Una vez que se tiene la matriz de rigidez del elemento aislador en coordenadas globales, se realizó el análisis sísmico por el método de superposición modal, empleando el espectro prescrito en la Norma Ecuatoriana de la Construcción, para un perfil de suelo tipo C (Bonifaz, 2015). Se utilizó el criterio de combinación modal del CQC (Combinación cuadrática completa, Chopra, 2001).

### Espectros reducidos

Para la estructura sin aisladores sísmicos se consideró un factor de reducción de las fuerzas sísmicas  $R = 6$   $R = 6$ . (Aguiar 2007) y para la estructura con aisladores se trabajó con  $R = 2R = 2$  para la superestructura y un valor  $BB$  para el sistema de aislación, (Achisina 2001).

$$R = R_{\mu} R_r R_s R = R_{\mu} R_r R_s \quad (7)$$

Donde  $R_{\mu}$  es el factor de reducción por ductilidad;  $R_r$  es el factor de reducción por redundancia y  $R_s$  es el factor de reducción por sobre resistencia. El NEC-15 permite considerar un valor máximo de  $R = 8$   $R = 8$ , para la tipología estructural del Bloque 1.

$$B = \left( \frac{\xi_{ef}}{0.05} \right)^{0.3} \quad (8)$$

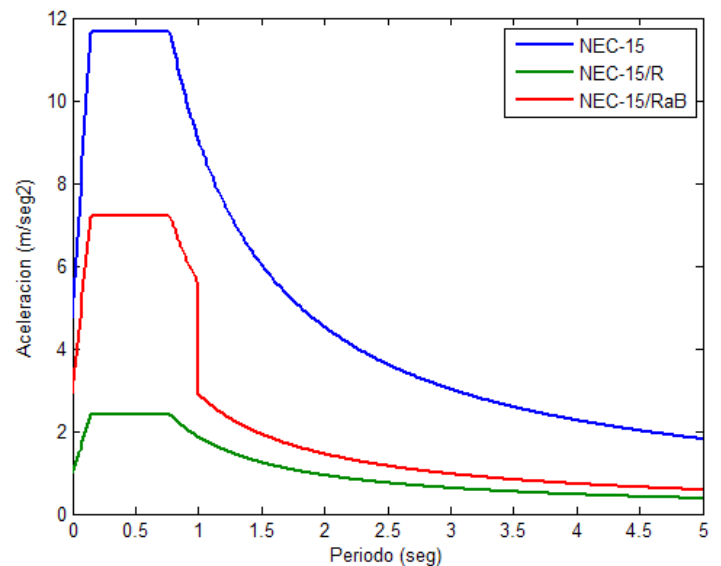
En resumen, para la estructura sin aisladores, el espectro inelástico de análisis se obtiene dividiendo el espectro elástico para 5 % de amortiguamiento para el valor

de  $RR$ . En cambio para la estructura con aisladores el espectro se halla dividiendo el espectro elástico para 5 % de amortiguamiento para  $RR$  en la zona de períodos cortos y para  $BB$  en la zona de períodos largos donde va a trabajar el sistema de aislación.

En la estructura con aisladores se debe encontrar primero los modos de vibración y observar los períodos de los primeros modos (que están asociados al sistema de aislación) para determinar el valor de  $t_0$  que es el período a partir del cual el espectro se divide para B.

En la parte superior de la figura 9 se presenta el espectro elástico, propuesto por el NEC-15, para el campus de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, en un perfil de suelo tipo "C". Posteriormente se aprecia el espectro inelástico para la estructura con aisladores sísmicos y finalmente el espectro inelástico para la estructura sin aisladores.

**Figura 9. Espectros: Elástico de NEC-15; Inelástico para estructura sin aisladores e inelástico para estructura con aisladores sísmicos.**



Fuente: Aguiar, et al., 2015

El Bloque 1 tiene 4 pisos, al considerar tres grados de libertad por planta, la estructura sin aisladores tiene 12 grados de libertad. Por lo tanto, se tiene 12 modos de vibración y 12 períodos; los tres primeros valores son: 1.21 s; 1.04 s; y 0.96 s; con estos valores en el espectro inelástico se encuentran valores altos ya que se encuentran muy cerca de la plataforma de aceleración máxima.

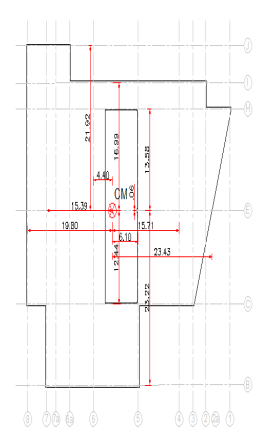
En cambio, en la estructura con aisladores sísmicos se tienen 5 losas; las cuatro de la estructura inicial en los niveles 4.94; 9.88; 14.82 y 19.76, y adicionalmente se tiene la losa de aislación en el nivel 0.00. Por lo tanto se tienen 15 grados de libertad y los tres primeros períodos de vibración son: 2.09 s; 1.94 s; y 1.67 s; con estos valores las ordenadas espectrales que se hallan en el espectro inelástico dividido para *RR* y para *BB*, son menores, en relación a la estructura sin aisladores.

Con los aisladores sísmicos se lleva a la estructura a la zona de períodos largos donde las ordenadas espectrales son menores.

### Estructura sin aisladores

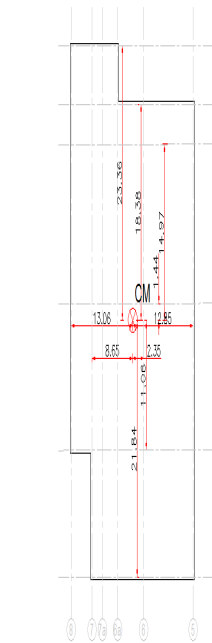
La estructura es irregular en planta y elevación. Por este motivo no son colineales los Centros de Masa (CM), como se aprecia en las figuras 10 a 12. Los grados de libertad se consideraron en el CM para que la matriz de masas sea diagonal y se numeraron de abajo hacia arriba, primero los asociados a la dirección X, luego en la dirección Y, finalmente las rotaciones de piso.

**Figura 10. Ubicación del Centro de Masas en los niveles 4.94 y 9.88. Además se indica la distancia del CM a los pórticos.**



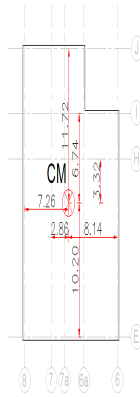
Fuente: Aguiar, et al., 2015

**Figura 11. Centro de Masas y distancia a los pórticos en el nivel 14.82.**



Fuente: Aguiar, et al., 2015

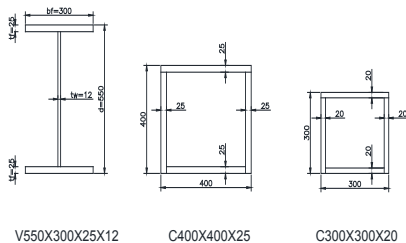
**Figura 12. Centro de Masas y distancia a los pórticos en el nivel 19.76.**



Fuente: Aguiar, et al., 2015

Las vigas de acero A 572 son tipo "I" de 550/300/25/12 mm., son iguales en todos los pórticos y en todos los pisos. Las columnas son tubulares y la mayor parte son de 400/400/25 mm.; pero existen también de 300/300/20 mm. En la figura 13 se presentan las secciones de los perfiles utilizados, los mismos que serán fabricados a partir de grandes planchas de acero.

**Figura 13. Secciones de acero A 572 utilizadas en Bloque Estructural 1.**



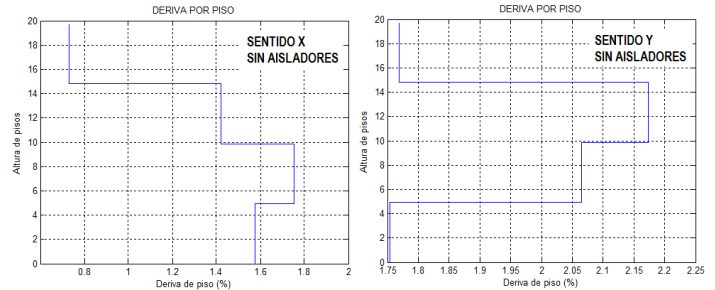
Fuente: Aguiar, et al., 2015

La carga permanente "D" considerada es de 770 kg/m<sup>2</sup> y la carga transitoria es de 300 kg/m<sup>2</sup>. Para el análisis sísmico se trabajó con  $D + 0.25 LD + 0.25 L$ , que da un valor total de 850 kg/m<sup>2</sup>, para los pisos 1 al 3; para

la losa de cubierta la carga con la que se encontró la masa del 4 piso es de 650 kg/m<sup>2</sup>.

Se considera sentido X, aquel que es paralelo a los pórticos identificados por letras y sentido Y, al que es ortogonal. Las derivas de piso, halladas en el centro de masas, se indican en la figura 14; se aprecia que para sismo en sentido X, la deriva máxima es menor al 2%, y para el sentido Y, es ligeramente mayor al 2%, recomendado por el NEC-15.

**Figura 14. Derivas de piso en sentido X y en sentido Y de Bloque Estructural 1 sin aisladores sísmicos**



Fuente: Aguiar, et al., 2015

En la tabla 1, se presenta el desplazamiento inelástico  $q_{ine}$ ; la deriva de piso  $\gamma$ ; y la fuerza lateral en el centro de masas  $F$ , tanto para sismo en sentido X, como para sismo en sentido Y. En sentido X, la estructura tiene un desplazamiento máximo de 27.08 cm., y en sentido Y de 38.35 cm., cantidades considerables, lo que implica derivas muy altas y por consiguiente mayor daño en elementos no estructurales y contenidos.

**Tabla 1. Respuestas máximas probables en estructura sin aisladores**

Piso	Sismo en sentido X			Sismo en sentido Y		
	$q_{ine}$ (m.)	$\gamma$ (%)	$F$ (Ton.)	$q_{ine}$ (m.)	$\gamma$ (%)	$F$ (Ton.)
1	0.0779	1.577	152.3	0.0867	1.75	144.0
2	0.1645	1.753	208.4	0.1887	2.07	192.6
3	0.2347	1.421	204.7	0.2961	2.17	189.6
4	0.2708	0.731	67.4	0.3835	1.77	70.1
$V_0$ (Ton.)			632.83			596.22
c			0.182			0.17

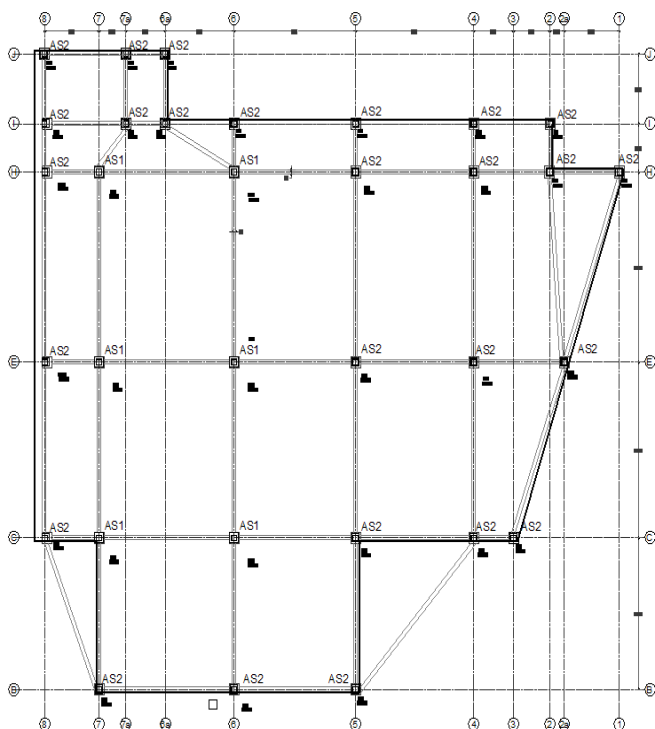
Fuente: Aguiar, et al., 2015

En las dos últimas filas de la tabla 1, se indica el cortante basal  $V_0/V_0$  obtenido del análisis dinámico y el coeficiente sísmico  $cc$ , que relaciona el cortante basal con el peso de la estructura.

### Estructura con aisladores

Básicamente se tienen dos tipos de aisladores FPS de la segunda generación; el mayor de ellos tiene un diámetro de 70 cm., con una placa cuadrada exterior de 80 cm. de lado y 2.5 cm., de espesor (Tipo AS1). El otro aislador tiene un diámetro de 60 cm., con una placa cuadrada de 70 cm., y el mismo espesor tanto en la placa superior como en la inferior (Tipo AS2). En la figura 15 se aprecia la ubicación de los aisladores, en la intersección de las columnas con las vigas. En total se tienen 6 aisladores tipo AS1 y 26 aisladores tipo AS2.

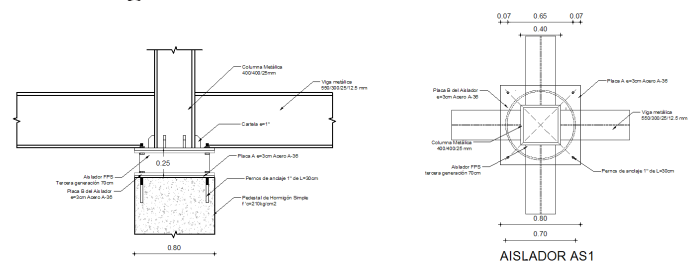
**Figura 15. Ubicación de los aisladores en el Bloque estructural 1**



Fuente: Aguiar, et al., 2015

A la izquierda de la figura 16, se presenta un detalle del anclaje de un aislador en el pedestal y en la viga de acero de la losa de aislación. A la derecha se tiene una vista superior para un aislador AS1, que tiene 70 cm., de diámetro con placas cuadradas de 80 cm., de lado y 2.5 cm., de espesor, identificada como placa B; se observa también los 4 pernos de anclaje de 1 pulgada de diámetro y 30 cm., de longitud y se aprecia también la placa A que tiene 3 cm., de espesor; que va en la parte superior del pedestal de hormigón y en la parte inferior de la viga de acero tipo "I"

**Figura 16. Detalle de los aisladores**



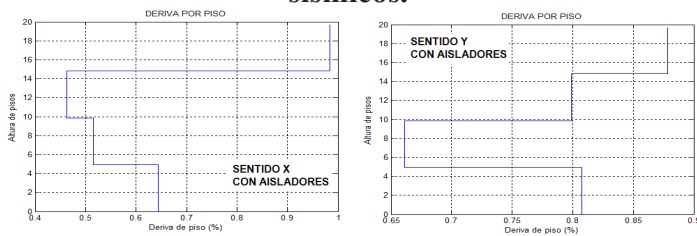
Fuente: Aguiar, et al., 2015

Ante el sismo en dirección X, el sistema de aislación se va a desplazar 11.77 cm., y en sentido Y, se desplaza 12.63 cm. A partir de estos desplazamientos la superestructura (pisos que se encuentran sobre el sistema de aislación) se deforma con respecto al desplazamiento de los aisladores y en base a estos desplazamientos relativos al movimiento lateral, se obtuvo las derivas de piso, las mismas que se indican en la figura 17. Se aprecia que las derivas de piso encontradas son menores al 1%, de tal manera que se logró una reducción sustancial de las derivas de piso y por ende del daño no estructural y contenidos.

En base a las ventajas de los aisladores friccionales y existiendo los de tercera generación, que permiten contar con un sistema de regímenes que se adaptan a la demanda existente, el análisis y el diseño de los

mismos se presentará como etapa final; la misma constituirá a futuro material de un nuevo artículo en la cual se presente el análisis del sistema mediante el método simplificado y se realice el análisis no lineal en el tiempo en función de la no linealidad del aislador, como es mandatorio en las normas.

**Figura 17. Derivas de piso encontradas en la superestructura del Bloque 1 con aisladores sísmicos.**



Fuente: Aguiar, et al., 2015

En la tabla 2 se presenta el desplazamiento relativo de cada piso con respecto al movimiento del sistema de aislación; la deriva máxima de piso encontrada y las fuerzas laterales en el centro de masas. La fuerza lateral en el CM, del sistema de aislación es 251.5 Ton., en sentido X, y 288.4 Ton., en sentido Y. Si se dividen estas fuerzas de corte para 32 aisladores, se encuentra que la fuerza promedio de corte en cada aislador está alrededor de las 10 Ton.

**Tabla 2. Respuestas máximas probables en estructura con aisladores**

Piso	Sismo en sentido X			Sismo en sentido Y		
	$q_{ine}$ (m.)	$\gamma$ (%)	F (Ton.)	$q_{ine}$ (m.)	$\gamma$ (%)	F (Ton.)
1	0.0779	1.577	152.3	0.0867	1.75	144.0
2	0.1645	1.753	208.4	0.1887	2.07	192.6
3	0.2347	1.421	204.7	0.2961	2.17	189.6
4	0.2708	0.731	67.4	0.3835	1.77	70.1
$V_0$ (Ton.)			632.83			596.22
c			0.182			0.17

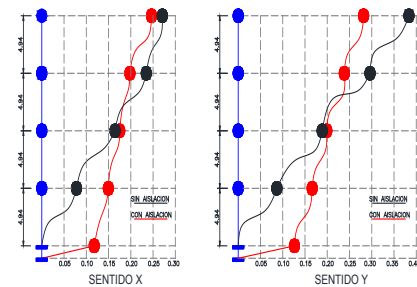
Fuente: Aguiar, et al., 2015

### Comparación de resultados

En la figura 18 se presentan los desplazamientos laterales

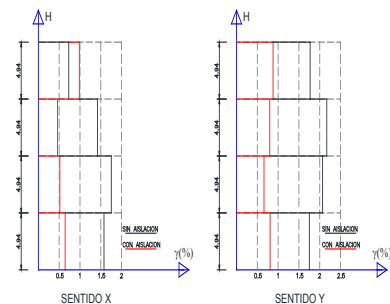
de la estructura sin aisladores y de la estructura con aisladores. Se aprecia que la columnas de la estructura sin aisladores no solo se desplazan lateralmente más, sino que tienen mayor deformación que en la estructura con aisladores. A nivel de derivas de piso, se aprecia en la figura 19 el mejor desempeño que tiene la estructura con aisladores.

**Figura 18. Desplazamientos laterales en estructura sin y con aisladores sísmicos ante sismo de diseño.**



Fuente: Aguiar, et al., 2015

**Figura 19. Derivas de piso en las estructuras sin y con aisladores sísmicos.**



Fuente: Aguiar, et al., 2015

### Conclusiones y trabajo futuro

Se mejora notablemente el comportamiento sísmico de una estructura mediante la incorporación de aisladores sísmicos. En efecto, se reducen los desplazamientos laterales y las aceleraciones, y lo fundamental, las

deformaciones de las columnas son bastante menores a la estructura sin aislar, como se apreció en las derivas de piso.

Si bien es cierto que se incrementa el costo por los aisladores sísmicos, al reducirse las derivas de piso se está garantizando un mejor desempeño de los elementos no estructurales y de los contenidos. Por tanto, se garantiza mayor seguridad de la construcción.

En un subsiguiente trabajo se realizaría el diseño de la estructura aislada, utilizando métodos simplificados que permitirán validar en el tiempo con análisis no lineales y a su vez comparar con lo que se ha presentado en este artículo.

Además, queda pendiente realizar el análisis sísmico ante un sismo máximo creíble que tenga un período de retorno de 2500 años, con aisladores de triple péndulo de fricción, que se utilizarán en la construcción.

### Referencias bibliográficas:

ACHISINA (2001), *Proposición de código para el análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*, Santiago de Chile: Achisina. Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica.

Aguiar, R., Vergara Francisco, Guaygua, Byron y Monge, Juan (2015), "Análisis sísmico de una estructura con aisladores FPS de primera y segunda generación", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 19 (1), 35-89.

Aguiar, R. (2014), *Análisis Matricial de Estructuras con CEINCI-LAB*, Cuarta Edición. Quito: Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH.

Aguiar, R. (2012), *Dinámica de Estructuras con*

*CEINCI-LAB*, Segunda edición, Quito: Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH.

Aguiar, R., Almazán, J., Dechent, P., Suárez, V. (2008), *Aisladores de base elastoméricos y FPS*, Quito: Escuela Politécnica del Ejército ESPE.

Aguiar, R. (2007), *Factor de reducción de las fuerzas sísmicas en edificios de hormigón armado*, Quito: Escuela Politécnica del Ejército ESPE.

Aguiar, R. (2003), *Análisis sísmico por desempeño*, Centro de Investigaciones Científicas. Quito: Escuela Politécnica del Ejército.

Alvarez, P. (2015) "Reunión de trabajo realizada el 7 de agosto de 2015", *Grupo militar de trabajo ESPE*. Sala de Reuniones de Rectorado.

ASCE Standard (ASCE/SEI 7-10), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

Bonifaz, H. (2015) "Estudio de suelos para el nuevo Centro de Investigaciones y Post Grado de la Universidad de Fuerzas Armadas, ESPE", *Reunión de trabajo realizada el 7 de agosto de 2015*. Sala de Reuniones de Rectorado

Chopra, A. (2001), *Dynamic of structures: Theory and applications to earthquake engineering*, 2<sup>nd</sup> edn. Saddle River New York: Prentice Hall.

Christopoulos, C. y Filiatrault, A. (2006) *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*, Pavia, Italy: IUSS Press.

Constantinou, M., Kalpakidisk, I., Filiatrault A. y Ecker R. (2011) *LRFD-Based Analysis and Design*

Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators, MCEER Report 11-0004, September 26.

Fadi, F. y Constantinou, M. (2010), "Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39, 5-22.

FEMA-E74. (2011). Reducing the Risk of Nonstructural Earthquake Damage – A Practical Guide (Cuarta Edición). Washington: Federal Emergency Management Agency.

Fenz, D., Constantinou, M., (2008), Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings, Technical Report NCEER-08-0007.

Miranda, E. y Taghavi, S. (2003). Response Assessment of Nonstructural Building Elements. University of California Berkeley. California: PEER Report 2003/05.

NEC-15 (2015), *Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS*, Ministerio de la Vivienda MIDUVI.