

# **CÁLCULO DE LA TORSIÓN EN AISLADORES FPT EN EL ANÁLISIS SIMPLIFICADO LINEAL Y EN EL ESPECTRAL. APLICACIÓN AL BLOQUE TRES DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA UFA-ESPE**

## **TORSION CALCULATION IN FPT ISOLATORS IN THE SIMPLIFIED LINEAR ANALYSIS AND IN THE SPECTRAL ANALYSIS. APPLICATION TO THE RESEARCH CENTER OF UFA-ESPE BLOCK THREE.**

### **Roberto Aguiar**

Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción  
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE  
Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos.  
Correo Electrónico: [rraguiar@espe.edu.ec](mailto:rraguiar@espe.edu.ec)

### **Enrique Morales**

Department of Civil, Structural  
University of New York at Buffalo

### **Byron Guaygua**

Departamento de Estructuras  
Cuero de Ingenieros del Ejército, Quito-Ecuador

### **Eduardo López y Evelyn Tipanluisa**

Maestría en Estructuras  
Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador

## **RESUMEN**

La rigidez efectiva de los aisladores de triple péndulo de fricción FPT, es función de la carga vertical que gravita sobre ellos, esto ocasiona que los aisladores tengan diferentes rigideces, lo que conduce a que el Centro de Resistencia del sistema de aislación no coincida con el Centro de Masas, generando un incremento de los desplazamientos horizontales por efecto de la torsión.

Se presenta el cálculo del desplazamiento debido a la torsión siguiendo el modelo desarrollado por Constantinou, aplicado al método simplificado lineal.

Por otra parte, se presenta el modelo espectral, considerando a la estructura con tres grados de libertad por planta: dos componentes de desplazamiento y un giro de torsión en cada uno de los pisos.

Como aplicación se realiza el análisis sísmico del Bloque Estructural 3 del Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, de dos formas, la primera empleando el Método Lineal Simplificado incorporando el desplazamiento por torsión y la segunda mediante el Método Espectral.

**Palabras Claves:** Método Lineal Simplificado; Método Espectral; Aisladores FPT.

## ABSTRACT

The effective stiffness of triple FP isolator is a function of the vertical load that gravitates on them, this cause different stiffness in each isolator, which leads to the stiffness center of the insulation system doesn't match with mass center, and this generates an increase of horizontal displacements for torsion effect.

This document presents the calculation of the displacement due to the torsion following the model developed by Constantinou and applying the Simplified Linear Method.

Moreover, this document presents the spectral model considering that structure has three degrees of freedom by plan: two displacement components and one torsional twist.

Application is carried out as seismic analysis of the Structural Block 3 of the Research Center of UFA-ESPE, the analysis is performed in two ways, first incorporating the displacement caused by torsion in the Simplified Linear Method and second using Spectral Method.

**Keyword:** Simplified Linear Method; Spectral Method, FPT isolators.

## 1 INTRODUCCIÓN

En la construcción del nuevo Centro de Investigaciones Científicas y de Post grados de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, se va a utilizar el aislador de triple péndulo de fricción FTP8833/12-12/8-6, indicado en la figura 1. Adquirido de la empresa EPS (Earthquake Protection System).

El fabricante proporciona la rigidez efectiva para el análisis sísmico, tanto para el sismo de diseño DBE, como para el sismo máximo considerado MCE y son los valores que se indican a continuación.

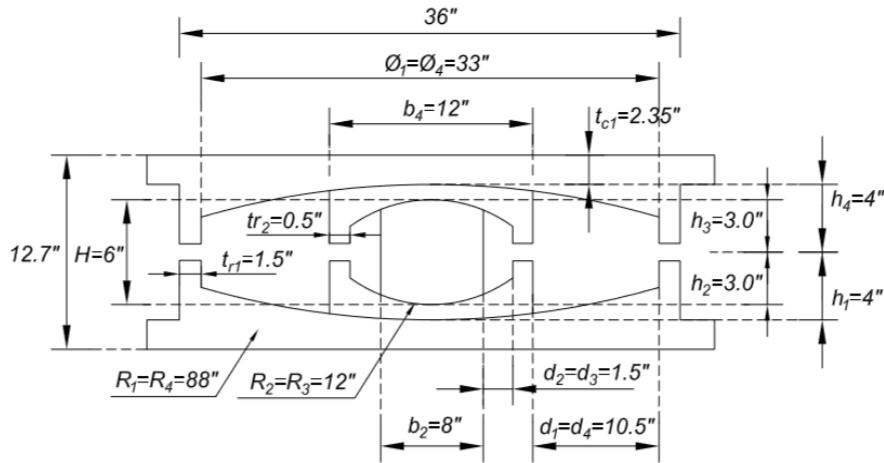
- **Sismo DBE**

$$k_{eff} = 0.000349 \frac{kn}{mm}$$

- **Sismo MCE**

$$k_{eff} = 0.000352 \frac{kn}{\frac{mm}{kn}}$$

Al multiplicar por el peso que gravita en cada aislador se tiene la rigidez efectiva en unidades de fuerza para desplazamiento.



**Figura 1** Geometría de aislador de triple péndulo de fricción. FTP8833/12-12/8-6

Interesa encontrar la respuesta en desplazamientos del sistema de aislación empleando el Método Lineal Simplificado, incorporando el desplazamiento por Torsión y empleando el Método Espectral considerando al aislador como un elemento corto, en un modelo espacial de tres grados de libertad por planta: dos componentes de desplazamiento horizontal y un giro de torsión.

El sismo de diseño **DBE** es el que reporta el NEC-15 para un perfil de suelo tipo "C" en una zona cuya peligrosidad sísmica tiene un factor  $z = 0.4$ . El sismo máximo considerado **MCE** se encuentra multiplicando el sismo **DBE** por 1.4. Constantinou *et al.* (2015).

- **Sismo DBE**

$$S_{aDBE} = \frac{0.667}{T} (g)$$

- **Sismo MCE**

$$S_{aMCE} = \frac{0.94}{T} (g)$$

Donde  $S_{aDBE}$ ,  $S_{aMCE}$ , son las aceleraciones espectrales en función de la gravedad  $g$ , para el sismo DBE y MCE;  $T$  es el período de vibración y los coeficientes 0.667 y 0.94 son los coeficientes  $S_{D1}$  asociados a un período de 1 segundo, para los sismos DBE y MCE.

## 2 METODO LINEAL SIMPLIFICADO

En el capítulo 17 del ASCE-7 de 2010, se detalla el Método lineal, simplificado, las ecuaciones más notables se resumen a continuación.

$$k_{ef} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{\mu}{\mu + \frac{D}{R}} \right] \quad (2)$$

Donde  $W$  es el peso que gravita sobre el aislador;  $R$  es el radio de curvatura;  $\mu$  es el coeficiente de fricción;  $D$  es el desplazamiento.

$$R = R_{ef1} + R_{ef4} \quad (3)$$

$$R_{efi} = R_i - h_i \quad (4)$$

Por otra parte, el período del sistema de aislación, se halla con la siguiente ecuación.

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

Finalmente el desplazamiento  $D$  se encuentra con la expresión siguiente.

$$D = \left( \frac{S_{D1} * g}{4 \pi^2} \right) \frac{T}{B} \quad (6)$$

Datos son la carga  $W$  que gravita en el aislador; el radio de curvatura  $R_1 = R_4$ ; el coeficiente de fricción  $\mu_1 = \mu_4$ ; el coeficiente de la aceleración de la gravedad del espectro elástico para un período de 1 segundo, denominado  $S_{D1}$ .

El cálculo del desplazamiento  $D$  se realiza en forma interactiva, para el efecto se impone un desplazamiento inicial; con este valor se halla la rigidez efectiva y amortiguamiento equivalente, mediante las ecuaciones (1) y (2). Posteriormente se encuentra el valor de  $B$  con el que se encuentra el espectro asociado al amortiguamiento  $\beta$ . Luego se determina el período  $T$  y se recalcula el desplazamiento, con las ecuaciones (5) y (6).

Se comparan los desplazamientos y si son menor a una tolerancia se habrá encontrado el desplazamiento  $D$ , la rigidez efectiva  $k_{ef}$ , el período  $T$ , y el amortiguamiento equivalente  $\beta$ . Para una convergencia más rápida se aplica el Método de la Bisección.

### 3 ANÁLISIS DE TORSIÓN EN SISTEMA DE AISLACIÓN

En el apartado anterior, se observa que la rigidez efectiva  $k_{ef}$  depende de la carga vertical  $W$ , que gravita sobre el aislador. Por lo regular las cargas que llegan al sistema de aislación son diferentes, en consecuencia las rigideces en los aisladores serán diferentes y el centro de resistencia **CR**, no coincide con el centro de masas **CM**, generándose la torsión. Winter y Constantinou (1993), Wolff *et al.* (2014), Constantinou (2015).

El problema de torsión se estudia en dos etapas a saber: primero el caso de vibración libre en un sistema de un grado de libertad en que se determina las propiedades dinámicas y segundo un caso particular cuando existe un momento de torsión, que conduce al cálculo del desplazamiento lateral  $D$ , debido al giro de torsión  $\theta$ .

#### 3.1 Vibración Libre

La ecuación diferencial que gobierna la torsión en un sistema de un grado de libertad es la siguiente:

$$J \ddot{\theta} + C_{\theta} \dot{\theta} + K_{\theta} \theta = 0$$

Donde  $J$  es el momento de inercia de la masa;  $C_{\theta}, K_{\theta}$ , amortiguamiento y rigidez;  $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ , es la rotación, velocidad angular y aceleración angular.

De la dinámica de estructuras, se conoce que la frecuencia natural de vibración  $W_{\theta}$ , y el factor de amortiguamiento  $\xi_{\theta}$ , se hallan con las siguientes ecuaciones:

$$W_{\theta} = \sqrt{\frac{K_{\theta}}{J}}$$

$$\xi_{\theta} = \frac{C_{\theta}}{2\sqrt{J K_{\theta}}}$$

El caso más común en un sistema de aislación es que la rigidez y amortiguamiento del aislador sea igual en sentido X, y en sentido Y, de tal manera que:

$$C_x = C_y = C_i$$

$$K_x = K_y = K_i$$

Pero para el aislador  $i$  se tiene:

$$K_{\theta i} = X_i^2 K_{yi} + Y_i^2 K_{xi} = K_i (X_i^2 + Y_i^2)$$

Por otra parte, el momento de inercia  $J$ , para un sistema de aislación vale:

$$J = M r^2 \quad (7)$$

$$r^2 = \frac{b^2 + d^2}{12} \quad (8)$$

Donde  $M$  es la masa total que llega al sistema de aislación, incluyendo el peso de los aisladores;  $b, d$ , son las dimensiones en planta del sistema de aislación con forma rectangular. Con todo esto se tiene. Constantinou (2015)

$$W_\theta = A \sqrt{\frac{\sum_i K_i}{M}} \quad (9)$$

$$\xi_\theta = A \left[ \frac{\sum_i C_i}{2 \sqrt{M \sum_i K_i}} \right] \quad (10)$$

$$A = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\sum_i (X_i^2 + Y_i^2)}{N}} \quad (11)$$

$$T_\theta = \frac{2 \pi}{W_\theta} \quad (12)$$

Por otro lado, para movimientos lineales, se conoce que. Aguiar (2012)

$$W_n = \sqrt{\frac{\sum_i K_i}{M}} \quad (13)$$

$$\xi = \frac{\sum_i C_i}{2 \sqrt{M \sum_i K_i}} \quad (14)$$

$$T = \frac{2 \pi}{W_n} \quad (15)$$

Por lo tanto, se puede expresar la frecuencia angular  $W_\theta$ , el factor de amortiguamiento  $\xi_\theta$  y el período de vibración angular  $T_\theta$ , en función de la frecuencia natural  $W_n$ , factor de amortiguamiento  $\xi$  y del período de traslación del sistema de aislación  $T$ , de la siguiente forma:

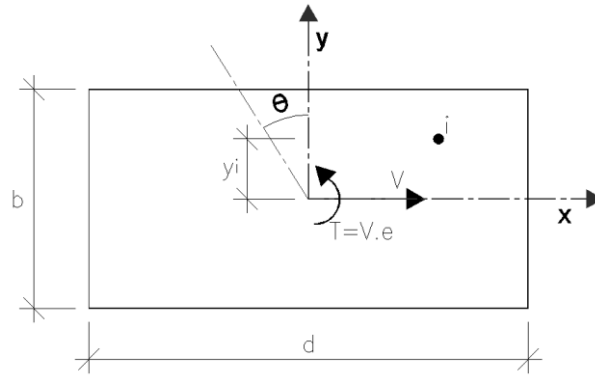
$$W_\theta = A W_n \quad (16)$$

$$\xi_\theta = A \xi \quad (17)$$

$$T_\theta = \frac{T}{A} \quad (18)$$

### 3.2 Desplazamiento lateral por torsión

En la figura 2, se presenta una losa de aislación de dimensiones  $b, d$  en la que se aplica un momento alrededor de un eje perpendicular al plano de la losa de magnitud  $T$ , que genera un desplazamiento lateral en sentido X, en el aislador  $i$ .



**Figura 2** Planta de aislación de dimensiones  $b, d$  en que actúa un momento de torsión  $T$ . Influencia del desplazamiento en el aislador  $i$ .

$$T = V e$$

Donde  $T$  es el momento de torsión;  $V$  es la fuerza de corte;  $e$  es la excentricidad estática. Pero el momento de torsión a su vez es igual a la rigidez por torsión  $K_\theta$  por el giro de torsión  $\theta$ . Luego se tiene:

$$K_\theta \theta = V e$$

Al dividir esta última expresión para  $M r^2$ , se tiene:

$$\frac{K_\theta \theta}{M r^2} = \frac{V e}{M r^2}$$

Pero  $W_\theta^2 = \frac{K_\theta}{M r^2}$ ,  $y$ ,  $r^2 = \frac{b^2 + d^2}{12}$ , con lo que se tiene:

$$W_\theta^2 \theta = \frac{V}{M} \frac{12 e}{(b^2 + d^2)}$$

El giro  $\theta$  genera en el aislador  $i$ , un desplazamiento lateral  $D_{TOR}$

$$D_{TOR} = \theta Y_i$$

Donde  $Y_i$  es la distancia desde el Centro de Masas CM, al aislador  $i$ . Con lo que se tiene:

$$W_\theta^2 D_{TOR} = \frac{V}{M} \frac{12 e Y_i}{(b^2 + d^2)}$$

Pero el cortante  $V = K_i D$ , y al remplazar la ecuación (13) se halla:

$$W_{\theta}^2 D_{TOR} = W_n^2 D \frac{12 e Y_i}{(b^2 + d^2)}$$

Al sustituir la ecuación (16) y luego de simplificar  $W_n^2$  se tiene:

$$D_{TOR} = \frac{D}{A^2} \frac{12 e Y_i}{b^2 + d^2} \quad (19)$$

Por lo tanto, el desplazamiento total lateral  $D_T$  es igual al desplazamiento lateral  $D$  más el desplazamiento de torsión  $D_{TOR}$ .

$$D_T = D + \frac{D}{A^2} \frac{12 e Y_i}{b^2 + d^2}$$

$$D_T = D \left[ 1 + \frac{12 e Y_i}{A^2 (b^2 + d^2)} \right] \quad (20)$$

La ecuación (20) es válida para cuando el sistema de aislación está definida por una losa rectangular, simétrica en planta. Pero normalmente se tienen losas de aislación irregulares. Por lo que es mejor escribir la ecuación (20) de la siguiente manera.

$$D_T = D \left[ 1 + \frac{e Y_i}{A^2 r^2} \right] \quad (21)$$

Cuando se tiene excentricidades estáticas  $e_x$  en sentido X;  $e_y$  en sentido Y, que es el caso general, la ecuación (20) toma la siguiente forma.

$$D_{TX} = D_X * F_X \quad (22)$$

$$D_{TY} = D_Y * F_Y \quad (23)$$

$$F_X = 1 + \frac{12 e_y Y_i}{A^2 (b^2 + d^2)} \quad (24)$$

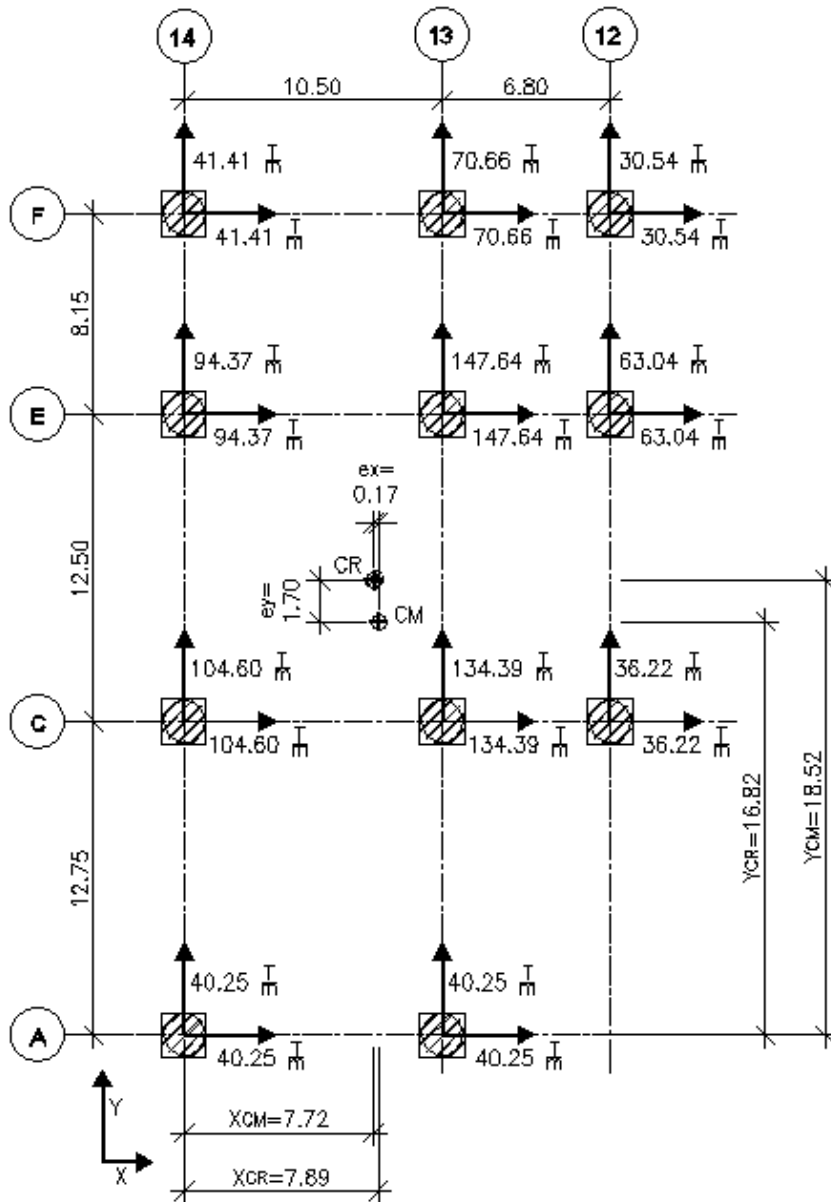
$$F_Y = 1 + \frac{12 e_x X_i}{A^2 (b^2 + d^2)} \quad (25)$$

Donde  $D_X, D_Y$  son los desplazamientos laterales en sentido X, Y.  $F_X, F_Y$  son los factores de mayoración de los desplazamientos debidos a la torsión, son valores mayores o iguales a la unidad.

#### 4 FACTORES DE AMPLIFICACIÓN POR TORSIÓN. CASO PRÁCTICO

Se va a calcular los factores de amplificación por torsión, del Bloque Estructural 3, destinado a las investigaciones de Nanotecnología y Nanociencia, de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Los aisladores se colocan sobre las columnas del subsuelo.





**Figura 3** Ubicación de los aisladores FPT, en el Bloque Estructural 3, rigidez efectiva y Centro de Masa CM y Centro de Resistencia CR.

En la figura 3 se presenta la ubicación de los aisladores en el Bloque Estructural 3, que es irregular en planta y elevación. Se indica la rigidez efectiva encontrada para el sismo DBE. Todos los aisladores tienen la geometría del FPT (Triple péndulo de fricción) indicado en la figura 1.

Se indica la ubicación del Centro de Masa CM y del Centro de Resistencia CR, se aprecia que no coinciden, por lo que se tiene una excentricidad en sentido X, denominada  $e_x = 0.17$  m, y una excentricidad  $e_y = 1.70$  m. Estas

excentricidades son las que generan los factores de mayoración de desplazamientos por torsión, cuyo cálculo se indica en la tabla 1.

**Tabla 1** Cálculo de los factores de mayoración de desplazamientos por torsión.

Aislador	$X_i$ (m.)	$Y_i$ (m.)	$X_i^2 + Y_i^2$ (m <sup>2</sup> )	$F_X$	$F_Y$
A14	-7.72	-18.52	402.588	1.163	1.007
A13	2.78	-18.52	350.719	1.163	1.002
C14	-7.72	-5.77	92.891	1.058	1.007
C13	2.78	-5.77	41.021	1.058	1.002
C12	9.58	-5.77	125.069	1.058	1.008
E14	-7.72	6.73	104.891	1.059	1.007
E13	2.78	6.73	53.021	1.059	1.002
E12	9.58	6.73	137.069	1.059	1.008
F14	-7.72	14.88	281.012	1.131	1.007
F13	2.78	14.88	229.143	1.131	1.002
F12	9.58	14.88	313.191	1.131	1.008

$$A = \frac{1}{10.858} \sqrt{\frac{2130.6}{11}} = 1.282$$

$$F_x = 1 + \frac{12 e_y Y_i}{A^2 (b^2 + d^2)} = 1 + \frac{1.70 * Y_i}{1.282^2 * (10.858)^2} = 1 + 0.0088 Y_i$$

$$F_y = 1 + \frac{12 e_x X_i}{A^2 (b^2 + d^2)} = 1 + \frac{0.17 X_i}{1.282^2 * (10.858)^2} = 1 + 0.00087 X_i$$

## 5 DESPLAZAMIENTOS TOTALES CON MÉTODO SIMPLIFICADO LINEAL

En la segunda columna de la tabla 2, se indican las cargas que gravitan en cada aislador, con las cuales se halló el desplazamiento lateral ante el sismo DBE aplicando el Método Simplificado Lineal. El valor de  $R_1 = R_4 = 223.5 \text{ cm}$ ; se calculó con un valor bien bajo del coeficiente de fricción  $\mu_1 = \mu_4 = 0.06$ , para encontrar los máximos desplazamientos.

El desplazamiento lateral que se obtiene para el sismo DBE es 30.17 cm, el factor de amortiguamiento  $\beta = 0.292$  y el período  $T = 3.05 \text{ s}$ . Estos valores son iguales para todos los aisladores. En la tabla 2 se indican los valores de desplazamiento total, incluyendo torsión, tanto para sismo en X, como para sismo en Y.

**Tabla 2** Desplazamientos totales encontrados con el Método Lineal Simplificado, para el sismo DBE.

Aislador	Carga Axial (T.)	Desplazamiento Lateral (cm)	
		Sismo en X	Sismo en Y
A14	115.33	35.09	32.28
A13	115.33	35.09	30.77
C14	299.71	31.92	32.28
C13	385.07	31.92	30.77
C12	103.78	31.92	32.58
E14	270.40	31.95	32.28
E13	423.04	31.95	30.77
E12	181.78	31.95	32.58
F14	130.12	34.12	32.28
F13	202.46	34.12	30.77
F12	87.51	34.12	32.58

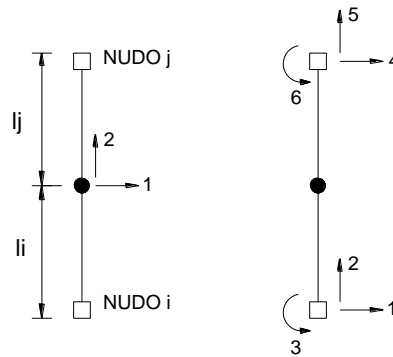
**Tabla 3** Desplazamientos totales encontrados con el Método Lineal Simplificado, para el sismo MCE.

Aislador	Carga Axial (T.)	Desplazamiento Lateral (cm)	
		Sismo en X	Sismo en Y
A14	115.33	61.05	56.18
A13	115.33	61.05	53.55
C14	299.71	55.55	56.18
C13	385.07	55.55	53.55
C12	103.78	55.55	56.70
E14	270.40	55.60	56.18
E13	423.04	55.60	53.55
E12	181.78	55.60	56.70
F14	130.12	59.38	56.18
F13	202.46	59.38	53.55
F12	87.51	59.38	56.70

Para el sismo MCE se encontró un desplazamiento lateral de 52.20 cm, y un factor de amortiguamiento  $\beta = 0.209$ . En la tabla 2 se presentan los desplazamientos laterales, incluyendo la torsión.

## 6 MÉTODO ESPECTRAL

Antes de presentar el modelo de análisis sísmico, considerando tres grados de libertad por planta; se indica en la figura 4 la forma de modelar al aislador como un elemento corto, a la izquierda se presentan las coordenadas locales del elemento y a la derecha las coordenadas globales.



**Figura 4** Coordenadas Locales y Globales de elemento aislador.

La matriz de rigidez del aislador en coordenadas locales,  $K_0$ , es:

$$K_0 = \begin{bmatrix} k_{ef} & 0 \\ 0 & k_v \end{bmatrix}$$

Donde  $k_{ef}$  es la rigidez efectiva;  $k_v$  es la rigidez vertical. De la primera ya se ha indicado su forma de cálculo. Antes de indicar como se obtiene  $k_v$  es conveniente observar el Anexo 1, en que se presenta, en la parte superior una fotografía de la base rígida deslizante que tiene el aislador interior y en la parte inferior se observa al aislador interior con la base rígida; se puede deducir que todo el aislador interior es muy compacto de tal manera que la rigidez vertical se puede calcular con la siguiente ecuación.

$$k_v = \frac{E A}{H} = \frac{E \pi b_4^2}{4 H}$$

Donde  $E$  es el módulo de elasticidad del acero;  $b_4$  es el diámetro del aislador interior;  $H$  es la altura del aislador (se incluye el espesor de las placas exteriores).

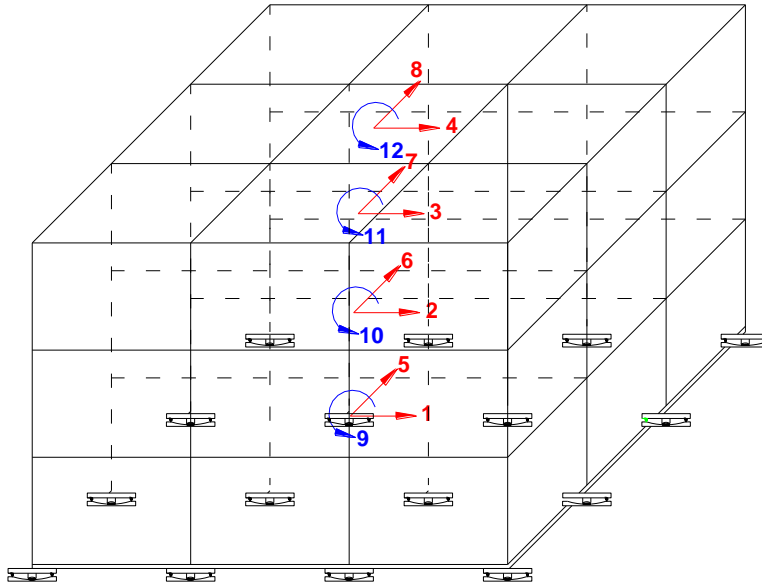
Para encontrar la matriz de rigidez en coordenadas globales se debe tener presente que existen los giros identificados con los grados de libertad 3 y 6 pero el momento debe ser cero. Por otro lado, la matriz cinemática  $T$ , es:

$$T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & l_i & 1 & 0 & l_j \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{26}$$

Finalmente, la matriz de rigidez en coordenadas globales  $k_3$  se halla con la siguiente ecuación. Aguiar (2014).

$$k_3 = T^t k_0 T \tag{27}$$

Únicamente para ilustrar la numeración de los grados de libertad considerados en el Método Espectral, en la figura 5 se presenta una estructura de 4 pisos con aisladores sísmicos, sobre la cimentación. Se aprecia que los grados de libertad se numeran primero los desplazamientos horizontales en sentido X, de abajo hacia arriba; luego los desplazamientos horizontales en sentido Y, finalmente las rotación de piso (torsión).



**Figura 5** Grados de libertad en el Centro de Masa. Fuente: Aguiar (2013)

Los grados de libertad se consideran en el Centro de Masa, CM, de cada piso. La estructura de la figura 5, es simétrica en planta y elevación por lo que no tendrá problemas de torsión. De igual manera el CM es colineal.

El Método Espectral, se encuentra bien detallado en Aguiar (2012), por lo que se omite la descripción del procedimiento de cálculo. Se van a presentar resultados a nivel de Centro de Masas y en los pórticos.

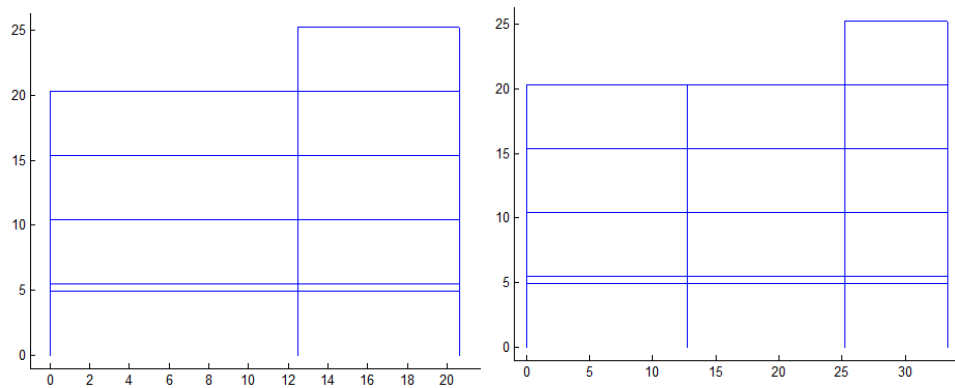
Sea  $\mathbf{q}$  el vector que contiene los desplazamientos y giros en el CM, y sea  $\mathbf{p}$  el vector con los desplazamientos en cada uno de los pórticos. La relación entre estos dos vectores viene dada por la matriz de compatibilidad de deformaciones  $\mathbf{A}$ .

$$\mathbf{p}^{(i)} = \mathbf{A}^{(i)} \mathbf{q} \quad (28)$$

El índice  $i$  sirve para identificar al pórtico.

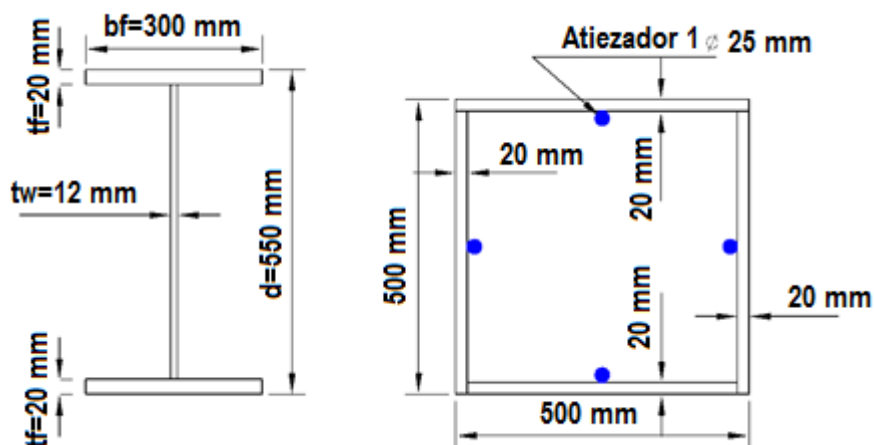
## 7 RESULTADOS ENCONTRADOS CON MÉTODO ESPECTRAL EN SISTEMA DE AISLADORES

En la figura 3 se presentó la configuración en planta del Bloque Estructural 3, que es de cinco pisos y los aisladores se han colocado sobre las columnas del subsuelo. En la figura 6 se indican los pórticos en sentido Y, en base a estos gráficos se puede tener una idea cabal de la geometría de la estructura cuyas alturas de piso son 4.94 m.



**Figura 6** Pórtico 12 a la izquierda y pórtico 13 que es igual al 14, a la derecha.

Todas las columnas de la estructura son cuadradas tubulares de 500 mm, de lado y 20 mm, de espesor como se aprecia a la derecha de la figura 7. La viga principal se indica a la izquierda es un perfil “I” de 550/300/20/12 mm. En Aguiar y Guaygua (2015) se tiene un espesor del ala de 25 mm, esta cantidad se disminuyó a 20 mm.



**Figura 7** Viga Principal y Columna Tipo

En el armado de la losa se tienen 4 tipos de vigas de acero, la indicada en la figura 7, es la principal pero hay tres tipos más en cada panel de la losa. Además de ello sobre las vigas se construirá una losa de 7.5 cm, de altura promedio tipo Deck, que aporta rigidez y resistencia pero no se consideró en el análisis.

Se realizó un estudio muy detallado para disminuir ligeramente las secciones de los elementos estructurales y poder bajar pesos. Concretamente se modeló las losas con todas las vigas como una malla espacial sometida a cargas verticales y se determinó el desplazamiento vertical, hasta tener desplazamientos razonables (del orden de la mitad de lo permitido  $L/360$ )

El objetivo fue bajar pesos, ahora se tiene que la carga muerta es 750 kg/m<sup>2</sup>, en los pisos intermedios y 630 kg/m<sup>2</sup> en la cubierta.

En la tabla 4 se presentan los desplazamientos laterales del sistema de aislación sin considerar la torsión, ante el sismo DBE y MCE.

**Tabla 4** Desplazamientos laterales en C.M. del sistema de aislación

Desplazamiento en CM	Sismo DBE		Sismo MCE	
	Sentido X	Sentido Y	Sentido X	Sentido Y
<b>Aisladores</b>	19.33	34.23	37.29	57.97

En las tablas 5 y 6 se presentan los desplazamientos en los pórticos, considerando la torsión, para el sismo DBE y para el sismo MCE. Se observa que el Método Simplificado Lineal,

**Tabla 5** Desplazamientos laterales en los pórticos considerando torsión, ante sismo DBE

Pórtico	Sismo DBE Sentido X		Pórtico	Sismo DBE Sentido Y	
	Espectral (cm)	MSL (cm)		Espectral (cm)	MSL (cm)
<b>A</b>	49.07	35.09	<b>12</b>	38.26	32.58
<b>C</b>	28.54	31.92	<b>13</b>	35.67	30.77
<b>E</b>	30.24	31.95	<b>14</b>	39.22	32.28
<b>F</b>	43.37	34.12			

**Tabla 6** Desplazamientos laterales en los pórticos considerando torsión, ante sismo MCE

Pórtico	Sismo DBE Sentido X		Pórtico	Sismo DBE Sentido Y	
	Espectral (cm)	MSL (cm)		Espectral (cm)	MSL (cm)
<b>A</b>	66.25	61.05	<b>12</b>	60.84	56.70
<b>C</b>	55.55	55.55	<b>13</b>	58.82	53.55
<b>E</b>	58.93	55.60	<b>14</b>	59.84	56.18
<b>F</b>	64.95	59.38			

## 8 DERIVAS DE PISO EN CENTRO DE MASA

Se define la deriva de piso como la relación entre el desplazamiento lateral relativo con respecto a la altura de entrepiso. En el presente caso, no se considera el desplazamiento de los aisladores en la evaluación de la deriva de piso; por esto a partir del segundo piso se encontró los desplazamientos relativos con respecto al desplazamiento del aislador.

En la tabla 7 se presentan las derivas de piso de la estructura analizada, tanto para el sismo DBE, como para el MCE, en sentido X, y en sentido Y. Es preocupante tener derivas un poco altas en sentido X, en el quinto piso, aunque para el sismo DBE cumple con lo establecido en el NEC-15 pero se analizará

alguna forma de bajar esos valores. Para el sentido Y, las derivas de piso son adecuadas.

**Tabla 7** Derivas de piso para sismo DBE y MCE en Centros de Masas

Piso	Sentido X		Sentido Y	
	DBE	MCE	DBE	MCE
1	0.34	0.48	0.37	0.65
2	0.35	0.81	0.34	0.77
3	0.33	0.72	0.32	0.69
4	0.29	0.54	0.23	0.48
5	1.60	2.68	0.08	0.11

## 9 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

El método espectral y el método simplificado lineal, son aproximados, con una gran diferencia de que el primero demanda una gran cantidad de tiempo para encontrar la matriz de rigidez lateral de cada uno de los pórticos, la matriz de rigidez en coordenadas de piso; en sí todo el análisis con el método espectral es largo. Lo que no sucede con el método simplificado lineal y lo interesante es que se halla resultados muy parecidos al método espectral.

Un tema muy importante a considerar en el análisis sísmico es el referente a la necesidad de incorporar la torsión en el cálculo ya que conlleva a un incremento de los desplazamientos laterales.

Finalmente se debe manifestar que se realizó el análisis sísmico con los aisladores FTP8833/12-12/8-6, trabajando con un coeficiente de roce muy bajo con el propósito de tener los máximos desplazamientos laterales.

## REFERENCIAS

1. Aguiar R., Guaygua B., (2015), "Análisis sísmico de Bloque Estructural 3 del nuevo Centro de Investigaciones de la UFA-ESPE con aisladores FPS de tercera generación", *Revista Ciencia*, **17 (3)**, 425-440.
2. Aguiar R., (2014), *Análisis Matricial de Estructuras con CEINCI-LAB*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Cuarta Edición, 676 p.
3. Aguiar R., (2013), *Microzonificación sísmica de Quito*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Primera Edición, 212 p.
4. Aguiar R. (2012), *Dinámica de Estructuras con CEINCI-LAB*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH. Segunda edición, 416 p., Quito.
5. ASCE 7-10, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, 608 p.
6. Constantinou M., (2015), *Torsión, Apuntes de clase del Prof. Constantinou en la Universidad de Buffalo*.
7. NEC-SE-DS (2015) *Cargas Sísmicas, Diseño Sismo Resistente*. Norma Ecuatoriana de la Construcción.



8. Winters C. W., and Constantinou M., (1993), *Evaluation of Static and Response Spectrum Analysis Procedures of SEAOC/UBC for Seismic Isolated Structures*. National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo. Technical Report NCEER-93-0004.
9. Wolff E. D., Ipek C., Constantinou M.C., Morillas L., (2014), "Torsional response of seismically isolated structures revisited", *Engineering Structures*, **59**, 462-468.

## ANEXO 1



**Base rígida deslizante de diámetro  $b_2$**



**Aislador Interior de diámetro  $b_4$**