

DESEMPEÑO DE AISLADOR FPT8833/12-12/8-5 EN EL ANÁLISIS SÍSMICO DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y DE POST GRADO DE LA UFA-ESPE

BEARING FPT8833/12-12/8-5 SEISMIC PERFORMANCE IN THE RESEARCH AND POSGRADE CENTER AT UFA-ESPE

Michael Constantinou

Department of Civil, Structural
University of New York at Buffalo

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

Enrique Morales

Department of Civil, Structural
University of New York at Buffalo

Pablo Caiza

Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos.

RESUMEN

Se analiza el desempeño del aislador de triple péndulo de fricción FPT8833/12-12/8-5 que se pensaba utilizar en la construcción del nuevo Centro de Investigaciones Científicas y de Post Grado de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, modelado como un sistema de un grado de libertad, ante la acción del sismo de diseño que recomienda la Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-15, que tiene un período de retorno de 475 años y ante un sismo máximo considerado, que tiene un período de recurrencia entre 1224 y 2190 años, con la finalidad de determinar la estabilidad del sistema y los máximos desplazamientos utilizando los coeficientes de fricción nominales, más bajos.

Luego del análisis realizado se decidió incrementar la altura del aislador al FTP8833/12-12/8-6, que será el que se utilice en el Proyecto. Finalmente se comprobó que para el nivel de cargas actuantes no es necesario colocar placas exteriores adicionales.

Palabras Claves: Aislador triple péndulo. Sismos de Control.

ABSTRACT

Seismic performance of the triple friction pendulum named FPT8833/12-12/8-5 is analyzed if used in the construction of the New Research and Graduate Center of Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. It is modeled as a system of one degree of freedom under the design earthquake action recommended by the Ecuadorian Construction Norm, NEC-15, which has a return period of 475 years, and the maximum considered earthquake, which has a recurrence period between 1224 and 2190 years. The objective is to determine the stability of the system and the maximum displacements obtained using nominal friction coefficients.

It was decided to increase the height of the bearing in order to reduce the maximum displacements. It was also found that, due to the level of acting loads, it is not necessary to use additional exterior plates.

1 INTRODUCCIÓN

Seis de los ocho bloques estructurales del nuevo Centro de Investigaciones Científicas y de Post Grado, van a construirse con aisladores sísmicos de triple péndulo de fricción FPT, por lo que se decidió hacerlo con un solo tipo de aislador a sabiendas de que por la variación de las cargas en los diferentes elementos estructurales se podía haberlo hecho con tres tipos de aisladores, pero esto implica para el fabricante construir tres matrices diferentes, preparar los ensayos de las mismas para tres condiciones; todo esto encarece el valor de los aisladores, por lo que se decidió hacerlo con un solo aislador, a sabiendas de que en algunos casos va a estar sobre dimensionado pero en la mayor parte de los casos es el adecuado.

Antes de indicar el aislador que se va a colocar, conviene mirar la figura 1, en que se presenta un aislador FPT, con su respectiva nomenclatura. Básicamente el aislador está compuesto por 4 placas de radios R_i y coeficientes de roce μ_i ; con alturas h_i , las mismas que están indicadas en la figura 1.

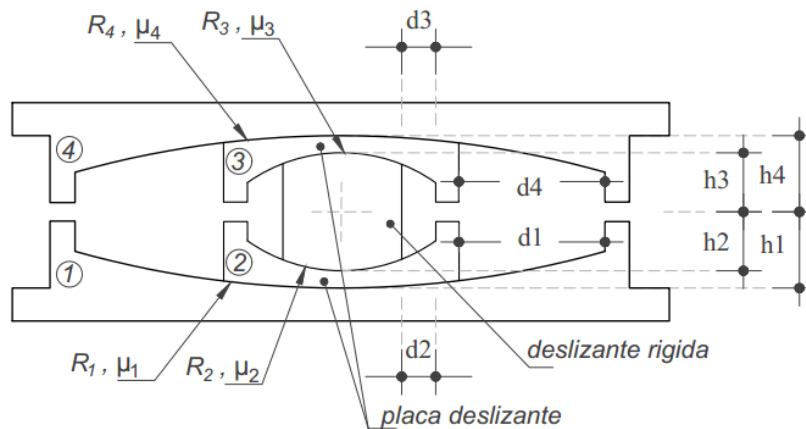


Figura 1 Nomenclatura de un aislador FPT. Fuente: Fenz y Constantinou (2007)

El aislador FPT tiene 12 propiedades geométricas a saber: 4 de los radios de curvatura; 4 de las alturas y 4 de los desplazamientos. Por otra parte tiene 4 propiedades mecánicas que son los coeficientes de fricción.

Un caso muy común de los aisladores es que: $R_1 = R_4$; y que $R_2 = R_3$; lo propio se tiene con las alturas: $h_1 = h_4$; y $h_2 = h_3$; y con los desplazamientos: $d_1 = d_4$; y $d_2 = d_3$. Con esto las propiedades geométricas se reducen a 6. El coeficiente de roce de las placas exteriores también es igual, no así el de las placas interiores. Al menos estas son las características del aislador **FPT8833/12-12/8-5**

Un modelo numérico que describe el funcionamiento del FPT, es considerar que este dispositivo, está compuesto por tres péndulos, que se describen a continuación.

- **Primer péndulo**

Al inicio del movimiento, se desliza la base rígida del aislador interior. Por lo tanto, el deslizamiento se produce en las superficies de radio R_2 y R_3 . Para las condiciones geométricas del aislador **FPT8833/12-12/8-5**, se tiene:

$$L_1 = R_2 + R_3 - (h_2 + h_3) \quad (1)$$

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{L_1}{g}} \quad (2)$$

$$\Delta_1 = (\mu_1 - \mu_2) L_1 \quad (3)$$

Donde L_1 es la longitud del primer péndulo; T_1 su período fundamental; Δ_1 el desplazamiento lateral máximo; g es la aceleración de la gravedad.

- **Segundo péndulo**

Corresponde al caso en que el aislador se desliza en las placas 1 y 3, cuyos radios son: R_1, R_3 .

$$L_2 = R_1 + R_3 - (h_1 + h_3) \quad (4)$$

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{L_2}{g}} \quad (5)$$

$$\Delta_2 = (\mu_4 - \mu_1) L_2 \quad (6)$$

Donde L_2, T_2, Δ_2 , son la longitud, período y desplazamiento del segundo péndulo.

- **Tercer péndulo**

El movimiento se da en las placas cuyos radios son: R_1, R_4 . Aquí se tiene:

$$L_3 = R_1 + R_4 - (H + t + t) \quad (7)$$

$$T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{L_3}{g}} \quad (8)$$

Donde L_3, T_3 , es la longitud y período de vibración del tercer péndulo.

Los tres péndulos indicados, corresponden a las tres primeras fases del modelo de Fenz y Constantinou (2007) en que consideran cinco fases. Las dos restantes que vendrían a ser, la cuarta el aislador trabaja en el segundo péndulo y en la quinta fase lo hace en el primer péndulo.

- **Capacidad de desplazamiento**

Para encontrar la capacidad de desplazamiento d_t del aislador **FPT8833/12-12/8-5** se debe tener en cuenta que los aisladores FPT se desplazan y rotan.

$$d_t = (d_2 + d_3) \frac{L_1}{L_{T1}} + (d_1 + d_4) \frac{L_2}{L_{T2}} \quad (9)$$

Donde: d_i son la capacidad de desplazamiento que tiene el aislador interior y el exterior, ver figura 1; L_1, L_2 son las longitudes del primer y segundo péndulo; L_{T1} es la suma de los radios R_2 y R_3 ; L_{T2} es la suma de los radios R_1 y R_4 .

La nomenclatura utilizada por EPS (Earthquake Protection System) para identificar los aisladores es la siguiente: $FPT R_1 \phi_1 / b_4 - R_2 / b_2 - H$. Donde R_1, R_2 son los radios de las placas 1 y 2; ϕ_1 , es el diámetro de las superficies cóncavas 1 y 4; b_4 es el diámetro del aislador interior; b_2 es el diámetro del deslizador rígido; H es la altura interior del deslizador rígido.

En el Anexo 1 se presenta los componentes de un aislador FTP, en la parte superior se observa la superficie cóncava de la placa 1, que está totalmente pulido; en la parte central se observa el aislador interior que tiene en su parte interna dos superficies cóncavas y una base rígida; finalmente abajo se indica un aislador completamente terminado, el mismo que está sellado para impedir que ingrese polvo al aislador y pueda deslizarse libremente.

2 AISLADOR FPT8833/12-12/8-5

Como se indicó se utilizará un aislador FPT8833/12-12/8-5, que tiene la geometría indicada en la figura 2. Las dimensiones se presentan en la tabla 1; los coeficientes de roce en la tabla 2. EPS (2015).

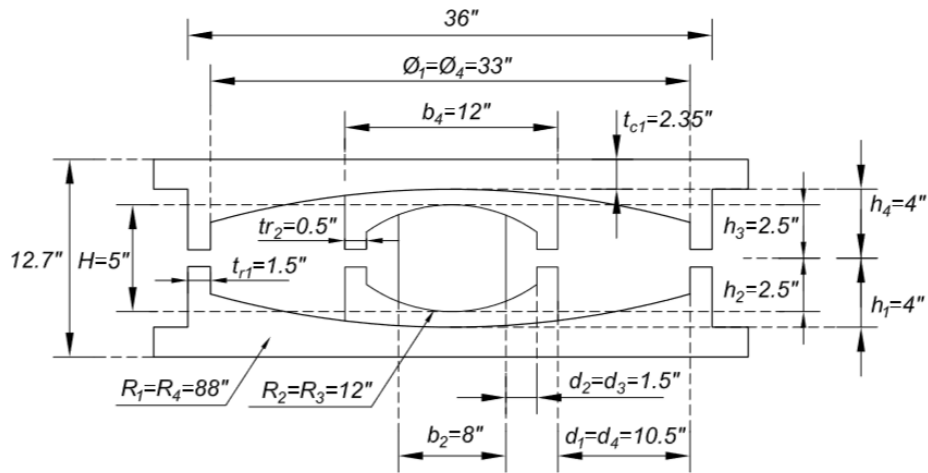


Figura 2 Geometría del aislador FPT8833/12-12/8-5.

Tabla 1 Geometría del aislador FPT8833/12-12/8-5

Identificación	Valor en pulgadas	Valor en cm
Radio de curvatura de las placas 1 y 4 $R_1 = R_4$	88	223.5
Diámetro de las placas 1 y 4, $\phi_1 = \phi_4$	33	83.82
Diámetro de aislador interior, b_4	12	30.5
Radio de aislador interior $R_2 = R_3$	12	30.5
Diámetro de deslizador rígido b_2	8	20.32
Altura de aislador interior H	5	12.7
Espesor de toques exteriores t_{r1} $t_{r1} = \frac{36 - 33}{2} = 1.5''$	1.5	3.81
Espesor de toques interiores t_{r2}	0.5	1.27
Espesor de aislador interior en el centro t_{c2}	1.5	3.81
Espesor de aislador exterior en el centro t_{c1}	2.35	5.97
Capacidad de desplazamiento $d_1 = d_4$ $d_1 = \frac{36 - 12 - 2 * 1.5}{2} = 10.5''$	10.5	26.67
Capacidad de desplazamiento $d_2 = d_3$ $d_2 = \frac{12 - 8 - 2 * 0.5}{2} = 1.5''$	1.5	3.81
Altura de aislador interior $h_2 = h_3$ $h_2 = \frac{H}{2} = \frac{5}{2} = 2.5''$	2.5	6.35
Altura de aislador	12.7	32.26
Alturas $h_1 = h_4$ $h_1 = 2.5 + 1.5 = 4''$	4	10.16

Tabla 2 Coeficientes de roce

Propiedad	$\mu_2 = \mu_3$	μ_1	μ_4
Valor Superior UB	0.015	0.07	0.08
Valor Inferior LB	0.008	0.05	0.06
Valor Nominal	0.01	0.06	0.07

Con los valores de roce **UB** (Upper Bound) se determinan las fuerzas que actúan en el aislador, con los valores **LB** (Lower Bound) los desplazamientos, debido a que con estos valores se hallan los máximos valores de fuerzas y desplazamientos.

En la tabla 3 se presenta la longitud del péndulo; el período y el desplazamiento esperado en los dos primeros péndulos. Se aprecia que el rango de variación del período se halla entre 1.39 y 4.15 s, de tal manera que ante un sismo de baja magnitud se flexibiliza muy poco a la estructura pero ante sismos más intensos la flexibilización es notable, llegando a 4.15 s.

El desplazamiento se obtuvo en base a los coeficientes de roce nominales.

Tabla 3 Cálculo de longitud, período y desplazamiento en cada péndulo.

Péndulo	L_i	T_i	Δ_i
1	$L_1 = 12 + 12 - 5$ $L_1 = 19'' = 48.26 \text{ cm}$	$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{48.26}{980}}$ $T_1 = 1.39 \text{ s.}$	$\Delta_1 = (0.06 - 0.01)19$ $\Delta_1 = 0.95''$
2	$L_2 = 88 + 12 - (4 + 2.5)$ $L_2 = 93.5''$ $= 237.49 \text{ cm}$	$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{237.49}{980}}$ $T_2 = 3.09 \text{ s.}$	$\Delta_2 = 0.95$ $+ (0.07 - 0.06)93.5$ $\Delta_2 = 1.885''$
3	$L_3 = 88 + 88 - (4 + 4)$ $L_3 = 168''$ $= 426.72 \text{ cm}$	$T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{426.72}{980}}$ $T_3 = 4.15 \text{ s}$	

La capacidad de desplazamiento del aislador FPT8833/12-12/8-5, es:

$$d_t = (1.5 + 1.5) \frac{19}{(12 + 12)} + (10.5 + 10.5) \frac{168}{(88 + 88)} = 22.4'' = 56.89 \text{ cm}$$

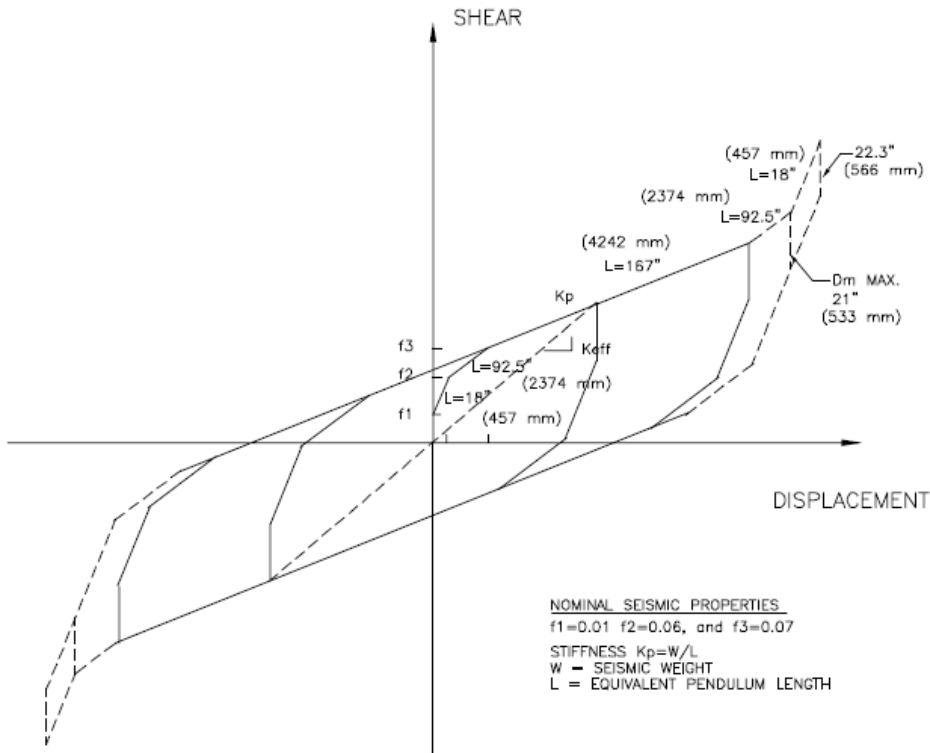


Figura 3 Curva de histéresis corte desplazamiento de aislador FPT8833/12-12/8-5
 Fuente: EPS (2015)

Un tema muy importante en el análisis sísmico de estructuras es el de la peligrosidad sísmica y más aún en estructuras con dispositivos de control pasivo como son los aisladores, ya que son estos los que van a disipar la energía sísmica que ingresa a la estructura.

3 PELIGROSIDAD SÍSMICA Y ESPECTROS DE ANÁLISIS

Se considera el espectro de diseño **DBE**, al propuesto por la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2015, NEC-15, que tiene un período de retorno de 475 años; en la figura 4 se indica la forma general del espectro elástico.

El proyecto se halla en Sangolquí, donde el factor de peligrosidad sísmica, $z = 0.4$; se encuentra sobre un perfil de suelo clasificado como "C" (Bonifaz, 2015), en consecuencia los factores de sitio de aceleración, desplazamiento y de comportamiento no lineal de suelo, son: $F_a = 1.2$; $F_d = 1.11$; $F_s = 1.11$. Con estos valores se hallan los períodos: T_0, T_c , que definen el inicio y fin de la plataforma de aceleración constante con las siguientes ecuaciones:

$$T_0 = 0.1 F_s \frac{F_d}{F_a} \quad (10)$$

$$T_c = 0.55 F_s \frac{F_d}{F_a} \tag{11}$$

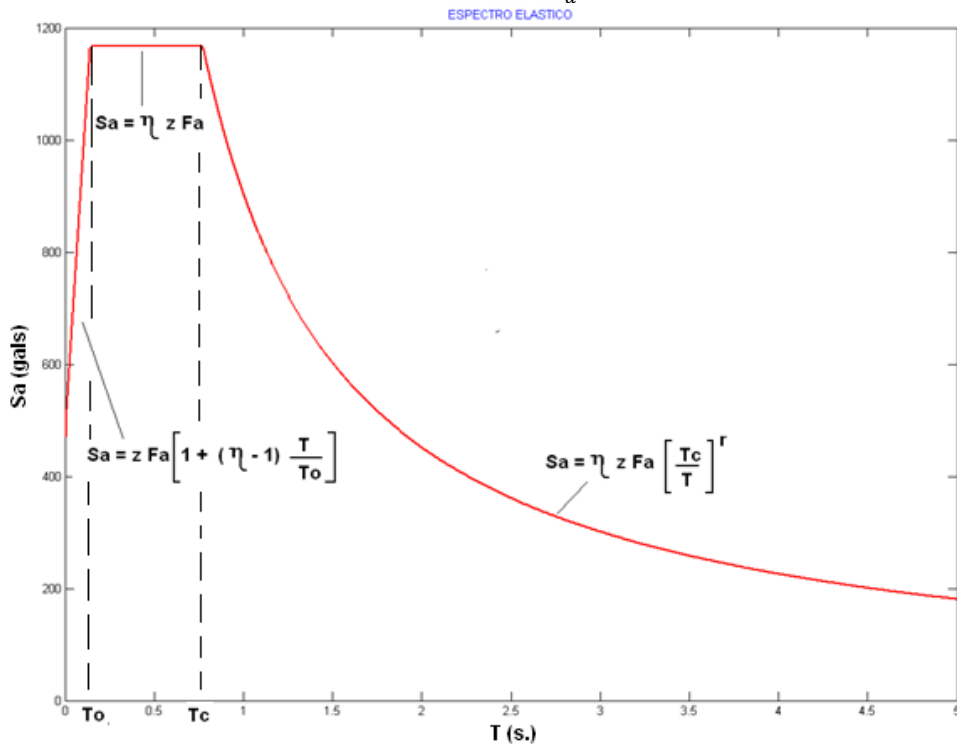


Figura 4 Espectro elástico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción. NEC-15

Al reemplazar valores se halla $T_0 = 0.10 \text{ s}$. $T_c = 0.56 \text{ s}$. Interesa encontrar la aceleración espectral S_{aDBE} en un período $T = 1 \text{ s}$, (rango de velocidad constante) en la rama descendente del espectro que viene definida por:

$$S_a(g) = \eta z F_a \left(\frac{T_c}{T} \right)^r \tag{12}$$

Las variables todavía no definidas, son: η factor de región sísmica, para la sierra vale: $\eta = 2.48$; el factor $r = 1$, para un perfil de suelo "C".

Al reemplazar valores, se tiene:

$$S_{aDBE} = \frac{2.48 * 0.4 * 1.2 * 0.56}{T} (g)$$

$$S_{aDBE} = \frac{0.667}{T} (g) \tag{13}$$

En la figura 5 se indica el espectro de aceleraciones, elástico, para el sitio del Proyecto, hallado con el NEC-15. Para el análisis estructural, se considera que a partir de $T = 5 \text{ s}$, los desplazamientos espectrales son constantes.

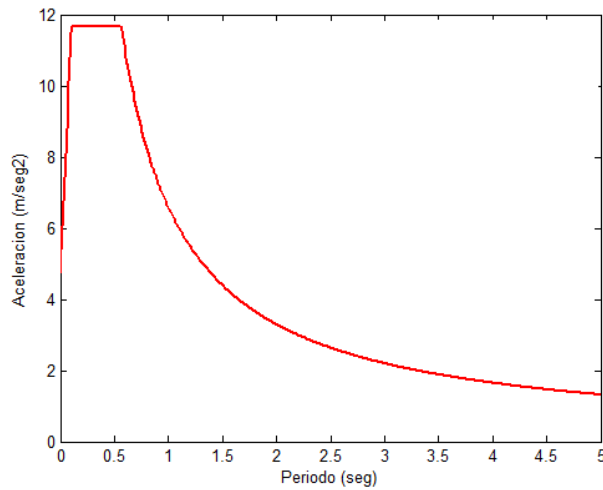


Figura 5 Espectro elástico para el Proyecto, para un período de retorno de 475 años. Fuente: NEC-15.

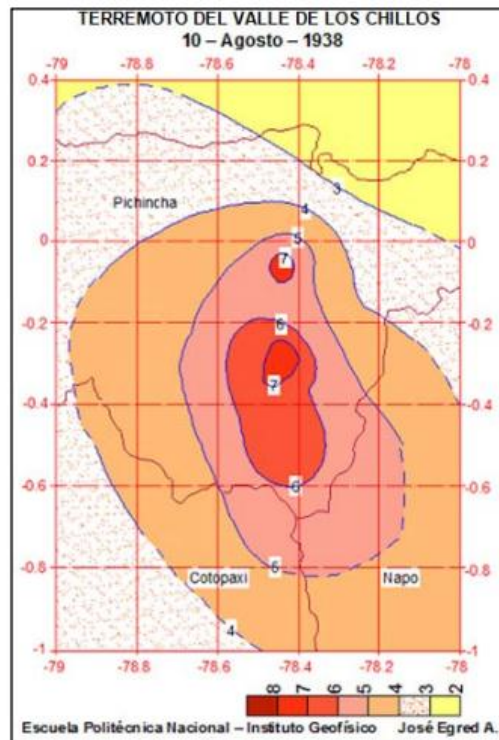


Figura 6 Isosistas del sismo del 9 de agosto de 1938. Fuente: Egred (2009).

En el último siglo, el sismo de mayor intensidad que ha afectado al Valle de los Chillos, sitio en el que se encuentra el Proyecto, es el registrado el 9 de agosto de 1938, que tuvo una magnitud estimada de 7.1 y una profundidad focal menor a

30 km. (Barona, 2010). Muy probablemente la magnitud esté sobre estimada si se observa las isosistas de este sismo, en la figura 6, en la escala de Mercalli modificada que tiene un valor máximo de XII, es de VII en la zona de mayor daño que fue Sangolquí y sus alrededores, cuyas coordenadas geográficas son: latitud – 0.334 S, longitud -78.452 W. (Egred, 2009). En esta zona se encuentra el sitio del proyecto.

No se ha realizado un estudio detenido de las fallas geológicas existentes en el Valle de los Chilllos, en que se encuentra el Proyecto pero si se lo ha realizado de la ciudad de Quito que se encuentra aproximadamente a 15 km, y es importante presentar este trabajo para inferir el sismo **MCE**.

Quito se halla sobre cuatro fallas geológicas inversas, denominadas: Puengasi, Ilumbisi-La Bota, Carcelén el Inca y Bellavista-Catequilla, cuyas trazas y planos de falla se presentan en la figura 7. La falla más cercana al Proyecto es la de Puengasi que tiene un período de recurrencia que se encuentra entre 1224 y 2190 años para que se produzca un sismo de magnitud $M_w = 6.4$, valores encontrados aplicando el método de Gutenberg y Richter, modificado y truncado. Aguiar (2015), Rivas *et al.* (2014).

Se encontraron espectros para el Sur de Quito, en los suelos tipo “C”, suponiendo que se genera un sismo $M_w = 6.4$ en la falla de Puengasi, con una profundidad focal de 10 km., empleando tres modelos de movimientos fuertes y son los desarrollados por: Abrahamson *et al.* (2014); Campbell y Borzognia (2014) y Chiou y Youngs (2014).

En la figura 8 se presentan los espectros medios hallados en perfil de suelo “C” en el Sur de Quito, con los modelos indicados en el párrafo anterior, para niveles de confianza del 50% (línea continua) y 84% (línea discontinua) también se indica el espectro hallado con el NEC-15.

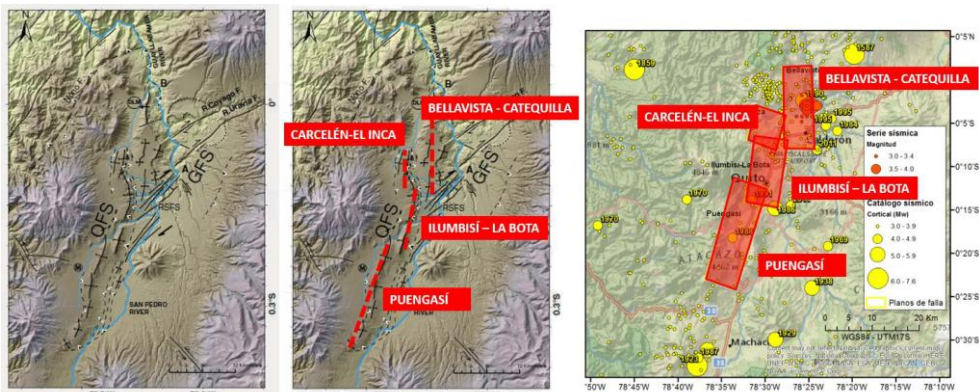


Figura 7 Fallas ciegas de Quito, trazas y planos de falla.

Fuente: Rivas *et al.* (2014)

Para el período de 1 segundo, los espectros hallados con un nivel de confianza del 84% superan la aceleración espectral encontrada con el NEC-15 y si se divide la aceleración hallada con el modelo de Campbell y Borzognia (2014) para la aceleración del NEC-15 se encuentra un valor de 1.4 (0.94/0.667).

Considerando el período de recurrencia ya indicado se considera que el factor de 1.4 es adecuado para encontrar el sismo **MCE** a partir del sismo **DBE**, hasta contar con estudios similares a los realizados en la ciudad de Quito en el Valle de los Chillos.

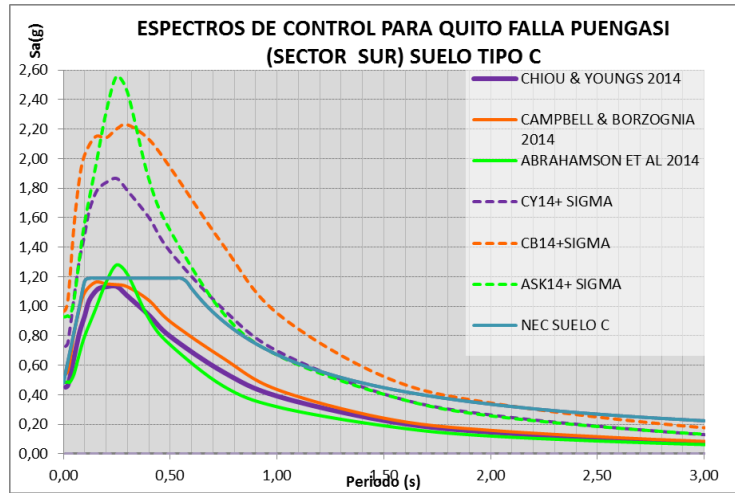


Figura 8 Espectros encontrados en perfil de suelo tipo C, para el sector Sur de Quito. Fuente: Aguiar (2015).

Por lo tanto, la aceleración espectral del sismo **MCE**, que se denomina S_{aMCE} , para la zona de períodos largos, viene dada por la siguiente ecuación.

$$S_{aMCE} = \frac{0.94}{T} (g) \quad (14)$$

Se destaca que el período es una definición estadística que no tiene relación con el período de recurrencia.

4 METODO SIMPLIFICADO LINEAL

El Método simplificado lineal, para el análisis sísmico de estructuras con aisladores de base FPT, propuesto por ASCE 7-10 considera que la superestructura va a desplazarse como cuerpo rígido; que el período del sistema de aislación es mucho más grande que el período de la superestructura y que el amortiguamiento del sistema de aislación es mayor que el de la estructura. Con estas consideraciones se puede considerar al sistema como de un grado de libertad con un modelo constitutivo del aislador bilineal, como el indicado en la figura 9.

Para el diagrama bilineal indicado en la figura 9, en Aguiar *et al.* (2008) se demuestra que la rigidez efectiva k_{ef} y el amortiguamiento equivalente β vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$k_{ef} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \tag{15}$$

$$\beta = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\mu}{\mu + \frac{D}{R}} \right] \tag{16}$$

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

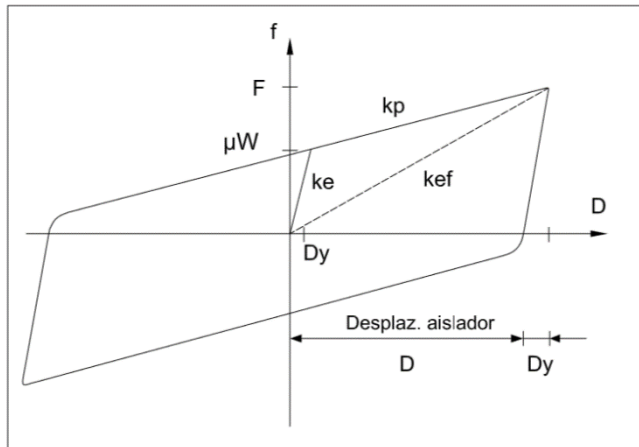


Figura 9 Simplificación del diagrama de histéresis Bilineal para el FPT.

Ahora bien, en el método simplificado se tiene que μ es el coeficiente de fricción en las superficies 1 o 4 (ver figura 1).

$$R = R_{ef1} + R_{ef4} \tag{17}$$

$$R_{efi} = R_i - h_i \tag{18}$$

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

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{ef} g}} \tag{19}$$

Los espectros se encuentran para 5% de amortiguamiento, ahora cuando se tienen aisladores en una estructura, el amortiguamiento β es mayor al 5%, por lo que se debe encontrar un factor B por el que se debe dividir el espectro del 5% para hallar el espectro con amortiguamiento β . En la tabla 4 se indican los valores de B , para diferentes valores de amortiguamiento β , recomendados por el ASCE 7-10.

Tabla 4 Valores de reducción de espectro por B . Fuente: ASCE 7-10

β (%)	5	10	20	30	40
B	1.00	1.20	1.50	1.70	1.90

Para encontrar el desplazamiento D se aplica la definición de Pseudo espectro, con lo que se encuentra.

$$D = \left(\frac{T^2}{4\pi^2} \right) \frac{S_a}{B}$$

Pero se conoce que:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T}(g)$$

Luego:

$$D = \left(\frac{S_{D1} * g}{4\pi^2} \right) \frac{T}{B} \quad (20)$$

Donde S_{D1} es el coeficiente de la aceleración de la gravedad para un período de 1 segundo.

El cálculo del desplazamiento se realiza en forma interactiva. En efecto se inicia imponiéndose un valor de desplazamiento, con el cual se obtiene la rigidez efectiva, el amortiguamiento equivalente y el período efectivo T , con este valor se halla el desplazamiento D en función de S_{D1} y B ; se compara el desplazamiento impuesto con el calculado y se continúa hasta lograr una convergencia. Se recomienda aplicar el método de la bisección para obtener más rápido la convergencia.

Lo descrito en el presente apartado, se realiza para el sismo DBE y MCE.

5 METODO SIMPLIFICADO CON CURVA DE HISTÉRESIS DE FPT

El análisis sísmico no se lo realizó con el método indicado en el apartado anterior, se lo presentó con el propósito de que se lo conozca, debido a su sencillez. Se lo hizo con el método simplificado pero trabajando con verdadera curva de histéresis del FPT. Fenz y Constantinou (2007, 2008), Fadi y Constantinou (2010), Constantinou *et al.* (2007),

En realidad lo que cambia, es que en lugar de trabajar con la curva de histéresis bilineal indicada en el apartado anterior, se lo hace con el modelo que se halla en los aisladores FPT, que se describen muy rápidamente a continuación.

Fenz y Constantinou (2007,2008) consideran cinco fases en el funcionamiento del FPT, cuatro de las cuales se indican en la figura 10. La primera, segunda y tercera fase corresponden a tres péndulos indicados al comienzo de este artículo; en la fase cuatro el aislador interior toca uno de los topes exteriores y trabaja como el péndulo dos y en la fase cinco el aislador interior toca el borde inferior y superior, por lo que el movimiento se da en el péndulo 1.

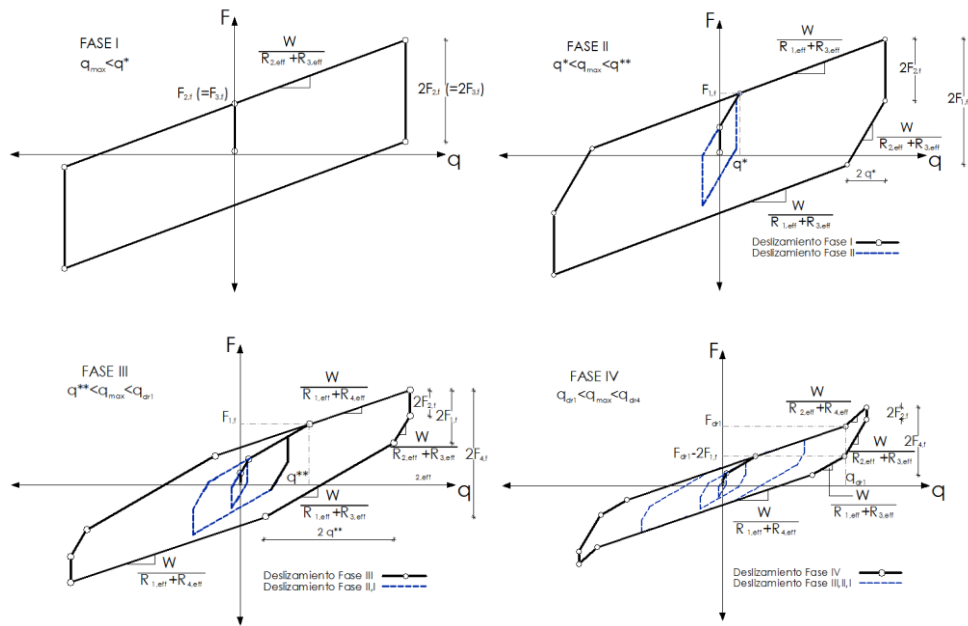


Figura 10 Fases del modelo de Fenz y Constantinou (2007) para el aislador FPT.

Al considerar el caso frecuente de la geometría de los FPT en que se reducen las propiedades de 12 a 6, Mc Vitty y Constantinou (2015) presentan un modelo más sencillo de análisis en que se reduce el comportamiento de seis fases a tres fases. Para cada una de las fases se tienen ecuaciones para definir la rigidez efectiva en función del desplazamiento esperado, que de igual manera se halla en forma iterativa. Se encuentra también el amortiguamiento equivalente, empleando la siguiente ecuación.

$$\beta = \frac{E_D}{4 \pi E_L}$$

Donde E_D es la energía disipada en un ciclo de histéresis; E_L es la energía elástica.

6 DESPLAZAMIENTOS ESPERADOS

En la tabla 1 se presentan las características y propiedades del aislador FPT8833/12-12/8-5, cuyos coeficientes de fricción o de roce son los indicados en la tabla 2. El cálculo de los desplazamientos laterales se realizó para el sismo DBE y MCE ya indicados, trabajando con los valores nominales del coeficiente de fricción, pero para que se tenga mayor desplazamiento se consideró el menor valor de la fricción de las placas exteriores. Es decir, se calculó con los siguientes valores:

$$\mu_1 = \mu_4 = 0.06$$

$$\mu_2 = \mu_3 = 0.01$$

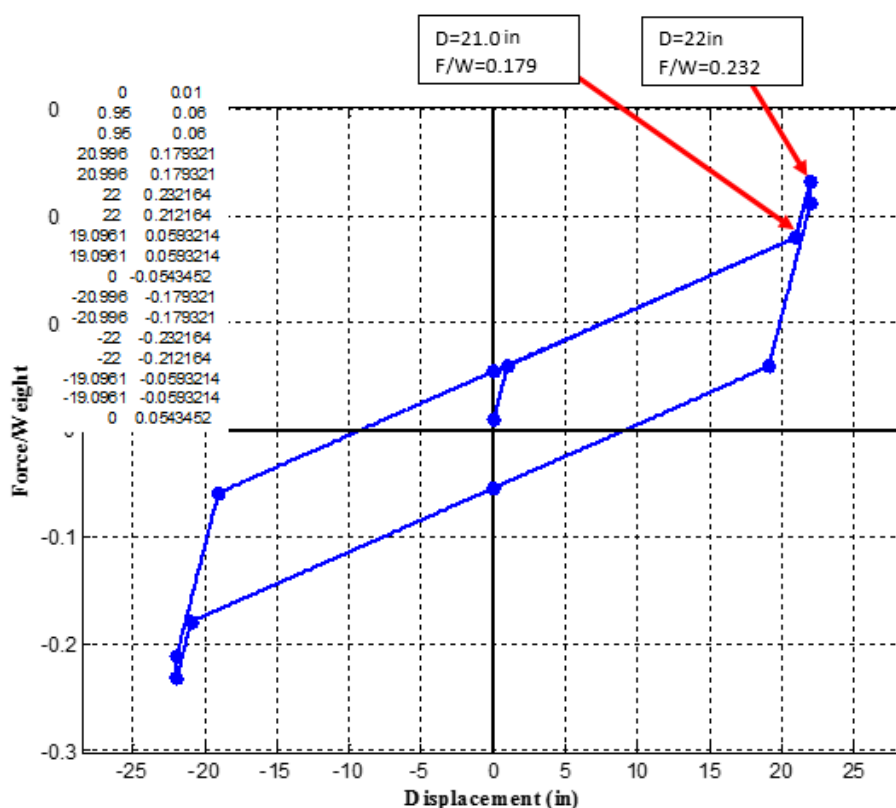


Figura 11 Desplazamiento esperado para el sismo DBE y MCE.

Por otra parte, la carga promedio que llega al sistema de aislación es de 268 T. Para esta carga los desplazamientos esperados, considerando el efecto de torsión que no se ha indicado en este artículo pero se lo tomó en cuenta en el cálculo se indican en la figura 11.

Para el sismo DBE el desplazamiento lateral máximo es $D = 21'' = 53.3 \text{ cm}$, y para el sismo MCE es $D = 22'' = 55.8 \text{ cm}$. Son valores bastante altos, pero de eso se trataba ya que los coeficientes de fricción con los que se calculó son muy bajos para precisamente hallar desplazamientos altos pero lo importante es conocer que el aislador si resiste un sismo con período de recurrencia entre 1224 y 2190 años.

Los valores indicados en la parte superior izquierda de la figura 11 corresponden a las coordenadas del diagrama de histéresis: desplazamiento en pulgadas y relación fuerza lateral para carga vertical (F/W).

7 CALCULO DEL ESPESOR DE LA PLACA

El objetivo del presente apartado es conocer si se necesita una placa exterior al aislador o si el valor de $t_{c1} = 2.35''$ (espesor de las placas 1 y 4 en el centro) es suficiente, (EPS, 2015). En caso de no ser necesario la placa exterior se colocará directamente el aislador a las vigas de acero o a las columnas o pedestal

de hormigón. El cálculo se realiza en dos sitios, el primero cuando el aislador se encuentra en el centro (solo cargas verticales) y el segundo cuando se halla en los extremos (cargas verticales más sismo).

- **Espesor de la placa en el centro**

Se aplica el método de la columna equivalente que consiste en considerar al aislador interior como una columna con dos placas de acero en sus extremos de ancho t_{eff} .

$$t_{eff} = \sqrt{t_{c1}^2 + t_b^2} \quad (22)$$

Donde t_b , es el espesor de la placa exterior al aislador, que se va a considerar igual a cero, ya que no se necesita como se verá a continuación; el significado de t_{c1} ya fue indicado. Sobre estas dos placas gravita una carga axial P_u , que genera una presión F_{bu} en un círculo de diámetro b_1 .

$$F_{bu} = \phi_c * 0.85 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad (23)$$

Donde ϕ_c es el factor de minoración de esfuerzos en el hormigón que es igual a 0.65; f'_c es la resistencia a la compresión del hormigón; $\frac{A_2}{A_1}$ es un factor de confinamiento del hormigón que se considera igual a 2.

El diámetro b_1 se calcula con la siguiente ecuación.

$$F_{bu} = \frac{P_U}{\frac{\pi b_1^2}{4}} = \frac{4P_U}{\pi b_1^2} \quad \rightarrow \quad b_1 = \sqrt{\frac{4P_U}{\pi F_{bu}}} \quad (24)$$

Si no se halla en la forma indicada se puede asumir un valor mayor de b_1 . En la parte superior de la figura 12 se presenta el aislador en la parte central y en la parte inferior el área de la presión en la placa que genera un momento M_U en la cara del aislador interior, que se obtiene con la siguiente ecuación.

$$M_U = F_{bu} \frac{r^2}{2} + F_{bu} \left(\frac{b_1}{b} - 1 \right) \frac{r^2}{3} \quad (25)$$

$$r = \frac{b_1 - b}{2} \quad (26)$$

La ecuación para determinar el momento de flexión es aproximada ya que se ha considerado una carga uniforme más una carga triangular, como se aprecia a la derecha de la figura 13, en lugar de considerar la carga variable en forma esférica indicada a la izquierda de la figura 13. Por eso se debe corregir el momento de flexión M_u por un factor de corrección que se obtiene de la figura 14, en función de la relación b/b_1 .

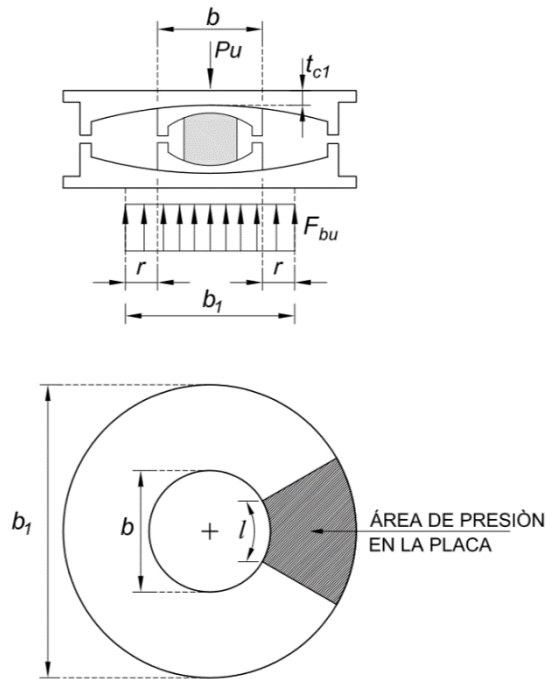


Figura 12 Método de la columna equivalente. Fuente: Constantinou *et al.* (2011).

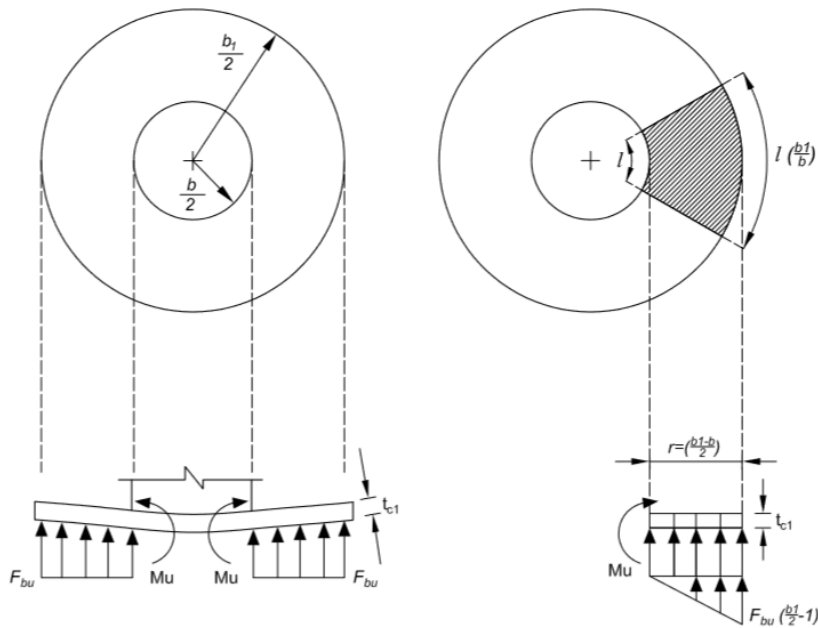


Figura 13 Diagramas de presiones, exacto y aproximado para calcular el momento de flexión, en la cara del aislador interior. Fuente: Constantinou *et al.* (2011).

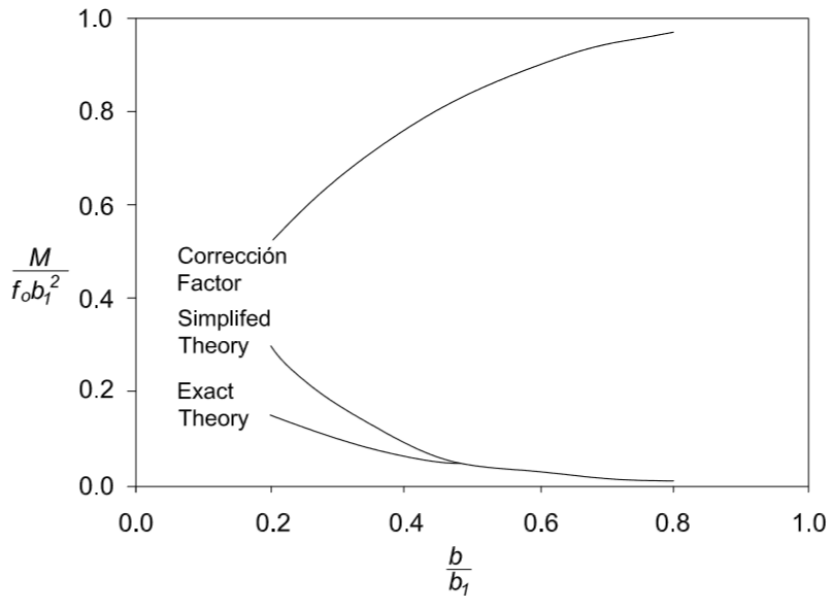


Figura 14 Factor de corrección del momento de flexión por la forma de cálculo de M_u . Fuente: Constantinou *et al.* (2011).

Finalmente se debe verificar que la capacidad a flexión que se va a denominar M_Y sea mayor que la demanda M_U . Se denominó M_Y ya que se va a trabajar con el momento de fluencia de las placas.

$$M_Y = \phi_s * f_y * z = \phi_s * f_y * \frac{t_{eff}^2}{4} \tag{27}$$

Donde f_y es el límite de fluencia del material; z es el momento plástico. Las restantes variables han sido ya indicadas. En la tabla 5 se presenta el cálculo del espesor de la placa, en el centro.

Tabla 5 Cálculo del espesor de la placa en el punto central.

Variable	Nombre	Valor
Diámetro de aislador interior	b	12"
Espesor de la placa cóncava en el centro.	t_{c1}	2.35"
Espesor de la placa exterior	t_b	0
Espesor efectivo de la placa $t_{eff} = \sqrt{t_{c1}^2 + t_b^2}$	t_{eff}	2.35"
Resistencia del hormigón $f'_c = 21 MPa$	f'_c	3.0 ksi
Relación de confinamiento en el hormigón	A_2/A_1	2
Límite de fluencia del acero $f_y = 276 MPa$	f_y	40 ksi
Factor de reducción de esfuerzos en hormigón	ϕ_c	0.65

Factor de reducción de esfuerzos a flexión en acero	ϕ_s	0.90
Presión en el hormigón $F_{bu} = \phi_c * 0.85 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$	F_{bu}	3.32 ksi
Diámetro b_1 . Considerando $P_U = 268 T$. $b_1 = \sqrt{\frac{4P_U}{\pi F_{bu}}}$	b_1	15.05"
Se impone un valor mayor a b_1 (Criterio conservador)	b_1	20.7"
Cálculo de longitud de volado r $r = \frac{b_1 - b}{2}$	r	4.4"
Cálculo de M_U simplificado $M_U = F_{bu} \frac{r^2}{2} + F_{bu} \left(\frac{b_1}{b} - 1 \right) \frac{r^2}{3}$	M_U	46.5 Kip-in
Relación b/b_1 para hallar factor de corrección de M_U	b/b_1	0.58
Factor de corrección de figura 14	f	0.93
Momento último exacto	M_{Ue}	43.27 kip-in
Capacidad de Momento en la fluencia $M_Y = \phi_s * f_y * z = \phi_s * f_y * \frac{t_{eff}^2}{4}$	M_Y	49.7 kip-in

El momento de capacidad es mayor que el momento de demanda. Por lo tanto, el espesor $t_{c1} = 2.35''$ es suficiente y no se requiere placa exterior. Se destaca que el momento M_U es menor al indicado en la tabla 5, debido a que el diámetro b_1 es menor al valor con el cual se obtuvo el momento de demanda.

- **Espesor de la placa en el borde**

En la figura 15 se ilustra el punto en el cual se halla el aislador debido a cargas verticales más un sismo muy intenso. La parte que conlleva mayor trabajo es determinar el diámetro b_1 , una vez encontrado este valor se procede en forma similar al anterior pero considerando los siguientes factores de minoración de esfuerzos $\phi_c = 1$, $\phi_s = 1$.

En la figura 16 se ilustra el proceso de cálculo, a la izquierda se presenta el diagrama de presiones con la carga actuando en la posición desplazada se aprecia que una parte del diagrama de presiones queda afuera de la placa del aislador y esto no puede darse, por lo que Constantinou *et al* (2011) recomienda mantener la misma área de distribución de presiones pero alargándola en el sentido contrario como se observa en la parte central de la figura 16, éste alargamiento conduce a tener una distribución de presiones en forma elíptica con eje menor a_1 y eje mayor b_1 .

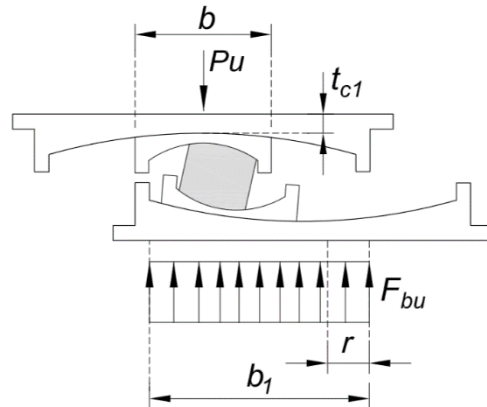


Figura 15 Posición desplazada del aislador interior

La determinación del eje menor a_1 está dada por la geometría del aislador y por el desplazamiento esperado.

$$a_1 = \left(\frac{L}{2} - d \right) * 2 \quad (28)$$

El eje mayor se encuentra con la siguiente expresión

$$b_1 = \frac{4P_u}{\pi a_1 F_{bu}} \quad (29)$$

En lugar de calcular b_1 en la forma indicada se puede imponer un valor siempre y cuando sea más alto que el valor que se halla con la ecuación anotada. Finalmente se calcula el momento último con la distribución de presiones que se encuentra en el eje más largo (área achurada de figura 16) y se procede en forma similar al caso anterior.

En la tabla 6 se resume el cálculo del espesor de la placa en los extremos. Nuevamente no se considera la existencia de placa exterior.

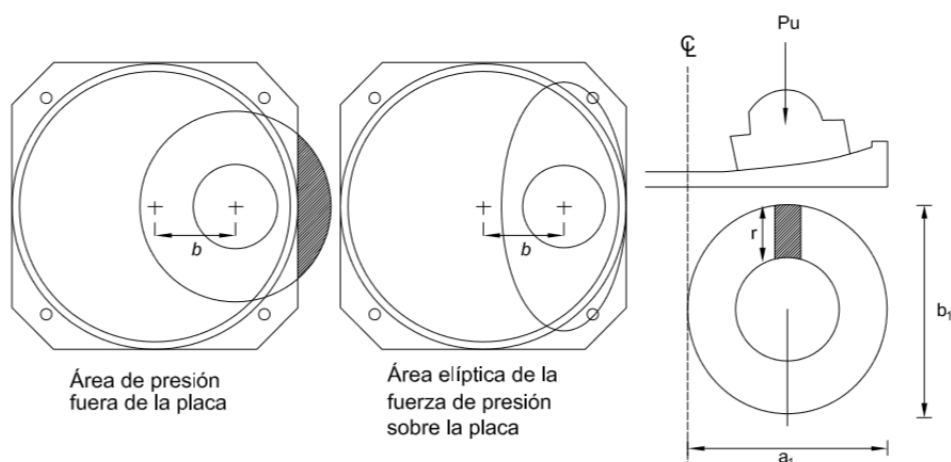


Figura 10. Presiones en la placa ante desplazamiento horizontal.
Fuente: Constantinou *et al.* (2011)

Tabla 6 Cálculo del espesor de la placa en el extremo.

Variable	Nombre	Valor
Diámetro de aislador interior	b	12"
Espesor de la placa cóncava	t_{c1}	2.35"
Espesor de la placa exterior	t_b	0
Espesor efectivo de la placa	t_{eff}	2.2"
$t_{eff} = \sqrt{t_{c1}^2 + t_b^2}$		
Resistencia del hormigón $f'_c = 21 \text{ MPa}$	f'_c	3.0 ksi
Relación de confinamiento en el hormigón	A_2/A_1	2
Límite de fluencia del acero $f_y = 276 \text{ MPa}$	f_y	40 ksi
Factor de reducción de esfuerzos en hormigón	ϕ_c	1.00
Factor de reducción de esfuerzos a flexión en acero	ϕ_s	1.00
Presión en el hormigón	F_{bu}	5.10 ksi
$F_{bu} = \phi_c * 0.85 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$		
Se impone un valor de b_1 (Criterio conservador)	b_1	18"
Cálculo de longitud de volado r	r	3"
$r = \frac{b_1 - b}{2}$		
Cálculo de M_U simplificado	M_U	30.6 Kip-in
$M_U = F_{bu} \frac{r^2}{2} + F_{bu} \left(\frac{b_1}{b} - 1 \right) \frac{r^2}{3}$		
Relación b/b_1 para hallar factor de corrección de M_U	b/b_1	0.67
Factor de corrección de figura 14 (Valor conservador)	f	1.00
Momento último exacto	M_{Ue}	30.6 kip-in

Capacidad de Momento en la fluencia $M_Y = \phi_s * f_y * z = \phi_s * f_y * \frac{t_{eff}^2}{4}$	M_Y	49.7 kip-in
--	-------	-------------

Nuevamente la capacidad a flexión es mayor que la demanda. Por lo tanto no se requiere placa extra y las dimensiones del aislador son las adecuadas.

8 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Se ha presentado las características geométricas y mecánicas de un aislador FPT8833/12-12/8-5 y se ha determinado las fases en las que va a trabajar el aislador para un mejor entendimiento del funcionamiento de los aisladores de triple péndulo de fricción.

Por otra parte se ha definido el espectro de diseño DBE para el sitio en que se halla el Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, en el Valle de los Chillos en Ecuador, siguiendo lo prescrito en la NEC-15, que tiene un período de retorno de 475 años y se ha determinado el espectro para el sismo máximo considerado MCE, asociado a un sismo de magnitud $M_w = 6.4$ con profundidad focal de 10 km, en la falla de Puengasí que es la falla más cercana al Proyecto que ha sido estudiada con detenimiento. Este sismo tiene un período de recurrencia que se encuentra entre 1224 y 2190 años. Del estudio realizado se determinó que el espectro para el sismo MCE es igual a 1.4 por el espectro del sismo DBE.

Por otra parte se encontró el desempeño del aislador ante los espectros DBE y MCE, considerando los valores nominales, del coeficiente de fricción, entregados por EPS (2015) y se halló que los desplazamientos laterales son bastante altos. Por lo que se decidió incrementar la altura del aislador para tener mayor rigidez y menores desplazamientos. El que se va a utilizar es FPT8833/12-12/8-6.

Finalmente se comprobó que con las dimensiones del aislador FPT8833/12-12/8-5, no se requiere colocar una placa sobre los aisladores sino que deben acoplarse directamente a las vigas de acero que conforman la losa de aislación. Para el caso en que se tiene los aisladores sobre columnas de hormigón si se necesita una placa exterior por el sistema constructivo.

REFERENCIAS

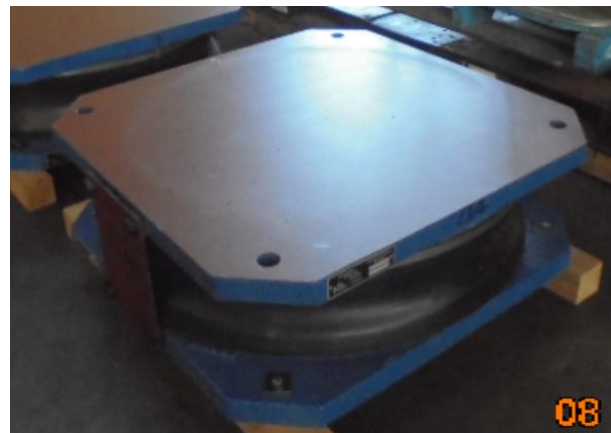
1. Abrahamson N., Silva W., Kamai R., (2014), "Summary of the ASK14 ground motion relation for active cristal regions", *Earthquake Spectra*, **30 (3)**, 1025-1055
2. Aguiar R., (2015), *Espectros de Control para la ciudad de Quito-Ecuador*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE, Universidad Politécnica de Cataluña, **IS-71**, 104 p., Barcelona, España.

3. ASCE 7-10, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, 608 p.
4. Barona M., (2010), *Vulnerabilidad sísmica del Centro de Sangolquí*, Tesis de Grado para obtener el título de Ing. Civil. Universidad de Fuerzas Armadas, ESPE.
5. Bonifaz Hugo, (2015), *Informe de suelos. Edificio de Investigaciones*. Laboratorio de Ensayo de Materiales LEM-ESPE, 33 p., Sangolquí.
6. Campbell K., Borzognia Y., (2014), "NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra", *Earthquake Spectra*, **30 (3)**, 1087-1115
7. Constantinou, M.C, Kalpakidisk, I., Filiatrault A., Ecker R.A., (2011), *LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*, MCEER Report **11-0004**, September 26, 2011.
8. Constantinou, M.C., Whittaker, A.S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M. and Warn, G.P., (2007), *Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading*, Report No. **MCEER-07-0012**, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 2007. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Performance-of-Seismic-Isolation-Hardware-Under-Service-and-Seismic-Loading-MCEER-07-0012.html>
9. Chiou B. S.-J, Youngs R.R. (2014), "Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra" *Earthquake Spectra*, **30 (3)**, 1117-1153.
10. Egred J., (2009) *Isosistas de los sismos registrados en el Ecuador*. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.
11. EPS (2015), "Ensayo de FPT8833/12-12/8-5", *Reuniones de trabajo realizadas el 8 y 9 de septiembre de 2015*, Mare Island, Vallejo, California.
12. Fadi F., and Constantinou M. (2010), "Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39, 5-22.
13. Fenz D., Constantinou M., (2007), Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearings, Technical Report **MCEER-08-0007**, *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html>
14. Fenz, D.M. and Constantinou, M.C., (2008), *Development, implementation and verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical sliding bearings*. Report No. **MCEER-08-0018**, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Development-Implementation-and-Verification-of-Dynamic-Analysis-Models-for-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0018.html>
15. McVitty, W.J. and Constantinou, M.C., (2015), *Property modification factors for seismic isolators: Design Guidance for Buildings*, Technical Report No. **MCEER-15-0005**, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, 2015. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Property->

[Modification-Factors-for-Seismic-Isolators-Design-Guidance-for-Buildings-MCEER-15-0005.html](#)

16. NEC-SE-DS (2015) *Norma Ecuatoriana de la Construcción*, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, MIDUVI.
17. Rivas A., Aguiar R., Benito M. B., Gaspar J., Parra H., (2014), "Determinación del período de recurrencia y magnitud máxima para el control de las estructuras en el rango elástico ante un sismo asociado a las fallas inversas de Quito", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **19 (2)**, 201-217.

ANEXO 1

PLACA INFERIOR CÓNCAVA DE RADIO R_1 Y DIAMETRO \varnothing_1 AISLADOR INTERIOR DE DIÁMETRO b_4 Y COEFICIENTE DE ROCE μ_4 

AISLADOR TERMINADO