

## **ANÁLISIS SÍSMICO DE UNA ESTRUCTURA CON AISLADORES FPS DE PRIMERA Y SEGUNDA GENERACIÓN Y ELASTOMÉRICOS CON NÚCLEO DE PLOMO**

### **Roberto Aguiar**

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

### **Fernanda Vergara**

Departamento de Post Grado en Ingeniería Estructural  
Universidad Central del Ecuador  
Av. América, s/n, Quito, Ecuador

### **Byron Guaygua**

Departamento de Post Grado en Ingeniería Estructural  
Universidad Central del Ecuador  
Av. América, s/n, Quito, Ecuador

### **Juan Pablo Monge**

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

## **RESUMEN**

Se presenta el marco teórico sobre el diseño propiamente dicho de aisladores FPS (Frictional Pendulum System) de la primera y segunda generación y de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo; de acuerdo a las investigaciones desarrolladas en la Universidad de Buffalo al 2011. Posteriormente se realiza, en forma detallada, el análisis sísmico de una estructura de tres pisos con estos tres tipos de dispositivos de control pasivo y se comparan los resultados.

**Palabras Claves:** Aisladores sísmicos, Espectros, Cojinete, Microzonificación.

## **ABSTRACT**

The theoretical framework is presented to completely design the FPS (Frictional Pendulum System) isolator of the first and second generation and elastomeric isolators with lead core, according to research conducted at the University of Buffalo in 2011. Subsequently, the seismic analysis of a three floor structure with three types of passive control devices is performed and the results are compared.

**Keywords:** Seismic isolators, Spectrum, Bearing, microzonification.

## 1 INTRODUCCIÓN

Todo evento sísmico deja a su paso pérdidas humanas y materiales, por tal razón la humanidad ha desarrollado en los últimos años sistemas de protección que ayudan a mitigar los efectos destructivos de una estructura durante un sismo, como son los sistemas de disipación pasiva, sistemas de disipación activa, sistemas híbridos y sistemas semi-activos, ver figura 1.

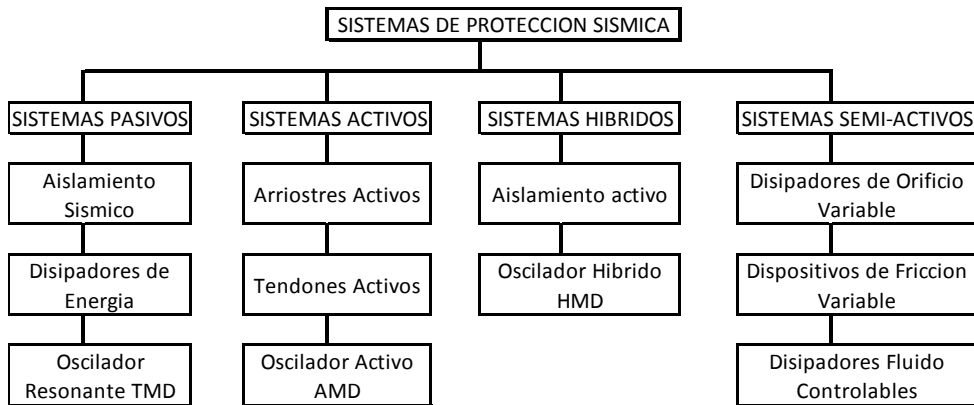


Figura 1 Sistemas de Protecciones Sísmicas

Hoy en día los sistemas más utilizados para mitigar los efectos de un sismo es el aislamiento sísmico (elemento de disipación pasiva); el aislamiento sísmico es una estrategia de diseño basada en la premisa de que es posible separar una estructura de los movimientos del suelo mediante la introducción de elementos flexibles entre la estructura y su fundación. Los aisladores reducen notablemente la rigidez del sistema estructural, haciendo que el periodo fundamental de la estructura aislada sea mucho mayor que el de la misma estructura con base fija.

Por ésta razón, los edificios con aislamiento sísmico tienen un mejor comportamiento que los edificio que no cuentan con dispositivos aisladores de base, cumpliendo el objetivo fundamental de la aislación sísmica que es el de mantener la respuesta dentro de los límites de seguridad, servicio y confort humano.

## 2 MARCO TEÓRICO GENERAL

En una estructura con aisladores se debe realizar el análisis sísmico para dos sismos denominados: de diseño “**DE**” que tiene periodo de retorno de 475 años y para un sismo máximo considerado “**MCE**” cuyo período de retorno es de 2475 años. El proyectista estructural puede cambiar estos períodos de retorno de acuerdo a la importancia de su estructura y porque no decirlo a la sismicidad de la

región. Lo importante es destacar que en el análisis se deben considerar dos sismos **DE**, y **MCE**.

El período de retorno de 475 años está asociado a una vida útil de la estructura de 50 años con una probabilidad de ser excedidas las aceleraciones sísmicas del 10%. En cambio el período de retorno de 2475 años está asociado a una vida útil de 50 años con una probabilidad de excedencia del 2%.

Las normativas sísmicas presentan espectros para 475 años de período de retorno y no determinan mediante un estudio de peligrosidad sísmica el espectro para 2475 años, lo que hace es multiplicar las ordenadas espectrales del sismo de diseño por 1.5. Existe variación en la determinación de las propiedades de los materiales por lo que no se recomienda trabajar con el valor medio si no que hay que definir dos límites un inferior y un superior. Al nivel inferior se denomina **LB** (lower level) y al nivel superior **UB** (upper level).

En los siguientes apartados se va a presentar el marco teórico para los aisladores FPS de la primera generación; de la segunda generación y elastoméricos con núcleo de plomo, en este orden; pero no se hará referencia al sismo de análisis ni al nivel de material. Destacando que el análisis comprende en cada uno de los sismos considerar los dos niveles de materiales.

## **2.1 AISLADORES FPS DE PRIMERA GENERACIÓN**

Los aisladores FPS trabajan en forma de un péndulo invertido autocentrante. Por lo tanto el período de vibración se halla con la siguiente ecuación:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad \longrightarrow \quad R = g \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (1)$$

Siendo  $R$  el radio de curvatura del aislador;  $g$  la aceleración de la gravedad. En la figura 2 se presenta un aislador de la primera generación en la cual se define el radio efectivo  $R_{ef}$ .

En este apartado se presenta en forma susintota: i) obtención del diagrama de histéresis; ii) análisis sísmico espacial de una estructura con los aisladores modelados como elementos cortos; iii) análisis estático para diferentes combinaciones de carga de la estructura tendientes al diseño del aislador.

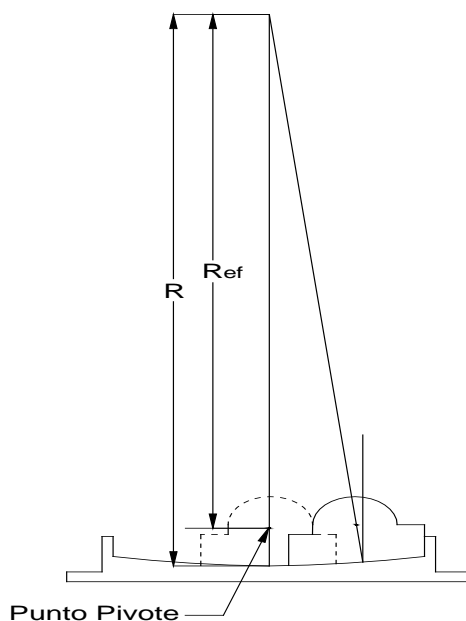


Figura 2. Radio de curvatura  $R$  y radio efectivo  $R_{ef}$ .

### 2.1.1 Diagrama de Histéresis.

Para los aisladores FPS de la primera generación el diagrama de histéresis es el indicado en la figura 3, donde  $F_f$  es la resistencia característica;  $K_d$  es la rigidez tangente que es igual al peso sobre el aislador dividido para el radio efectivo;  $k_{ef}$  es la rigidez secante.

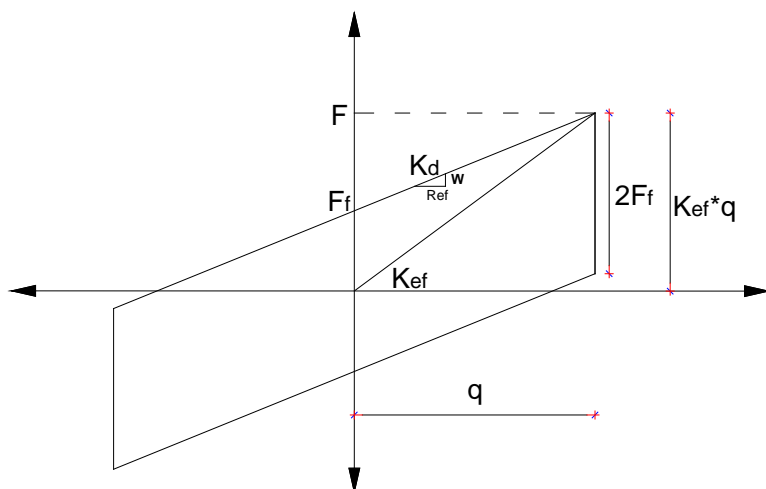


Figura 3 Curva constitutiva de un aislador de la primera generación, Fenz y Constantinou 2008.

$$F_f = \mu W \quad (2)$$

$$F = F_f + \frac{W}{R_{ef}} q \quad (3)$$

$$K_{ef} = \frac{F}{q} \quad (4)$$

$$K_{ef} = \frac{W}{R_{ef}} + \frac{F_f}{q} \quad (5)$$

Siendo  $\mu$  el coeficiente de fricción del aislador el mismo que se calcula en la forma indicada posteriormente.  $W$  es el peso que gravita en el aislador;  $R_{ef}$  es el radio efectivo que se encuentra en base al radio de curvatura del aislador;  $q$  es el desplazamiento esperado en el aislador que se halla en forma interactiva. Aguiar (2013);  $F$  es la fuerza máxima esperada en un ciclo de histéresis. Es importante notar en la figura 3 que la rama de descarga es vertical y tiene un valor de  $2F_f$ .

Como se dijo anteriormente el cálculo de  $q$  se realiza de forma interactiva de la siguiente manera: primero se obtiene el radio efectivo ya que las restantes variables que intervienen en su formulación están definidas. Después se encuentra el factor de amortiguamiento efectivo  $\xi_{eq}$

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_L} \quad (6)$$

Siendo  $E_D$  la energía disipada que no es más que el área encerrada en la curva de histéresis;  $E_L$  es la energía almacenada elásticamente; que se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$E_D = 4 * q * \mu W \quad (7)$$

$$E_L = \frac{K_{ef} * q^2}{2} \quad (8)$$

Con lo que al remplazar en la ecuación (6) y simplificar términos se encuentra.

$$\xi_{eq} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{\mu}{\mu + \frac{q}{R_{ef}}} \right) \quad (9)$$

Con el  $\xi_{eq}$  se encuentra el factor  $B$  para reducir el espectro elástico.

$$B = \left( \frac{\beta_{ef}}{0.05} \right)^{0.03} \quad (10)$$

Con el período objetivo impuesto se halla en el espectro de desplazamiento inelástico (reducido por  $B$ ) el desplazamiento de la estructura, el mismo que se compara con el impuesto. Si es aproximadamente igual ya se habrá determinado las propiedades del diagrama de histéresis caso contrario se repite el cálculo.

$$q = \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 A_d \quad (11)$$

## 2.2 Análisis Sísmico Espacial

Se considera un modelo de losa rígida con tres grados de libertad por planta: dos componentes de desplazamiento y una rotación de piso. Por otra parte se va a trabajar con coordenadas absolutas de esta manera se numeran los desplazamientos de abajo hacia arriba, primero en la dirección X; luego en la dirección Y, finalmente la rotaciones de piso, como se indica en la figura 4. Cuando se trabaja con coordenadas relativas primero hay que numerar las coordenadas de la superestructura y después las coordenadas del sistema de aislación; y en el caso de tener subestructura estas se enumeran al final. Castillo y Pazmiño (2014).

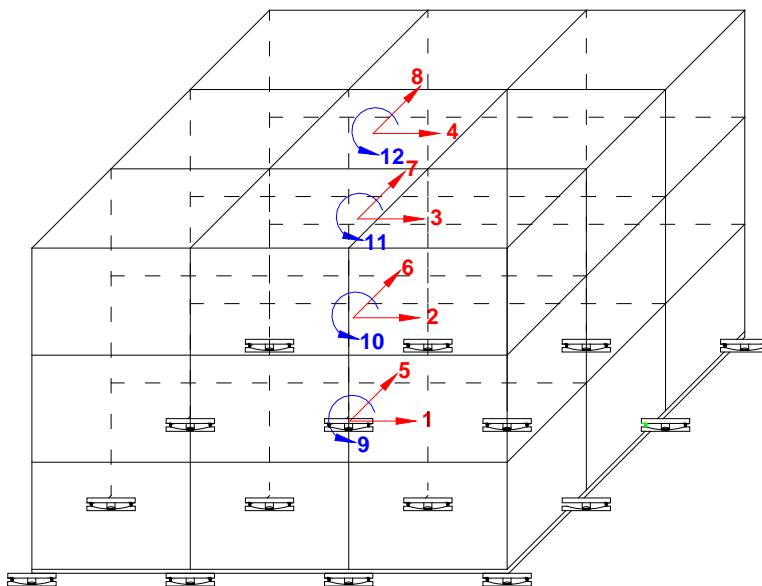


Figura 4. Grados de libertad en el Centro de Masa

Existen varias escuelas para la parte numérica una de ellas es la desarrollada en la Universidad Católica de Chile, en que trabajan con coordenadas relativas y presentan metodologías de análisis muy específicas como la denominada de *Masa equivalente* por citar una de ellas. Almazán (2001). Seguin (2007). En este artículo no se aplican estas metodologías si no lo que se hace es encontrar un elemento corto que representa al aislador, el mismo que se desarrolla en el siguiente apartado.

Retomando el modelo numérico de cálculo indicado en la figura 4 se obtiene la matriz de rigidez en coordenadas de piso  $K$ , la misma que tiene la siguiente forma:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & K_{x\theta} \\ 0 & K_{yy} & K_{y\theta} \\ K_{x\theta} & K_{y\theta} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} K_{xx} &= \sum K_x^i & K_{yy} &= \sum K_y^i \\ K_{\theta\theta} &= \sum K_x^i r_{yi}^2 + K_y^i r_{xi}^2 & (13) \\ K_{x\theta} &= \sum K_x^i r_{yi}^2 & K_{y\theta} &= \sum K_y^i r_{xi}^2 \end{aligned}$$

Donde  $r_{xi}, r_{yi}$  son las distancias desde el Centro de Masas, C.M, al pórtico  $i$  y tiene signo; serán positivas si la rotación positiva del pórtico rota en sentido antihorario con respecto al C.M. La matriz de masas tiene la siguiente forma:

$$M = \begin{bmatrix} m & & \\ & m & \\ & & J \end{bmatrix} \quad (14)$$

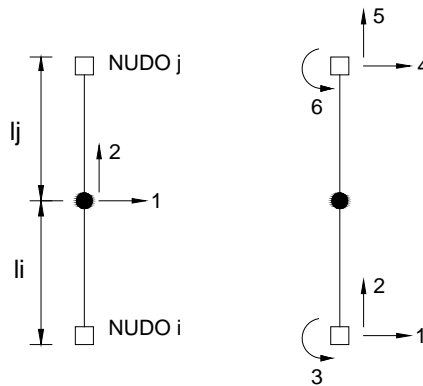
$$m = \begin{bmatrix} m_1 & & \\ & m_2 & \\ & & m_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & & \\ & J_2 & \\ & & J_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Una vez definidas las dos matrices se obtienen las propiedades dinámicas de la estructura resolviendo el problema de valores y vectores propios. Finalmente se aplica el método de superposición modal para encontrar las respuestas máximas probables. Aguiar (2012).

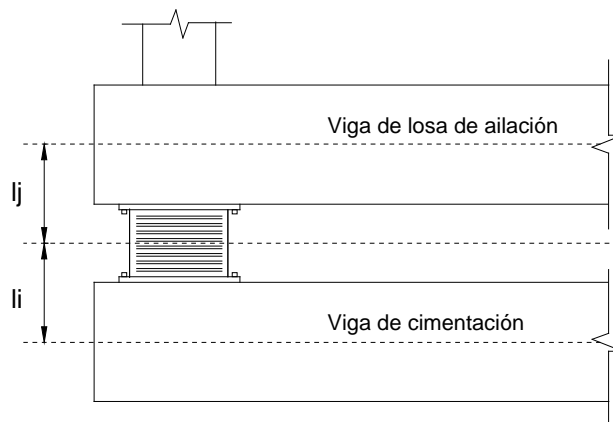
### 2.2.1 Elemento Aislador

A la izquierda de la figura 5 se muestra las coordenadas en el centro de gravedad del aislador denominadas coordenadas locales; y a la derecha de la figura 5 las coordenadas en el extremo del elemento denominadas coordenadas globales. La distancia  $l_i$  se mide desde el centro de gravedad del aislador hasta el centro de gravedad de la cimentación y la distancia  $l_j$  se mide desde el centro de gravedad del aislador hasta el centro de gravedad de la viga del sistema de aislación.



**Figura 5.** Coordenadas locales y globales de un elemento aislador.

En la figura 6 se presenta un aislador colocado sobre una viga de cimentación y se define la longitud del elemento corto como la suma de las longitudes  $l_i$ ,  $l_j$  respectivamente.



**Figura 6** Distancias que definen el modelo del aislador.



Para pasar de coordenadas locales a globales se debe determinar la matriz de paso  $T$  que se indica a continuación.

$$T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & l_i & 1 & 0 & l_j \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Hay dos formas de análisis para el sistema de aislación, la primera es trabajar con rigidez tangente y la segunda es trabajar con la rigidez secante denominada  $k_{ef}$ , en este caso se va a trabajar con la última de las rigideces. La matriz de rigidez en coordenadas locales, del elemento aislador  $k_0$ , es:

$$k_0 = \begin{bmatrix} k_{EF} & 0 \\ 0 & K_V \end{bmatrix} \quad (18)$$

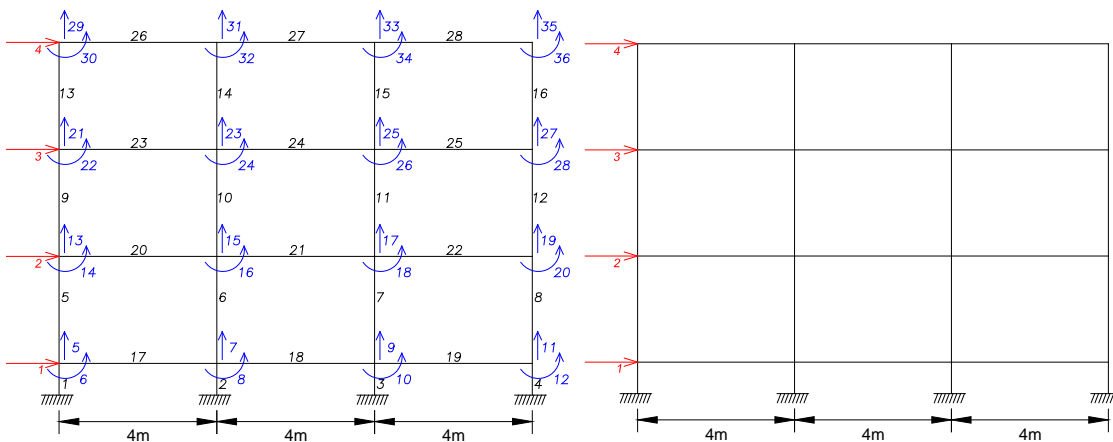
Donde  $k_{EF}$  es la rigidez efectiva horizontal;  $k_v$  es la rigidez vertical del aislador.

$$k_v = \frac{E^*A}{H} \quad (19)$$

Donde  $E$  es igual al módulo de elasticidad del acero dividido para dos;  $A$  es el área de la sección transversal del deslizador o cojinete y  $H$  es la altura total del aislador

### 2.2.2 Matriz de Rigidez Lateral

Para el análisis sísmico en coordenadas de piso se debe determinar en primer lugar la matriz de rigidez lateral de cada uno de los pórticos, con la hipótesis de que las vigas son axialmente rígidas, de tal manera que se tiene un grado de libertad lateral por piso.



**Figura 7.** Coordenadas totales y laterales de un pórtico

A la izquierda de la figura 7 se presenta uno de los pórticos de la estructura de tres pisos que se está analizando con todos los grados de libertad, en la cual se a numerado en primer lugar las coordenadas laterales y posteriormente las coordenadas y giros de cada uno de los nudos. Para hallar la matriz de rigidez lateral se encuentra en primer lugar la matriz de rigidez completa de la estructura por ensamblaje directo y posteriormente se condensa esta matriz a las coordenadas laterales. Aguiar (2012).

$$K_L = K_{AA} - K_{AB} * K_{BB}^{-1} * K_{BA} \quad (20)$$

Donde  $K_{AA}$  es de orden  $(na, na)$ ,  $K_{AB}$  es de orden  $(na, nb)$ , y  $K_{BB}$  es de orden  $(nb, nb)$ , siendo  $na$  el número de coordenadas laterales, y  $nb$  el número de grados de libertad. En el modelo de los pórticos, el elemento aislador está representado como una columna corta en la figura 7. Se destaca que el modelaje del pórtico debe considerar la mampostería de existir mediante una diagonal equivalente.

Una vez determinada la matriz de rigidez lateral de los pórticos se encuentra la matriz de rigidez en coordenadas de piso y se realiza el análisis sísmico, el mismo que concluye con la determinación de los desplazamientos y fuerzas laterales en coordenadas de piso.

Se debe controlar que el desplazamiento lateral del sistema de aislación sea menor al desplazamiento que se halló cuando se determinó el modelo de histéresis.

### **2.2.3 Análisis Estático de los Pórticos**

Para el diseño del aislador como tal se debe encontrar la fuerza vertical y momento que llegan al aislador al igual que el desplazamiento lateral y giro en la cabeza del aislador para las siguientes combinaciones de carga:

- Carga Vertical  $1.2D + 1.6L$  (21)

- Carga Vertical más sismo  $1.2D + 0.5L + 1.0S_{DE}$  (22)  
 $1.2D + 0.25L + 1.0S_{MCE}$

### 2.3 Diseño del aislador

Básicamente se debe encontrar el espesor de la placa en la parte central cuando no existe desplazamiento lateral y el espesor de la placa en el borde cuando existe desplazamiento lateral. Adicionalmente se determina el diseño del cojinete. Estos temas se presentan a continuación en este apartado.

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

Se aplica el método de la columna equivalente que consiste en considerar al deslizador como una columna con dos placas de acero en sus extremos sometida a una carga axial  $P_U$ , como se aprecia en la parte superior de la figura 8. Por efecto de esta carga se genera una presión denominada  $f_b$  en un círculo de diámetro  $b_1$  que vale:

$$f_b = \frac{P_U}{\frac{\pi b_1^2}{4}} = \frac{4P_U}{\pi b_1^2} \quad \rightarrow \quad b_1 = \sqrt{\frac{4P_U}{\pi f_b}} \quad (23)$$

Pero  $f_b$  también es igual a:

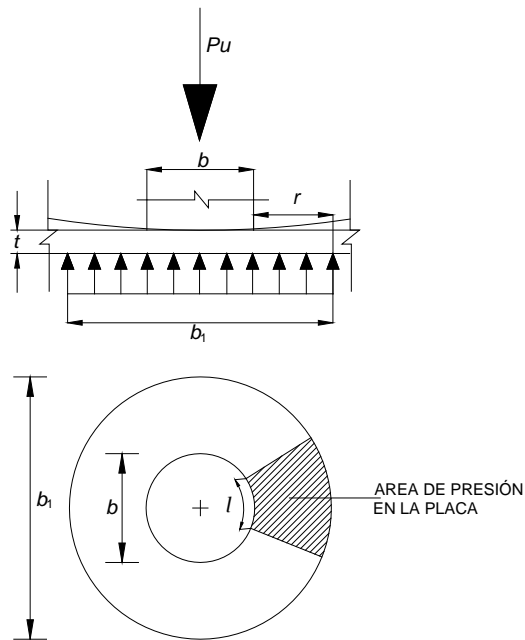
$$f_b = 1.7 \phi_c f'_c \quad (24)$$

Donde el factor 1.7 está relacionada con el confinamiento del hormigón  $\phi_c$  un factor de minoración de esfuerzos que vale 0.65 y  $f'_c$  la resistencia del hormigón.

En la figura 8 se ha identificado con la variable  $b$  al diámetro del deslizador, si  $b_1$  es menor que  $b$  habrá que colocar el espesor mínimo recomendado para placas de 1.5 in caso contrario se debe determinar el momento en el borde del deslizador como una viga empotrada sometida a una carga, de la siguiente manera:

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

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



**Figura 8.** Método de la columna equivalente

La ecuación para determinar el momento de flexión es aproximada ya que se ha considerado una carga uniforme más una carga triangular como se indica en la parte central de la figura 9 en lugar de considerar la distribución de presiones que está indicada a la izquierda de ésta figura. Para corregir ésta simplificación a la derecha se presenta unas curvas de corrección propuestas por Constantinou (2011). A ésta gráfica se ingresa con el factor  $b$  sobre  $b_1$  y se halla un factor de corrección que será multiplicado al momento hallado con la ecuación (25). Finalmente el espesor de la placa en el centro se encuentra con la ecuación:

$$t \geq \sqrt{\frac{4 M_u}{\phi_b f_y}} \quad (27)$$

$$\phi_b = 0.9$$

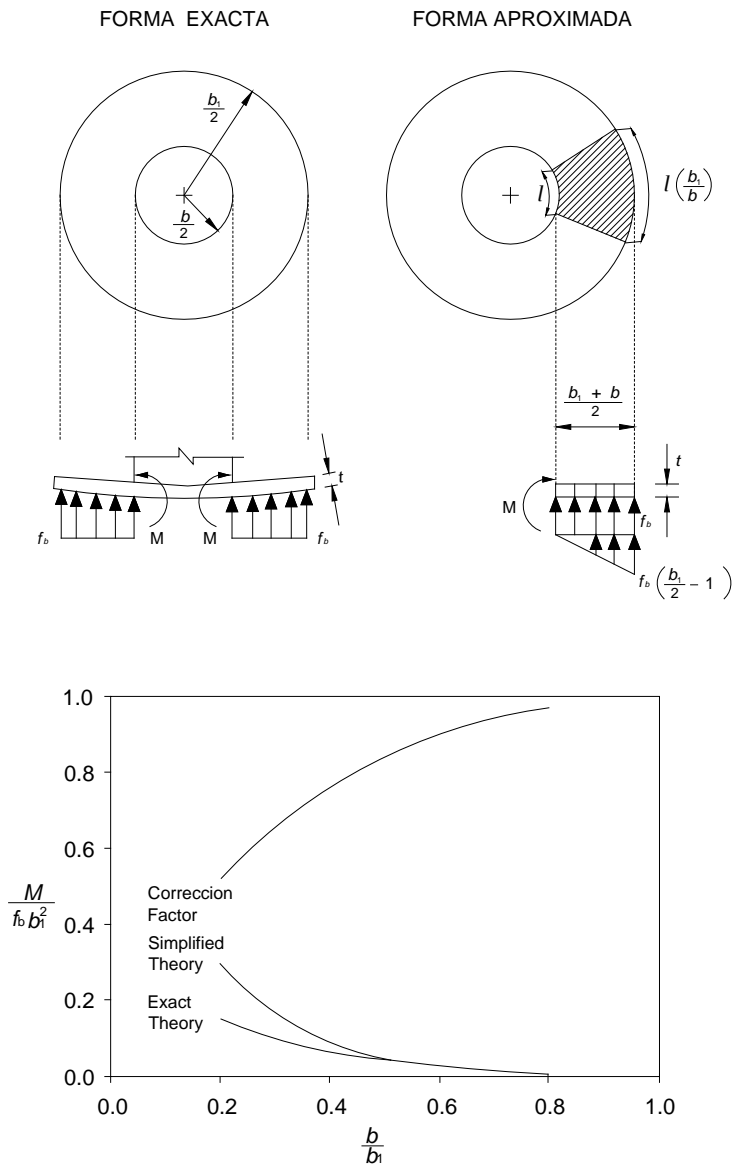


Figura 9. Distribución de presiones y factor de corrección del momento

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

Para el borde se procede con el desplazamiento lateral hallado en el análisis sísmico para uno de los dos sismos. Éste desplazamiento debe sumarse al desplazamiento lateral encontrado para cargas verticales sin sismo; estrictamente se debe considerar el 50% del desplazamiento lateral sin

sismo para el sismo **DE** y el 25% de desplazamiento lateral para el sismo **MCE**.

En la figura 10 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 10, éste alargamiento conduce a tener una distribución de presiones en forma elíptica con eje menor  $a_1$  y eje mayor  $b_1$ .

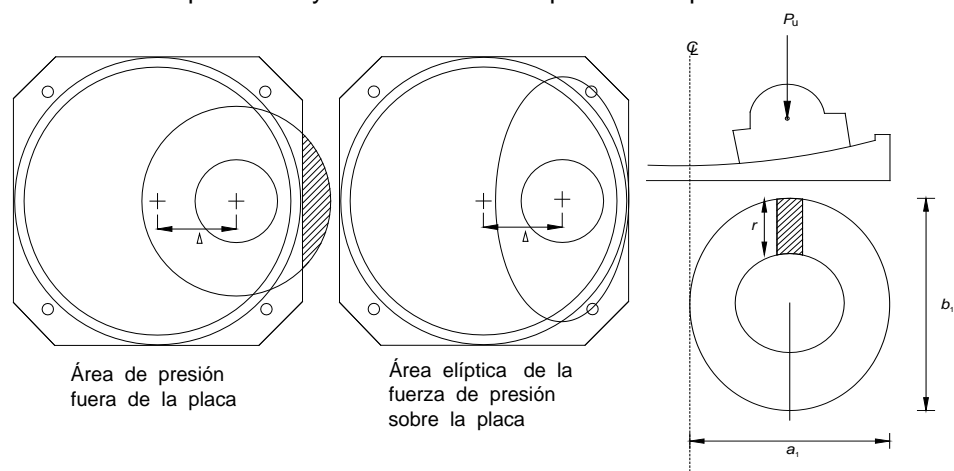
La determinación del eje menor  $a_1$  está dada por la geometría del aislador y por el desplazamiento esperado.

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

El eje mayor se encuentra con la siguiente expresión

$$b_1 = \frac{4P}{\pi a_1 f_b} \tag{29}$$

Finalmente se calcula el momento último con la distribución de presiones que está en el eje más largo (área achurada de figura 10). Se procede en forma similar al anterior, es decir, se encuentra un factor de corrección por la distribución de presiones y se determina el espesor de la placa  $t$ .



**Figura 10.** Presiones en la placa ante desplazamiento horizontal

- **Diseño del cojinete**

Para el diseño del cojinete, de acuerdo a la teoría propuesta por Constantinou *et al* (2011) se necesitan los siguientes datos del estado de carga  $1.2D + 1.6L$  :  $P_D$  que es la carga vertical en (KIP);  $\theta_{EL}, \theta_{ET}$  que son los giros en radianes en sentido longitudinal y transversal;  $\Delta_{EL}, \Delta_{ET}$  que son los desplazamientos laterales del aislador en pulgadas.

Para el estado de carga  $1.2D + 0.5L + 1S_{DE}$  se necesita la siguiente información:  $P_{DE}$  que es la fuerza vertical debido al estado de carga indicado para el sismo de diseño en (KIP);  $\theta_{ELDE}, \theta_{ETDE}$  que son los giros en radianes en sentido longitudinal y transversal;  $\Delta_{ELDE}, \Delta_{ETDE}$  que son los desplazamientos laterales del aislador en pulgadas.

Con esta información se procede al cálculo de la geometría del cojinete que se indica en la figura 11 de la siguiente manera:

$$D_m = \sqrt{\frac{4P_D}{\pi(6.5)}} \quad (in) \quad (30)$$

Donde  $D_m$  es la longitud indicada en la figura 11; se ha considerado un esfuerzo promedio  $\sigma_{ss} = 6.5 \text{ Ksi}$ .

$$A_{PTFE} = \frac{P_D}{6.5} \quad (in)^2 \quad (31)$$

Donde  $A_{PTFE}$  es el área en plata del cojinete, de igual manera se consideró  $\sigma_{ss} = 6.5 \text{ Ksi}$ . Se debe controlar que:

$$2.2 \leq \frac{P_D}{A_{PTFE}} \leq 4.3 \quad (Ksi) \quad (32)$$

$$B = \sqrt{A_{PTFE}} \quad (33)$$

Donde  $B$  es la dimensión en planta del cojinete. Ahora se procede al cálculo del radio  $R$  indicado en la figura 11.

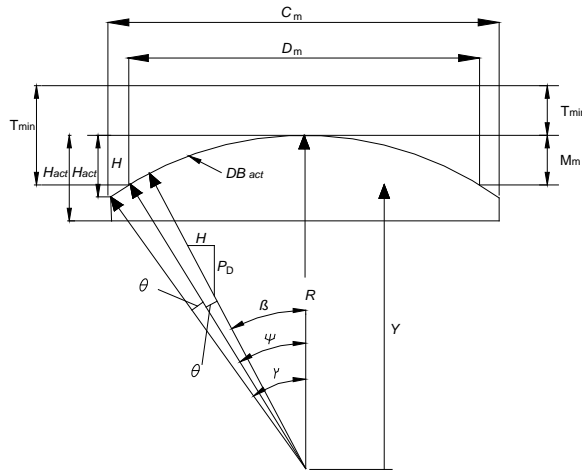


Figura 11. Diámetro permisible y longitud de la cuerda cóncava

$$P_{Hmax} = 0.15 \frac{P_D}{1.5} \quad (34)$$

$$P_{Vmin} = 0.5 \frac{P_D}{1.5} \quad (35)$$

$$\varphi \geq \tan^{-1} \left( \frac{P_{Hmax}}{P_{Vmin}} \right) + \theta_E \leq 35^\circ \quad (36)$$

Donde  $\varphi$  es el ángulo indicado en la figura 11;  $\theta_E$  es el mayor de los dos giros encontrados para el estado de carga vertical  $1.2D + 1.6L$ . Ahora se calcula en forma provisional el radio de curvatura  $R$  del cojinete.

$$R = \frac{D_m}{2\sin(\varphi)} \leq 40in \quad (37)$$

El valor del ángulo  $\beta$  Constantinou recomienda que sea igual a 0.06, con éste valor se calcula en primer lugar la altura  $H$  indicada en la figura 11 y figura 12.

$$H = 0.06P_D \quad (38)$$

$$H \leq \pi R^2 \sigma_{PTFE} \sin^2(\varphi - \beta - \theta) \sin\beta \quad (39)$$



Ahora una vez encontrado el valor de  $H$  se recalcula  $R$  despejando de la ecuación (39). Se procede a calcular el diámetro del cojinete de la siguiente manera:

$$DB_{act} = 2R \sin^{-1} \left( \frac{D_m}{2R} \right) \quad (40)$$

$$\gamma = \left( \frac{DB_{act}}{2R} \right) + \theta_E \quad (41)$$

$$C_m = 2R \sin \gamma \quad (42)$$

Donde  $DB_{act}, \gamma, C_m$ , están indicados en la figura 11. Se recalcula el valor de  $H$  con el valor de  $C_m$ .

$$H = R - \sqrt{R^2 - \left( \frac{C_m}{2} \right)^2} \quad (43)$$

Constantinou *et al* (2011) recomienda.

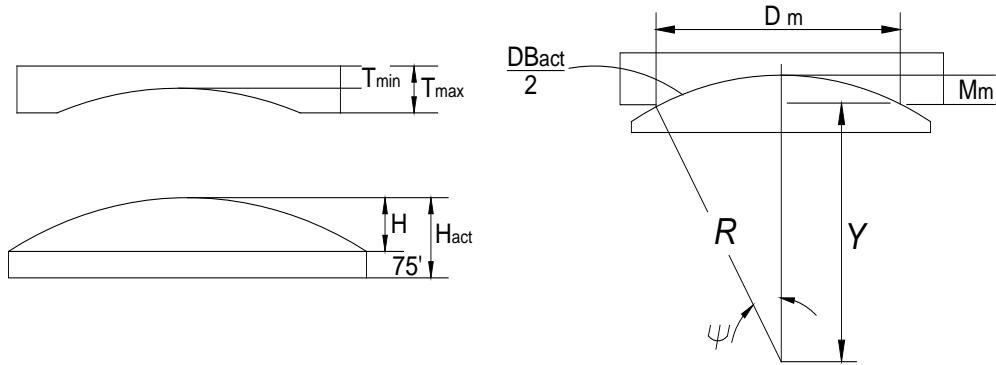
$$H_{act} = H + 0.75 \quad (in) \quad (44)$$

$$M_m = R \left[ 1 - \cos \left( \sin^{-1} \left( \frac{D_m}{2R} \right) \right) \right] + 0.09375 \quad (in) \quad (45)$$

$$T_{min} = 0.75 \quad (in) \quad (46)$$

$$T_{max} = T_{min} + M_m \quad (47)$$

El significado de las variables:  $H_{act}; M_m; T_{min}; T_{max}$  están indicadas en las figuras 11 y 12.



**Figura 12.** Dimensionamientos de la altura del cojinete

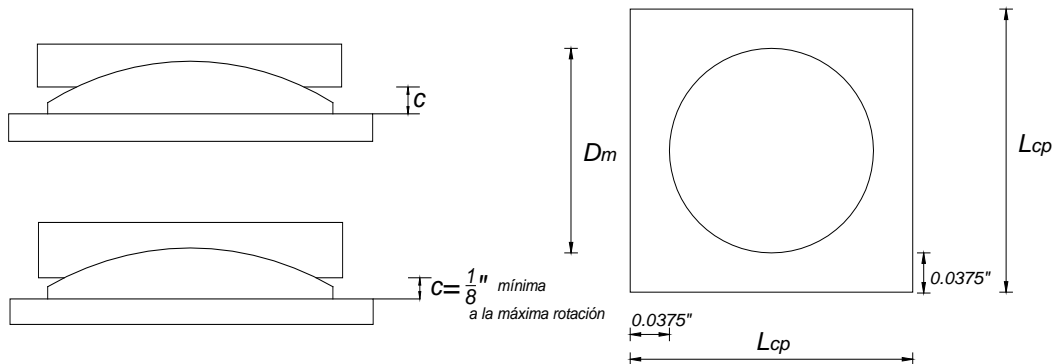
Finalmente el diámetro de cojinete  $D$ .

$$D = \min \left( \sqrt{\frac{4A_{PTFE}}{\pi}}, C_m, D_m \right) \quad (48)$$

Ahora se calcula la longitud de la placa cóncava cuadrada que se indica en la figura 13 y la dimensión vertical mínima  $c$

$$L_{cp} = D_m + 0.75inc \quad (49)$$

$$c = 0.7L_{cp}\theta_E + 0.125 \quad (50)$$

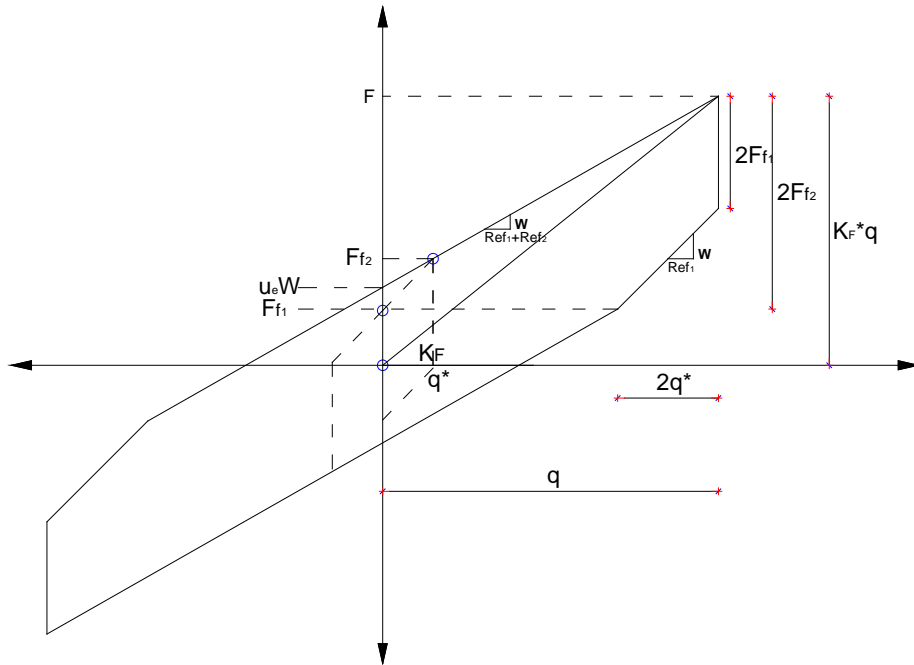


**Figura 13.** Longitud de placa cóncava y dimensión vertical mínima

Resta calcular el espesor del cojinete, el mismo que se realiza en forma similar al cálculo de las placas inferior y superior.

## 2.4 AISLADORES FPS DE SEGUNDA GENERACIÓN.

Se va a indicar únicamente lo que cambia con respecto al análisis y diseño sísmico del aislador FPS de la primera generación. En este contexto se debe manifestar que lo que cambia es el diagrama de histéresis el mismo que se indica en la figura 13.



**Figura 13.** Diagrama de histéresis para un aislador de la segunda generación de FPS, Fenz y Constantinou (2008).

El aislador de la segunda generación tiene dos superficies cóncavas; cuando se inicia el sismo trabaja únicamente en una superficie (régimen de desplazamiento I, ver figura 13 en líneas entrecortadas) llegando a una resistencia característica  $F_{f1} = \mu_1 W$ .

Siendo  $\mu_1$  el coeficiente de fricción de uno de los aisladores. Por efecto de sismo empieza a trabajar el otro aislador cuando se supera la resistencia  $F_{f2} = \mu_2 W$ . La rigidez tangente se obtiene considerando resortes en serie de las dos rigideces de los aisladores al trabajar en forma individual. Es decir tenemos un aislador con una rigidez tangente igual a  $\frac{W}{R_{f1}}$  y al trabajar la otra superficie cóncava la rigidez tangente es  $\frac{W}{R_{f2}}$ , al considerar que estas dos trabajan en serie se obtiene la rigidez tangente indicada en la figura 13 que es igual a  $\frac{W}{R_{f1}+R_{f2}}$ .

En la descarga nótese que primero se mantiene el comportamiento del aislador de la primera generación con una magnitud igual a  $2F_{f1}$  y después adquiere la rigidez tangente de éste superficie cóncava que es  $\frac{W}{R_{f1}}$ . La suma de la componente vertical en la descarga vale  $2F_{f2}$ . En la figura 13 se aprecia también que la descarga tiene una componente horizontal de magnitud  $2q^*$ , siendo  $q^* = (\mu_2 - \mu_1)R_{f1}$ . Para que trabaje en régimen dos el desplazamiento tiene que ser mayor que  $q^*$ .

### 2.4.1 Factor de amortiguamiento efectivo

En la figura 14 se presenta en forma achurada el área que se debe evaluar para encontrar la energía disipada  $E_D$ ; la misma que se obtiene encontrando el área completa del paralelograma que es igual a  $2\mu_e W * 2q$  Siendo  $q$  el desplazamiento máximo encontrado en un ciclo de histéresis. A ésta área hay que restar el área de dos triángulos cuyo lado vale  $2q^*$ , con ésta acotación se presenta el cálculo de  $E_D$ .

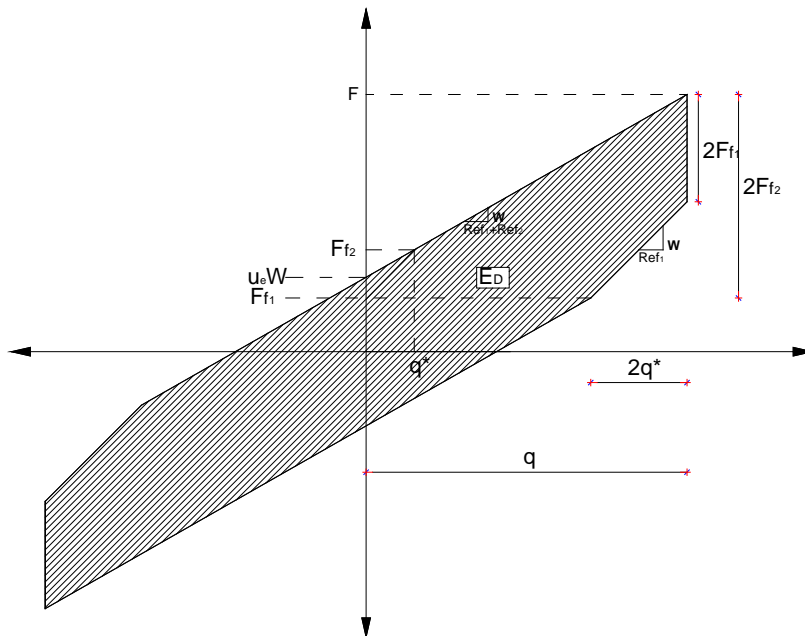


Figura 14. Cálculo de la energía disipada  $E_D$ .

$$E_D = [2(2\mu_e Wq)] - 2 \frac{[2q^*(2\mu_e W - 2F_{f1})]}{2} \quad (51)$$

$$\mu_e = \frac{\mu_1 R_{eff1} + \mu_2 R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} \quad (52)$$

$$E_D = 4\mu_e Wq - 4q^* \mu_e W + 4q^* F_{f1} \quad (53)$$

Por otra parte la energía elástica se obtiene en base al diagrama indicado en la figura 15.

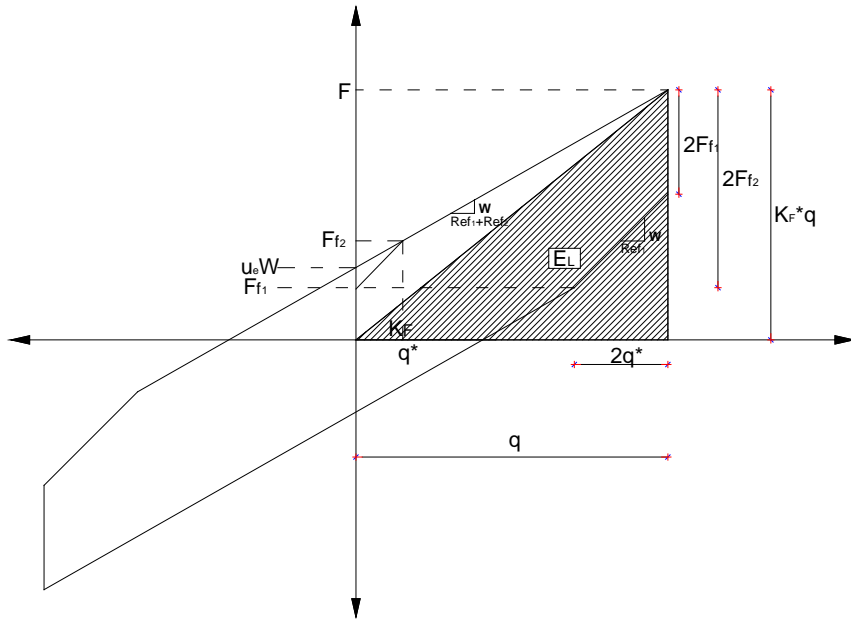


Figura 15. Cálculo de la energía elástica  $E_L$ .

$$E_L = \frac{1}{2} Fq \quad (54)$$

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff2}} q + \frac{F_{f1} R_{eff1} + F_{f2} R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} \quad (55)$$

Pero  $F$  también es igual a  $2F_{f2} + F_{f1}$ . Finalmente el factor de amortiguamiento efectivo se halla con la siguiente expresión:

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_L} \quad (56)$$

$$\xi_{eq} = \frac{4\mu_e Wq - 4q^* \mu_e W + 4q^* F_{f1}}{4\pi \left(\frac{1}{2} Fq\right)} \quad (57)$$

$$\xi_{eq} = \frac{2(\mu_e Wq - q^* \mu_e W + q^* F_{f1})}{\pi Fq} \quad (58)$$

La ecuación (58) es una forma aproximada de calcular el amortiguamiento efectivo de un aislador FPS de la segunda generación, pero que genera buenos resultados al momento de realizar los diferentes análisis.

### 2.4.2 Rigidez efectiva

La rigidez efectiva  $K_{EF}$  se halla con la relación entre la fuerza para el desplazamiento lateral máximo.

$$K_{EF} = \frac{F}{q} \quad (59)$$

$$K_{EF} = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff2}} q + \left( \frac{F_{f1} R_{eff1} + F_{f2} R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} \right) \quad (60)$$

Estrictamente habría que considerar también la tercera fase en que trabaja el aislador cuando experimenta un desplazamiento lateral que llega al tope del mismo, con lo que se incrementaría ligeramente la rigidez efectiva. Fenz y Constantinou (2008).

### 2.4.3 Coeficiente de Fricción.

A continuación se presenta el cálculo del amortiguamiento siguiendo la propuesta de Constantinou *et al* (2007), que tiene un respaldo analítico y experimental.

Para el valor inferior **LB** se tiene:

$$\mu = \mu_{3c} = 0.122 - 0.01 P - 0.015 \quad (KSI) \quad (61)$$

Se destaca que  $\mu_{3c}$  es el coeficiente de fricción en el tercer ciclo de carga, pero a la vez es el coeficiente de fricción para el nivel inferior del material.  $P$  es la

presión normalizada que a continuación se indica su cálculo en *KSI*. El término 0.015 está relacionado con la velocidad a la que se desplaza el deslizador.

La presión normalizada  $P$  es igual a la presión debido a la carga axial con respecto a la dimensión de la placa del aislador y ésta a su vez se debe dividir para el área del deslizador.

$$P = \frac{N/L^2}{\pi b^2/4} \quad (62)$$

Donde  $N$  es la carga axial que llega a un aislador;  $L$  es la longitud de la placa cuadrada;  $b$  es el diámetro del deslizador.

Ahora para el valor superior se tiene que considerar los siguientes factores: envejecimiento  $\lambda_1$ ; contaminación  $\lambda_2$ , desplazamiento lateral acumulado esperado del deslizador  $\lambda_3$ ; temperatura en el lugar donde va a funcionar el aislador  $\lambda_4$ .

$$\mu = \mu_{1c} = 1.2\mu_{3c}\lambda_{max} \quad (63)$$

$$\lambda_{max} = \lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4 \quad (64)$$

En Constantinou *et al* (2007), se indican las tablas que conducen al cálculo de los factores  $\lambda$  y están en función del tipo de recubrimiento del deslizador; de la protección lateral del mismo (en el sentido de que si está sellado o no sellado; del lugar en el que van a funcionar y del modo de colocación de los aisladores).

## **2.5 AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON NÚCLEO DE PLOMO**

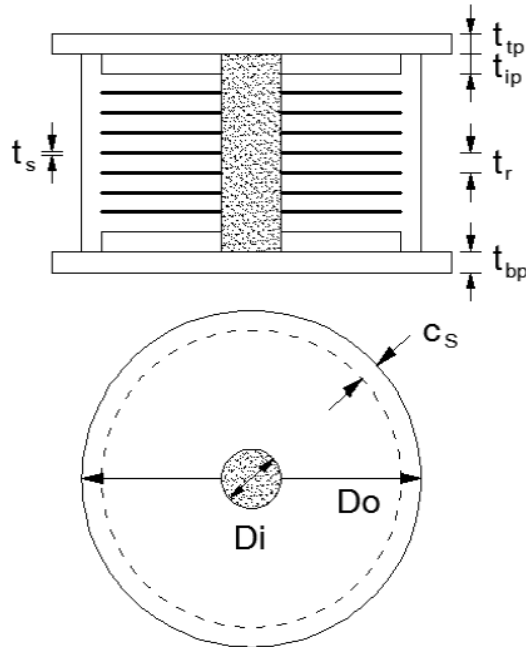
### **2.5.1 Descripción de aislador elastoméricos**

Los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo están conformados por láminas de caucho natural intercaladas con placas de acero, las cuales son vulcanizadas entre sí y poseen un núcleo de plomo que aumenta su capacidad de amortiguamiento. El amortiguamiento que se logra con la inclusión del núcleo de plomo es mayor al 20%. Estos dispositivos son fabricados a medida para cada proyecto, de acuerdo a la rigidez horizontal, rigidez vertical, desplazamiento, capacidad de carga y capacidad de amortiguamiento requerida.

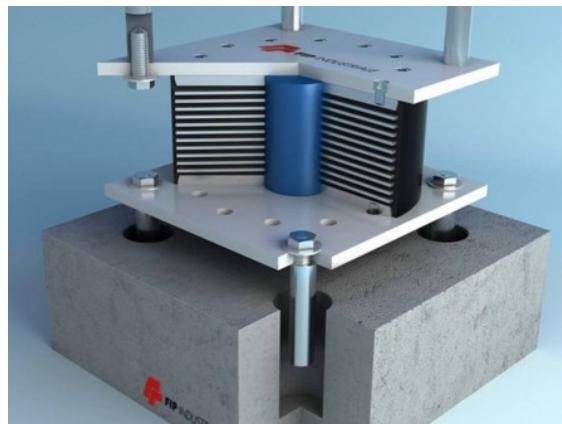
Sea  $tr$  el espesor de la goma y  $ts$  el espesor de la placa de acero, la suma de los espesores de goma se denomina  $Tr$  y en base a esta dimensión se determina la rigidez al corte del aislador;

En la parte exterior se tienen dos placas de mayor espesor que en la figura 16 se han identificado como  $ttp$ , la superior y  $tbp$ , la inferior. Estas placas deben

ser capaces de soportar la carga axial que llega al aislador. Si el espesor de la placa exterior es muy grande se puede colocar una placa de ancho *tip* en la parte interior del aislador.



**Figura 16** Dimensiones de un aislador con núcleo de plomo



**Figura 17** Aislador elastoméricos con núcleo de plomo

Las tablas que se presentan a continuación tabla 1 y tabla 2 resultan de mucha utilidad para iniciar el diseño de los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo ya que proporcionan una buena aproximación de las dimensiones finales de los mismos y son el punto de partida de dicho diseño, estas tablas son proporcionadas por los fabricantes de los aisladores.



Consiste en determinar la carga axial total del edificio que gravita sobre cada uno de los aisladores para en función de esta determinar las dimensiones aproximadas de los componentes del aislador.

**Tabla 1** Dimensiones del aislador y placas de montaje

TAMAÑO DEL AISLADOR				DIMENSIONES DE PLACAS DE MONTAJE					
Do (mm)	H (mm)	# capas de goma	Di (mm)	L (mm)	t (mm)	# de orificios	orificio $\phi$ (mm)	A (mm)	B (mm)
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50

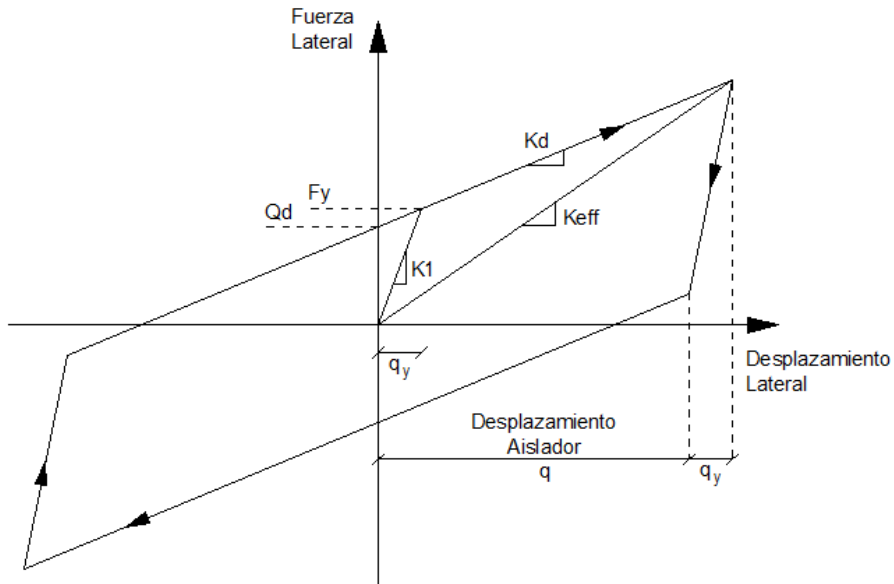
**Tabla 2** Propiedades, desplazamiento y carga axial en función del diámetro del aislador

Do (mm)	Propiedades del aislador			Desplazamiento Maximo qmax (mm)	Carga Axial Pmax (kg)
	kd (T/m)	Qd (kg)	kv (T/m)		
305	20-40	0-6500	> 5000	150	45000
355	20-40	0-6500	> 10000	150	70000
405	30-50	0-11000	> 10000	200	90000
455	30-70	0-11000	> 10000	250	115000
520	40-70	0-18000	> 20000	300	135000
570	50-90	0-18000	> 50000	360	180000

### 2.5.2 Diagrama de la curva de histéresis

En la figura 18 se presenta el comportamiento histerético de un aislador elastomérico se destaca que el modelo no contempla degradación de rigidez en la descarga. Este modelo es bastante aproximado a los obtenidos experimentalmente.

A continuación se describe en forma rápida los parámetros que definen la relación entre la fuerza aplicada al aislador y el desplazamiento obtenido los mismos que están presentados en la figura 18.



**Figura 18** Comportamiento histerético de un aislador elastoméricos.

Para un aislador con núcleo de plomo el valor de  $Q_d$  se halla con la siguiente expresión:

$$Q_d = A_L * \tau_{py} \quad (65)$$

Donde  $A_L$  es el área de la sección transversal del núcleo de plomo y  $\tau_{py}$  es el esfuerzo de corte del plomo a nivel de fluencia.

$$k_d = \frac{G A}{Tr} \quad (66)$$

Donde  $G$  es el módulo de corte de la goma;  $A$  es el área de la sección transversal del aislador que trabaja al corte;  $Tr$  es la sumatoria de la altura de la goma del aislador.

La fuerza de fluencia cuando el aislador empieza a trabajar en el rango no lineal es:

$$F_y = Q_d + k_d q_y \quad (67)$$

La rigidez elástica  $k_1$ , y la rigidez efectiva  $k_{EF}$  son:

$$k_1 = \frac{F_y}{q_y} \quad (68)$$

$$k_{EF} = k_d + \frac{Q_d}{q} \quad (69)$$

Donde  $q$  es el desplazamiento lateral del sistema de aislación. Lo importante en las estructuras con aislación sísmica es incrementar el factor de amortiguamiento de la misma; para las estructuras con aisladores elastoméricos se obtiene a partir de la figura 18 que el factor de amortiguamiento efectivo,  $\beta_{EF}$  es el siguiente.

$$\beta_{EF} = \frac{2Q_{ds}(q - q_y)}{\pi K_{EF} q^2} \quad (70)$$

En forma práctica se recomienda proceder de la siguiente manera para encontrar el diagrama de histéresis.

Se determina el peso total  $W_t$  que llega al sistema de aislación, el cual considera el peso de la losa de aislación y los aisladores, se debe definir el número de aisladores  $N$  a utilizar; se puede colocar un aislador en cada columna del edificio.

En estas condiciones, se obtiene multiplicando los parámetros que definen la curva de histéresis por el número de aisladores  $N$ .

$$\begin{aligned} F_{ys} &= F_y N \\ Q_{ds} &= Q_d N \\ K_{ds} &= K_d N \\ K_{1s} &= K_1 N \end{aligned} \quad (71)$$

### **2.5.3 Proceso de cálculo de la curva de histéresis**

A continuación se presenta en forma resumida como se obtiene la curva de histéresis para un aislador.

1. Desplazamiento Inicial

Se impone un desplazamiento que se supone va a desarrollar el sistema de aislación  $q$ .

2. Propiedades dinámicas

Determinada la rigidez efectiva mediante la ecuación 69 y se halla el periodo y factor de amortiguamiento.

$$T_{EF} = 2\pi \sqrt{\frac{W_t}{g K_{EF}}} \quad (72)$$

$$\beta_{EF} = \frac{2Q_{ds}(q - q_y)}{\pi K_{EF} q^2} \quad (73)$$

Dónde:  $W_t$  es el peso total que gravita en el sistema de aislación;  $g$  es la aceleración de la gravedad;  $K_{EF}$  es la rigidez efectiva;  $q$  es el desplazamiento lateral;  $q_y$  es el desplazamiento de fluencia;  $T_{EF}$  es el periodo efectivo;  $\beta_{EF}$  es el factor de amortiguamiento efectivo.

### 3. Espectro reducido

Se obtiene dividiendo el espectro de 5% de amortiguamiento para el valor de B.

$$B = \left(\frac{\beta_{EF}}{0.05}\right)^{0.3} \quad (74)$$

### 4. Calculo de desplazamiento

Ingresamos con el periodo efectivo al espectro de desplazamiento y se obtiene el desplazamiento del sistema de aislación, este debe ser parecido o igual al desplazamiento impuesto si no coincide se repite el proceso desde el numeral 1.

Si se trabaja con el espectro de aceleración, con el periodo efectivo se encuentra la aceleración espectral  $A_d$  y después mediante la definición del pseudo espectro se halla el desplazamiento.

$$q = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 A_d \quad (75)$$

## 2.5.4 Elemento aislador

El análisis sísmico de estructuras con aisladores elastoméricos es similar a lo presentado cuando la estructura tiene aisladores FPS razón por la cual no vuelve a describir su procedimiento de cálculo. Pero se va a indicar con detalle cómo se trabaja con el elemento aislador destacando que es aplicable a los aisladores FPS aquí utilizados.

Lo que difiere respecto a los aisladores FPS, cuando se utiliza el método de la rigidez efectiva, es la determinación de la rigidez vertical  $k_v$ . La matriz de rigidez en coordenadas locales del elemento aislador  $k_0$  viene dado por la siguiente expresión:

$$k_0 = \begin{bmatrix} k_{EF} & 0 \\ 0 & k_v \end{bmatrix} \quad (76)$$

Donde  $k_{EF}$  es la rigidez efectiva horizontal;  $k_v$  es la rigidez vertical del aislador.  $k_{EF}$  ya fue determinado anteriormente y  $k_v$  viene dado por la siguiente expresión:

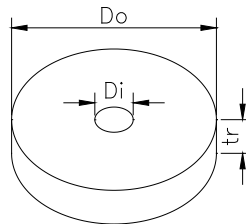
$$k_v = \frac{A}{T_r} \left[ \frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3k} \right]^{-1} \quad (77)$$

Donde A es el área transversal del aislador;  $T_r$  es la sumatoria de los espesores de las gomas  $t_r$ ; S es la relación entre el área de la planta de una goma con relación al área lateral de la goma; k es el modulo volumétrico de la goma.

Para un aislador circular con o sin núcleo de plomo el factor de forma se encuentra con la siguiente ecuación.

$$S = \frac{\frac{\pi}{4}(D_0^2 - D_i^2)}{\pi D_0 t_r} \quad (78)$$

Donde  $D_0$ ,  $D_i$ , son los diámetros exterior e interior del aislador;  $t_r$  es el espesor de una goma, como se observa en la figura 19, es importante observa las relaciones de área.



**Figura 19 Geometría de una goma**

Finalmente, la matriz de rigidez del elemento aislador en coordenadas globales se halla de la siguiente forma.

$$k^* = T^t k_0 T \quad (79)$$

Donde T es la matriz de paso:

$$T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & l_i & 1 & 0 & l_j \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (80)$$

### 2.5.5 Mosaico de cargas

En las estructuras con los aisladores anteriores no se tuvo la suficiente prolijidad en determinar el ancho de banda cooperante para trabajar con carga uniforme distribuida por este motivo en este apartado se presenta en primer lugar el mosaico de cargas considerando que las mismas distribuyen a los pórticos con ángulo de 45° teniendo por tanto que sobre las vigas gravita una carga trapezoidal o una carga triangular como se muestra en la figura 20.

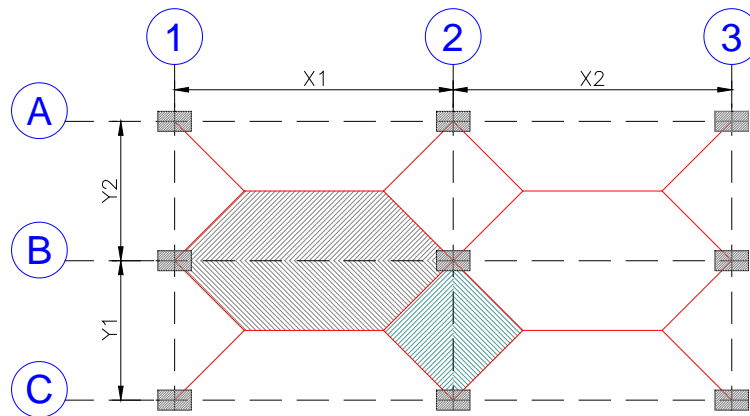


Figura 20 Distribución por mosaico de cargas

Para no trabajar con carga triangular o trapezoidal se puede encontrar carga uniforme distribuida  $W$  empleando el siguiente formulario:

Distribución triangular:

$$W = \frac{q * s}{3} \quad (81)$$

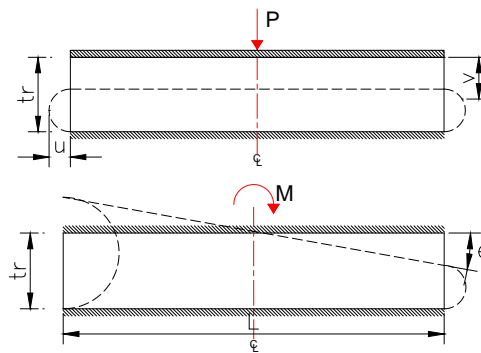
Distribución trapezoidal:

$$W = \frac{q * s}{3} \left( \frac{3 * m^2}{2} \right); \quad m = \frac{s}{l} \quad (82)$$

Dónde:  $q$  carga actuante sobre unidades de superficie;  $s$  es la dimensión del lado menor del tablero contribuyente;  $m$  es la relación entre la dimensión menor y la dimensión mayor del tablero contribuyente;  $l$  es la dimensión del lado mayor del tablero contribuyente.

### 2.5.6 Control del espesor de la goma

Una vez realizado el análisis sísmico del sistema de aislación y de la estructura completa considerando tres grados de libertad por planta, se determinan las fuerzas estáticas equivalentes y se continua con la determinación de los desplazamientos y giros en los nudos; fuerzas y momentos en cada uno de los aisladores para las combinaciones de carga estipuladas por NEC-11 y tomando en cuenta las recomendaciones de Constantinou et al. 2011 las cuales fueron ya expuestas anteriormente, para el control de los espesores de la goma y de las láminas de acero de los aisladores.



**Figura 21** Cargas, desplazamientos y giro actuando en un aislador

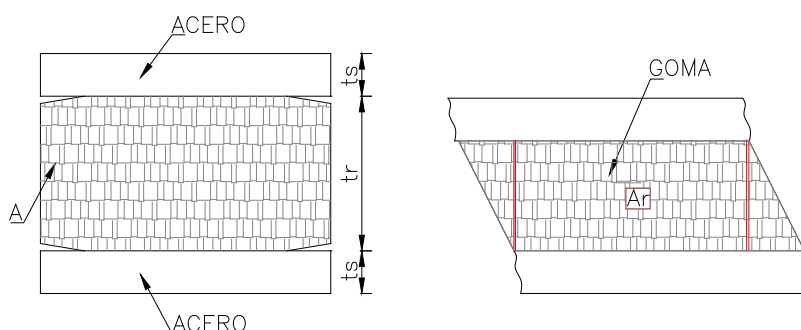
#### Área reducida de una goma

El área que trabaja al corte se ha denominado A; ahora cuando se deforma lateralmente como se indica en la parte derecha de la figura 22, se tiene un área reducida a compresión que se denomina  $A_r$ , la misma que se calcula de la siguiente manera:

$$A_r = A \left( \frac{\delta - \text{sen}\delta}{\pi} \right)$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left( \frac{u}{D_o} \right)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) \tag{83}$$



**Figura 22** Área reducida de un aislador elastoméricos

### Deformaciones angulares

Cuando actúa la carga axial  $P_u$ , la máxima deformación angular por compresión  $\gamma_c$  se halla con la siguiente ecuación:

$$\gamma_c = \frac{P_u}{A_r G S} f_1 \leq 3.5 \quad (84)$$

Se debe verificar que  $\gamma_c \leq 3.5$  únicamente para el estado de cargas verticales, sin sismo. Con sismo  $\gamma_c$  puede ser mayor a 3.5, más adelante se indicara todos los controles que debe satisfacerse.

El facto  $f_1$  se presenta en la tabla 3 para un aislador circular

**TABLA 3** Valores de  $f_1$  para un aislador circular

S	k/G			
	2000	4000	6000	$\infty$
5,0	1,02	1,01	1,01	1,00
7,5	1,05	1,03	1,02	1,00
10,0	1,10	1,05	1,03	1,00
12,5	1,15	1,08	1,05	1,00
15,0	1,20	1,11	1,07	1,00
17,5	1,27	1,14	1,10	1,00
20,0	1,34	1,18	1,13	1,00
22,5	1,41	1,23	1,16	1,00
25,0	1,49	1,27	1,19	1,00
27,5	1,57	1,32	1,23	1,00
30,0	1,66	1,37	1,26	1,00

Para encontrar el valor de  $f_1$  se necesita conocer el factor de forma S y la relación k/G, siendo k el modulo volumétrico de la goma y G el módulo de corte de la goma.



La deformación angular por rotación  $\gamma_r$  se halla con la siguiente expresión:

$$\gamma_r = \frac{D_o^2 \theta}{t_r T_r} f_2 \tag{85}$$

Donde  $\theta$  es la rotación en el aislador para el estado de cargas verticales, sin sismo;  $f_2$  es el factor que afecta al corte el cual se presenta en la tabla 4

**TABLA 4** Valores de  $f_2$  para un aislador circular

S	k/G			
	2000	4000	6000	$\infty$
5,0	0,37	0,37	0,37	0,37
7,5	0,36	0,36	0,37	0,37
10,0	0,34	0,36	0,36	0,37
12,5	0,33	0,35	0,36	0,37
15,0	0,32	0,34	0,35	0,37
17,5	0,30	0,33	0,34	0,37
20,0	0,28	0,32	0,33	0,37
22,5	0,27	0,31	0,32	0,37
25,0	0,25	0,29	0,32	0,37
27,5	0,24	0,28	0,31	0,37
30,0	0,23	0,27	0,30	0,37

La deformación angular por corte es:

$$\gamma_s = \frac{u}{T_r} \tag{86}$$

Para que el espesor de la goma sea adecuado, se debe verificar lo detallado en la tabla 5 para los estados de carga que se indican, si para algún estado de carga no cumple se debe incrementar el espesor de la goma

**TABLA 5** Controles que debe cumplir el espesor de la goma

Estado de carga	Control
$1.2D + 1.6L$	$\gamma_c + \gamma_r + \gamma_s < 6$
$1.2D + 0.5L + 1.0S_{DE}$	$\gamma_c + \frac{1}{2}\gamma_r + \gamma_s < 7$
$1.2D + 0.25L + 1.0S_{MCE}$	$\gamma_c + \frac{1}{4}\gamma_r + \gamma_s < 9$

## 2.5.7 Calculo del espesor de placa shim

En Constantino et al (2011) y en Aguiar (2013) se tiene en inglés y español respectivamente el marco teórico que conduce a la obtención de la siguiente ecuación con la cual se determina el espesor de las placas intermedias que van intercaladas con la goma en los aisladores elastoméricos.

$$t_s > \frac{\alpha t_r}{1.08 f_y \frac{A_r}{P} - 2} \quad (87)$$

Donde  $\alpha=1.65$ ;  $t_r$  es el espesor de la goma;  $f_y$  es el límite de fluencia de la placa de acero;  $A_r$  es el área reducida; P la carga axial. Se destaca que el espesor mínimo de estas placas denominadas shim es de 1.9mm.

Las normas AASHTO (2010) recomiendan que el valor de  $\alpha=3$  para placas de acero con orificios. De tal manera que  $\alpha=1.65$  se utiliza para placas sin orificios.

## 2.5.8 Control del Pandeo

Según Kelly (1993) la carga crítica de pandeo en una posición no desplazada del aislador es:

$$P_{cr} = \frac{\pi \sqrt{\lambda} G S A_r}{T_r} \quad (88)$$

Donde  $\lambda=2$ , para aisladores circulares y  $\lambda=2.25$  para aisladores rectangulares; G es el módulo de corte de la goma; S es el factor de forma de la goma, A es el área del aislador que trabaja al corte; r es el radio de giro;  $T_r$  es la sumatoria de los anchos de las gomas, el radio de giro se obtiene con la siguiente ecuación.

$$r = \sqrt{I/A} \quad (89)$$

Donde I es el momento de inercia; A es el área. Para un aislador circular sin orificio  $r = \frac{D}{4}$ ; el factor de forma  $S = \frac{D}{4 t_r}$ , y el área que trabaja al corte es  $A = \frac{\pi D^2}{4}$  y D es el diámetro del aislador sin orificio;  $t_r$  es el ancho de una goma. Reemplazando  $\lambda = 2$  y las ecuaciones que definen r, S, A, entonces obtenemos:

$$P_{cr} = 0.2181 \frac{G D^4}{t_r T_r} \quad (90)$$

Para aisladores con o sin núcleo de plomo pero con orificio en la mitad.

$$P_{cr} = 0.2181 \frac{GD_0^4 \left(1 - \frac{D_i}{D_0}\right) \left(1 - \frac{D_i^2}{D_0^2}\right)}{t_r T_r \left(1 + \frac{D_i^2}{D_0^2}\right)} \quad (91)$$

La carga crítica de pandeo cuando el aislador tiene un desplazamiento lateral,  $P'_{cr}$  se halla con la siguiente ecuación.

$$P'_{cr} = P_{cr} \frac{A_r}{A} \quad (92)$$

Mientras más desplazamiento lateral tiene el aislador el área reducida  $A_r$  es menor y por lo tanto la carga crítica  $P'_{cr}$ , disminuye, para restringir el desplazamiento lateral se debe cumplir la siguiente expresión:

$$P'_{cr} > 0.15 P_{cr} \quad (93)$$

Caso contrario se debe rediseñar el aislador.

Adicionalmente se debe verificar los siguientes controles

- Para cargas verticales

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} > 2 \quad (94)$$

- Para cargas verticales más sismo MCE

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} > 1.1 \quad (95)$$

### **2.5.9 Placas exteriores**

Para determinar el espesor de las placas exteriores de un aislador utilizamos el método del área reducida desarrollado por DeWolf y Ricker (1990) figura 23, el cual reemplaza al aislador por una columna rectangular equivalente de dimensiones  $0.75 * L * b$  y cuyas variables quedan definidas por las siguientes ecuaciones:

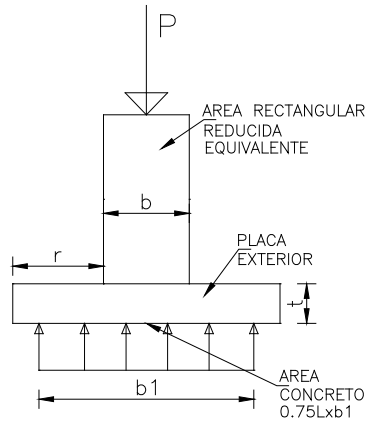
$$L = D_0 - 2c_s$$

$$b = \frac{A_r}{L} \quad (96)$$

Donde L es la longitud de la placa cuadrada del aislador;  $c_s$  es el recubrimiento de la goma;  $A_r$  es el área reducida del aislador obtenida en función

del desplazamiento lateral. Es importante tomar en cuenta que el núcleo de plomo contribuye para soportar la carga axial, por lo que el área del aislador es completa.

El espesor de la placa se denomina  $t$  figura 23 el cual queda definido por las siguientes expresiones:



**Figura 23** Método del área reducida (figura reproducida de Constantinou *et al.*2011)

Placa inferior

$$t = t_{bp} + t_{ip} \quad (97)$$

Placa superior

$$t = t_{tp} + t_{ip} \quad (98)$$

Donde  $t_{bp}$  y  $t_{tp}$  son los espesores de las placas metálicas exteriores inferior y superior respectivamente; y  $t_{ip}$  es el espesor de la placa que inmersa en el aislador.

El modelo establece un esfuerzo  $fb$  que es igual a:

$$fb = 1.7\phi_c f'_c \quad (99)$$

Donde  $f'_c$  es la resistencia del hormigón a compresión (losa de cimentación); 1.7 es el incremento de resistencia por confinamiento;  $\phi_c$  factor de minoración de esfuerzo, para el sismo *DE* tiene un valor de 0.65 y para sismo *MCE* 1.00.

Finalmente el espesor de la placa de acero queda determinada mediante la siguiente ecuación:

$$t \geq \sqrt{\frac{4Mu}{\phi_b f_y}}$$

$$M_u = \frac{f_b r^2}{2}; \quad r = \frac{b_1 - b}{2}; \quad b_1 = \frac{P}{0.75 L f_b} \quad (100)$$

$\phi_b$  Factor de minoración de esfuerzo, para el sismo *DE* tiene un valor de 0.90 y para sismo *MCE* 1.00.

### 3 ESTRUCTURA DE ANÁLISIS Y SISMOS DE DISEÑO

La estructura de análisis es la presentada en la figura 4 la misma que tiene columnas de 45x45 cm y vigas de 30x40 cm para los pisos del uno al tres, las vigas del sistema de aislación son de 30x50 cm. Se considera que se encuentra ubicada en el antiguo Quito Tennis cuyos factores de sitio obtenidos del estudio de microzonificación sísmica de Quito Aguiar (2013) son los siguientes:  $F_a = 1.155$ ,  $F_d = 0.575$ ,  $F_s = 1.790$ . A continuación se resumen los resultados más importantes del análisis sísmico realizado.

#### 3.1 Aisladores FPS de la primera generación

En la tabla 6 se presenta los parámetros que definen el modelo de histéresis para el aislador de la primera generación de la estructura que se está analizando, considerando que el período objetivo de la estructura es de 2 segundos. El cálculo se ha realizado para un coeficiente de fricción de 0,10 y 0,20 que son los esperados para **LB** y **UB**.

**Tabla 6.** Parámetros del diagrama de histéresis

PROPIEDADES DINAMICAS	UNIDADES	ESPECTRO DE ACELERACIONES ERN-12			
		$\mu = 0.10$		$\mu = 0.20$	
		SISMO DE	SISMO MCE	SISMO DE	SISMO MCE
$q$	cm	17,7625	29,359	15,528	24,7581
$b_{effect}$	%	22,83	16,09	35,73	28,34
$K_{EF}$	kg/cm	582,5438	500,0369	851,5403	673,383
$K_d$	kg/cm	373,6615	373,6615	373,6615	373,6615
$R$	cm	99,2948	99,2948	99,2948	99,2948
$F$	kg	10347	14681	13223	16672
$F_f$	kg	3710,3	3710,3	7420,5	7420,5

Con las rigideces efectivas indicadas se procedió en primer lugar a encontrar la matriz de rigidez lateral en los pórticos; para ello el aislador fue modelado como un elemento corto con rigidez horizontal igual a la rigidez efectiva y con rigidez vertical encontrada suponiendo que el deslizador tiene un diámetro de 20 cm y la altura del aislador es de 20 cm que son los datos que se requieren para calcular  $K_V$ .

Posteriormente se obtuvo la matriz de rigidez espacial en coordenadas de piso y se halló las respuestas máximas probables para cada uno de los sismos y para los dos niveles del material, empleando el método de superposición modal; los resultados encontrados son los siguientes, ver tabla 7 y tabla 8.

**Tabla 7.** Períodos de vibración

PERIODOS DE VIBRACIÓN			
$\mu = 0.10$		$\mu = 0.20$	
DE	MCE	DE	MCE
1,6357312	1,7603034	1,366043	1,52637663
1,6357312	1,7603034	1,366043	1,52637663
1,26703194	1,36352515	1,05813236	1,18232625
0,2359825	0,23659486	0,23400224	0,23531097
0,2359825	0,23659486	0,23400224	0,23531097
0,18279126	0,18326559	0,18125735	0,1822711
0,09775674	0,09778721	0,09765703	0,09772314
0,09775674	0,09778721	0,09765703	0,09772314
0,07572205	0,07574565	0,07564481	0,07569602
0,0553574	0,05535974	0,05534976	0,05535483
0,0553574	0,05535974	0,05534976	0,05535483
0,04287966	0,04288147	0,04287374	0,04287766

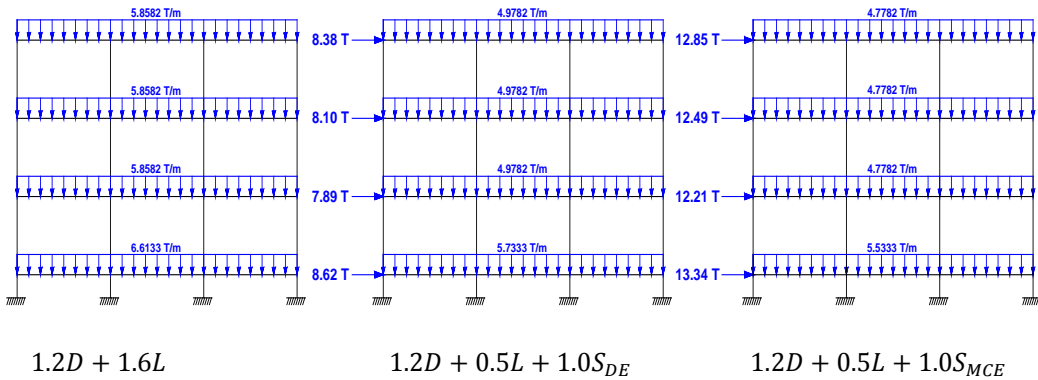
**Tabla 8.** Resultado del Análisis Sísmico espacial

PISO	$\mu = 0.10$				$\mu = 0.20$			
	DE		MCE		DE		MCE	
	Desplaza. Lateral en C.M. (m)	Fuerza Lateral en C.M. (T)	Desplaza. Lateral en C.M. (m)	Fuerza Lateral en C.M. (T)	Desplaza. Lateral en C.M. (m)	Fuerza Lateral en C.M. (T)	Desplaza. Lateral en C.M. (m)	Fuerza Lateral en C.M. (T)
1	0,1389	34,4718	0,2504	53,3750	0,0995	35,9179	0,1811	51,8735
2	0,1431	31,5756	0,2569	48,8365	0,1039	33,0868	0,1874	47,5958
3	0,1471	32,4142	0,2631	49,9643	0,1082	34,3267	0,1934	49,0384
4	0,1496	33,5297	0,2670	51,4058	0,1108	36,0315	0,1972	50,9954

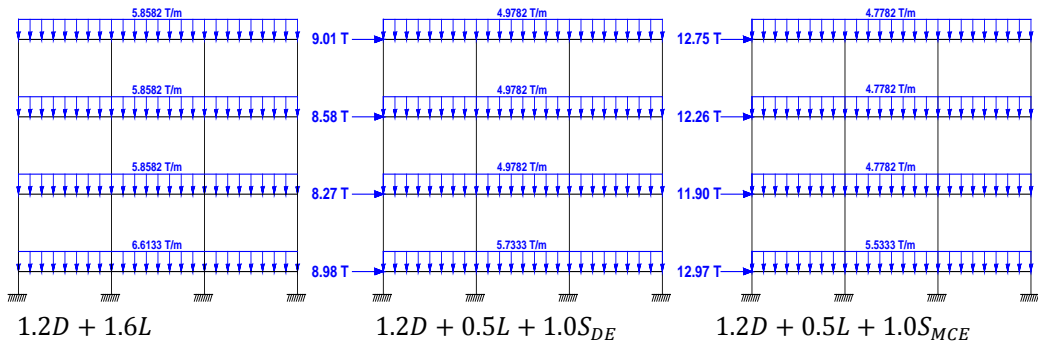
Una vez que se obtuvo los desplazamientos laterales en coordenadas de piso, éstos fueron comparados con los indicados en la tabla 6 para el aislador, encontrando en todos los casos que los resultados con el método de superposición modal son menores, lo cual es correcto.

Con las fuerzas obtenidas en el centro de masas se halló las fuerzas a nivel de los pórticos repartiendo proporcionalmente a su rigidez lateral y se procedió al análisis estático de los mismos para diseñar el aislador propiamente dicho, las combinaciones de carga que se consideraron se indican a continuación.

Valor **LB** para  $\mu = 0.10$



Valor **LB** para  $\mu = 0.20$



Los resultados encontrados se indican en la tabla 9

**Tabla 9.** Fuerza axial, desplazamientos y giros en aisladores

$\mu = 0.10$							
CARGA VERTICAL (1.2 D+1.6L) DE		SISMO DE		SISMO MCE			
Aislador	Pu (kg)	u (cm)	$\theta$ (rad)	Pu (kg)	u (cm)	Pu (kg)	u (cm)
Externo	46966,7	0	0,0052	52667,3	15,29	57869,1	27,17
Interno	98173,3	0	0,0050	85412,8	14,62	82989,6	26,16

$\mu = 0.20$							
CARGA VERTICAL (1.2 D+1.6L) DE		SISMO DE		SISMO MCE			
Aislador	Pu (kg)	u (cm)	$\theta$ (rad)	Pu (kg)	u (cm)	Pu (kg)	u (cm)
Externo	46966,8	0	0,0052	53475,2	11,43	57583,7	20,22
Interno	98173,2	0	0,0050	85507,7	10,72	82952,0	19,22

Finalmente se determina el espesor de las placas tanto en el centro como en los bordes. Estos resultados se muestran en la tabla 10 los mismos que son iguales para  $\mu = 0.10$  y  $\mu = 0.20$ .

**Tabla 10** Resultados para el espesor de la placa

$\mu = 0.10 = 0.20$						
1.2D+1.6L		1.2D+0.5L+1.0SDE		1.2D+0.25L+1.0SMCE		
Aislador	Placa exterior centro (cm)	Placa exterior desplazamiento (cm)	Placa exterior centro (cm)	Placa exterior desplazamiento (cm)	Placa exterior centro (cm)	Placa exterior desplazamiento (cm)
Externo (fept)	0	0	0	0	0	0
Interno (fept)	0,0246	0,0246	0	0	0	0

Las dimensiones del diseño del cojinete se muestran en la tabla 11

**Tabla 11** Resultados para el dimensionamiento del cojinete

PROPIEDADES	UNIDADES	$\mu = 0.10=0.20$
$D_m$	cm	17
$C_m$	cm	18,5
$H_{act}$	cm	3,6
$T_{min}$	cm	1,9
$T_{max}$	cm	3,5
$c$	cm	0,8
$R$	cm	25,7



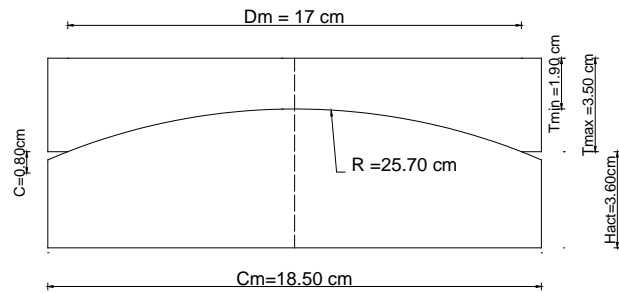


Figura 24. Diseño del cojinete.

Por lo que el diseño del aislador FPS de la primera generación se muestra en la figura 25

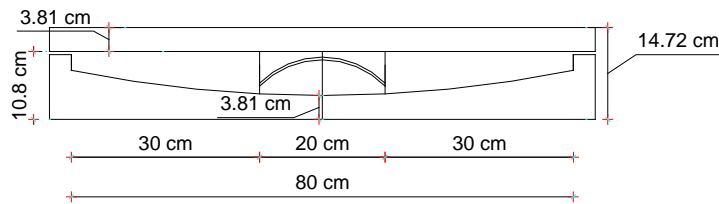


Figura 25. Diseño del aislador de la primera generación

### 3.2 Aisladores FPS de la segunda generación

Se va a indicar los resultados obtenidos del análisis y diseño del aislador FPS de la segunda generación, considerando que los parámetros utilizados para el cálculo son los mismos que los aisladores FPS de la primera generación, ver tabla 12, tabla 13 y tabla 14.

Tabla 12. Parámetros del diagrama de histéresis

PROPIEDADES DINAMICAS	UNIDADES	ESPECTRO DE ACELERACIONES ERN-12			
		$\mu = 0.10$		$\mu = 0.20$	
		SISMO DE	SISMO MCE	SISMO DE	SISMO MCE
$q_1$	cm	7,8126	12,4898	7,1991	11,1763
$q_2$	cm	7,789	12,4378	7,1692	11,1298
$q_t$	cm	15,6106	24,9277	14,3683	22,3062
$b_{effect}$	%	0,3510	0,2768	46,31	40,25
$K_{EF}$	kg/cm	431,1306	342,2959	709,907	526,1219
$K_d$	Kg/cm	193,4549	193,4549	193,4549	193,4549
$R$	cm	99,2948	99,2948	99,2948	99,2948
$F$	kg	6730,2	8532,6	10200	11736
$F_f$	kg	3710,3	3710,3	7420,5	7420,5

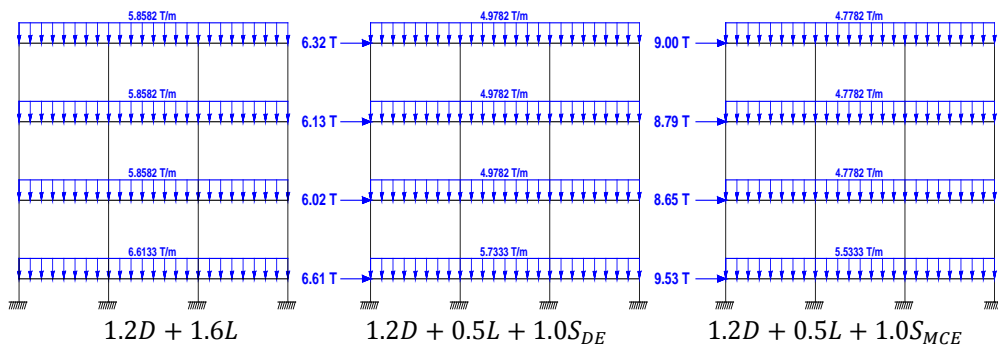
**Tabla 13.** Períodos de vibración

PERIODOS DE VIBRACIÓN			
$\mu = 0.10$		$\mu = 0.20$	
DE	MCE	DE	MCE
1,89107178	2,11555049	1,4885425	1,71772079
1,89107178	2,11555049	1,4885425	1,71772079
1,4648179	1,63869836	1,15302006	1,33054081
0,23710801	0,23777185	0,23504177	0,23640101
0,23710801	0,23777185	0,23504177	0,23640101
0,18366307	0,18417728	0,18206257	0,18311544
0,09781261	0,09784529	0,09770961	0,09777758
0,09781261	0,09784529	0,09770961	0,09777758
0,07576532	0,07579064	0,07568554	0,07573819
0,0553617	0,05536421	0,05535379	0,055359
0,0553617	0,05536421	0,05535379	0,055359
0,04288299	0,04288493	0,04287686	0,0428809

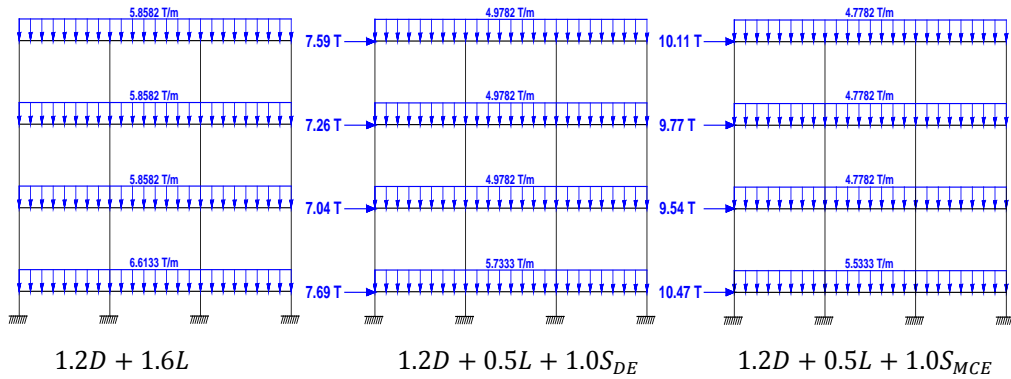
**Tabla 14.** Resultado del Análisis Sísmico espacial

PISO	$\mu = 0.10$				$\mu = 0.20$			
	DE		MCE		DE		MCE	
	Desplaza. Lateral en C.M. (m)	Fuerza Lateral en C.M. (T)	Desplaza. Lateral en C.M. (m)	Fuerza Lateral en C.M. (T)	Desplaza. Lateral en C.M. (m)	Fuerza Lateral en C.M. (T)	Desplaza. Lateral en C.M. (m)	Fuerza Lateral en C.M. (T)
1	0,1426	26,4579	0,2586	38,1200	0,1013	30,7639	0,1853	41,8728
2	0,1458	24,0622	0,2632	34,6169	0,1051	28,1545	0,1903	38,1562
3	0,1488	24,5395	0,2675	35,1698	0,1086	29,0402	0,1951	39,0672
4	0,1507	25,2717	0,2702	36,0150	0,1109	30,3634	0,1982	40,4543

Valor **LB** para  $\mu = 0.10$



Valor **LB** para  $\mu = 0.20$



Los resultados encontrados se indican en la tabla 15.

**Tabla 15.** Fuerza axial, desplazamientos  $\mu$  y giros en aisladores

$\mu = 0.10$							
CARGA VERTICAL (1.2 D+1.6L) DE				SISMO DE		SISMO MCE	
Aislador	Pu (kg)	u (cm)	$\theta$ (rad)	Pu (kg)	u (cm)	Pu (kg)	u (cm)
Externo	46966,6	0	0,0052	49297,8	15,39	52141,4	27,49
Interno	98173,4	0	0,0050	84336,8	14,89	82296,2	26,78

$\mu = 0.20$							
CARGA VERTICAL (1.2 D+1.6L) DE				SISMO DE		SISMO MCE	
Aislador	Pu (kg)	u (cm)	$\theta$ (rad)	Pu (kg)	u (cm)	Pu (kg)	u (cm)
Externo	46966,8	0	0,0052	51096,8	11,43	53704,6	20,31
Interno	98173,2	0	0,0050	84552,4	10,83	82483,5	19,51

**Tabla 16.** Resultados para el espesor de la placa

$\mu = 0.10$						
1.2D+1.6L		1.2D+0.5L+1.0SDE		1.2D+0.25L+1.0SMCE		
Aislador	Placa exterior centro (cm)	Placa exterior desplazamiento (cm)	Placa exterior centro (cm)	Placa exterior desplazamiento (cm)	Placa exterior centro (cm)	Placa exterior desplazamiento (cm)
Externo (fept)	0	0	0	0,4956	0	0
Interno (fept)	0,0246	0,0246	0	3,5820	0	0

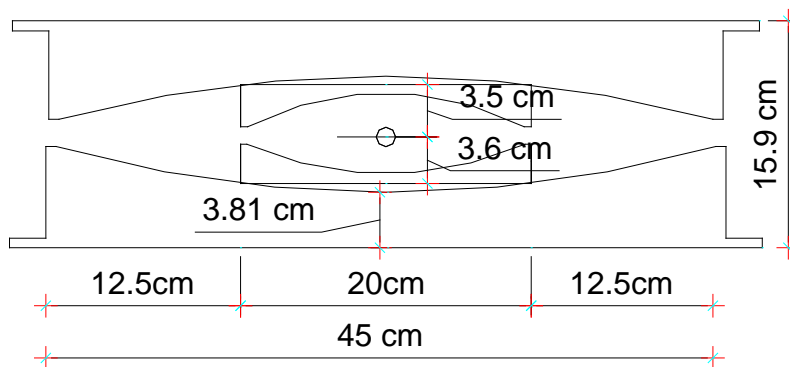
$\mu = 0.20$							
		1.2D+1.6L		1.2D+0.5L+1.0SDE		1.2D+0.25L+1.0SMCE	
Aislador	Placa exterior centro (cm)	Placa exterior desplazamiento (cm)	Placa exterior centro (cm)	Placa exterior desplazamiento (cm)	Placa exterior centro (cm)	Placa exterior desplazamiento (cm)	
Externo (fept)	0	0	0	0	0	3,8470	
Interno (fept)	0,0246	0,0246	0	1,0598	0	5,1612	

El diseño del cojinete se muestra en la tabla 17, como se muestra en la figura 24.

**Tabla 17.** Dimensionamiento del cojinete

PROPIEDADES	UNIDADES	$\mu = 0.10 = 0.20$
$D_m$	cm	17
$C_m$	cm	18,5
$H_{act}$	cm	3,6
$T_{min}$	cm	1,9
$T_{max}$	cm	3,5
$c$	cm	0,8
$R$	cm	25,7

Por lo que el diseño del aislador FPS de la segunda generación se muestra en la figura 26



**Figura 26.** Diseño del aislador de la segunda generación

### 3.3 Aisladores elastoméricos.

Se consideró un aislador elastomérico con diámetro exterior  $D_0 = 35.5\text{cm}$ , diámetro interior del núcleo de plomo  $D_i = 9\text{ cm}$ . El aislador tiene 24 capas de goma, cada una de ellas tiene un espesor de 5 mm; el espesor de la placa Shim es de 2mm. La longitud de la placa cuadrada es de 40 cm; el espesor de las placas exteriores es de 2.5 cm. Por otra parte en la tabla 18 se indican las propiedades del material.

**Tabla 18.** Propiedades del material

Nombre	Límite Inferior	Límite Superior	Unidades
Módulo efectivo de corte de goma, $G$	5.95	8.05	Kg/cm <sup>2</sup>
Módulo Volumétrico de Goma, $k$	2000	2000	MPa.
Módulo de corte del Plomo, $G_p$	127.5	172.5	MPa.
Esfuerzo de corte del Plomo, $\tau_{py}$	85	115.0	Kg/cm <sup>2</sup>

En la tabla 18 se presenta los parámetros que definen el modelo de histéresis para el aislador elastoméricos de la estructura que se está analizando.

**Tabla 19.** Parámetros del diagrama de histéresis

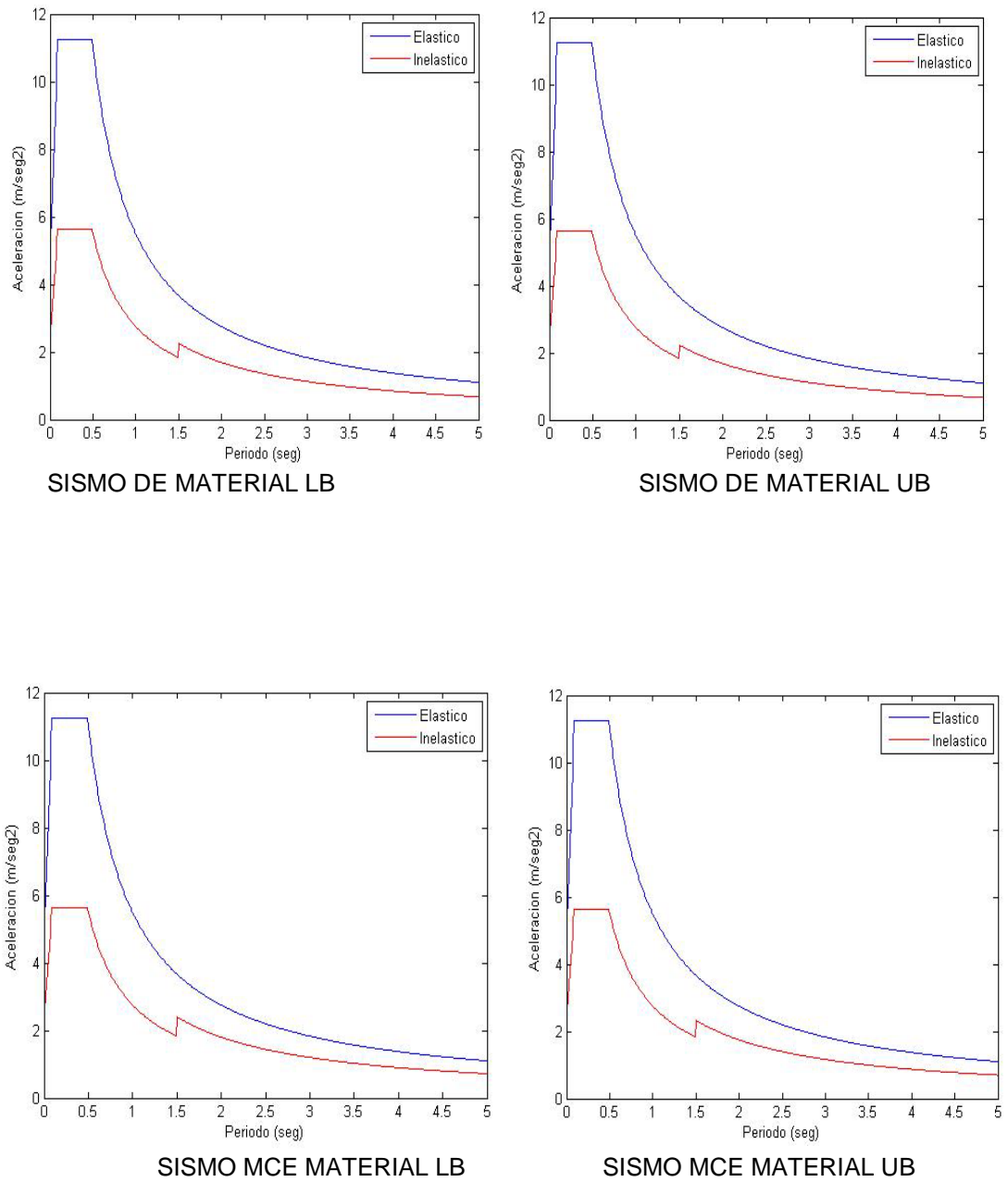
PROPIEDADES DINAMICAS	UNIDADES	ESPECTRO DE ACELERACIONES ERN-12			
		SISMO DE		SISMO MCE	
		LB	UB	LB	UB
q=	cm	11,257	9,065	20,419	16,333
Alead=	cm2	636,173	636,173	636,173	636,173
A=	cm2	926,181	926,181	926,181	926,181
Qd=	T	86,519	117,060	86,519	117,060
Kd=	T/m	734,77	994,10	734,77	994,10
Fy=	T	104,890	141,910	104,890	141,910
Kef=	T/m	1503,300	2285,400	1158,500	1710,800
betaef=	%	25,320	26,050	20,430	22,590
B=		1,627	1,641	1,526	1,572
Tef=	s	1,302	1,056	1,483	1,221

**Tabla 20.** Periodos de vibración

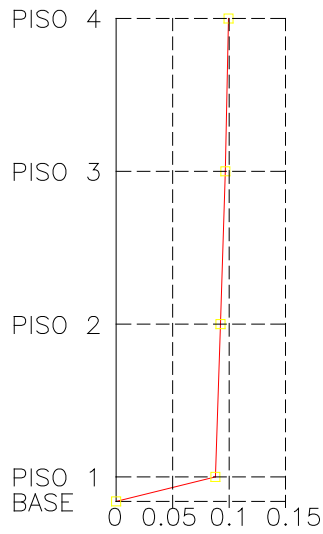
MODOS	SISMO DE		SISMO MCE	
	<i>T<sub>LB</sub></i>	<i>T<sub>UB</sub></i>	<i>T<sub>LB</sub></i>	<i>T<sub>UB</sub></i>
1	1,350	1,115	1,525	1,271
2	1,350	1,115	1,525	1,271
3	1,046	0,864	1,181	0,985
4	0,243	0,239	0,245	0,241
5	0,243	0,239	0,245	0,241
6	0,188	0,185	0,190	0,187
7	0,101	0,101	0,101	0,101
8	0,101	0,101	0,101	0,101
9	0,078	0,078	0,078	0,078
10	0,058	0,057	0,058	0,057
11	0,058	0,057	0,058	0,057
12	0,045	0,045	0,045	0,045

**Tabla 21.** Resultados del análisis sísmico espacial

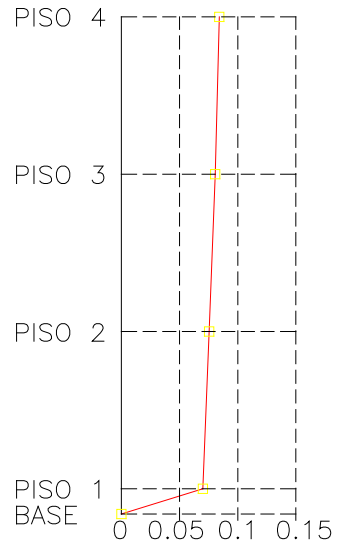
SISMO DE						
GDL	MATERIAL LB			MATERIAL UB		
	qt (m)	f (T)	f c/p (T)	qt (m)	f (T)	f c/p (T)
1	0,088	33,640	8,41	0,070	40,054	10,01
2	0,092	32,785	8,20	0,075	39,583	9,90
3	0,097	34,108	8,53	0,081	41,890	10,47
4	0,099	36,210	9,05	0,084	45,381	11,35
SISMO MCE						
GDL	MATERIAL LB			MATERIAL UB		
	qt (m)	f (T)	f c/p (T)	qt (m)	f (T)	f c/p (T)
1	0,132	38,785	9,70	0,082	35,563	8,89
2	0,137	37,857	9,46	0,087	34,789	8,70
3	0,142	39,104	9,78	0,091	36,360	9,09
4	0,146	40,783	10,20	0,094	38,809	9,70



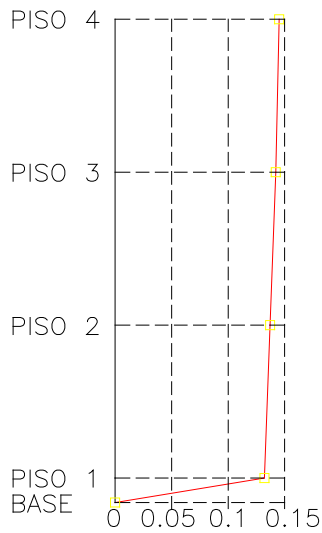
**Figura 27.** Espectros elásticos e inelásticos el cual esta reducido por R para la superestructura y B para el sistema de aislación.



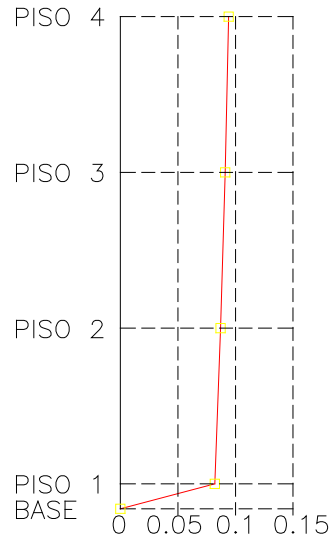
SISMO DE MATERIAL LB



SISMO DE MATERIAL UB



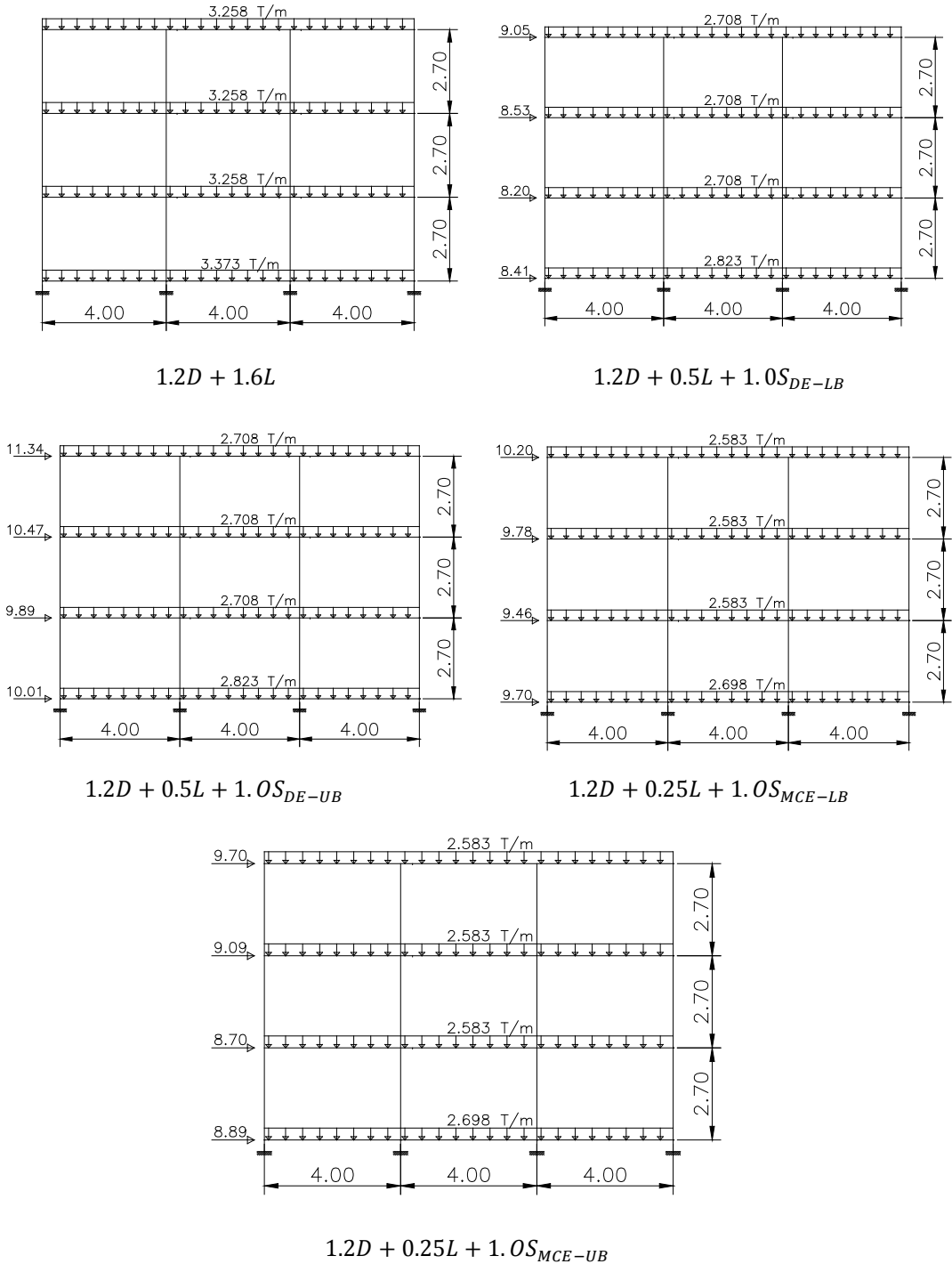
SISMO DE MATERIAL LB



SISMO DE MATERIAL UB

Figura 28. Desplazamientos laterales por piso y del sistema de aislación.





**Figura 29.** Combinaciones de carga para cada caso

**Tabla 22.** Fuerza axial, desplazamientos y giros en aisladores

AISLADOR	CARGA VERTICAL (1.2D+1.6L)					
	LB			UB		
	Pu	U	$\theta$	Pu	U	$\theta$
EXTERNO	26,77	-3,99E-05	-0,000300538	26,58	-3,85E-05	-0,000290192
INTERNO	52,11	-1,39E-05	-1,99E-05	52,30	-1,32E-05	-1,21E-05
AISLADOR	COMBINACION (1.2D+0.5L+1.0S(DE))					
	LB			UB		
	Pu	U	$\theta$	Pu	U	$\theta$
EXTERNO	35,32	0,091353938	-0,001444635	38,28	0,07347228	-0,001697368
INTERNO	44,12	0,091326975	-0,000740768	44,62	0,07343608	-0,000893528
AISLADOR	COMBINACION (1.2D+0.25L+1.0S(MCE))					
	LB			UB		
	Pu	U	$\theta$	Pu	U	$\theta$
EXTERNO	36,1	0,135582276	-0,001602685	35,07	0,085466441	-0,00149371
INTERNO	42,24	0,135546637	-0,000842418	42,49	0,085435185	-0,000775566

**Tabla 23.** Control de deformaciones angulares

COMB. CARGA	AISLADOR	DEFORMACION ANGULAR	LB	UB
1,2D+1,6L	EXTERIOR	$Y_c+Y_r+Y_s \leq 6$	0,70	0,61
	INTERIOR		1,01	0,84
1,2D+0,5L+1,0S(DE)	EXTERIOR	$Y_c+Y_r+0,5Y_s \leq 7$	1,61	1,30
	INTERIOR		1,76	1,37
1,2D+0,25L+1,0S(MCE)	EXTERIOR	$Y_c+Y_r+0,25Y_s \leq 9$	2,09	1,29
	INTERIOR		2,23	1,39

**Tabla 24.** Calculo de la placa shim

COMB. CARGA	AISLADOR	VALOR CALCULADO		VALOR MINIMO		VALOR ADOPTADO	
		LB(cm)	UB(cm)	LB(cm)	UB(cm)	LB(cm)	UB(cm)
1,2D+1,6L	EXTERIOR	0,16	0,16	1,90	1,90	2,00	2,00
	INTERIOR	0,32	0,32	1,90	1,90	2,00	2,00
1,2D+0,5L+1,0S (DE)	EXTERIOR	0,32	0,32	1,90	1,90	2,00	2,00
	INTERIOR	0,41	0,38	1,90	1,90	2,00	2,00
1,2D+0,25L+1,0 S(MCE)	EXTERIOR	0,33	0,24	1,90	1,90	2,00	2,00
	INTERIOR	0,39	0,29	1,90	1,90	2,00	2,00

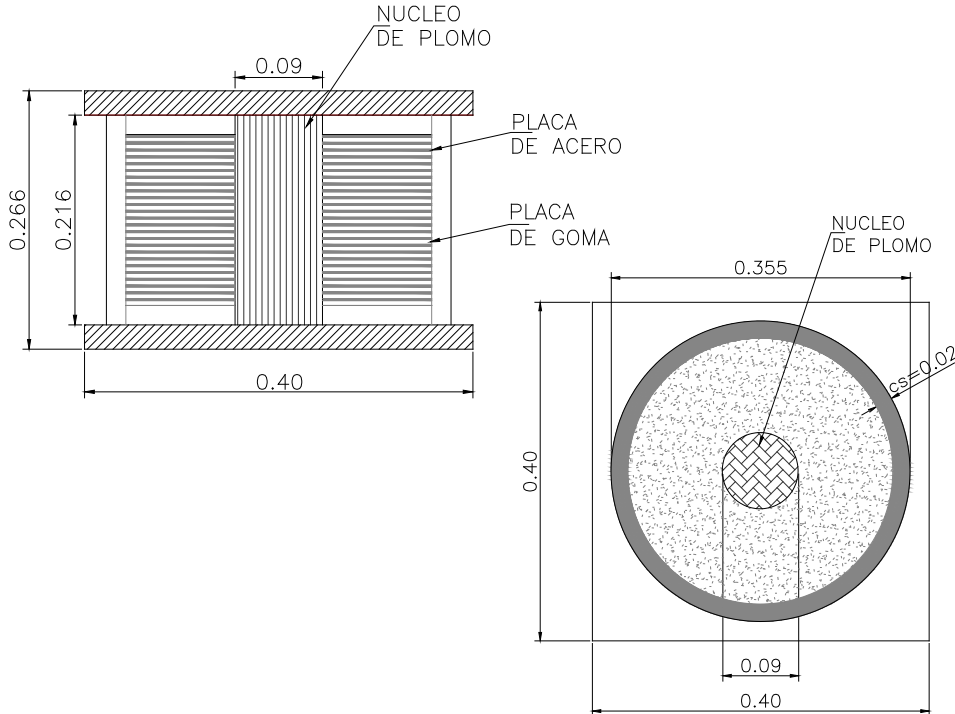
**Tabla 25.** Control del pandeo

COMB. CARGA	AISLADOR	CONTROL	VALORES OBTENIDOS	
			LB	UB
1,2D+1,6L	EXTERIOR	$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 2$	8,42	11,47
	INTERIOR		4,32	5,83
1,2D+0,25L+1,0S(MCE)	EXTERIOR	$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 1.1$	3,29	6,05
	INTERIOR		2,82	5,01

**Tabla 26.** Placas exteriores

COMB. CARGA	AISLADOR	Ar (cm <sup>2</sup> )		t <sub>tp</sub> (mm)	
		LB	UB	LB	UB
1,2D+0,5L+1,0S(DE)	EXTERIOR	133,18	144,34	25	25
	INTERIOR	166,37	168,25	25	25
1,2D+0,25L+1,0S(MCE)	EXTERIOR	88,48	85,96	25	25
	INTERIOR	103,53	104,14	25	25

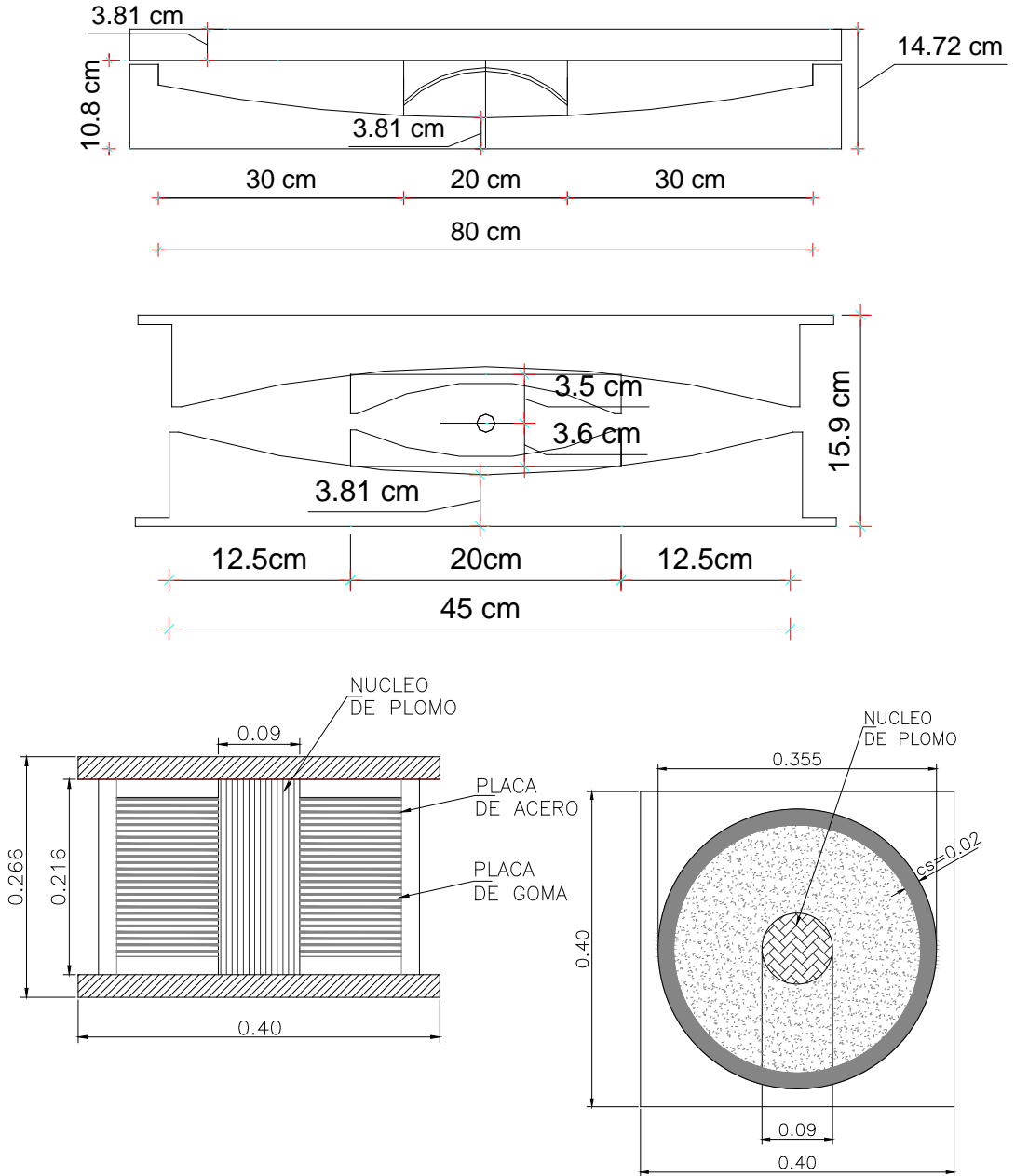
Los valores calculados son mínimos por lo que se adoptan las recomendaciones del fabricante.



**Figura 30.** Aislador elastomérico diseño final

#### 4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se resumen las dimensiones de los diferentes aisladores encontrados para el edificio de tres pisos que ha sido analizado. Ver figura 31.



**Figura 31.** Dimensiones de los tres tipos de aisladores

## **5 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES**

Se ha presentado con bastante detalle el marco teórico que conduce al diseño de aisladores FPS de la primera y segunda generación y de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo; de acuerdo a las investigaciones desarrolladas en la Universidad de Buffalo al año 2011.

Posteriormente se analizó y diseño los aisladores sísmicos para una estructura de tres pisos, todo esto con el propósito de ayudar al lector a comprender el diseño de estos dispositivos de control pasivo.

Se aspira haber aportado a la socialización del diseño de estructuras con aisladores sísmicos, habida cuenta que es una muy buena opción para estructuras situadas en zonas de alta peligrosidad sísmica.

## **REFERENCIAS**

1. AASHTO (2010) *LRFD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. Aguiar R., (2013,1), "Análisis estático de una estructura con aisladores sísmicos utilizando *CEINCI-LAB*" Terceras Jornadas de Investigación Científica desde las Aulas. Micrositio: [www.ia.espe.edu.ec](http://www.ia.espe.edu.ec).
3. Aguiar R., (2013,2), *Microzonificación sísmica de Quito*, Centro de Investigaciones Científicas. Universidad de Fuerzas Armadas. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH, Primera edición, 214 p., Quito.
4. Aguiar R., Pazmiño M., Castillo J., (2013), "Comparación entre el método de la rigidez secante y tangente en el análisis sísmico de estructuras con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo utilizando factores de sitio NEC-11 y ERN-12", *Tercera Jornada de Investigación Científica desde las aulas. Carrera de Ingeniería Civil. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE*, 14 p., Quito.
5. Aguiar (2012) *Dinámica de Estructuras con CEINCI-LAB*. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 416 p., Quito.
6. Aguiar R., (2010), "Peligrosidad sísmica del Ecuador y descripción de los puentes construidos sobre el estuario del río Esmeraldas, con aisladores de base FPS", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, **15 (1)**, 85-118, Quito.
7. Aguiar R. (2004) *Análisis Matricial de Estructuras*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. Tercera Edición, 550 p., Quito.

8. Almazán J. L., (2001), *Torsión accidental y natural de estructuras aisladas con el sistema de Péndulo friccional*. Tesis para obtener título de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Católica de Chile, 288 p., Santiago de Chile.
9. Castillo J.G., Pazmiño M.B., (2013), *Diseño sísmico de estructuras con aisladores de acuerdo al ASCE 7-10 y análisis de torsión*, Tesis de grado. Carrera de Ingeniería Civil. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, Quito.
10. Constantinou M., (2013) *Curso de Aislación Sísmica*. XIX Curso Internacional de Estructuras. Universidad de Fuerzas Armadas EPE, Quito Ecuador.
11. Constantinou M., Kalpakidis I., Filiatrault A., and Ecker Lay R., (2011), *LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*, Technical Report MCEER-11-0004, 436 p.
12. Constantinou M., Whittaker A., Kalpakidis Y., (2007), *Performance of seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading*, Technical Report MCEER-07-0012, 186 p.
13. Cueto J., (2013), *Curso de Aislación Sísmica*. XIX Curso Internacional de Estructuras. Universidad de Fuerzas Armadas EPE, Quito Ecuador.
14. DeWolf J. T. and Ricker D.T., (1990), *Column base plates*. Steel Design Guide Series 1. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois.
15. ERN-2012, *Microzonificación sísmica del distrito metropolitano de Quito: Estudio de la amenaza sísmica a nivel local*. Programa para la reducción de riesgos urbanos. Distrito Metropolitano de Quito.
16. Fenz D., Constantinou M., (2008), *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings*, Technical Report MCEER-08-0007, 186 p.
17. Kelly J., (1993), *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, Department of Civil Engineering, University of California, 134 p., Berkeley California.
18. Morales E., (2013), *Curso de Aislación Sísmica*. XIX Curso Internacional de Estructuras. Universidad de Fuerzas Armadas EPE, Quito Ecuador.
19. NEC-11 (2011) *Norma Ecuatoriana de la Construcción*, Cámara de la Construcción de Quito.
20. Norma de Aislación de Chile (2001), *Proposición de código para el análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*, Achisina. Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica, 70 p., Santiago de Chile.
21. Norma E.030 (2003), *Reglamento Nacional de Construcciones*. Norma Técnica de Edificaciones. Diseño Sismo Resistente, Servicio Nacional de

Normalización, Capacitación e Investigación para la Industria de la Construcción, SENSICO, 36 p. Lima.

22. Roeder C.W., Stanton J.F., and Taylor A.W., (1987), *Performance of Elastomeric Bearings*" Report N. 298, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington D.C.