

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

---

### **RESUMEN**

En este capítulo se da una descripción de la necesidad del estudio de aisladores de base, se realiza una descripción de los 3 tipos de aisladores FPS como son los aisladores de Primera, Segunda y Tercera Generación señalando sus partes y características más importantes. Además se explica detalladamente los fundamentos generales de los aisladores de base tipo FPS tales como: factor de amortiguamiento, amortiguamiento viscoso, amortiguamiento de Coulomb, periodo objetivo, etc.



## 1.1 ANTECEDENTES:

Los aisladores tipo péndulo son utilizados a nivel mundial con el fin de mejorar la seguridad y el comportamiento estructural ante una eventualidad sísmica, tanto en estructuras nuevas como para la rehabilitación de estructuras existentes. Por tal motivo se ve la necesidad de investigar en nuestro país más acerca de ellos y con más razón sabiendo que nos encontramos dentro de una zona de alta peligrosidad sísmica en la que se requiere implementar métodos más eficaces para la seguridad de la población, ya que los terremotos presentados a través de la historia han dejado grandes e irrecuperables pérdidas a la humanidad, golpeando fuertemente su economía y cobrando muchas vidas. En los últimos años en nuestro país, una de las más importantes acciones sísmicas sufridas fue la de Bahía de Caráquez en 1998 la misma que dejó grandes daños.

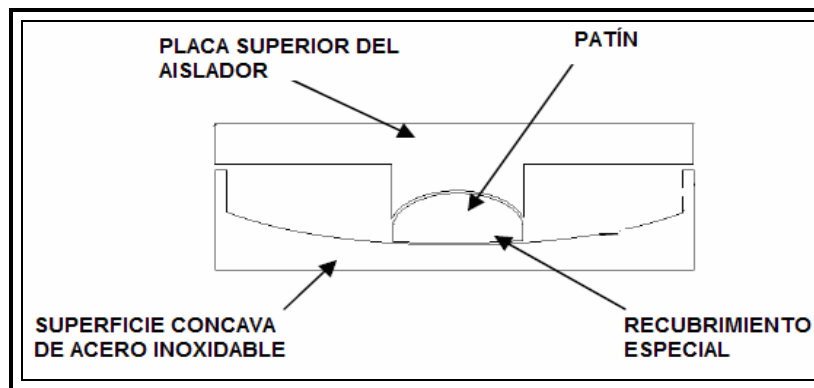
Es importante entender que en un sismo la estructura convencional sin aislamiento sísmico está expuesta a grandes deformaciones que pueden causar daño severo y hasta colapso de la misma, mientras que una estructura aislada vibra casi como un cuerpo rígido con grandes deformaciones o desplazamientos soportados por el sistema de aisladores.



## 1.2 TIPOS DE AISLADORES FPS

Existen tres tipos de aisladores FPS que se han desarrollado a raíz de décadas de estudio y experimentaciones que son los que se indican a continuación:

### 1.2.1 Aisladores de Primera Generación (Simple péndulo)



**Figura 1.1:** Detalle de un aislador FPS de Primera Generación

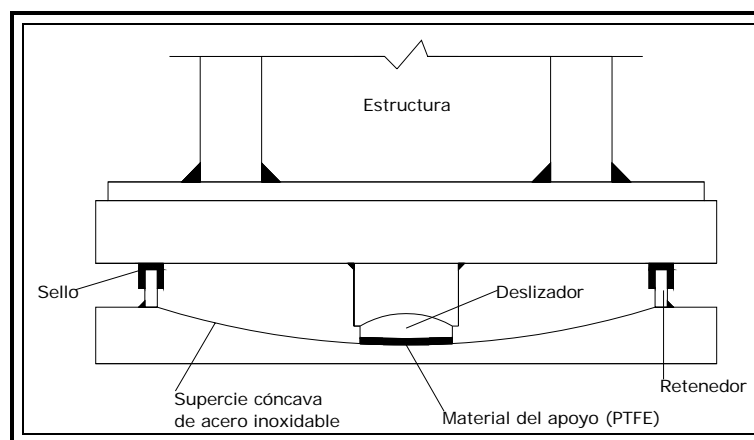
Son los primeros aisladores tipo péndulo conocidos y los que serán estudiados y analizados en esta tesis. Son aisladores sísmicos de acero inoxidable que constan de una superficie cóncava, un patín esférico articulado y una platina de cubierta, durante un sismo, el patín articulado se desliza en la superficie cóncava generando en la estructura soportada pequeños movimientos de péndulo, la fuerza de fricción dinámica genera el amortiguamiento necesario para absorber la energía de entrada. En consecuencia, las fuerzas y movimientos laterales transmitidos a la estructura se reducen en gran proporción.



Una diferencia importante con los aisladores de segunda y tercera generación es que este aislador solo cuenta con una superficie cóncava como se puede observar en la figura 1.1, aunque esto puede ser ventajoso en algunas instalaciones ya que tiene una altura mucho más baja.

El diseño de estos elementos se simplifica por el hecho de que el periodo del aislador, la capacidad de carga vertical, el amortiguamiento, la capacidad de desplazamiento y su capacidad a tensión pueden seleccionarse de forma independiente.

Al desplazarse únicamente sobre esta superficie cóncava el periodo de la estructura se seleccionará simplemente escogiendo el radio de curvatura (R) de la superficie cóncava del aislador ya que  $T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}$  donde g es la aceleración de la gravedad.



**Figura 1.2:** Detalle de un aislador FPS de Primera Generación



El primer edificio diseñado con aisladores de base tipo péndulo de fricción, fue el edificio gubernamental Hayward City Hall, que se halla ubicado en la ciudad de Hayward en el estado de California, se lo puede observar en la figura 1.3 . En este edificio de hormigón armado se colocaron 53 aisladores FPS, los mismos que se encuentran en el subsuelo que sirve de parqueadero.

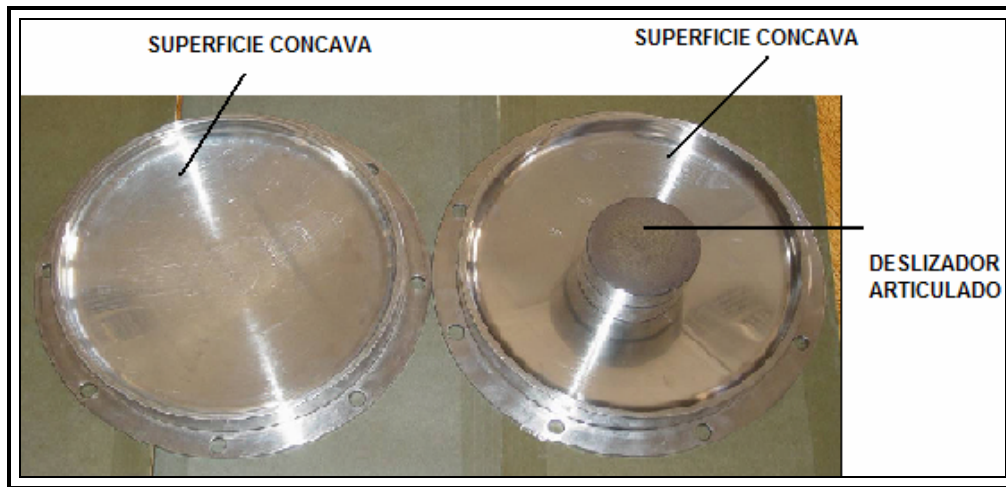


**Figura 1.3:** Edificio, Hayward City Hall, con aisladores FPS.

La empresa EPS es quien patentó el aislador FPS y le ha dado gran impulso, es así que en menos de 12 años se tienen tres generaciones de aisladores tipo péndulo de fricción.



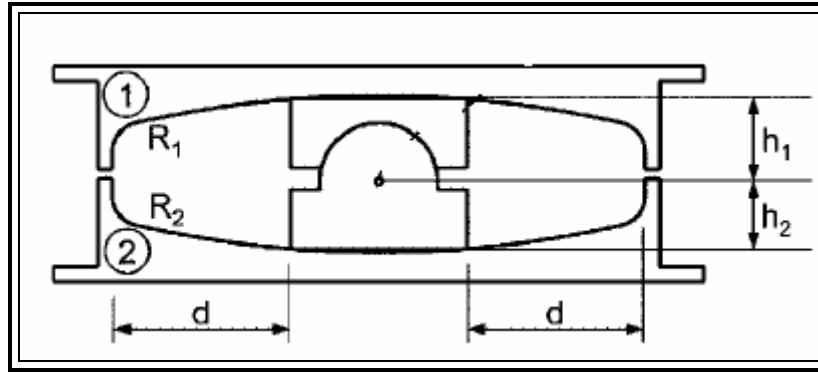
### 1.2.2 Aisladores de Segunda Generación (Doble Péndulo).



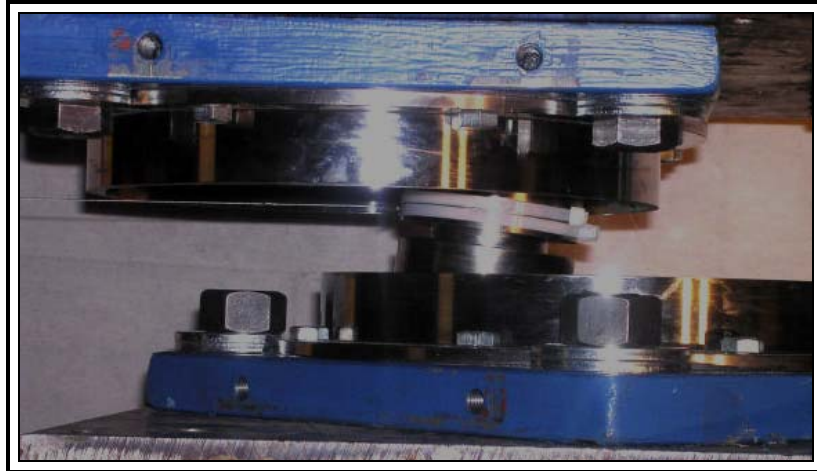
**Figura 1.4:** Detalle de un aislador de Segunda Generación

En los aisladores de Segunda Generación se puede apreciar a diferencia de los aisladores de la Primera Generación que están compuesto de dos superficies cóncavas tanto en la superior como en la inferior.

La parte superior e inferior de las superficies cóncavas tienen radios de curvatura  $R1$  y  $R2$ , respectivamente, que pueden no ser iguales. Los coeficientes de fricción en estas dos superficies de deslizamiento son  $m1$  y  $m2$ , respectivamente. El deslizador articulado separa las dos superficies cóncavas. El mayor desplazamiento que se puede obtener con este tipo de aisladores será la suma de los dos radios de las dos superficies cóncavas como se muestra en la figura 1. 5.



**Figura 1.5:** Detalle de un aislador de Segunda Generación



**Figura 1.6:** Comportamiento de un aislador de Segunda Generación



### 1.2.3 Aisladores de Tercera Generación (Triple péndulo)

Y por último se han desarrollado los aisladores de base triple péndulo o de Tercera Generación, este tipo de aislador es el que será utilizado en el Puente Bahía-San Vicente y es el FPS de última Generación y de última tecnología.



**Figura 1.7:** Aislador de Tercera Generación

Los aisladores de tercera generación tienen una mejor respuesta sísmica, teniendo los costos más bajos y menores costos de construcción en comparación con la tecnología convencional de aislamiento sísmico. Las propiedades de cada uno de los tres péndulos son elegidas para activarse sucesivamente para diferentes esfuerzos sísmicos. A medida que los movimientos del suelo son más fuertes los desplazamientos de los aisladores incrementan, en los mayores desplazamientos la longitud efectiva del péndulo y el amortiguamiento efectivo se incrementan, logrando de esta manera reducir las fuerzas sísmicas y obteniendo menores desplazamientos en la estructura.

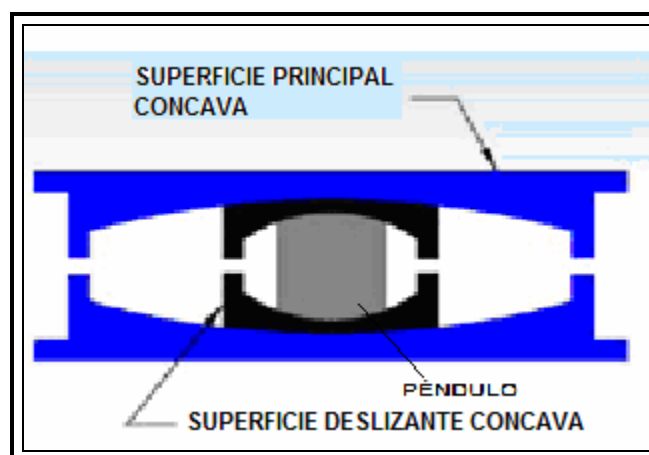




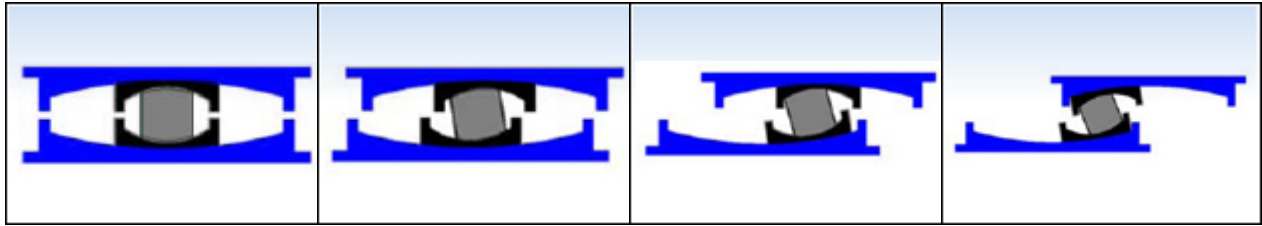
Cuando se presenta una actividad sísmica severa o el sismo máximo para el cual fue diseñado, se desplaza tanto el deslizador articulado interior sobre las dos superficies cóncavas interiores como las dos superficies deslizantes cóncavas interiores sobre las dos superficies cóncavas principales, como se muestra en la figura 1.9.

Mientras si se produce un sismo de menores proporciones o cargas eventuales como viento solo se desplazará el deslizador articulado interior sobre las dos superficies cóncavas interiores.

Las propiedades en el interior del péndulo son elegidas para reducir las mayores aceleraciones que actúan sobre la estructura aislada, reducir al mínimo la participación de los mayores modos de vibración de la estructura y reducir las fuerzas de corte durante un sismo.



**Figura 1.8:** Detalle de un Aislador de Tercera Generación



**Figura 1.9:** Comportamiento Aislador de Tercera Generación

Existen varias estructuras diseñadas con aisladores de Tercera Generación tales como:



**Figura 1.10:** Pasadena City Hall, California

El Pasadena City Hall fue afectado por el sismo de Northridge, al tratarse de un patrimonio cultural, necesitaba ser rehabilitada y protegida ante cualquier nueva eventualidad sísmica, por lo que después de una ardua investigación fueron incorporados a su estructura aisladores friccionales.



Otro ejemplo es:

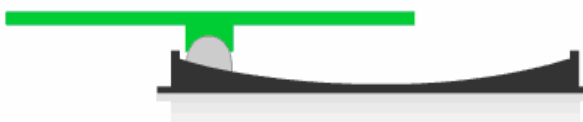


**Figura 1.11:** Aeropuerto Internacional de San Francisco

Está compuesto por 267 péndulos de fricción.

### 1.3 COMPARACIÓN DEL AISLADOR TRIPLE PÉNDULO Y AISLADOR SIMPLE PÉNDULO.

AISLADOR DE PRIMERA GENERACIÓN



AISLADOR DE TERCERA GENERACIÓN



**Figura 1.12:** Comportamiento Aislador de primera generación y tercera generación



El Péndulo de Primera Generación mantiene una fricción constante, rigidez lateral y un período dinámico para todos los niveles de movimiento y desplazamientos sísmico. En el aislador de Tercera Generación los tres mecanismos tipo péndulo se activan secuencialmente en base al sismo aplicado. Los pequeños desplazamientos, los movimientos de suelo de alta frecuencia son absorbidas por la baja fricción y el corto período del péndulo interior. En el caso de sismos más fuertes, tanto el aislamiento friccional como el periodo incrementan, lo cual reduce los desplazamientos y las fuerzas cortantes en la base de la estructura. Para el sismo de diseño, tanto el aislamiento friccional y la rigidez lateral se incrementan, por lo que se activan todas las partes del aislador como se muestra en la figura 1.12.

Para el sismo máximo esperado el plan de dimensiones del aislador Triple Péndulo corresponde el 60 % de lo que sería las dimensiones de un aislador de Primera Generación.

## 1.4 FUNDAMENTO GENERAL DE LOS AISLADORES FPS

### 1.4.1 Factor de amortiguamiento

Se define el amortiguamiento efectivo  $\zeta_{ef}$  :

$$\zeta_{ef} = \frac{W_D}{4\pi W_E} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{\nu}{\nu + \frac{q}{R}} \right] \quad (1.1)$$



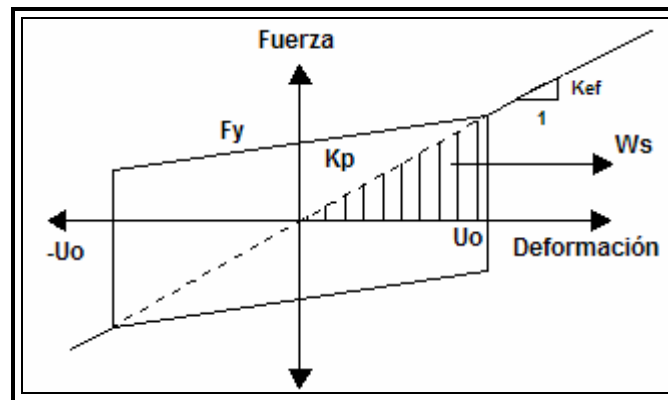
Siendo

(1.2)

$W_D = 4\mu W \cdot q$  Energía Disipada

$W_E = \frac{1}{2} K_{ef} \cdot q^2$  Energía Elástica (1.3)

$W_D$  es la energía disipada por cada ciclo de deformación, representada como el área dentro de la curva fuerza deformación de la figura 1.13



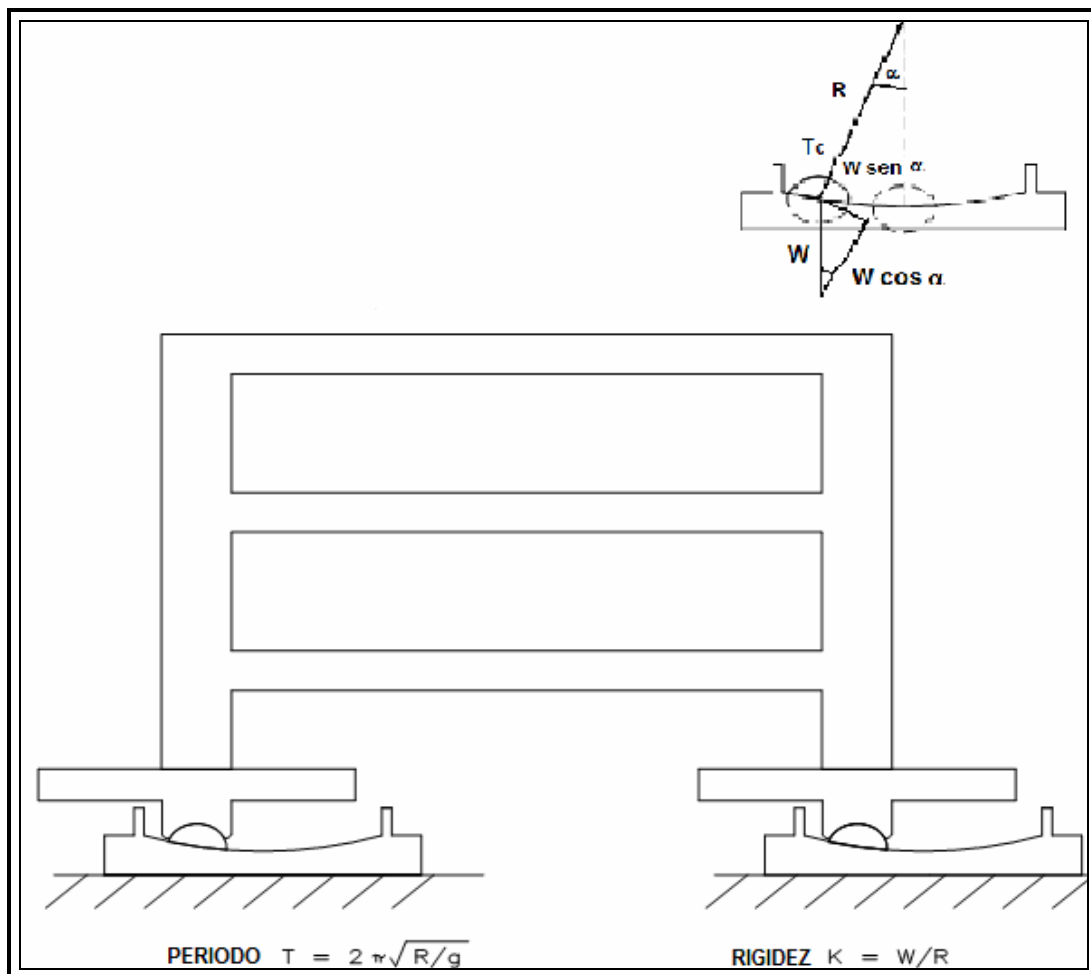
**Figura 1.13:** Constitutiva del sistema de péndulo friccional

Para la obtención numérica de los parámetros de la constitutiva, es necesario tener las características geométricas de cada tipo de aislador tales como el radio de curvatura de la superficie esférica y coeficiente de fricción del sistema de péndulo friccional.

Con las características de los aisladores se logra obtener la constitutiva fuerza-deformación correspondiente a cada aislador.



Los aisladores de base FPS empiezan a trabajar cuando la fuerza sísmica en la base es mayor a  $\nu W$ , siendo  $\nu$  el coeficiente de fricción del material que está recubierto el deslizador y  $W$  el peso total que gravita en el disipador; de la física básica se conoce que  $\nu W$  es la fuerza de fricción en el aislador, para que empiece a trabajar como péndulo la fuerza sísmica tiene que ser mayor a  $\nu W$ .



**Figura 1.14:** Movimiento de una estructura con FPS

Para el caso de que la fuerza sísmica es mayor a  $\nu W$ , en la figura 1.14 en la parte superior derecha se muestra un diagrama de fuerzas, se aprecia que existe



una tensión en la cuerda de magnitud  $T_c$  y las dos componentes del peso, la tangencial que tiene una magnitud  $W \text{sen} \alpha$  y la radial que tiene un valor  $W \text{cos} \alpha$ . La componente tangencial es la que se opone al movimiento pendular.

El arco que ha recorrido la masa del péndulo, vale  $R\alpha$ , siendo R el radio; este arco es la distancia recorrida por la masa. Ahora bien la fuerza inercial que se opone al movimiento tiene un valor de  $\frac{W}{g} R \frac{d^2\alpha}{dt^2}$ ; donde  $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$  es la aceleración angular;  $W/g$  es la masa. Luego al hacer el equilibrio de las fuerzas tangenciales se tiene:

$$\frac{W}{g} R \frac{d^2\alpha}{dt^2} + W \text{sen} \alpha = 0$$

Para valores pequeños de  $\alpha$ , que es el caso del movimiento de los edificios ante un sismo, el valor de  $\text{sen} \alpha = \alpha$  y tomando en cuenta que W no puede ser cero, la ecuación diferencial del movimiento pendular queda:

$$\alpha'' + \frac{g}{R} \alpha = 0 \quad (1.4)$$

En movimiento armónico simple (vibración libre, sin amortiguamiento. Aguiar, 2007) la ecuación diferencial del movimiento es:

$$\alpha'' + w_b^2 \alpha = 0 \quad (1.5)$$



Siendo  $w_b$  la frecuencia circular pero ya adaptándole a una estructura con FPS,  $w_b$  es la frecuencia circular nominal de la aislación y al observar la ecuación, se tiene:

$$w_b = \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (1.6)$$

Pero  $w_b$  también es igual a la raíz cuadrada de la rigidez del aislador dividido para la masa. Luego se tiene:

$$w_b = \sqrt{\frac{g}{R}} = \sqrt{\frac{k_b}{m}} \quad \rightarrow \quad k_b = \frac{mg}{R} \quad (1.7)$$

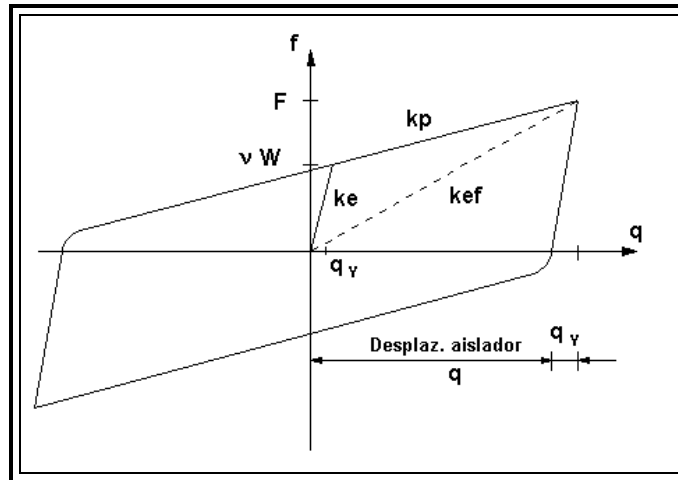
$$k_b = \frac{W}{R}$$

El período de vibración  $T_b$  del aislador es igual a  $2\pi$  dividido para  $w_b$  con lo que se obtiene, lo siguiente.

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1.8)$$

Como se observa en la ecuación anterior el período del sistema de aislación ( $T_b$ ) solo depende del radio de curvatura de la superficie esférica del FPS. Por lo tanto, con la ecuación (1.8) se determina el radio del aislador para el período objetivo que se desea tenga el sistema de aislación.





**Figura 1.15:** Comportamiento de histéresis de un aislador FPS

En la figura 1.15 se presenta el comportamiento no lineal de un aislador FPS de la primera generación. Al comienzo trabaja en el rango elástico con una rigidez  $k_e$  hasta cuando la fuerza actuante supera el valor de  $vW$  en ese instante ingresa al rango no lineal y trabaja con una rigidez  $k_p$ . Anteriormente se indicó que cuando la fuerza es mayor a  $vW$  la estructura empieza a actuar como péndulo. Por lo tanto la rigidez  $k_p = k_b$ . Luego se tiene.

$$k_e = \frac{vW}{q_y} \quad (1.9)$$

$$k_p = \frac{W}{R}$$

La variable todavía no definida es  $q_y$  que es el desplazamiento de fluencia. En el lazo de histéresis de la figura 1.15 se ha identificado con la variable F a la fuerza



asociada al desplazamiento del aislador  $q$  más  $q_y$ . El valor de la fuerza  $F$  es el siguiente:

$$F = \nu W + k_p q \quad (1.10)$$

$$F = \nu W + \frac{W}{R} q$$

En la figura 1.15 se ha presentado también la rigidez secante que se ha denominado  $k_{ef}$  y a futuro se denominará rigidez efectiva del aislador que es igual a la fuerza  $F$  dividida para el desplazamiento  $q$ .

$$k_{ef} = \frac{\nu W + \frac{W}{R} q}{q} \quad (1.11)$$

Tanto en la ecuación 1.1 como en la ecuación 1.11 la rigidez efectiva como el amortiguamiento efectivo depende del desplazamiento lateral  $q$ . De tal manera que el análisis sísmico se hace iterando hasta que converge el valor de  $q$ , ya que para encontrar  $k_{ef}$  o  $\xi_{ef}$  se necesita conocer el valor de  $q$ , en un primera iteración uno se impone este valor pero a futuro se calcula  $q$  se compara con el impuesto y se recalcula  $k_{ef}$  y  $\xi_{ef}$ .



### 1.4.2 Concepto de Aislación Basal

La ecuación Demanda < Capacidad se puede explicar a través de una interpretación energética. Para todo instante de tiempo en que una estructura es excitada por algún movimiento de la base, se cumple que la energía de entrada es igual a las diferentes formas de energía que se desarrolla en la superestructura como se puede mostrar en la siguiente ecuación:

$$E_{\text{Sísmica}} = E_{\text{Estructura}} + E_{\text{Sistema mecánico}} \quad (1.12)$$

Se han ideado diversos dispositivos que representan a lo que se ha denominado sistema mecánico y que en la literatura técnica se denominan como sistemas de protección pasiva.

El sistema pasivo que ha tomado mayor desarrollo es el de aislación en la base, esta se trata de apoyar a la estructura no directamente sobre el terreno sino que sobre aisladores que desacoplen el movimiento del suelo con respecto al de la estructura, reduciendo la respuesta sísmica. La aislación basal tiene dos principios fundamentales que son la flexibilización y el aumento de amortiguamiento, logrando reducir las aceleraciones y concentrando el desplazamiento en el sistema de aislación con la contribución de la amortiguación.



La Energía mecánica de la que se habla es una Energía de disipación la misma que es posible por amortiguamiento viscoso, por fricción (Coulomb), por amortiguamiento histerético, por impacto y radiación.

El movimiento de las estructuras sometidas a fuerzas variables durante un periodo de tiempo, dependen en particular, de las propiedades de amortiguamiento, es decir, de la disipación de la energía por los materiales constitutivos de la estructura, entre las ligaduras de sus diferentes elementos, entre ellos y el medio circunvecino. De acuerdo a los fenómenos físicos, se distinguen tres tipos de amortiguamiento:

- El amortiguamiento de Coulomb, que corresponde a un amortiguamiento de fricción, con dirección del desplazamiento y de signo opuesto al de la velocidad.
- El amortiguamiento viscoso, por el cual la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad.
- El amortiguamiento histerético, para el cual la fuerza de amortiguamiento es proporcional al desplazamiento y de signo opuesto al de la velocidad.

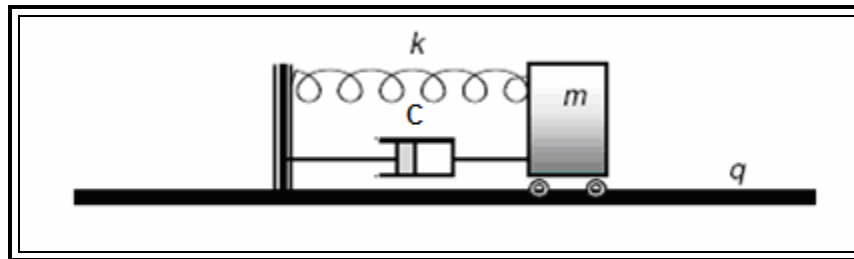
#### **1.4.3 Amortiguamiento Viscoso**

En el amortiguamiento viscoso la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad. Los dispositivos amortiguadores clásicos proporcionan fuerzas resistentes proporcionales a la velocidad del movimiento y de signo opuesto, por



medio de láminas de un fluido viscoso quienes circulan a través de orificios estrechos. En el curso de un ciclo, el trabajo de esas fuerzas, que son positivas, representa el amortiguamiento viscoso.

El símbolo que se utiliza para expresar un elemento viscoso es un cilindro con émbolo, como se muestra en la figura 1.16



**Figura 1.16:** Sistema de 1 gdl con amortiguamiento viscoso

En las estructuras con aisladores elastoméricos el amortiguamiento es de tipo viscoso tanto en la superestructura como del sistema de aislación.

#### 1.4.4 Amortiguamiento de Coulomb

El amortiguamiento de Coulomb o también llamado friccional es aquel en que las fuerzas de amortiguamiento se generan haciendo que un componente seco deslice contra otro, por lo que el principio de los aisladores friccionales se basa en ley de Coulomb (ecuación 1.13), donde  $N$  representa la fuerza normal en la interfase de la aislación;  $\mu$  es el coeficiente de fricción.



$$F_r = \mu N$$

(1.13)

Cuando se encuentra una superestructura aislada con este sistema y está es solicitada sísmicamente, se transmitirán fuerzas a la superestructura; si ocurre que estas fuerzas no son capaces de romper las fuerzas de fricción estática del aislador, esta estructura se comporta como un sistema de base fija. Sin embargo, cuando las fuerzas de corte a través de la interfase del aislador son mayores que la fuerza de fricción estática, el péndulo friccional se comporta como un fusible, pues se activa inmediatamente. Por lo que una vez que las fuerzas exceden la fuerza de fricción, la superestructura responde con períodos de base aislada, y con respuestas dinámicas y amortiguamiento gobernados por las propiedades del aislador.

En las estructuras con FPS el amortiguamiento es viscoso en la superestructura y de fricción o de Coulomb en el sistema de aislación.

#### **1.4.5 Obtención de espectros para diferentes factores de amortiguamiento**

El valor de  $\xi$  depende de algunos parámetros como son el tipo de material, sistema estructural, el nivel de esfuerzos, etc.

El valor de  $\xi$  nos puede indicar el tipo de daño que esperamos en una estructura después de un evento sísmico por ejemplo si diseñamos una estructura de



hormigón armado con un valor de  $\xi$  menor al 2% sabremos que no tendremos ningún daño en la estructura pero al mismo tiempo conocemos que es sumamente costosa por lo cual es algo no muy aplicable a la realidad, si para la misma estructura el valor de  $\xi=0.05$  existirá un agrietamiento visible en la estructura, y si aplicamos un valor de  $\xi$  superior al 10% el daño en la estructura es sumamente grande.

Esta es la razón por la cual el valor de  $\xi$  más adecuado es el 5% y por el que normalmente se realizan los espectros de diseño para este factor de amortiguamiento.

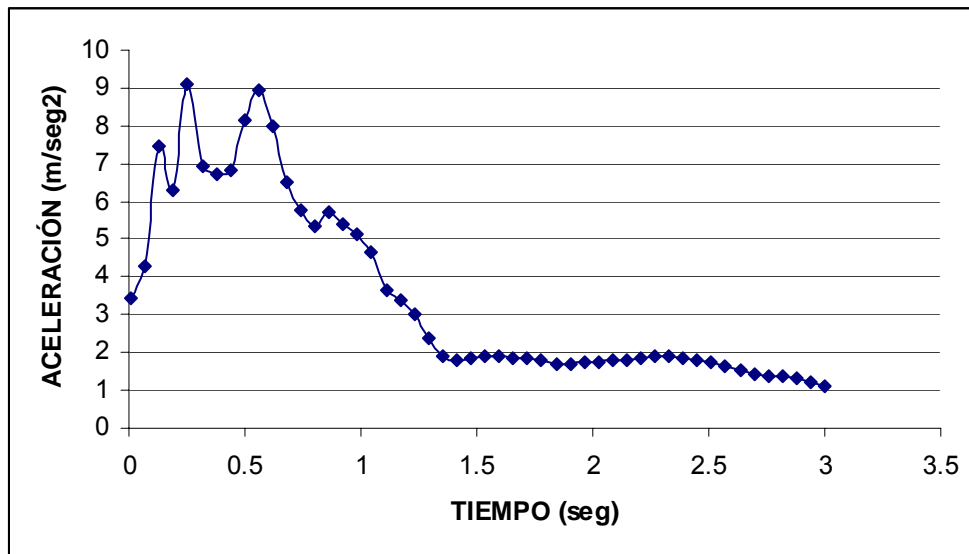
En el caso en el que trabajamos con aisladores de base es necesario disponer de espectros con diferentes factores de amortiguamiento, por lo que es necesario hallar las ordenadas espectrales para cualquier tipo de amortiguamiento  $\xi$  a partir del espectro para 0.05, se debe encontrar el factor  $B_0$  y multiplicar las ordenadas espectrales por este factor.

$$B_0 = 2 \left( \frac{1 + \xi}{1 + 14.68 \xi^{0.865}} \right) \quad (1.13)$$

De esta manera podemos obtener espectros para cualquier factor de amortiguamiento.



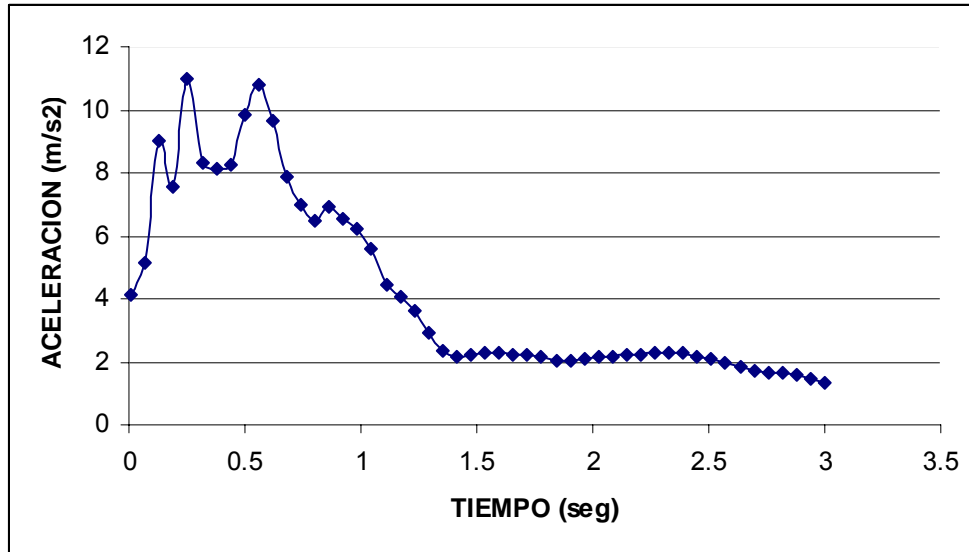
A continuación se presenta un ejemplo, a partir del espectro de diseño construido para el sismo del Centro para un factor de amortiguamiento  $\xi=0.05$  con la ayuda del programa DEGTRA.



**Figura 1.17:** Espectro de diseño para  $\xi=0.05$

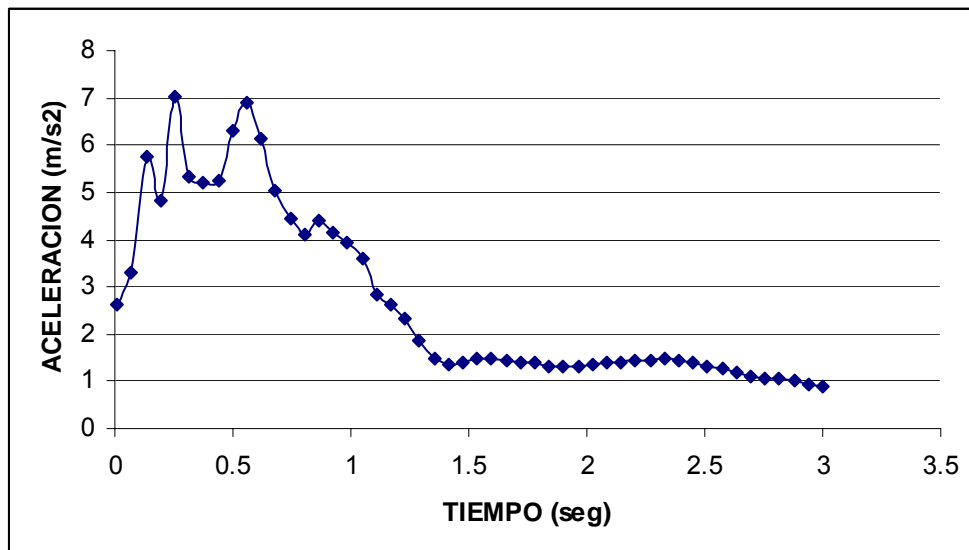
Las ordenadas espectrales de la gráfica las multiplicamos por el factor que nos da la ecuación (1.13), buscando el espectro de diseño para un factor de amortiguamiento del 3% que es la que se muestra en la figura 1.18.





**Figura 1.18:** Espectro de diseño para  $\xi=0.03$

Lo mismo hacemos para encontrar la figura 1.19 en la cual se encuentra el factor para un factor de amortiguamiento del 9%.



**Figura 1.19:** Espectro de diseño para  $\xi=0.09$



#### 1.4.6 Periodo objetivo ( $T_{obj}$ )

En los aisladores friccionales el periodo natural ( $T$ ) del aislador se selecciona definiendo el radio de curvatura de la superficie cóncava ( $R$ ) tal que  $T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}$  siendo  $R$  el único parámetro que esta en función del periodo ya que  $g$  es la aceleración de la gravedad. Como se observa, el periodo es independiente de la masa de la estructura soportada.

De esta manera el diseño se simplifica ya que se lo puede seleccionar de manera independiente. Lo que no ocurre con un aislador elastomérico el mismo que para poder aumentar el periodo de la estructura se necesita incrementar la altura del mismo lo cual es muy susceptible ya que se podría afectar la estabilidad o se requeriría del aumento de las dimensiones del aislador lo cual no es siempre posible.

El periodo fundamental de una estructura aislada se incrementa en un rango de 2 a 2.5 segundos, lo cual contribuye con un mejor desempeño sísmico de la estructura, dicho aumento del período fundamental, hace que la estructura incurriere en rangos en los cuales las ordenas espectrales son mucho menores, con ello se reduce su demanda de deformaciones y se reducen los esfuerzos en los elementos estructurales.



## REFERENCIAS

1. Bueno R, Reyes J.C., (2005), “Criterios para el uso de aisladores en la base de una estructura en concreto”. Universidad de los Andes. 11p Bogotá, Colombia.
2. Gonzáles Herrera R., (2001), “Modelación estructural y comparación económica de edificios con asilamiento en la base”. Universidad de los Andes. 9 p, Bogotá, Colombia.
3. Casarotti C., (2004), *Bridge Isolation and Dissipation Devices*, Tesis para optar por el grado de Master en Ciencias de la Ingeniería. University of Pavia and Rose School. 164 p, Pavia, Italia.
4. Segúin E., (2007), Torsión en sistemas aislados sísmicamente con dispositivos elastoméricos, Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. 229 p., Santiago de Chile.
5. Zayas V.A., Earthquake Protection Systems. Friction Pendulum Bearings. [www.earthquakeprotection.com](http://www.earthquakeprotection.com).