

## **IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO DIRECTO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS PARA PUENTES CON SISTEMAS DE AISLAMIENTO SÍSMICO**

**José C. Hurtado<sup>1</sup>, Vinicio A. Suárez<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja-Ecuador, [jchurtado@utpl.edu.ec](mailto:jchurtado@utpl.edu.ec).*

<sup>2</sup>*Director de la Unidad de Ingeniería Civil Geología y Minas de la UTPL. [vasuarez@utpl.edu.ec](mailto:vasuarez@utpl.edu.ec)*

### **ABSTRACT**

El Diseño de Puentes con Sistemas de Aislamiento Sísmico ha ganado popularidad debido a las ventajas que presenta respecto a la disminución de fuerzas y control de daño de la estructura. En esta investigación, se implementa el Diseño Directo basado en Desplazamientos (DDBD) para puentes con este tipo de sistemas. Este documento, presenta una recopilación de la literatura existente sobre los métodos de diseño Menshin, y AASHTO, además, se implementa el DDBD para diseño sísmico de puentes aislados. Para implementar el DDBD se da particular atención a: i. la interacción entre el aislador y la subestructura, ii. combinación del amortiguamiento equivalente dado por los dispositivos de aislamiento y pilas de hormigón armado; y iii. modelos de amortiguamiento usados con los dispositivos disipación de energía. La aplicación de cada procedimiento propuesto se demuestra con ejemplos de diseño que incluyen: aisladores elastoméricos con núcleo de plomo y pilas que soportan superestructuras simplemente apoyadas. Para efectos de comparación, con los ejemplos de diseño también se usan las actuales especificaciones AASHTO de diseño con aislamiento sísmico. La eficiencia del procedimiento es evaluado mediante un análisis no lineal de historia en el tiempo.

### **1. INTRODUCCIÓN**

El Diseño de Puentes con Sistemas de Aislamiento Sísmico ha ganado popularidad debido a las ventajas respecto a la disminución de fuerzas y control de daño de la estructura. Por otro lado, el Diseño Directo basado en Desplazamientos (DDBD) es una herramienta de la ingeniería sísmica basada en desempeño que ha sido probada con eficacia en el diseño sísmico de edificios y puentes sin aislamiento.

En este documento, se presenta una revisión de la literatura existente sobre diversos métodos de diseño como: Diseño Menshin (Sugita, 1994), diseño AASHTO (2001); además se exponen los resultados de la implementación del DDBD en el diseño sísmico de puentes aislados, adaptando el procedimiento existente para considerar la flexibilidad y amortiguamiento que los dispositivos de disipación y aislamiento añaden a la estructura. En este trabajo, para implementar el DDBD se le da una atención particular a: i. La interacción entre el aislador y la subestructura, ii. combinación del amortiguamiento equivalente dado por los dispositivos de aislamiento y pilas de hormigón armado; y iii. modelos de amortiguamiento usados con los dispositivos de disipación de energía.

La aplicación del procedimiento propuesto se demuestra con ejemplos de diseño que incluyen: aisladores elastoméricos con núcleo de plomo y pilas que soportan superestructuras simplemente apoyadas. Para efectos de comparación, con los ejemplos de diseño también se usan las actuales especificaciones de diseño con aislamiento sísmico de la AASHTO, y se verifican mediante un análisis no lineal de historia en el tiempo.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Principios de Aislamiento Sísmico

Si bien los sistemas de aislamiento sísmico no se pueden considerar como antecesores de los sistemas modernos de amortiguamiento y disipación de energía en estructuras, existe constancia de la protección mediante aislamiento de base, en la antigüedad. Kirikov (1992) describe varios procedimientos empleados por los sumerios, griegos, romanos y bizantinos, para proteger sus construcciones frente a los sismos. El sistema más usual consistía en ubicar una capa fina de arena debajo de la cimentación, actuando en forma de aislamiento de base.

Actualmente, el aislamiento sísmico es una estrategia de diseño que va ganando popularidad, y se fundamenta en el desacoplamiento de la estructura del movimiento del suelo para protegerla del efecto de los sismos. Esto se consigue a partir de la adición de dispositivos flexibles al desplazamiento horizontal y rígido al movimiento vertical, situados en la base. El aislamiento de base se usa en estructuras rígidas sobre terrenos firmes. La característica básica del aislamiento sísmico es la reducción de fuerzas sísmicas mediante un incremento de la capacidad de disipación de energía y del periodo fundamental, logrando reducir la aceleración de la superestructura (Skinner, Robinson y McVerry, 1993, Buckle y Mayes, 1992). En la Figura 2.1, el incremento del periodo natural desde el punto A al B, provoca la disminución de la respuesta de aceleración y un aumento del desplazamiento de la superestructura. Consecuentemente debido a la disminución de energía, se produce un incremento de amortiguamiento de B a C. Si la respuesta de desplazamiento de la superestructura en el punto C está a un nivel aceptable respecto a la capacidad de los elementos estructurales, es posible implementar el aislamiento sísmico (Kawashima, 2000).

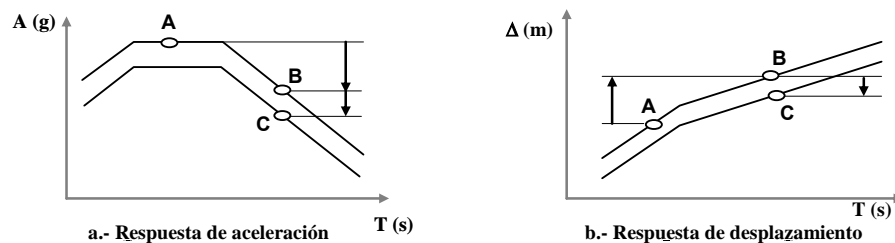


Figura 2.1 Principios de aislamiento sísmico

### 2.2 Aislamiento sísmico de puentes

Existen dos puntos de vista diferentes sobre el aislamiento sísmico de puentes, el primero encuentra en el aislamiento, la solución a todos los problemas de diseño sísmico, debido a que presenta gran capacidad de simulación de la respuesta no lineal de la estructura. Este punto de vista es contrarrestado por quienes sostienen que el aislamiento sísmico no es confiable debido a que varios estudios probabilísticos aseguran que los factores y parámetros de respuesta no han sido aún perfeccionados, pero que constituyen un importante campo de investigación futura. (Priestley, et al, 1996). Independientemente de estas dos corrientes, el aislamiento sísmico es sin duda, una herramienta poderosa, flexible y económica para el diseño de puentes nuevos y la rehabilitación de puentes existentes. La variabilidad de posibles selecciones de parámetros de diseño dificulta la aplicación de reglas simples y confirma la necesidad de un análisis detallado. Por esta razón hoy en día el diseño de puentes aislados se ha constituido en un arte antes que en una combinación y aplicación de reglas. En puentes, los aisladores se colocan entre la subestructura y la superestructura y tienen el doble propósito de proveer protección para cargas dinámicas y movimientos térmicos incrementando el periodo fundamental y disipando energía sísmica mediante amortiguamiento histerético. En la Figura 2.2, se puede apreciar los elementos constitutivos de un puente con aislamiento.

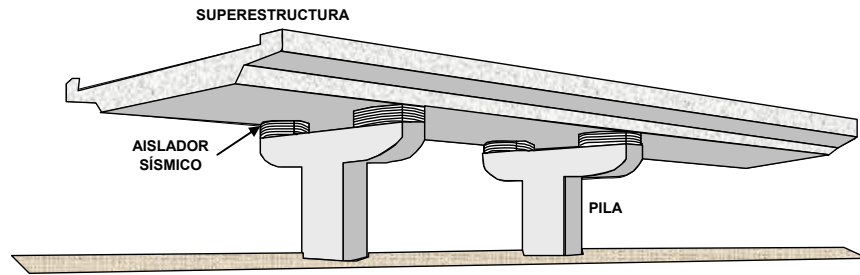


Figura 2.2 Elementos de un puente

### 2.3. Sistemas de aislamiento / disipación de energía

Los aisladores sísmicos son elementos de carácter reactivo cuya respuesta no es controlable y depende únicamente de las condiciones de trabajo en que se encuentren. Son dispositivos que intervienen alterando las propiedades dinámicas de la estructura, provocando una reducción de su respuesta estructural. Entre sus ventajas se encuentra su confiabilidad y competitividad económica. Se debe tener en cuenta que un sistema de aislamiento debe soportar a una estructura mientras le dota de flexibilidad horizontal y disipación de energía. Existe una variedad de sistemas de aislamiento, pero en la presente investigación nos referimos a dos tipos específicos cuya aplicabilidad es mayor en puentes: apoyos elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) y péndulo deslizante de fricción (FPS).

Los dispositivos elastoméricos poseen baja rigidez, varían el periodo fundamental de la estructura evitando la resonancia debido a las excitaciones sísmicas; por otro lado, los sistemas deslizantes se basan en el concepto de deslizamiento friccionante. Para la elección del sistema de aislamiento, se debe considerar aparte de su capacidad general de cambiar el período de vibración y añadir amortiguamiento a la estructura algunos parámetros como: i. deformabilidad bajo carga frecuente quasi estática, ii. fuerza de fluencia y desplazamiento, y iii. rigidez vertical.

#### 2.3.1 Apoyos Elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

En la categoría más importante de los dispositivos elastoméricos esta el aislador con núcleo de plomo (LRB) (Robinson, 1982) que se muestra en la Figura 2.3(a). Este es un dispositivo laminado de elastómero que se compone de placas de acero y caucho construidas en capas alternadas. En su interior posee un núcleo de plomo que le dota de una cantidad adicional de disipación de energía. Posee la capacidad de soportar la combinación de cargas verticales, proveer de flexibilidad horizontal, restauración de fuerzas y amortiguamiento. La capacidad de energía absorbida por el núcleo reduce el desplazamiento lateral del aislador.

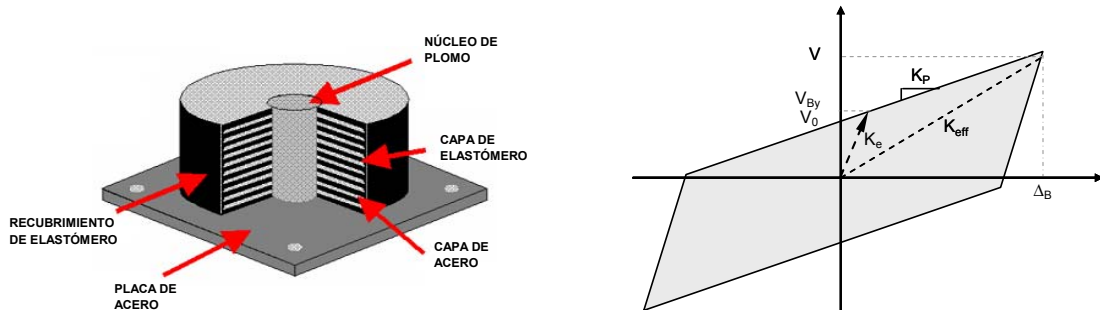


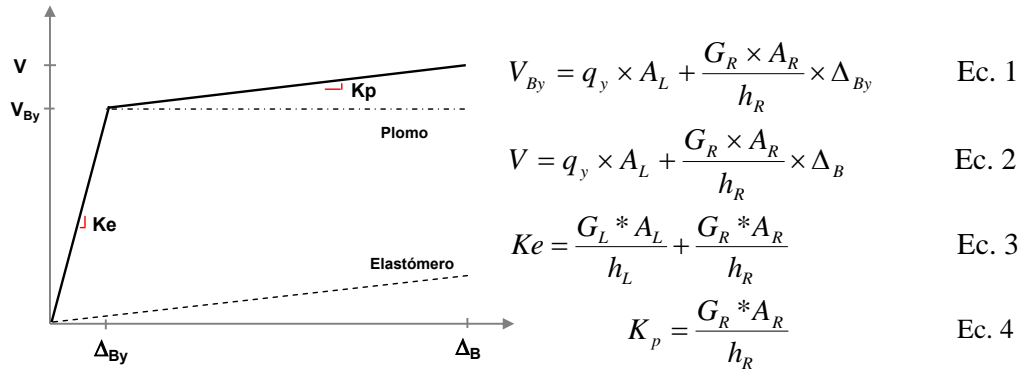
Figura 2.3 (a) Aislador Elastomérico con núcleo de plomo y (b) Comportamiento histerético de LRB

**Comportamiento Histerético:** La inserción del núcleo de plomo en los apoyos elastoméricos laminados proporciona rigidez para cargas estáticas y disipación de energía frente a una respuesta sísmica (Figura 2.4). Los parámetros característicos del LRB son: el cortante de fluencia para cargas monotónicas,  $V_{By}$  (Ec. 1), el cortante para un desplazamiento cero bajo carga cíclica,  $V_0$ , y la fuerza transversal post fluencia  $V$  (Ec. 2), donde  $q_y$  es el esfuerzo de fluencia del plomo,  $G_L$  es el módulo de corte del plomo y  $G_R$  es el módulo de corte del elastómero, éstas y otras características importantes, como la constante del material relacionado con el endurecimiento  $k$ , se presentan en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Propiedades de los materiales del LRB

$G_L$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G_N$ (kN/m <sup>2</sup> )	$q_{Ly}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma_u$ (%)	$k$
130000	1177.2	8500	400	0.85

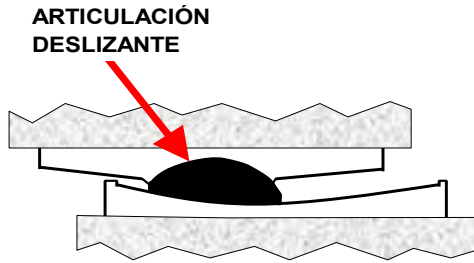
La relación fuerza-desplazamiento del LRB se aproxima a una relación bilineal, que presenta una rigidez elástica inicial para cargas monotónicas,  $Ke$  (Ec.3) que ha sido estimada a partir de resultados experimentales en función de las propiedades de los materiales. El esfuerzo de fluencia del aislador es proporcional al tamaño del núcleo del plomo, mientras que la rigidez post fluencia,  $Kp$  (Ec.4), es proporcional a la rigidez del dispositivo elastomérico, con una variación entre  $\pm 20\%$  a  $\pm 40\%$ . La fuerza máxima tiene una incertidumbre de  $\pm 20\%$ . Otro factor importante es la energía disipada por ciclo  $E_D$ , para un desplazamiento de diseño  $\Delta_B$ , igual al área encerrada por el lazo histerético existente. (Fig. 2.3(b)). (Casarotti, 2004).



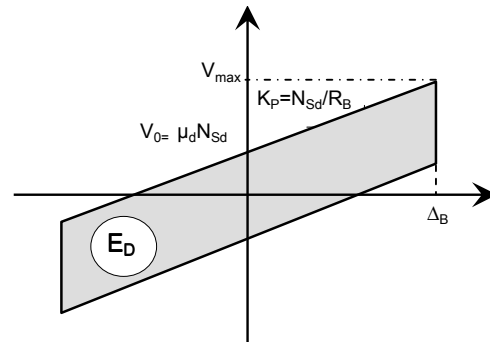
### 2.3.2 Péndulo deslizante de fricción (FPS)

El uso de los dispositivos deslizantes es una de las técnicas más efectivas y populares para aislamiento sísmico. Funciona muy bien bajo cargas sísmicas severas y es muy efectivo reduciendo los grandes niveles de aceleración de la superestructura. Además, tienden a reducir la energía del sismo sobre un amplio rango de frecuencias. Dentro de este grupo tenemos algunos tipos de sistemas de aislamiento, el más simple es el sistema de fricción pura (PF), en el que una junta deslizante separa la superestructura y la subestructura, sin embargo carece de fuerza de restauración.

El concepto de dispositivos deslizantes es combinado con el concepto de péndulo de fricción, obteniendo un sistema de aislamiento sísmico interesante conocido como sistema de péndulo deslizante de fricción (Zayas, et al, 1990) como muestra la Figura 2.5. En el FPS, el aislamiento se logra mediante un deslizador articulado en la superficie cóncava y esférica.



**Figura 2.5** Péndulo deslizante de fricción.



**Figura 2.6:** Comportamiento friccionante

El coeficiente de fricción depende de la carga y de la concavidad del dispositivo. (Mokha, et al, 1990). El sistema actúa como un fusible que es activado sólo cuando las fuerzas del sismo superan el valor estático de fricción. El aislamiento sísmico es logrado mediante la variación del periodo natural de la estructura, el mismo que se controla seleccionando el radio de curvatura de la superficie cóncava.

*Comportamiento friccionante:* Los dispositivos con superficie deslizante esférica de radio  $R_B$ , proveen una fuerza de restauración  $V_r$  proporcional al desplazamiento de diseño,  $\Delta_B$  (Ec. 5 y Fig. 2.6), una relación fuerza- desplazamiento (Ec.6) y una disipación de energía por ciclo  $E_D$  (Ec 7).

$$V_r = \frac{N_{sd}}{R_B} \Delta_B \quad \text{Ec. 5}$$

$$V_{\max} = \frac{N_{sd}}{R_B} \Delta_B + \mu_d N_{sd} \text{sign}(d) \quad \text{Ec 6}$$

$$E_D = 4\mu_d N_{sd} \Delta_B \quad \text{Ec 7}$$

El lazo histerético del FPS tiene un comportamiento aproximadamente rígido plástico con endurecimiento post fluencia. Existe una fuerte dependencia de su respuesta en la variación de fuerza del dispositivo.

## 2.4 Revisión de los Métodos de Diseño existentes para puentes con aislamiento sísmico

Las metodologías aplicadas para el diseño de puentes con aislamiento sísmico son diversas, y han ido mejorando continuamente en base a la investigación y experiencias adquiridas en sismos pasados. En este estudio se ha considerado las metodologías de mayor eficacia como: el diseño MENSIN, propuesto por el Ministerio de la Construcción de Japón, así como también el método proporcionado por la AASHTO.

### 2.4.1 Diseño Menshin.

El diseño Menshin fue iniciado en 1989 por el Ministerio de Construcción de Japón mediante un programa de investigación cuyo propósito fue desarrollar un método racional de reducción de fuerzas para puentes. El Diseño Menshin reduce la respuesta sísmica de estructuras, alargando su periodo natural mediante el uso de aisladores, al mismo tiempo que incrementa su capacidad de disipación de energía.

Primero se diseñan los puentes por el método de diseño estático lineal equivalente, y posteriormente se evalúa su seguridad sísmica mediante un análisis de respuesta dinámica. Para el análisis, los dispositivos Menshin son generalmente idealizados por un conjunto de resortes. En el diseño Menshin se debe recordar que el periodo natural del puente diseñado es al menos dos veces mayor que el de un puente sin

aislamiento, además se debe seleccionar con cuidado el periodo para prevenir efectos no deseados, provocados por el incremento de la respuesta sísmica de la superestructura, y que el diseño Menshin, no será adoptado para puentes en los que la cimentación se implante en capas de suelo muy suaves.

Para la disipación de energía se utiliza dispositivos Menshin (LRB y FPS), los cuales poseen un desempeño confiable. Simultáneamente, se debe chequear el funcionamiento del dispositivo Menshin para asegurar la estabilidad durante un sismo.

El procedimiento de diseño Menshin, (Figura 2.7) se resume en los siguientes pasos:

*Paso 1:* Establecer las condiciones iniciales de diseño, y seleccionar propiedades tentativas para los dispositivos de aislamiento sísmico, y la pila de hormigón.

*Paso 2:* Obtener la rigidez de la pila considerando un extremo libre de ésta (Ec. 8). Tomando como base la rigidez de la pila y los principios de diseño Menshin, determinamos el periodo fundamental del puente con aislamiento sísmico,  $T_M$  (Ec. 9) que será igual a dos veces al periodo de un sistema sin aislamiento  $T_N$ . (Ec. 10)

$$K_p = \frac{3 \times E \times I}{h_p^3} \quad \text{Ec.8}$$

$$T_N = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g * K_C}} \quad \text{Ec.9}$$

$$T_M = 2T_N \quad \text{Ec.10}$$

*Paso 3:* Basándonos en la demanda sísmica (espectro de diseño), obtenemos la fuerza lateral elástica. Asumiendo un amortiguamiento del sistema, encontramos el factor de modificación de respuesta debido a la disipación de energía,  $R_E$  y el factor basado en la respuesta de la pila  $R\mu$ , que posteriormente permitirán determinar el cortante último  $V_{eq}$ .

*Paso 4:* Asumir el desplazamiento máximo, El 70% de este le corresponde al desplazamiento efectivo del dispositivo ( $c=0.7$ ) y el 30% restante le corresponde a la pila. Una vez determinado el desplazamiento efectivo del dispositivo, se calcula su rigidez efectiva .

*Paso 5:* En base a la geometría y a las propiedades de los dispositivos, se determina: el cortante para un desplazamiento igual a cero,  $V_0$ , Ec.11 el cortante de fluencia  $V_{By}$  Ec.12 y el cortante máximo  $V$ , Ec.13. Luego se itera hasta que el  $V$  converja a la fuerza equivalente calculada con anterioridad  $V_{eq}$ , también se determina la rigidez efectiva del dispositivo Ec.14. En caso de que los cortantes no converjan, variamos el amortiguamiento o el desplazamiento impuesto y repetimos el proceso, hasta lograr convergencia

$$V_0 = A_p \times q_y \quad \text{Ec. 11.}$$

$$V_{By} = q_y \times A_L + \frac{G_R \times A_R}{h_R} \times \Delta_{By} \quad \text{Ec. 12}$$

$$V = A_R * G_R * \gamma + A_L * q \quad \text{Ec. 13}$$

$$K_B = \frac{V_{eq}}{\Delta_B} \quad \text{Ec.14}$$

*Paso .:* Determinar la rigidez post fluencia  $K_p$  (Ec. 15) en función de las propiedades antes calculadas. A partir de ésta, se calcula la rigidez elástica inicial  $K_e$ , (Ec.16) considerando el inverso del factor bilineal.

$$K_p = \frac{V_B - V_0}{\Delta_B} \quad \text{Ec. 15}$$

$$K_e = \frac{1}{r} \times K_p \quad \text{Ec. 16}$$

*Paso 7:* Determinar el amortiguamiento del dispositivo,  $\xi_B$ , (Ec.17) en base a rigideces, cargas y desplazamientos, obtenidos anteriormente.

$$\xi_B = \frac{2 \times V_0 \times \left[ \Delta_B + \left( \frac{V_0}{K_p - K_e} \right) \right]}{\pi \times \Delta_B \times (V_0 + \Delta_B \times K_p)} \quad \text{Ec. 17}$$

*Paso 8:* A partir del concepto de protección sísmica, en la cual la subestructura no sufre daño alguno frente a un sismo, se le asigna un amortiguamiento del 5%, permitiendo combinar el amortiguamiento de la subestructura con el del sistema de aislamiento sísmico.

*Paso 9:* Verificar que el amortiguamiento del sistema, (Ec. 32) converja al amortiguamiento inicial impuesto, caso contrario, retornamos al paso dos y variamos el amortiguamiento hasta lograrlo.

Una vez comprobada la convergencia del diseño, se realiza un chequeo de capacidad de presión vertical, tanto para la pila (Figura 2.8(a)), como para el dispositivo (Figura 2.8(b)). En el caso de no lograr el chequeo adecuado, se procede a variar las propiedades iniciales de los elementos.

*Paso 10:* Como propuesta de esta investigación, una vez terminado el proceso de diseño, es recomendable entrar al espectro de desplazamientos con el periodo efectivo y determinar el desplazamiento del sistema y a partir de este, chequear el valor de c.

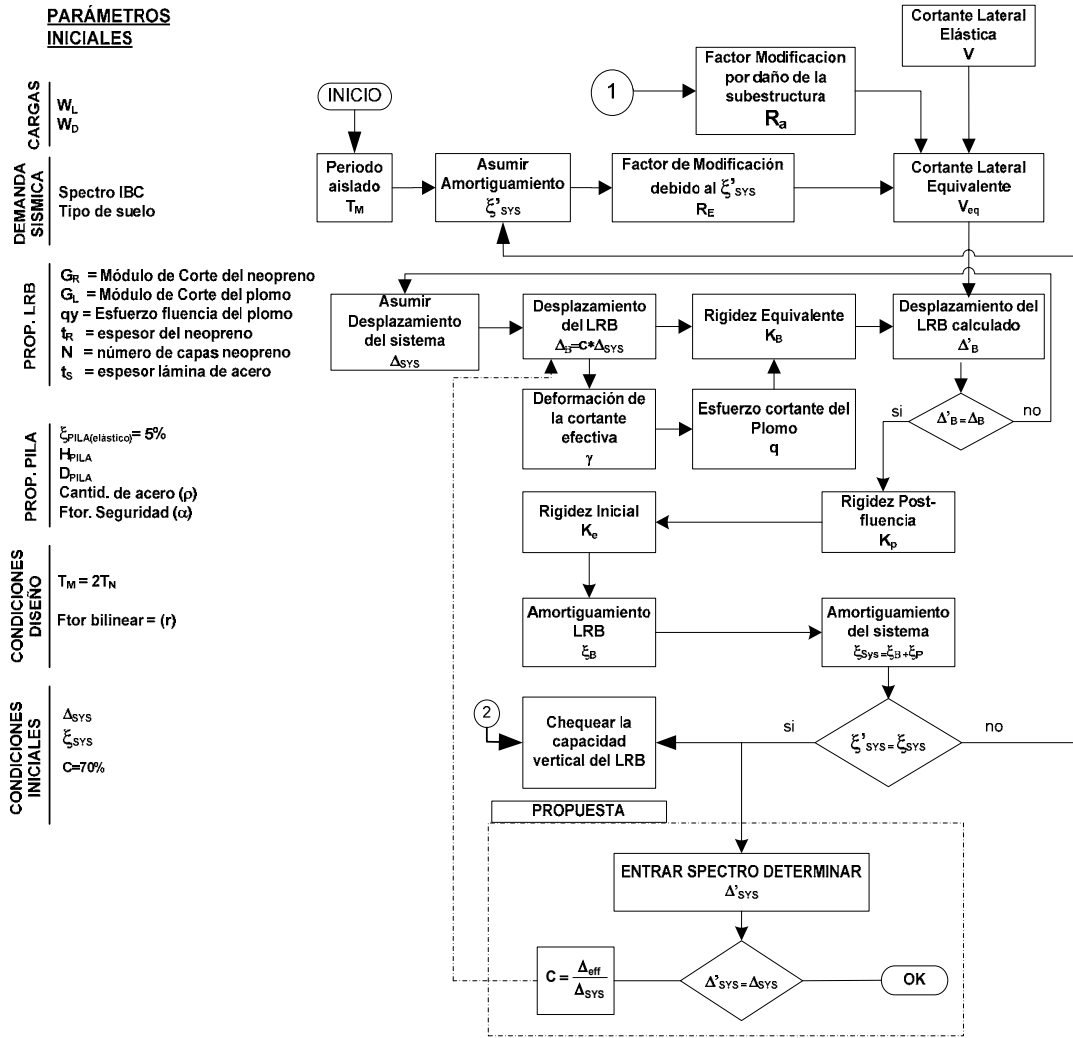


Figura 2.7 Proceso de Diseño Menshin

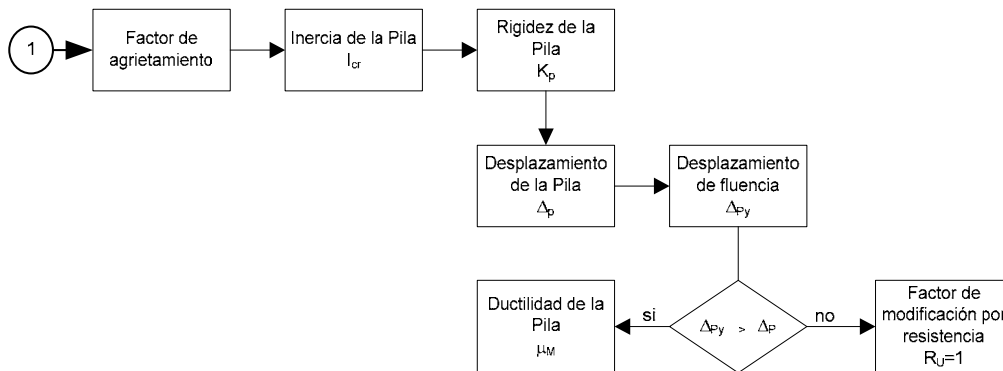


Figura 2.8(a) Chequeo de la capacidad de la pila

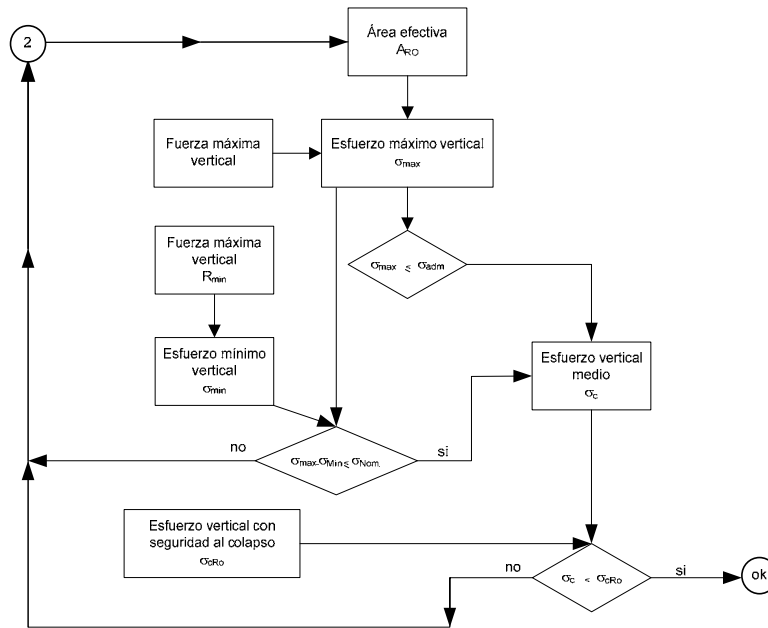


Figura 2.8 (b) Chequeo de capacidad del dispositivo Mershin

#### 2.4.2 Diseño AASHTO.

El procedimiento de diseño actual para puentes aislados, está estipulado en la Guía de especificaciones para Diseño con Aislamiento Sísmico de la AASHTO (2001). Los tres elementos básicos de los sistemas de aislamiento sísmico que han sido usados son:

- i. Un dispositivo que lleva carga vertical y proporciona flexibilidad lateral.
- ii. Un disipador de energía para que las deflexiones relativas a través del sistema flexible, puedan ser limitadas a niveles de diseño práctico.
- iii. Un medio de suministrar rigidez bajo pequeños niveles de carga, tal como fuerzas de viento y frenado.

El objetivo básico del aislamiento sísmico es incrementar el periodo fundamental de vibración de tal manera que la estructura esté sujeta a menores fuerzas sísmicas. Sin embargo, la reducción de fuerzas, va acompañada de un incremento de los desplazamientos debido a la flexibilidad que se le adiciona a la superestructura mediante estos dispositivos.

El diseño AASHTO, se resume en los siguientes pasos:

*Paso 1:* Establecer las condiciones iniciales de diseño, y seleccionar propiedades tentativas para los dispositivos de aislamiento sísmico, y para la pila.

*Paso 2:* Asumir un desplazamiento admisible del aislador,  $\Delta_B$  a través del cual se determina la fuerza máxima del dispositivo,  $V_B$ .(Ec. 18).

$$V_B = q_{Ly} * A_L + \frac{G_R * A_R}{h_B} * \Delta_B \quad \text{Ec. 18}$$

*Paso 3:* A partir de la rigidez efectiva del dispositivo,  $K_{Beff}$  Ec. 19,y de la rigidez crítica de la pila,  $K_p$ , Ec. 20 se determina la rigidez efectiva del sistema,  $K_{eff}$ . Ec. 21

$$K_{Beff} = \frac{V_B}{\Delta_B} \quad \text{Ec. 19}$$

$$K_P = \frac{3 * E * I}{h_p^3} \quad \text{Ec. 20}$$

$$K_{eff} = \frac{K_P * K_{Beff}}{K_P + K_{Beff}} \quad \text{Ec. 21}$$

*Paso 4:* Determinar el periodo efectivo, a partir de la rigidez efectiva  $K_{eff}$  del sistema y del peso de la superestructura.. Ec. 22

$$T_{eff} = 2 * \pi * \sqrt{\frac{W}{K_{eff} * g}} \quad \text{Ec.22}$$

*Paso 5:* Se procede a determinar el amortiguamiento,  $\zeta_{SYS}$ , (Ec. 24) a partir del cortante para un desplazamiento igual a cero,  $V_0$ , (Ec. 23) rigidez efectiva,  $K_{eff}$ , y los desplazamientos tanto del aislador como de la pila. En base al amortiguamiento del sistema, se determinará un coeficiente de amortiguamiento, B (AASHTO, 2000)

$$V_0 = V_{By} - K_p * \Delta_{By} \quad \text{Ec. 23}$$

$$\zeta_{SYS} = \frac{2 * V_0 * (\Delta_B - \Delta_{By})}{\pi * (\Delta_B + \Delta_P)^2 * K_{eff}} \quad \text{Ec. 24}$$

*Paso 6:* Seguidamente, ha partir de un espectro de aceleración, se calcula el coeficiente sísmico elástico  $C_S$ , (Ec. 25)el mismo que permitirá obtener una fuerza sísmica equivalente,  $V_{eq}$  (Ec. 26)

$$C_S = \frac{A * S_i}{T_{eff} * B} \quad \text{Ec. 25}$$

$$V_{eq} = C_S * W \quad \text{Ec. 26}$$

*Paso 7:* A través del periodo efectivo y del coeficiente sísmico, se determina el desplazamiento del sistema,  $\Delta_{sys}$ . Ec. 27

$$\Delta_{sys} = \frac{250 * A * S_i * T_{eff}}{B} \quad \text{Ec. 27}$$

*Paso 8:* Chequeamos que el desplazamiento calculado del dispositivo, sea igual al desplazamiento impuesto del mismo. Si esto no sucede, variamos el desplazamiento impuesto, y repetimos el proceso desde el paso dos, hasta que haya convergencia.

Una vez comprobada la convergencia del diseño, se procede a realizar un chequeo de la capacidad de la pila de hormigón armado y del dispositivo. En el caso de no lograr el chequeo adecuado, se procede a variar las propiedades iniciales del dispositivo.

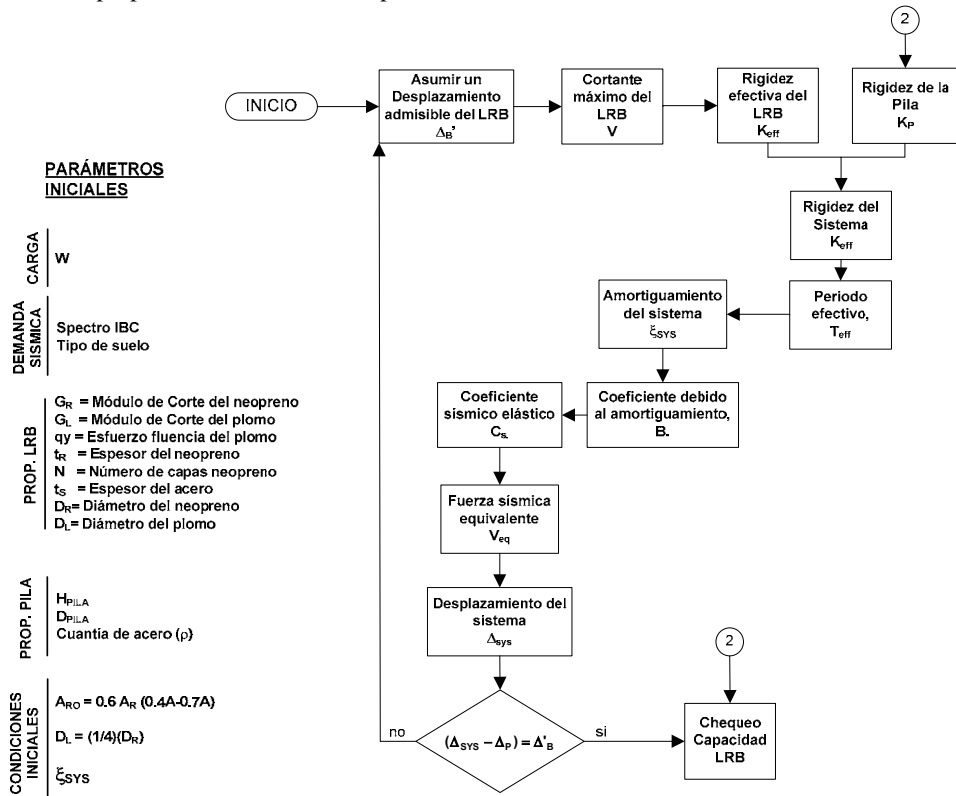


Figura 2.9 Diseño mediante AASHTO

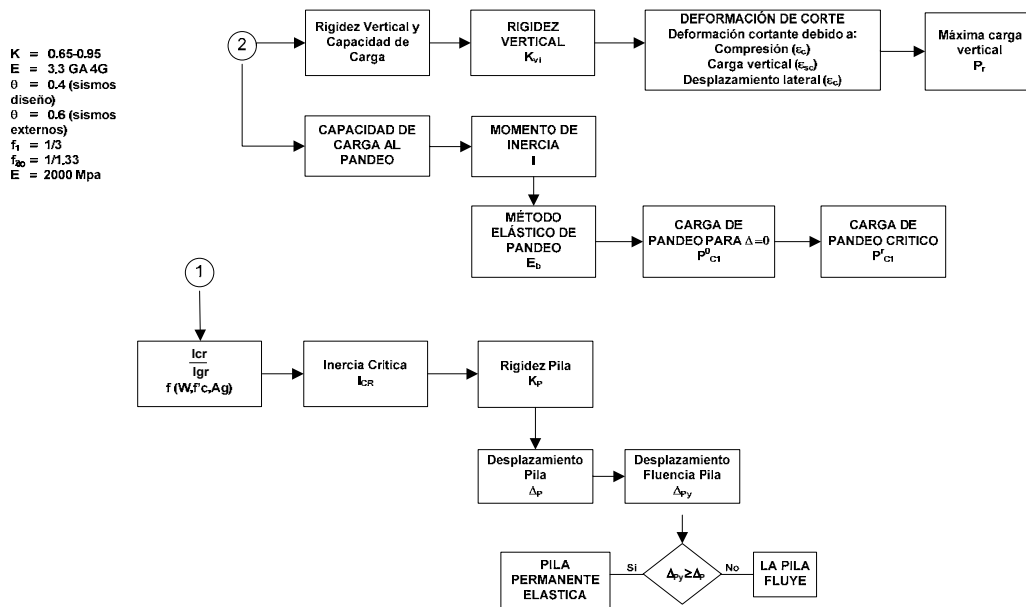
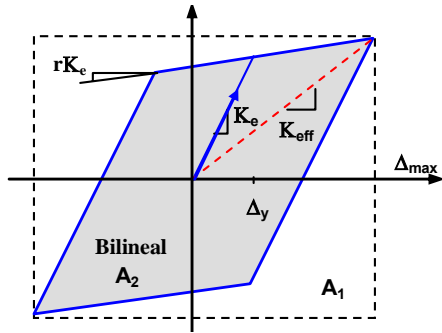


Figura 2.10 Chequeo de capacidad de la pila y el aislador.

### 3. REVISIÓN DE LOS MODELOS DE AMORTIGUAMIENTO Y DE LAS REGLAS EXISTENTES PARA SU COMBINACIÓN EN PUENTES AISLADOS:

El amortiguamiento es la característica de un sistema estructural, que contrarresta el movimiento y tiende a regresar el sistema al reposo cuando es perturbado. Para sistemas de aislamiento, es generalmente categorizado como viscoso cuando depende de la velocidad, o histerético cuando depende del desplazamiento. Para un análisis lineal equivalente, el amortiguamiento histerético se convierte en amortiguamiento viscoso equivalente, el cual permite la linearización de la respuesta inelástica.

Mientras que la variación del período usualmente reduce la aceleración, pero incrementa los desplazamientos, el amortiguamiento siempre reduce las aceleraciones y los desplazamientos. Se advierte, que el amortiguamiento incrementado, reduce las aceleraciones, respecto al cortante basal que es dominado por el primer modo de vibración. No obstante, un alto amortiguamiento podría incrementar las aceleraciones en modos altos de la estructura.



$$\xi_{eq} = \xi_e + \xi_{hyst} \quad \text{Ec 28}$$

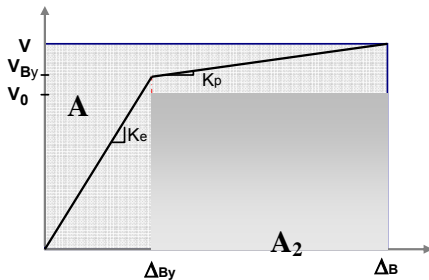
$$\xi_{hyst} = \frac{2}{\pi} \frac{A_2}{A_1} \quad \text{Ec 29}$$

Figura 3.1: Idealización del amortiguamiento, según Jacobsen.

Todos los modelos de amortiguamiento parten del modelo propuesto por Jacobsen (1930), en el que sostiene que para un modelo histerético rígido perfectamente plástico, (R-P-P), el amortiguamiento equivalente máximo es igual a  $2/\pi$ , el mismo que disipa más energía que cualquier otro modelo, de ahí que el amortiguamiento es proporcional a la energía disipada por el modelo histerético (Figura 3.1). El amortiguamiento equivalente para cualquier modelo es dada por la Ec. 28 y Ec. 29 donde  $\xi_e$ , es el amortiguamiento elástico inicial en un sistema no lineal,  $\xi_{hyst}$  es el amortiguamiento debido a la energía disipada,  $A_1$  es el área del lazo histerético y  $A_2$  es el área del lazo R-P-P.

#### 3.1 Modelo de amortiguamiento Menshin

El amortiguamiento de un dispositivo Menshin, se basa en la relación de áreas propuesta por Jacobsen, combinados con todos los parámetros que intervienen en el diagrama bilineal fuerza-desplazamiento. Básicamente el modelo de amortiguamiento que propone el diseño Menshin (Ec 30) se transforma en una relación de áreas, (Ec 31) donde el área dos,  $A_2$ , corresponde al rectángulo formado por los valores últimos tanto de cortante  $V$ , como de desplazamiento,  $\Delta_B$ , mientras que el área uno,  $A_1$ , se forma entre el cortante para un desplazamiento cero  $V_0$  y la variación de desplazamiento. (Figura 3.2)



$$\xi_B = \frac{2 * V_0 * \left[ \Delta_B + \left( \frac{V_0}{K_p - K_e} \right) \right]}{\pi * \Delta_B * (V_0 + \Delta_B * K_p)} \quad \text{Ec 30}$$

$$\xi_B = \frac{A_2}{A_1} = \frac{2 * V_0 * [ \Delta_B - \Delta_{By} ]}{\pi * V * \Delta_B} \quad \text{Ec 31}$$

Figura 3.2 Relación de áreas según Menshin

La regla de combinación de amortiguamiento según el diseño Menshin se basa en combinar el amortiguamiento de sus elementos: dispositivo Menshin, pilas, fundaciones y superestructura, obteniendo un valor representativo de amortiguamiento para el sistema total (Ec. 32). En donde  $\xi_{Bi}$  es el amortiguamiento para el dispositivo  $i$ ,  $\xi_{Pi}$  es el amortiguamiento de la pila o estribo  $i$ ,  $\xi_{Fi}$ , el amortiguamiento para la fundación  $i$  asociada con el desplazamiento de traslación,  $\xi_{F\theta}$  es el amortiguamiento para la fundación  $i$  asociada con el desplazamiento de rotación,  $K_{Pi}$  es rigidez equivalente de una pila o estribo  $i$ ,  $K_{Fui}$ , rigidez trasnacional de una fundación  $i$ ,  $K_{F\theta}$ , rigidez rotacional de una fundación  $i$ ,  $h$ , la distancia desde la base de la pila hasta el centro de gravedad de la superestructura.

$$\xi_{SYS} = \frac{\sum K_{Bi} \times \Delta_{Bi}^2 \times \left( \xi_{Bi} + \frac{\xi_{Pi} \times K_{Bi}}{K_{Pi}} + \frac{\xi_{Fui} \times K_{Bi}}{K_{Fui}} + \frac{\xi_{F\theta} \times K_{Bi} \times h^2}{K_{F\theta}} \right)}{\sum K_{Bi} \times \Delta_{Bi}^2 \left( 1 + \frac{K_{Bi}}{K_{Pi}} + \frac{K_{Bi}}{K_{Fui}} + \frac{K_{Bi} \times h^2}{K_{F\theta}} \right)} \quad \text{Ec. 32}$$

### 3.2 Modelo de amortiguamiento AASTHO

La regla de combinación de amortiguamiento según AASHTO, es determinar directamente el amortiguamiento del sistema (Ec. 33), el cual se lo puede transformar en la relación de áreas propuesta por Jacobsen, ( $A_2/A_1$ ) (Ec34), y en función de todos los parámetros que intervienen en el diagrama bilineal de fuerza-desplazamiento, tanto para el aislador como del sistema. El área dos,  $A_2$ , está formada entre el cortante para un desplazamiento cero  $V_0$  y la variación de desplazamiento del aislador ( $\Delta_{By}-\Delta_B$ ); el área rectangular,  $A_1$  se forma por los valores últimos tanto de cortante  $V$ , como de desplazamiento del sistema  $\Delta_{SYS}$ , (Figura 3.3).

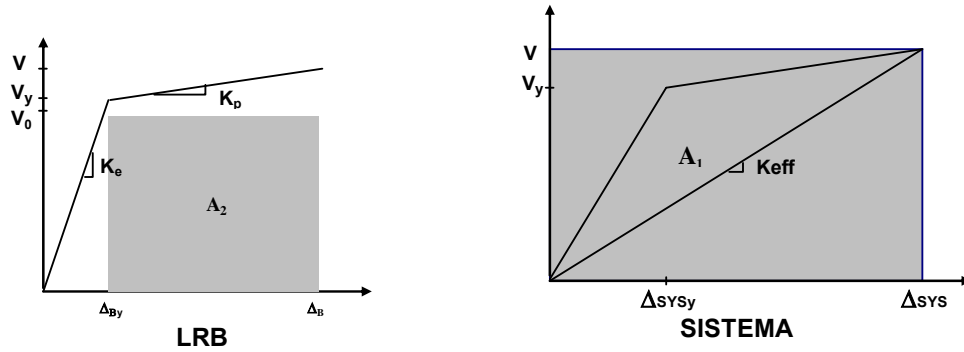


Figura 3.3 Relación de áreas según AASTHO

$$\xi_{SYS} = \frac{2 \times V_0 \times (\Delta_B - \Delta_{By})}{\pi \times (\Delta_B + \Delta_P)^2 \times K_{eff}} \quad \text{(Ec. 33),}$$

$$\xi_{SYS} = \frac{2 \times V_0 \times (\Delta_B - \Delta_{By})}{\pi \times V \times \Delta_{SYS}} \quad \text{(Ec. 34),}$$

### 3.3 Modelo Bilineal

Blandon propone el amortiguamiento de un modelo bilineal en base a encontrar un sistema sustituto, de forma que en este sistema a partir del amortiguamiento y periodo efectivo se alcance el mismo

desplazamiento que en el sistema inelástico. El amortiguamiento se obtiene a partir de un análisis no lineal de historia en el tiempo, para un número determinado de sismos. En la ecuación 36 se muestra el amortiguamiento planteado por Blandon el cual depende básicamente de la ductilidad del dispositivo.

**Tabla 3.1** Constantes para amortiguamiento

Constante	Valor
a	160
b	0.5
c	0.85
d	4

$$N = 1 + \frac{1}{(0.5 + c)^d} \quad (\text{Ec. 35}),$$

$$\xi_{B\text{eff}} = \frac{a}{\pi} \left( 1 - \frac{1}{\mu^b} - 0.1 \times r \times \mu \right) \left( 1 + \frac{1}{(T + c)^d} \right) \frac{1}{N} \quad (\text{Ec. 36})$$

La combinación de amortiguamiento del sistema se basa en el trabajo realizado tanto de la pila de hormigón armado, como del dispositivo, Ec 37, (Priestley, et al, 1996)

$$\xi_{\text{SYS}} = \frac{\xi_B * \Delta_B + \xi_P * \Delta_P}{\Delta_B + \Delta_P} \quad (\text{Ec. 37}),$$

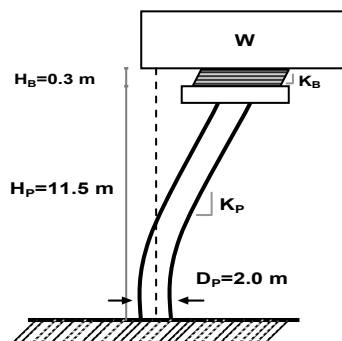
### 3.4. Verificación de las reglas de combinación para puentes aislados.

Con el propósito de verificar la efectividad de las reglas para la combinación del amortiguamiento descritas anteriormente, se realizó un estudio paramétrico en el que se analizaron pilas conectadas en serie con dispositivos de aislamiento/disipación. Las propiedades de estos sistemas se presentan en la tabla 3.2, además los parámetros que permanecen constantes se presentan en la Figura 3.4

Las variables que se incluye en este estudio son la relación de rigideces entre la pila y el aislador ( $K_p/K_b$ ) que se vario entre 2 y 4, la relación entre la fuerza lateral de la pila y la fuerza de fluencia del dispositivo, ( $V_{yp}/V_{yb}$ ), que se vario entre 0.5 y 0.9 y la demanda de ductilidad del dispositivo cuando la pila fluye, que se vario entre 2 y 10, el resumen de las variables se detallan en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Matriz Paramétrica

$K_B/K_P:$	$\mu_B \rightarrow f(V_{Pv}):$	$V_{Bv}/V_{Pv}:$
2	2	0.5
4	6	0.7
	10	0.9
<b>total de combinaciones:</b>		<b>21</b>



**Figura 3.4** Parámetros iniciales

El proceso de verificación requiere de los siguientes pasos:

### 3.4.1 Selección de un registro de sismos

Para encontrar el amortiguamiento equivalente de un sistema: pila de hormigón armado– dispositivo de aislamiento / disipación, se utilizó el análisis no lineal de historia en el tiempo, para un registro de de sismos, y para un tipo de suelo B (roca), como se indica en la Tabla 3.3.

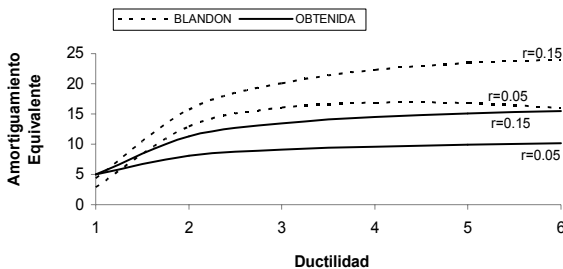
**Tabla 3.3.** Sismos utilizados en el diseño.

SISMO	NOMBRE	ESTACIÓN	COMPONENTE	PGA (G)
1	NORTHRIDGE	ANTELOPE BUTTES	0	0.046
2	LOMA PRIETA	BERKELEY LBL	90	0.117
3	LOMA PRIETA	COYOTE LAKE DAM DOWNST	195	0.16
4	NORTHRIDGE	ANTELOPE BUTTES	90	0.068
5	HOLLISTER	SAN JUAN BAUTISTA	123	0.13
6	LOMA PRIETA	HOLLISTER SAGO VAULT	270	0.036
7	NORTHRIDGE	LA - S GRAND	90	0.29
8	NORTHRIDGE	LITTLE ROCK-BRAINARD CAN	180	0.06
9	LANDERS	SILENT VALL - POPPET	90	0.04
10	LOMA PRIETA	BERKELEY LBL	0	0.057
11	LOMA PRIETA	RINCON HILL	0	0.078
12	LOMA PRIETA	SF GOLDEN GATE BRIDGE	270	0.123
13	LOMA PRIETA	COYOTE LAKE DAM DOWNST	285	0.179
14	LOMA PRIETA	PIEDMONT JH GROUND	45	0.084
15	NORTHRIDGE	LA - WONDERLAND	95	0.112
16	NORTHRIDGE	MT WILSON-CIT SEIS STA	0	0.234
17	SAN FRANCISCO	GOLDEN GATE	10	0.095
18	NORTHRIDGE	WRIGHTWOOD - NIELSON RANCH	180	0.042
19	LOMA PRIETA	SO.SAN FRAN, SIERRA PT	115	0.056
20	LANDERS	AMBOY	0	0.115

Con el propósito de calcular el amortiguamiento viscoso equivalente, se encontró el espectro de desplazamiento para cada uno de los registros de sismos para varios niveles de amortiguamiento.

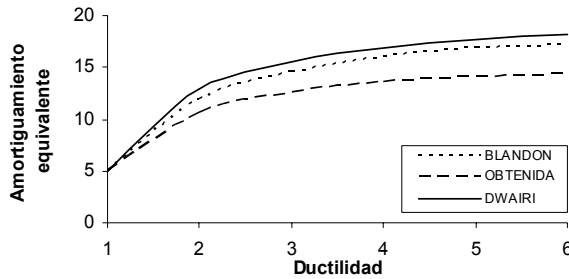
### 3.4.2 Modelos de amortiguamiento para el dispositivo y para la pila de hormigón armado.

Para poder aplicar las reglas de combinación y así estimar el amortiguamiento equivalente de la estructura, es necesario encontrar el amortiguamiento del aislador Ec. 37 y de la pila (Ec. 38) por separado. A pesar de que estas expresiones ya han sido desarrolladas para los dispositivos y para pilas de concreto (Dwairi 2005 y Blandon 2004), en esta investigación se ha considerado necesario el obtener las expresiones desarrolladas específicamente para el registro de 20 sismos utilizados; lo cual permitirá aislar el error en la determinación del amortiguamiento causado por las reglas de combinación únicamente. El procedimiento para encontrar esta relación de amortiguamiento específica, es el mismo utilizado por Dwairi (2005). La fig 3.5 y 3.6, muestra los modelos encontradas tanto para la pilas como para el dispositivo.



$$\xi_B = \xi_c + (-58.2 \times r + 48.42) \times \frac{\mu - 1}{\pi \mu} \quad \text{Ec. 37}$$

**Figura 3.5** Modelo específico para el dispositivos de aislamiento/disipación



$$\xi_p = \xi_e + 35.5 \times \frac{\mu - 1}{\pi \mu} \quad \text{Ec. 38}$$

**Figura 3.6** Modelo específico para pilas de hormigón armado

### 3.4.3 Amortiguamiento equivalente debido a varios niveles de daño causado al sistema en serie

Para encontrar el amortiguamiento equivalente del sistema en serie; se utilizó el siguiente procedimiento:  
*Paso 1:* Con la ayuda de RUAUMOKO (Carr, 1996), se diseñó un modelo no lineal del sistema en serie para realizar el análisis. La geometría, rigidez y demás propiedades de los elementos se muestran en la Figura 3.4 y en la Tabla 3.2. El modelo histérico para las pilas fue el de Takeda modificado y para el aislador fue un modelo histérico bilineal.

*Paso 2.* El análisis de historia en el tiempo fue realizado bajo la aplicación de cada registro de sismos que fue escalado para diferentes intensidades para dar una demanda de ductilidad entre el rango de 1 a 6 en la pila de hormigón armado.

*Paso 3.* A partir de los resultados de cada análisis no lineal de historia en el tiempo fueron extraídos, los valores máximos de desplazamientos y fuerza cortante para el sistema en serie. Con esta información, las propiedades del sistema de sustitución SDOF fue determinado de la siguiente manera:

- i. La rigidez efectiva del sistema  $K_{eff}$ :

$$K_{eff} = \frac{V_{max}}{\Delta_{max}} \quad \text{Ec. 39}$$

- ii. El periodo efectivo del sistema  $T_{eff}$ :

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g \times K_{eff}}} \quad \text{Ec. 40}$$

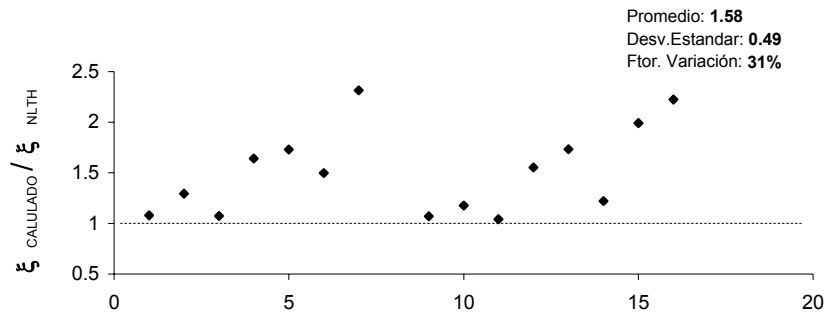
El amortiguamiento para el sistema sustituto se encontró de forma que en este sistema a partir del amortiguamiento y periodo efectivo se alcance el mismo desplazamiento que en el sistema inelástico. El resultado encontrado para cada sismo fue interpolado para obtener valores redondos de ductilidad que estén dentro del rango anteriormente establecido. Luego los resultados fueron promediados entre todos los registros de los sismos.

## 3.5 Análisis y Resultados

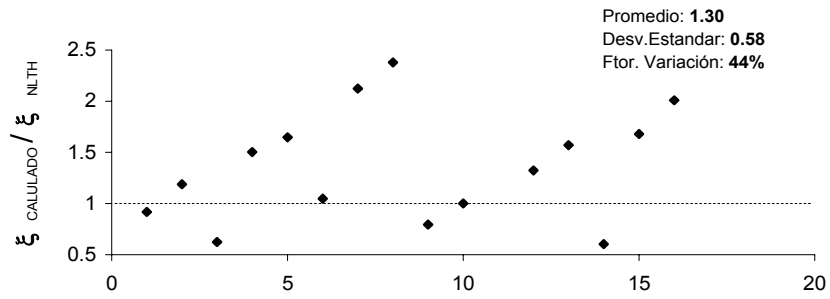
Para sistemas en serie (pila-aislador), los resultados del análisis paramétrico fueron clasificados en dos grupos: respuesta para pila elástica, y respuesta para pila y aislador inelásticos.

### 3.5.1. Respuesta para pila elástica

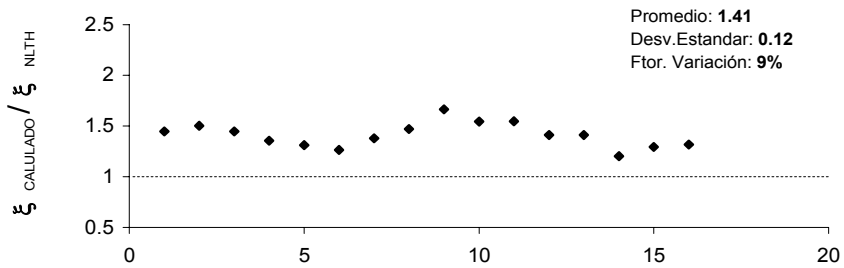
Para este análisis se consideró los resultados para cuando la ductilidad de la pila de hormigón armado no es mayor que uno.



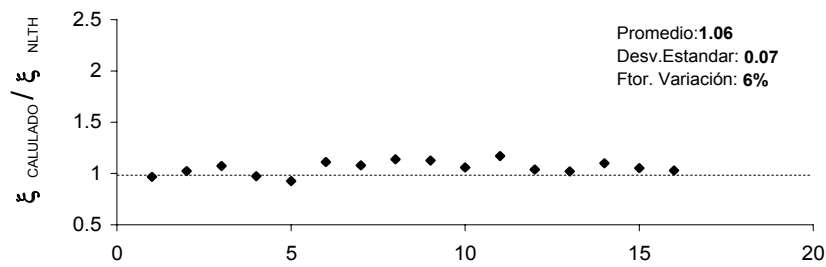
**Figura 3.7** Modelo Menshin



**Fig 3.8** Modelo AASHTO



**Fig 3.9** Modelo bilineal de Blandon



**Fig 3.10** Modelo bilineal Adoptado

*Análisis de Resultados:* Las gráficas anteriores demuestran la correlación de resultados comparados con diferentes reglas de combinación descritas anteriormente y los resultados del NTHA.

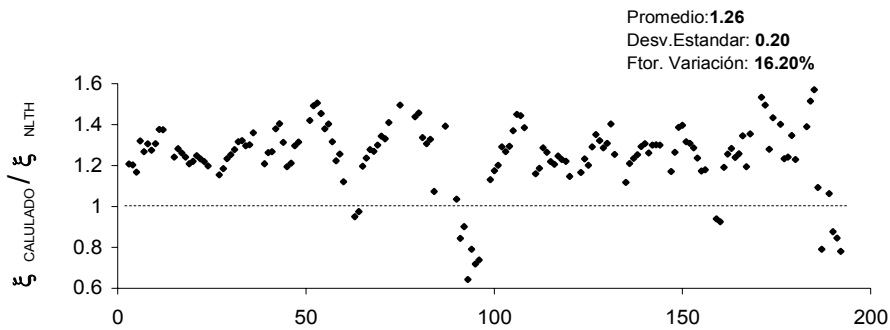
En el análisis del sistema: pila elástica y aislador inelástico, resultado que para el modelo determinado en esta investigación, el cual se basó en considerar que para cuando la pila de hormigón armado no fluye el amortiguamiento del sistema está dado por el amortiguamiento del dispositivo, en función de la ductilidad del sistema (Fig. 3.10), predice los resultados con un error del 6% y una variabilidad del 6%. Resultados similares se obtienen con la aplicación del modelo de Blandon (Fig., 3.9), que aunque sobreestima el amortiguamiento en un 41% debido a que este modelo no fue específicamente desarrollado para los sismos de este estudio, produce resultados con una variabilidad baja del 9%. Esto demuestra que usar en forma directa modelos de amortiguamiento en función de la ductilidad del sistema pila-aislador, resulta apropiado.

Los métodos de combinación Menshing (Fig, 17) y AASHTO (Fig, 18) sobreestiman el amortiguamiento y producen resultados con una alta variabilidad. Para el modelo Menshin (Fig. 3.7), se sobreestima el valor real del amortiguamiento en un 58% y se produce una variabilidad de 31%.

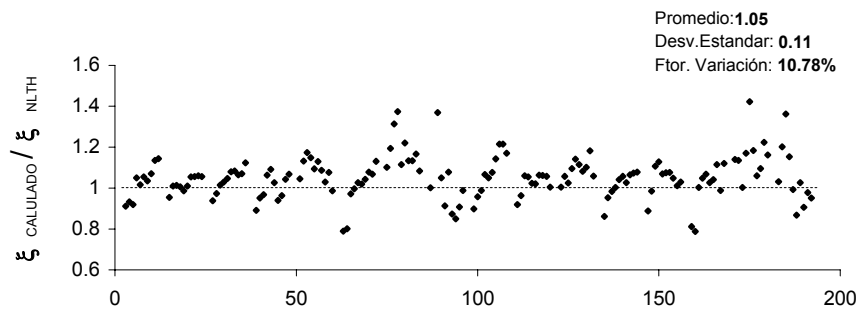
Para el modelo AASHTO Fig.3.8 los resultados obtenidos, al igual que Menshin sobrestiman el amortiguamiento en un 30%, y produce una variabilidad del 44%.

### 3.4.2 Respuesta para pila y aislador inelásticos

Para este análisis se consideró los resultados para cuando ambos elementos fluyen.



**Fig 3.11** Modelo bilineal de Blandon



**Fig 3.12** Modelo bilineal Adoptado

*Análisis de Resultados:* En el análisis del sistema: pila y aislador inelásticos, debido a que Menshin y AASHTO consideran que durante un sismo las pilas de un puente no deben sufrir daño alguno, entonces para estos métodos de diseño no se obtiene modelos de combinación de amortiguamiento. El modelo bilineal de Blandon igual es analizado considerando los mismos principios que los de esta investigación

por las razones antes mencionadas. Se probaron varias opciones de combinar el amortiguamiento, la que dio mejor resultado fue la combinación por trabajo de sus elementos (Ec.37).

Los resultados obtenidos del modelo bilineal de Blandon (Fig. 3.11) sobreestiman el amortiguamiento en un 26%, y posee una variabilidad de 16.2%. Si los comparamos con los resultados del modelo bilineal propuesto en esta investigación, (Fig. 3.12) podemos decir que estamos obteniendo un amortiguamiento más cercano al real, ya que la sobrestimación es mínima en un 5%. Demostrándose que esta regla es adecuada puesto que la dispersión de los resultados es baja

### 3.6 Interacción Pila Elástica y Aislador inelástico

Cuando se habla de pila elástica, nos referimos a que durante la demanda sísmica, el elemento que fluye en el sistema es el dispositivo de aislamiento sísmico. El diseño Menshin y AASTHO consideran siempre que la pila permanecerá elástica. El beneficio que posee esta teoría es que después de un sismo lo único que se debe reparar o cambiar son los aisladores sísmicos. La combinación pila elástica-aislador inelástico da como resultado un diagrama bilineal fuerza –desplazamiento presente en la figura 3.13. Dentro de los puntos más sobresalientes tenemos al desplazamiento de fluencia del sistema  $\Delta_{SYS}$ , (Ec 41) que es igual al desplazamiento de fluencia del aislador  $\Delta_{By}$ , más el aporte de desplazamiento de la pila debido al cortante de fluencia del aislador,  $\Delta_p^{V_{By}}$ . El desplazamiento total del sistema  $\Delta_{SYS}$ , que es igual a la suma del desplazamiento del aislador,  $\Delta_B$  más el desplazamiento de la pila, el cual permanece elástico, (Ec.42). En lo que respecta a los cortantes, los puntos más notables sigue siendo el cortante de fluencia del aislador  $V_{By}$  y el cortante último  $V$ .

$$\Delta_{SYSy} = \Delta_{By} + \frac{V_{By}}{K_p} \quad Ec\ 41$$

$$\Delta_{SYS} = \Delta_B + \frac{V}{K_p} \quad Ec\ 42$$

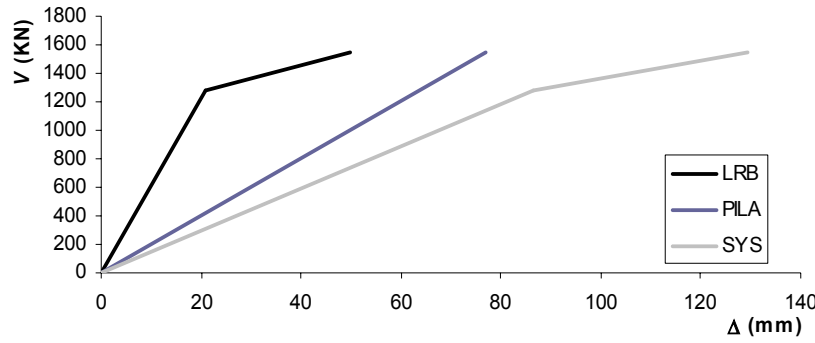


Figura 3.13 Interacción Pila elástica-Aislador inelástico

### 3.7 Interacción Pila y Aislador en estado inelástico.

Las subestructuras de puentes si son diseñadas para incursionar en el rango inelástico, tienden a disminuir la demanda de resistencia en los componentes de: la subestructura, superestructura y aisladores sísmicos. Sin embargo, la incursión inelástica se traduce en daño estructural que debe ser controlado y limitado en la etapa de diseño. Parecería entonces que todos los efectos de la incursión inelástica son negativos, aunque, un aspecto positivo es la disipación de energía que ocurre en cada ciclo y que está relacionada con el área dentro del lazo histérico. Por esta razón es beneficioso que la estructura opere en un rango inelástico, siempre y cuando se controle los niveles de daño deseado. La combinación pila-aislador en estado inelástico da como resultado un diagrama fuerza - desplazamiento trilineal, ( figura 3.14). Dentro de los puntos más sobresalientes tenemos el desplazamiento debido a la fluencia del aislador  $\Delta_y^B$  que es igual al desplazamiento de fluencia del aislador,  $\Delta_{By}$ , más el aporte de desplazamiento de la pila debido al

cortante de fluencia del aislador, (Ec 43); el desplazamiento debido a la fluencia de la pila  $\Delta_y^P$ , que es igual al desplazamiento de fluencia de la pila más el aporte del aislador que se encuentra en el rango inelástico (Ec. 44); el desplazamiento total del sistema  $\Delta_{SYS}$ , que es igual a la suma del desplazamiento del aislador,  $\Delta_B$  más el desplazamiento de la pila,  $\Delta_P$ , (Ec45). En lo que respecta a los cortantes, los puntos más notables sigue siendo el cortante de fluencia del aislador  $V_{By}$  el cortante de fluencia de la pila  $V_{Py}$  y el cortante último  $V$ .

$$\Delta_{SYS}^B = \Delta_{By} + \frac{V_{By}}{K_p} \quad , Ec 43$$

$$\Delta_{SYS}^P = \Delta_{By} + \frac{V_{Py} - V_{By}}{rK_e} \quad , Ec 44$$

$$\Delta_{SYS} = \Delta_B + \Delta_P \quad , Ec 45$$

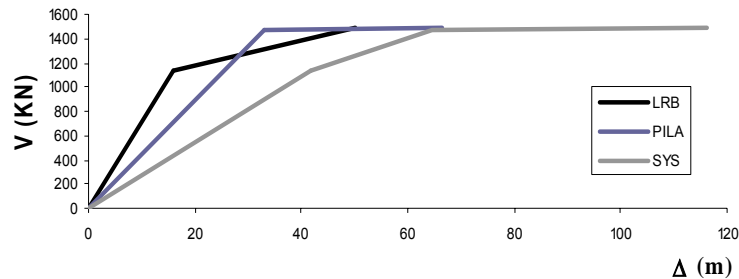


Figura 3.14 Interacción Pila y Aislador inelástico

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL DDBD PARA EL DISEÑO DE PUENTES AISLADOS.

DDBD se desarrolló con base en el método de estructura sustituta (Shibata y Sosen, 1976). En DDBD la estructura inelástica en su máximo desplazamiento es reemplazada por un sistema elástico de un grado de libertad, que es equivalente por el uso de rigidez secante al punto de máxima respuesta, y por el uso de amortiguamiento viscoso; combinando de esta manera el amortiguamiento viscoso e histerético en la estructura real. Este método parte del desplazamiento máximo que se desea obtener en la estructura y produce la rigidez y resistencia requeridas para alcanzar el desempeño propuesto. DDBD es un método que puede ser fácilmente implementado para el diseño de puentes con aislamiento debido a que utiliza amortiguamiento equivalente y rigidez efectiva de manera similar a los métodos AASHTO y Menshin. Sin embargo para una implementación adecuada de DDBD es necesario:

1. Estudiar los modelos de amortiguamiento usados en los otros métodos y su aplicación en DDBD.
2. Estudiar las reglas de combinación propuestas en los otros métodos
3. Modificar el procedimiento de DDBD para puentes no aislados para considerar la interacción entre pilas y los dispositivos.

Estos ítems fueron cubiertos en las secciones anteriores de este documento. Con base en la información encontrada se presenta el siguiente procedimiento para DDBD de pilas con dispositivos de aislación/dispación:

*Paso 1.* Estimar el tamaño y configuración de la pila de hormigón armado y del dispositivo de aislamiento sísmico.

*Paso 2.* Determinar el desplazamiento “meta”, con base en límites de deformación unitaria, curvatura, ductilidad, deriva, desplazamiento o efectos P-Delta. (Dwairi y Kowalsky, 2005). Además también se determina un desplazamiento para el dispositivo, basado en la deformación cortante última y en el desplazamiento propiamente dicho.

*Paso 3.* Definir el sistema equivalente de un grado de libertad, que incluye la determinación del amortiguamiento viscoso equivalente tanto de la pila como del aislador sísmico.

Paso 4. Mediante el uso de un espectro de desplazamiento preparado para el amortiguamiento obtenido, se determina el periodo efectivo del sistema.

Paso 5. Determinar la rigidez y resistencias requeridas para alcanzar el desempeño propuesto en el paso 2

Paso 6. Diseño de los elementos utilizando principios de diseño por capacidad (Priestley y Calvi, 1996) Si la resistencia requerida no puede darse a la estructura debido a limitaciones practicas en la cantidad de refuerzo o dimensiones del dispositivo, el procedimiento se repite modificando el tamaño de las secciones. Además, se realiza un chequeo de la capacidad de presión vertical, desplazamiento lateral, colapso y deformación cortante local del dispositivo (Figura 2.10). En el caso de no lograr el chequeo adecuado, se varían las propiedades iniciales del dispositivo y se repite el procedimiento.

En la Figura 4.1 se puede observar el proceso de diseño DDBD.

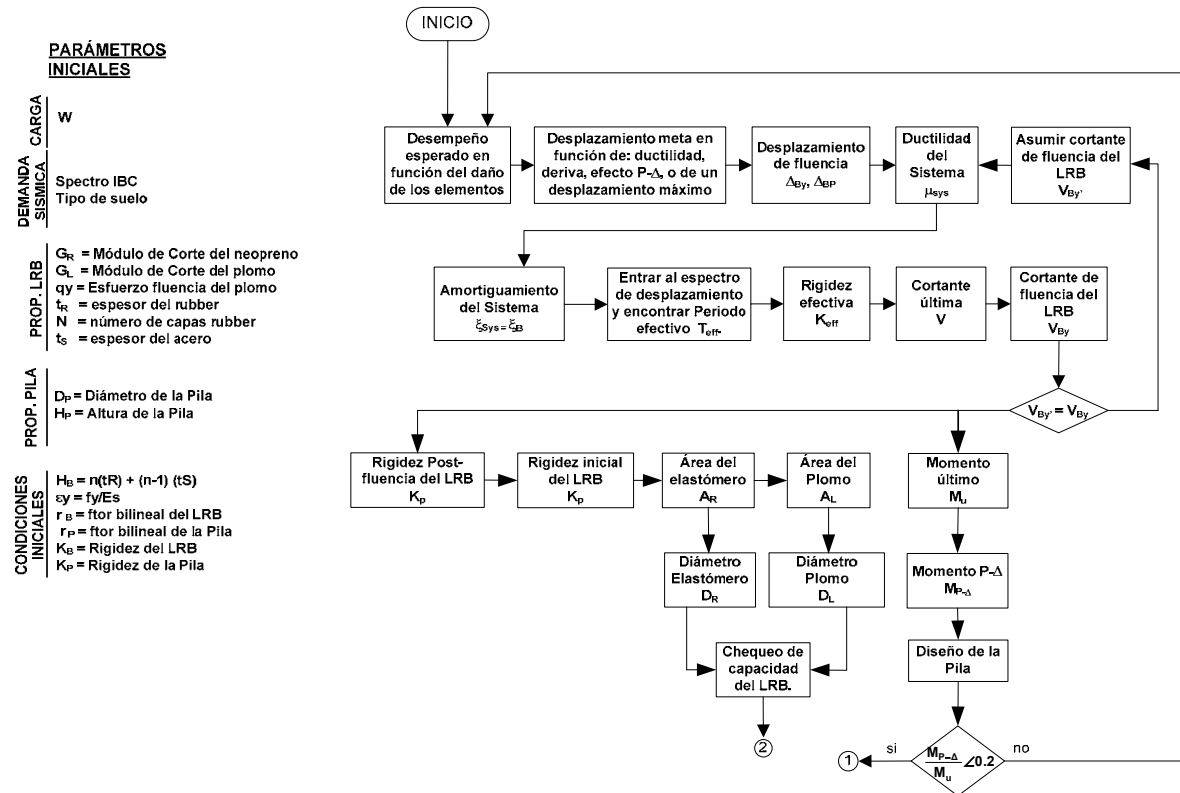
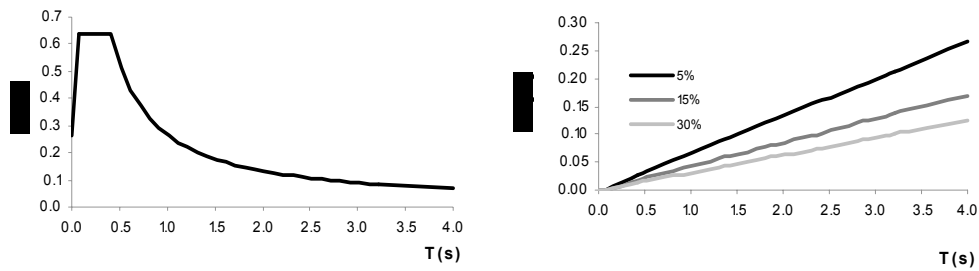


Figura 4.1 Procedimiento de Diseño del DDBD

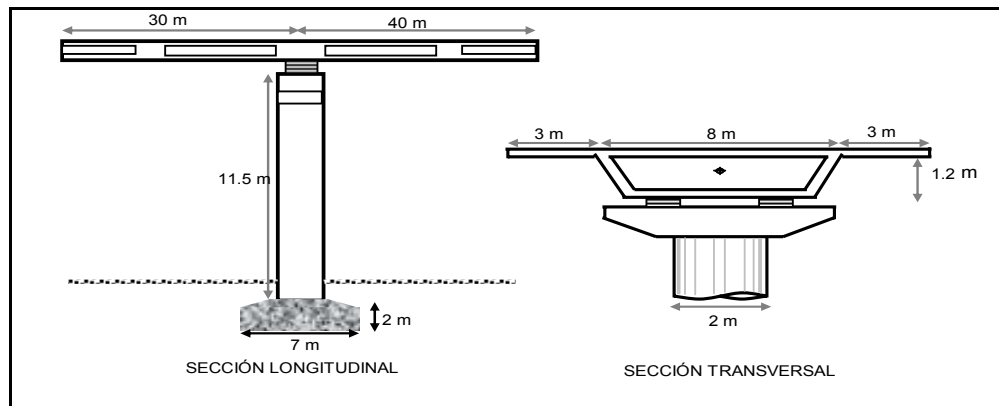
#### 4.1. Diseño de un sistema: pila elástica y aislador inelástico.

Una pila que soporta una superestructura simplemente apoyada dotada de aisladores sísmicos del tipo LRB es diseñada mediante el DDBD y con fines de comparación con Menshin y AASHTO. Los objetivos de diseño para este sistema son: lograr que bajo la demanda sísmica especificada en la Figura 4.2, correspondiente al espectro IBC para un suelo tipo A (Roca), la demanda de ductilidad en la pila no supere el valor de uno; que el desplazamiento de los aisladores sísmicos no supere su valor máximo y que los momentos causados por los efectos P-Delta no superen el 20% de la capacidad a flexión de las secciones diseñadas. Para verificar el diseño por los distintos métodos se realizó un análisis no lineal de historia en el tiempo.



**Figura 4.2.** Amenaza sísmica de diseño

Para el diseño sismorresistente se asume que la pila ya ha sido diseñada para resistir cargas gravitacionales, por ende se toman el peso que aporta la superestructura a la pila igual a 250 kN por metro lineal. Los datos de entrada sobre la geometría se presentan en la Figura 4.3.



**Figura 4.3** Sección transversal adoptada

Las propiedades elásticas de la sección de la superestructura no son relevantes ya que al no ser continua, no transmite la acción sísmica de una pila a otra. Para este sistema la subestructura consiste en una pila circular cimentada a nivel del suelo. Los datos para el diseño y análisis de las pilas, son presentados en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Propiedades de los materiales de diseño

Concreto			
$f'_c$	28	[Mpa]	Esfuerzo de compresión
$E_c$	24870	[Mpa]	Módulo Elástico
$\gamma_c$	24	[kN/m <sup>3</sup> ]	Peso unitario
Acero de refuerzo			
$f_y$	420	[Mpa]	Esfuerzo de fluencia
$E_s$	200000	[Mpa]	Módulo de elasticidad
$d_{bl}$	36	[mm]	Diámetro

El DDBD fue aplicado considerando que la pila permanece elástica, por efectos de comparación con Menshin y AASHTO, debido a que estos métodos se diseñan tomando en cuenta que la pila no sufre ningún daño frente a un sismo.

El amortiguamiento para el sistema  $\xi_{sys}$ , para cuando la pila permanece elástica es igual al amortiguamiento del dispositivo de aislamiento, con respecto a la ductilidad del sistema, para lo cual se ha utilizado el modelo de amortiguamiento obtenido para ciertas propiedades específicas descrito en la sección anterior. También es necesario disponer de espectros de desplazamiento para diferentes valores de amortiguamiento, por tal razón, el espectro de aceleración propuesto para el diseño es convertido a un espectro de desplazamientos (Fig. 4.2) y es escalado a diferentes niveles de amortiguamiento con la Eq. 46 propuesta por el Eurocode (1988).

$$\beta = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi_{eq}}}$$

Eq. 46

## 4.2 Análisis de verificación

Análisis no lineales de historia en el tiempo (NTHA) fueron ejecutados para verificar el desempeño de las estructuras que resultaron de la aplicación de cada uno de los métodos. El programa Ruaumoko 2D (Carr 1999) fue utilizado para este propósito. La pila de hormigón armado fue modelada como barra a la que se le asignó el modelo histerético de Takeda (1970) para tomar en cuenta la disipación de energía que ocurre con la formación de las rotulas plásticas. Los dispositivos aisladores/disipadores fueron modelados con resortes bilineales. Ocho registros sísmicos fueron aplicados al modelo en serie, estos acelerogramas corresponden a sismos reales registrados en estaciones sobre suelos suaves y fueron modificados para ser compatibles con el espectro de diseño utilizando la técnica de descomposición en ondas (Montejo, 2004). El máximo desplazamiento del sistema corresponde al promedio de los valores máximos obtenidos para cada uno de los sismos.

### 4.1.2 Análisis comparativo de Resultados de los diseños propuestos.

Resultados de la aplicación de los métodos de diseño y de los análisis de verificación se muestran para el sistema en serie en la Tabla 4.2 y Tabla 4.3.

En la tabla 4.2 se muestra los parámetros de mayor importancia del sistema en serie (pila – dispositivo). Podemos decir que para una misma configuración estructural y carga vertical, mediante el DDBD se obtuvo el mayor desplazamiento del sistema, debido a que el amortiguamiento es menor, mientras que en Menshin el desplazamiento es el menor en comparación con los demás, debido a que el amortiguamiento es mayor, AASHTO al igual que Menshin posee un elevado amortiguamiento. Con respecto a la comparación con el NTHA, los resultados obtenidos con el DDBD son similares a los obtenidos en el NTHA.

En la tabla 4.3 se muestra los parámetros de mayor importancia del LRB para los diferentes métodos de diseño. En Menshin el desplazamiento del LRB es mayor que en DDBD y AASHTO. En lo que respecta a las dimensiones del LRB, para el diseño Menshin se obtiene menores dimensiones debido a que el amortiguamiento del sistema es mayor, en comparación con AASHTO y DDBD, en los cuales las dimensiones son iguales.

**Tabla 4.2** Comparación de resultados de la pila

PARÁMETROS DEL SISTEMA	MENSHIN		AASHTO		DDBD	
	DISEÑO	NLTH	DISEÑO	NLTH	DISEÑO	NLTH
Peso de la Estructura (KN)	17500	17500	17500	17500	17500	17500
Periodo Aislado (s)	3.80	3.11	2.48	2.59	2.42	2.49
Desplazamiento total (m)	0.08	0.14	0.13	0.14	0.13	0.13
Amortiguamiento (%)	13.30	15.99	12.76	9.57	9.22	9.34
Rigidez efectiva (KNm)	12367.22	7438.70	11431.90	10542.45	12197.26	11461.50
Fuerza Lateral (KN)	982.72	988.5875	1468.78	1463.13	1546.84	1527.00
Periodo inicial (s)	2.12	2.12	2.18	2.18	2.16	2.16

**Tabla 4.3** Comparación de resultados de LRB

PARÁMETROS LRB	MENSHIN		AASHTO		DDBD	
	DISEÑO	NLTH	DISEÑO	NLTH	DISEÑO	NLTH
Desplazamiento ultimo (m)	0.029	0.018	0.054	0.037	0.05	0.04
Desplazamiento fluencia (m)	0.011	0.011	0.021	0.021	0.021	0.021
Deformacion lateral	0.10	0.07	0.50	0.14	0.49	0.17
Altura total (mm)	345	345	320	320	320	320
Diametro del caucho (m)	1.1	1.1	1.14	1.14	1.14	1.14
Diametro del plomo (m)	0.22	0.22	0.29	0.29	0.29	0.29
Numero de LRB	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

#### 4. CONCLUSIONES

El objetivo principal de la investigación de revisar la literatura existente sobre los métodos de diseño de puentes aislados, y la implementación del DDBD para diseño sísmico de puentes aislados se han cumplido satisfactoriamente.

Esta investigación se ha dividido en dos áreas: evaluación del amortiguamiento y de las reglas para su combinación en puentes aislados, y evaluación de los métodos de diseño e implementación del DDBD para puentes aislados.

Respecto a la evaluación del amortiguamiento y de las reglas para su combinación en puentes aislados se puede concluir que:

- i. Cuando el LRB fluye y la pila de hormigón armado permanece elástica, la mejor estimación del amortiguamiento equivalente se logra utilizando en forma directa un modelo de amortiguamiento similar al propuesto por Blandon para sistemas bilineales, pero utilizando en este modelo directamente la ductilidad del sistema.
- ii. Cuando la pila de hormigón y el LRB fluyen, se demostró que la mejor forma de combinar el amortiguamiento es haciéndolo en función del trabajo de estos elementos.
- iii. La regla de combinación tanto para Menshin como para AASHTO sobreestiman el amortiguamiento.

Respecto a la evaluación de los métodos de diseño e implementación del DDBD para puentes aislados se concluye que:

- i. Tanto AASHTO como Menshin son métodos iterativos en los cuales se asume al principio tanto la resistencia como la rigidez de la pila y del LRB. Luego durante el proceso de aplicación del método se determina si estos valores son adecuados para satisfacer que la demanda sísmica sea menor que la capacidad, y de ser este el caso después de varias iteraciones se concluye con el diseño.
- ii. El diseño DDBD se demuestra con el diagrama de flujo encontrado que se puede aplicar de forma directa.
- iii. En el ejemplo se demuestra que debido a que Menshin y AASHTO sobreestiman el amortiguamiento, los desplazamientos de diseño son menores a los que se obtiene en el NTHA.

#### REFERENCIAS:

- AASHTO 2001. "Guide Specifications for seismic Isolation Design", American Association of State Highway and Transportation Officials; Washington D.C.
- Blandon, C. A., and Priestley, M. J. N., 2005 "Equivalent viscous damping equations for direct displacement-based design" *Journal of Earthquake Engineering* vol. 9, Special Issue 1
- Carr, A.J, 1996 "Ruaumoko-Program and users manual for Inelastic Dynamic Analysis", Dept. of Civil Engineering, University of Canterbury. New Zealand
- Casarotti C., 2004. "Bridge Isolation and Dissipation Devices: state of the art review of seismic response and modelling of modern seismic isolation and dissipation devices", ROSE SCHOOL, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk.
- Dwairi H.M, 2005. "Equivalent damping in support of direct displacement-based design with applications for multi-span Bridges". Ph.D. Thesis; North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- EuroCode 8, 1988. "Structure in seismic regions – Design. Part 1". General and Building. Edition, Report EUR 8849 EN, Commission of European Communities.
- Jacobsen L.S. "Steady forced vibrations as influenced by damping". *ASME Transactions* 1930; 52(1): 169-181.
- Kawashima K., 2000. "Seismic Design and Retrofit of Bridges," Key Note Presentation, 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1818 (CD-ROM), Auckland, New Zealand
- Kirikov. B., 1992. "History of earthquake resistant construction" Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid.
- Mokha A., Constantinou M.C. and Reinhorn A.M., 1990. "Teflon bearings in seismic base isolation I: Testing", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116, 438-454.
- Montejo L., 2004. "Generation and analysis of spectrum compatible earthquake time histories using wavelets". Ms Thesis, University of Puerto Rico.
- Priestley M.J.N., Seible, F. , Calvi G., 1996. "Seismic design and retrofit of bridges". Wiley, New York.

Robinson, W.H., 1982. "Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, 593-604.

Shibata and Sozen, 1976. "Substitute Structure Method for Seismic Design". *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol 102, No ST1.

Skinner, R. V., Robinson, W. H. and McVerry, G. H., 1994. "An Introduction to Seismic Isolation". John Wiley & Sons, New York, USA.

Sugita, H.,1994. "Manual for Menshin design of highway Bridges". Puiblic works research Institute, Ministry of construction, Japan.

Takeda T., Sozen M. and Nielsen N. 1970, "Reinforced concrete response to simulated earthquakes". *Journal of the Structural Division, ASCE* 1970; 96(12): 2557-2573.

Zayas, V.A., Low, S.S. and Mahin, S.A., 1990. "A simple pendulum technique for achieving seismic isolation", *Earthquake Spectra*, Vol. 6, 317-334.