

# **IV CONGRESO LATINOAMERICANO DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA CIVIL**

**COLEIC, PANAMÁ 2007**

## **CONCURSO DE PONENCIAS**

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

**JOSÉ C. HURTADO H.  
VINICIO A. SUÁREZ CH.**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR  
DE LOJA**

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

## **1. INTRODUCCIÓN**

El Diseño de Puentes con Aislamiento Sísmico ha ganado popularidad debido a las ventajas que presenta respecto a la disminución de fuerzas y control de daño de la estructura.

Esta investigación presenta una revisión de la literatura existente sobre los métodos de diseño Menshin (Sugita, 1994) y AASHTO (2001); además se exponen los resultados de la implementación del Diseño Directo basado en Desplazamientos (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.

La aplicación del procedimiento propuesto se demuestra con ejemplos de diseño que incluyen: sistemas en serie pila-LRB y puentes continuos.

## **2. OBJETIVO**

Comparar la efectividad de los métodos de diseño e investigar los parámetros necesarios para implementar el DDBD.

## **3. FUNDAMENTOS DEL DDBD.**

DDBD utiliza el método de la rigidez secante y una aproximación de amortiguamiento equivalente para transformar a una estructura en un sistema lineal equivalente de un solo grado de libertad (SDOF). Tiene por objeto diseñar una estructura que alcance un estado límite de comportamiento específico bajo una intensidad de sismo adoptada.

En el caso de estructuras de múltiples grados de libertad (MDOF), el DDBD transforma a la estructura en un SDOF con un sistema de masas  $M_{sys}$  y fuerzas  $V_{sys}$  (Fig. 1a). Este proceso se basa en el concepto de estructura substituta, desarrollada por Shibata y Sozen en 1976. La conducta

histerética del SDOF se describe en términos de una rigidez secante  $K_{eff}$  para una respuesta meta y un amortiguamiento equivalente  $\xi_{sys}$ , que es proporcional a la energía disipada (figura 1b).

El amortiguamiento equivalente toma en cuenta los efectos de disipación de energía en la respuesta no lineal de una estructura flexible, y se expresa como una función de la ductilidad de desplazamiento. El espectro de respuesta de diseño se reduce a través del uso de un factor reductor de amortiguamiento  $R_d$  (Ec. 1).

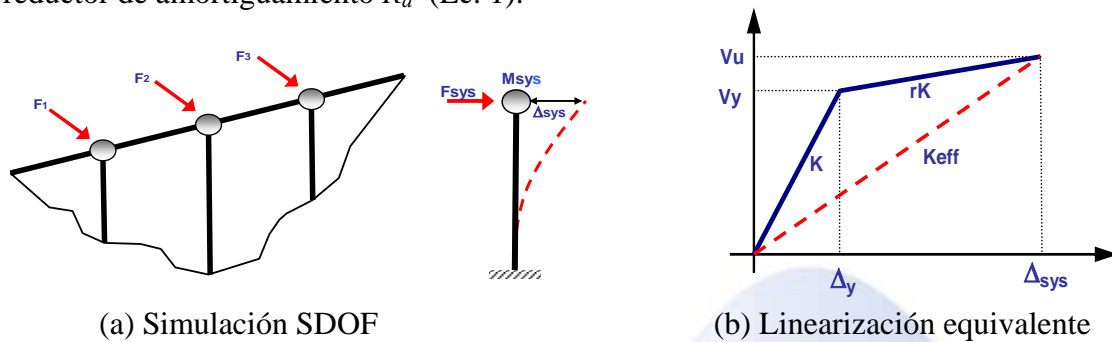


Figura 1. Caracterización de una estructura equivalente a un SDOF

Para obtener el periodo efectivo de la estructura equivalente, se ingresa en el espectro de desplazamiento con el desplazamiento objetivo  $\Delta_{sys}$ , el mismo que se selecciona de acuerdo con el estado límite de comportamiento deseado. El periodo efectivo  $T_{eff}$  se usa para calcular la rigidez efectiva  $K_{eff}$  (Ec. 2) y el cortante basal de diseño  $V$  (Ec. 3). El cortante basal de diseño se distribuye en los elementos estructurales de acuerdo con su rigidez secante para una respuesta máxima, la estructura es entonces diseñada de acuerdo a los principios de diseño por capacidad, para garantizar el desarrollo de los mecanismos de falla deseados.

$$R_d = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi_{sys}}} \quad \text{Ec. 1}$$

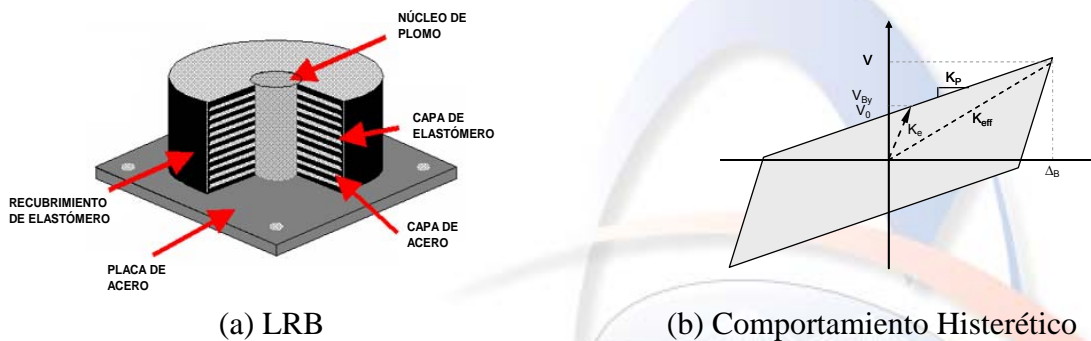
$$K_{eff} = \frac{4\pi^2 M}{T_{eff}^2} \quad \text{Ec. 2}$$

$$V = K_{eff} \Delta \quad \text{Ec. 3}$$

#### 4. PRINCIPIOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO

El aislamiento sísmico es una estrategia de diseño que va ganando popularidad, se fundamenta en el desacoplamiento de la estructura del movimiento del suelo para protegerla del efecto de los sismos. El aislamiento da flexibilidad al movimiento horizontal y rigidez al movimiento vertical, produciendo una reducción de las fuerzas sísmicas mediante un incremento de la capacidad de disipación de energía y del periodo fundamental, reduciendo la aceleración de la superestructura.

**Apoyos Elastoméricos con Núcleo de Plomo (LRB).**- Dispositivo laminado de elastómero compuesto de placas de acero y caucho construidas en capas alternadas (Fig. 2a), que en su interior posee un núcleo de plomo. Posee la capacidad de soportar la combinación de cargas verticales, proveer de flexibilidad horizontal, restauración de fuerzas y amortiguamiento.



(a) LRB

(b) Comportamiento Histerético

Figura 2. Aislador Elastomérico con núcleo de plomo

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 2b). La relación fuerza-desplazamiento del LRB se aproxima a una relación bilineal, que presenta una rigidez elástica inicial.

#### 5. REVISIÓN DE LOS MODELOS DE AMORTIGUAMIENTO

**5.1 Modelo de Amortiguamiento Menshin.**- Se basa en la relación de áreas propuesta por Jacobsen (1930) la misma que tiene como fundamento la combinación de todos los parámetros que intervienen en el diagrama bilineal fuerza-desplazamiento (Ec. 4).

$$\xi_B = \frac{2 * V_0 * \left[ \Delta_B + \left( \frac{V_0}{K_p - K_e} \right) \right]}{\pi * \Delta_B * (V_0 + \Delta_B * K_p)} \quad \text{Ec. 4}$$

El amortiguamiento según el diseño Menshin se basa en combinar el amortiguamiento de sus elementos: LRB, pilas, fundaciones y superestructura, obteniendo un valor representativo de amortiguamiento para el sistema total (Ec. 5).

$$\xi_{SYS} = \frac{\sum K_{Bi} \times \Delta_{Bi}^2 \times \left( \xi_{Bi} + \frac{\xi_{Pi} \times K_{Bi}}{K_{Pi}} \right)}{\sum K_{Bi} \times \Delta_{Bi}^2 \left( 1 + \frac{K_{Bi}}{K_{Pi}} \right)} \quad \text{Ec. 5}$$

**5.2 Modelo de Amortiguamiento AASTHO.-** La combinación de amortiguamiento se hace directamente para el sistema (Ec. 6), basado en la relación de áreas propuesta por Jacobsen, y en función de los parámetros que intervienen en el diagrama bilineal de fuerza-desplazamiento

$$\xi_{sys} = \frac{2 \times V_0 \times (\Delta_B - \Delta_{By})}{\pi \times (\Delta_B + \Delta_p)^2 \times K_{eff}} \quad \text{Ec. 6}$$

**5.3 Modelo Bilineal.-** Se encuentra en base a un sistema sustituto, que depende básicamente de la ductilidad del dispositivo  $\mu$ .

$$\xi_B = 39.144 \times \left( 1 - \frac{1}{\mu^{0.5}} - 0.1 \times r \times \mu \right) \left( 1 + \frac{1}{(T + 0.85)^4} \right) \quad \text{Ec. 7}$$

La combinación de amortiguamiento del sistema pila-aislador (Ec. 8) se basa en el trabajo realizado de la pila y del dispositivo (Priestley, et al, 1996).

$$\xi_s = \frac{\xi_B * \Delta_B + \xi_P * \Delta_P}{\Delta_B + \Delta_P} \quad \text{Ec. 8}$$

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

Se presenta dos ejemplos de diseño, el primero, se trata de un sistema en serie pila-LRB, con su respectiva evaluación mediante un análisis no lineal de historia en el tiempo (NTHA). El segundo ejemplo trata de un puente continuo con aislamiento sísmico del tipo LRB.

## 6.1 Diseño Directo Basado en Desplazamientos de un sistema en serie pila-LRB.

Una pila que soporta una superestructura simplemente apoyada dotada de dispositivos tipo LRB (Fig. 4) es diseñada mediante DDBD y comparada con el diseño Menshin y AASHTO. Los objetivos de diseño son: lograr que bajo la demanda sísmica especificada (Fig. 3), 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 LRB no supere  $\Delta_{max}=0.15\text{m}$ . Para verificar el diseño por los distintos métodos se realizó un NTHA.

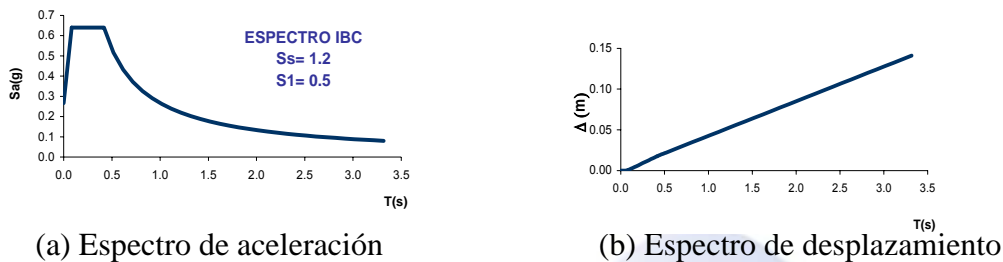


Figura 3. Amenaza sísmica de diseño

Para el diseño sismorresistente se asume que la pila ya ha sido diseñada para resistir cargas gravitacionales, el peso que aporta la superestructura a la pila es 250 kN/m.

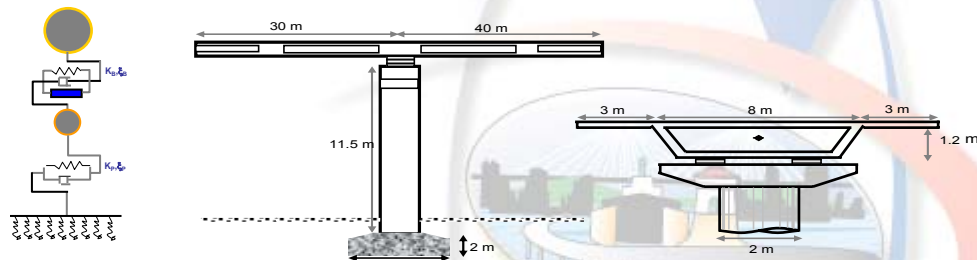


Figura 4. Sección transversal adoptada

El sistema consiste en una pila circular con un diámetro  $D=2\text{m}$ , cimentada a nivel del suelo. Las propiedades del hormigón son:  $f'c = 28\text{ MPa}$ ,  $f_y = 420\text{ MPa}$  y su peso específico,  $\gamma_H = 24\text{ KN/m}^3$ . Las propiedades del LRB son:  $G_R = 640\text{ KN/m}^2$ ,  $G_L = 130000\text{ KN/m}^2$ ,  $q_{Ly} = 8500\text{ KN/m}^2$ . El amortiguamiento para la pila es  $\xi_P = 5\%$  y del LRB es  $\xi_B = 9\%$ , por lo tanto para el sistema el amortiguamiento es  $\xi_{sys} = 9.22\%$ , estos valores se obtuvieron a partir de las ductilidades:  $\mu_P = 1$  y  $\mu_B = 2.4$  para la pila y para el LRB respectivamente. Para determinar  $T_{eff}$  el espectro de aceleración

propuesto es convertido a un espectro de desplazamientos (Fig. 4) y escalado en función del  $\xi_{sys}$  obteniendo un  $T_{eff} = 2.42$  s. A partir del periodo efectivo determinamos  $K_{eff} = 12197.26$  KN/m y  $V = 1546.84$  KN, que nos permitirá determinar el cortante de fluencia del LRB  $V_y = 1280$  KN. Determinamos que es necesario dos LRB, con un diámetro para el elastómero de  $D_R = 1.1$  m y para el plomo de  $D_L = 0.22$  m. Para finalizar el diseño se realizó el chequeo correspondiente para la pila y para los LRB, dando resultados satisfactorios.

## 6.2 Diseño de un puente continuo con aislamiento sísmico del tipo LRB.

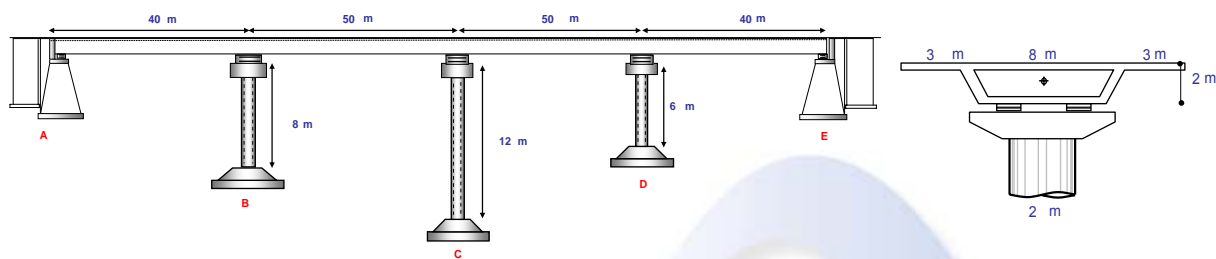


Figura 5. Puente diseñado

Se presenta el diseño longitudinal de un puente (Fig. 5) de 180 m de longitud, su superestructura es continua con cuatro vanos de 40m y 50m, pesa 190 kN/m, la conexión entre los estribos y pilas con la superestructura es a través de los LRB. Las pilas son de diámetro constante igual a 2 m y altura de 8 m para la pila B, 12 m para la pila C y 6m para la pila D. Debido a la rigidez de la superestructura, se espera que el desplazamiento en las cabezas de todas las pilas sea el mismo. El cortante se distribuye en los estribos en un 10% y el resto en las pilas, durante la acción sísmica las pilas y estribos permanecen elásticas. El objetivo del diseño es que bajo la acción sísmica (Fig. 3), las pilas no fluyan y los LRB alcancen  $\Delta_B = 0.15$  m.

*Paso 1. Capacidad de desplazamiento de cada pila.*- Debido a que las pilas permanecen elásticas, el desplazamiento meta de cada pila es igual al desplazamiento de fluencia, por lo tanto su capacidad de desplazamiento es: 0.056m, 0.12m, 0.03m, para las pilas B, C y D respectivamente. Del análisis se desprende que la pila D, controlará la capacidad de desplazamiento del puente que aportan las pilas. El desplazamiento dado por los LRB está en función de la deformación máxima a corte  $\Delta_B = 0.15$  m. Para la definición del SDOF equivalente, se toma  $\Delta_{sys} = 0.18$  m.

*Paso 2. Ductilidad y Amortiguamiento.* - la demanda de ductilidad en cada pila es igual a uno por permanecer elásticas. El amortiguamiento viscoso equivalente,  $\xi_i$  es entonces calculado para las pilas (Ec. 9) y para los LRB (Ec. 7), los mismos que nos permitan determinar el amortiguamiento del sistema en serie pila-LRB con la Ec. 8.

$$\xi_{PILA} = \xi_e + 25.226 \times \left( 1 - \frac{1}{\mu^{0.5}} \right) \quad \text{Ec. 9}$$

Las contribuciones de amortiguamiento deben combinarse para obtener el amortiguamiento del sistema sustituto. La combinación se realiza en proporción al cortante tomado por cada pila y por los estribos ( $v = 10\%$ ). Si se opta por una distribución de resistencia en la que el momento de diseño resulte igual para todas las pilas, la combinación de amortiguamiento se realiza en proporción inversa a la altura de las pilas, de acuerdo a la Ec. 10, resultando en  $\xi_{sys} = 16.14 \%$ .

$$\xi_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \xi_{sysi}}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad \text{Ec. 10}$$

*Paso 3. Determinación de la Resistencia requerida por el sistema.*-El amortiguamiento equivalente resulta en una reducción de la demanda sísmica que se cuantifica con el factor  $R_d$ . (Ec. 1), para la estructura en estudio,  $R_d = 0.64$ . Entramos en el espectro de desplazamiento para determinar el periodo efectivo  $T_{eff}$  necesario para alcanzar  $\Delta_{sys}$ , resultando  $T_{eff} = 3.32$  s.

La masa de la estructura proviene de la superestructura y de las pilas. Considerando que un 1/3 de las masas de las columnas genera fuerzas inerciales, la masa del puente es  $m = 3554$ . La rigidez secante  $K_{eff}$  (Ec. 3), que requiere el puente es: 12754.80 KN/m. La resistencia  $V$  que requiere el puente al nivel de respuesta máxima es: 2325.48 KN.

*Paso 4. Distribución de la resistencia.*-El cortante máximo se distribuye en la estructura en proporción inversa a la altura de cada pila y de acuerdo a la proporción de cortante transmitido a los estribos, dando como resultado momentos de diseño iguales en todas las pilas  $M = 2790.58$  KNm. En este punto, se debe chequear los momentos que resultan de efectos  $P-\Delta$ , los mismos que dieron resultados satisfactorios.

*Paso 5. Geometría de los LRB.*- Para determinar las dimensiones de los LRB se determina el cortante de fluencia  $V_y$ , que resulta en: 309.88KN, 221.89 KN, 147.93 KN, 295.85 KN y 309.88 KN para *A, B, C, D* y *E* respectivamente. Mediante  $V_y$  determinamos las dimensiones de los LRB, que se presentan más adelante.

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

### 7.1 Análisis comparativo de resultados para el sistema en serie pila-LRB.

En la tabla 3 se muestra los parámetros de mayor importancia del sistema pila-LRB. 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, AASTHO al igual que Menshin posee un elevado amortiguamiento. Además, los resultados obtenidos con el DDBD son similares a los obtenidos en el NTHA. Respecto a las dimensiones del LRB, para el diseño Menshin se obtiene menores dimensiones debido a que el amortiguamiento del sistema es mayor.

Tabla 3. Comparación de resultados

PARÁMETROS DEL SISTEMA	MENSIN		AASHTO		DDBD	
	DISEÑO	NTHA	DISEÑO	NTHA	DISEÑO	NTHA
Periodo Aislado (s)	3.80	3.11	2.48	2.59	2.42	2.49
Desplazamiento total (m)	0.07	0.14	0.13	0.14	0.13	0.13
Amortiguamiento (%)	11.90	15.99	12.76	9.57	9.22	9.34
Rigidez efectiva (KN/m)	13272.13	7438.70	11431.90	10542.45	12197.26	11461.50
Fuerza Lateral (KN)	982.72	988.59	1468.78	1463.13	1546.84	1527.00
Periodo inicial (s)	2.22	2.12	2.18	2.18	2.16	2.16
Diametro del Elast. (m)	1.1	1.1	1.14	1.14	1.14	1.14
Diametro del plomo (m)	0.22	0.22	0.285	0.29	0.29	0.29
Numero de LRB	2	2	2	2	2	2

### 8.2 Análisis de los resultados del puente continuo con aislamiento sísmico.

Se presenta únicamente el diseño longitudinal debido a que éste, controla el diseño final del puente puesto que la demanda de cortantes es mayor. En la tabla 4 se muestra las dimensiones de los LRB, en los estribos son iguales debido a que la transferencia de cortante es la misma, mientras que en las pilas debido a que el cortante se distribuye en función del inverso de la altura, las dimensiones de los LRB son diferentes, que en el ámbito constructivo es costoso, por tal razón se toma las dimensiones del LRB mayor, para todas las pilas. Para comprobar que las dimensiones asumidas para los LRB son aceptables se realizó el chequeo a pandeo, a estabilidad, y a deformación, dando valores confiables.

Tabla 4. Geometría del LRB

	ESTRIBOS	PILAS
LRB :	2	2
D <sub>Elastom</sub> (m) :	0.80	0.70
D <sub>PLOMO</sub> (m) :	0.14	0.14

## 9. CONCLUSIONES

El objetivo de revisión de la literatura existente sobre los métodos de diseño de puentes aislados, e implementación del DDBD para diseño sísmico de puentes aislados se han cumplido satisfactoriamente.

Una de las ventajas que se puede observar en el DDBD es que los puentes son diseñados para una respuesta estructural inelástica que permite que las estructuras alcancen un buen desempeño ante una acción sísmica.

## 10. RECOMENDACIONES.

Los resultados presentados son satisfactorios pero no lo suficientes para que la implantación del DDBD en puentes con aislamiento sísmico esté debidamente justificada. Se recomienda que esta investigación sea profundizada respecto a la aplicación de otro tipo de aislamiento sísmico.

## REFERENCIAS.

- AASHTO (2001). "Guide Specifications for seismic Isolation Design", American Association of State Highway and Transportation Officials; Washington D.C.
- Jacobsen L.S. (1930). "Steady forced vibrations as influenced by damping". ASME
- Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J. (2007) Displacement Based Seismic Design of Structures. Pavia, Italy.
- Shibata and Sozen, 1976. "Substitute Structure Method for Seismic Design". Journal of the Structural Division, ASCE, Vol 102, No ST1.
- Sugita, H., 1994. "Manual for Menshin design of highway Bridges". Public works research Institute, Ministry of construction, Japan.