

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

COLEIC, PANAMÁ 2007

CONCURSO DE PONENCIAS

TITULO: ESTUDIO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE
PUENTES MEDIANTE ANÁLISIS NO LINEAL ESTÁTICO

AUTOR:

José Morocho C.

ASESOR:

Vinicio Suárez Ch.

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se realiza un estudio de los métodos existentes para la verificación del desempeño sísmico de puentes, con base en el análisis no lineal estático. Los métodos estudiados son el método del espectro de capacidad ATC 40 y el método del coeficiente de desplazamiento FEMA 356 de acuerdo a las últimas revisiones propuestas en FEMA 440, adicionalmente se presenta un método para la determinación del punto de desempeño basado en los principios del Diseño Directo Basado en Desplazamientos.

Los ejemplos de evaluación que se presentan se enfocan en el desempeño sísmico de 11 pilas arriostradas de hormigón armado que forman parte de la subestructura de los puentes sobre la quebrada Zambiza en la autopista Simón Bolívar en el Nororiente de Quito y quebrada Gualo.

Para la determinación el desempeño sísmico de las pilas de los puentes en primera instancia se considera un modelo estructural con las columnas empotradas en la base (base rígida) despreciando la interacción suelo estructura, luego se considera este efecto (base flexible) acorde a las consideraciones propuestas en FEMA 440. Las pilas son evaluadas por los 3 métodos presentados. Los resultados del análisis no lineal estático son corroborados mediante el análisis no lineal de historia en el tiempo (NTHA).

2. OBJETIVOS

1. Determinar el desempeño sísmico de puentes a través del análisis no lineal estático. Los métodos estudiados son el método del espectro de capacidad ATC 40 y el método del coeficiente de desplazamiento FEMA 356, de acuerdo a las últimas revisiones propuestas en FEMA 440.
2. Proponer una nueva metodología para el desempeño sísmico de puentes basado en el Diseño Directo Basado en Desempeño DDBD.

3. MÉTODOS EXISTENTES PARA LA DETERMINACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE PUENTES

Las primeras bases para mejorar el diseño sísmico y el desempeño de edificaciones fueron propuestas por el comité de sismología de SEAOC después del terremoto de 1994 en Northridge. Con el advenimiento de esta filosofía, surgió la necesidad de contar con herramientas que ayuden a determinar de una manera rápida y efectiva el desempeño sísmico, tanto para estructuras nuevas como estructuras antiguas. Es así como toman auge los análisis no lineales estáticos. Uno de estos métodos es el método del espectro de capacidad CSM propuesto por Freeman (1975).

El método del CSM presentado por ATC 40 (1996) basado en linearización equivalente, requiere de un proceso gráfico iterativo que utiliza las curvas de demanda y de capacidad de la estructura para la determinación del punto de desempeño. En la versión original ATC propone tres procesos (A, B y C) para la determinación del punto de desempeño, de estos el proceso A recibió muchas críticas (Chopra 1999) ya que se aducen grandes deficiencias, como la no convergencia para algunos sistemas; y si el proceso converge entonces los resultados están alejados del desplazamiento real obtenido del análisis dinámico. Recientemente FEMA 440 (2005) revisa el método del espectro de capacidad de ATC, para el cual mantiene el concepto de linearización equivalente, pero propone nuevas ecuaciones para la determinación del periodo efectivo y amortiguamiento equivalente, y concluye que el método produce resultados aceptables.

Otro método para la determinación del punto de desempeño es el método del coeficiente de desplazamiento FEMA 356 (1994), en este el desplazamiento lineal elástico del sistema es modificado por una serie de factores con la finalidad de obtener el desplazamiento inelástico de la estructura. FEMA 440 revisa el método del coeficiente de desplazamiento de FEMA 356 y propone nuevas ecuaciones para la determinación de los factores de modificación de desplazamiento

4. MÉTODO BASADO EN LOS PRINCIPIOS DEL MÉTODO DE DISEÑO DIRECTO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS (DDBD)

En DDBD la estructura se diseña para que se deforme un específico desplazamiento meta, el cual está en función de nivel de desempeño estructural requerido. La rigidez y la resistencia de los elementos son el resultado del análisis a la inversa de los métodos tradicionales basados en fuerzas y otros métodos basados en desplazamientos.

En este trabajo se emplea las ecuaciones de diseño propuestas por Priestley (2000) y principios básicos de estructuras para la determinación del punto de desempeño. El método que se propone es similar al método de ATC, el punto de desempeño queda determinado por la intersección de la curva pushover y la curva de demanda.

A continuación se detalla los pasos a seguir para la determinación punto de desempeño de una estructura de acuerdo al DDBD.

1. Realizar el pushover y registrar el desplazamiento. En el caso de un puente, el desplazamiento de los nudos en donde se conectan las pilas con la superestructura. En el caso de una pila arriostrada, el desplazamiento los nudos del cabezal y la riostra, y convertirlo en una curva equivalente de todo el sistema eq (3-1), como se muestra en **Fig. 3-1**. Determinar el V_y y Δ_y de la representación bilineal de la curva pushover.

$$\Delta_{sis} = \frac{\sum m \cdot \Delta_i^2}{\sum m \cdot \Delta_i} \quad (3-1)$$

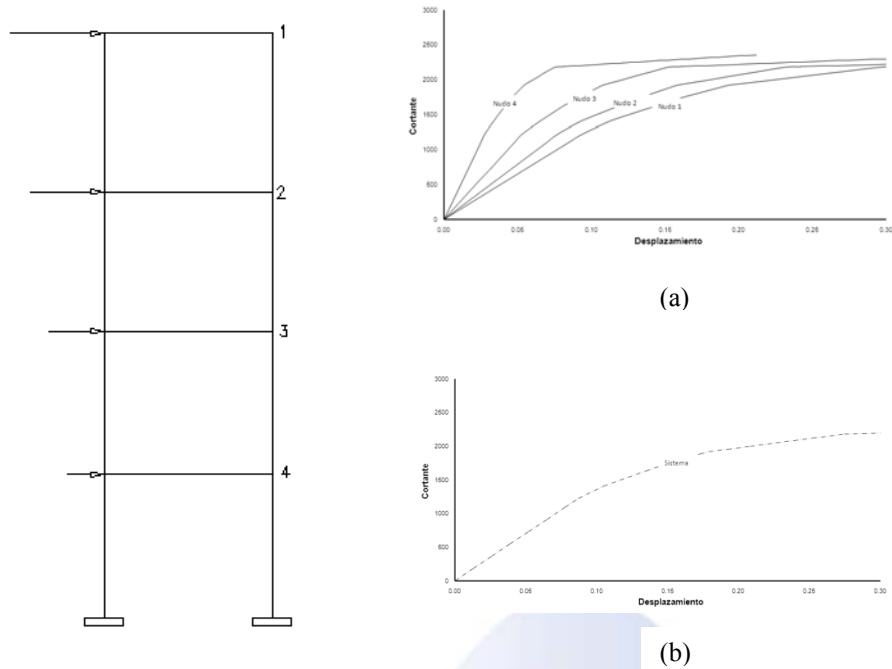


Fig. 3-1 Curvas Pushover a) distintos puntos, (b) sistema equivalente

2. Suponer un punto de demanda $V-\Delta$ de la curva pushover y determinar la ductilidad de desplazamiento por medio de eq (3-2).

$$\mu = \frac{\Delta}{\Delta_y} \quad (3-2)$$

3. Con el valor de ductilidad determinar el amortiguamiento equivalente, se pueden utilizar diversas ecuaciones o curvas para la determinación del ζ_{eq} , dependiendo del tipo de elemento o del modelo estructural **Fig. 3-2**
4. Con el valor Δ , entrar al espectro de desplazamiento para amortiguamiento equivalente y determinar el periodo efectivo del sistema T_{eff} **Fig. 3-3**, una vez obtenido el periodo encontrar la rigidez efectiva k_{eff} eq (3-3)

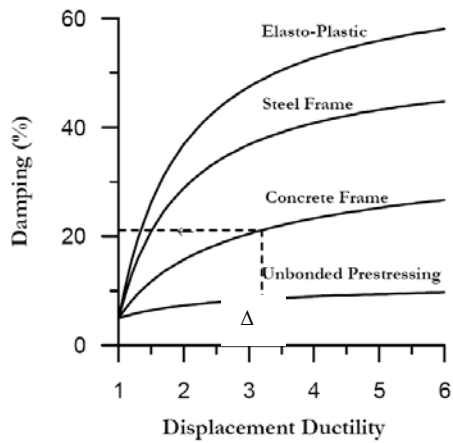


Fig. 3-2 Modelos de amortiguamiento

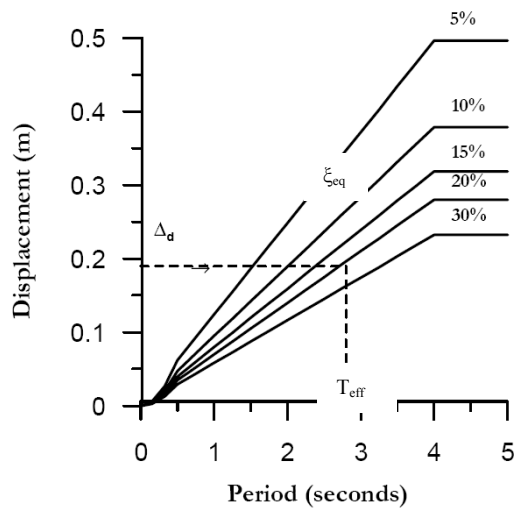


Fig. 3-3 Curvas Desplazamiento vs periodo en función del amortiguamiento

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2 \cdot W}{9.81 \cdot T_{eff}^2} \quad (3-3)$$

- Determinar el cortante de demanda $V_{dem} = \Delta \cdot K_{eff}$, con esto tenemos un punto de demanda para la estructura, aumentar o disminuir el punto de demanda supuesto en el paso 2 y se repetir el proceso, con lo que se obtiene una serie de posibles puntos de demanda que unidos forman la curva de demanda sísmica. El punto de desempeño para el sistema equivalente se encuentra en la intersección de la curva pushover y la de demanda. Este se transforma a desplazamiento de un nudo en particular para que pueda ser comparado con los otros métodos. Se traza una línea horizontal que pase por el punto de desempeño del sistema y se obtiene el correspondiente valor de desplazamiento para cada nudo, que corresponde a la intersección de la línea horizontal y la curva pushover del nudo **Fig. 3-4**.

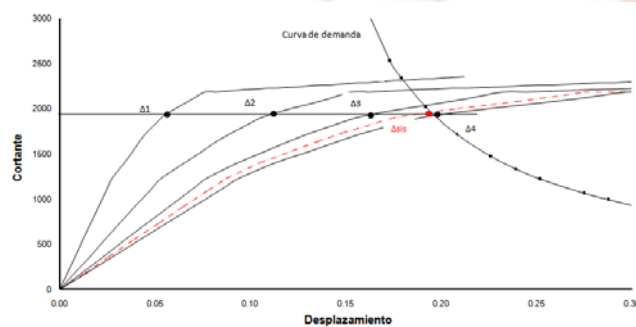


Fig. 3-4 Punto de demanda mediante DDBD

5. RESULTADOS

Un resumen de del desempeño de las pilas del puente de los puentes de Zambiza bajo el sismo de demanda especificado en la sección previa se presenta en la **Tabla 5-1**, en esta tabla se compara los desplazamientos de desempeño obtenidos por varios métodos con el obtenido del NTHA. Del análisis de estos resultados se puede concluir que ATC 40 predice con mayor exactitud el desempeño de las pilas para base rígida y base flexible con una variación del 5 y 9 % respectivamente **Fig. 5-1**.

PILA	Método	Base rígida		Base flexible	
		Δ	Variación %	Δ	Variación %
ESTE - 1	ATC 40	0.051	1	0.094	7
	FEMA 356	0.051	1	0.103	11
	DDBD	0.060	9	0.098	9
	NTHA	0.050		0.083	
ESTE - 2	ATC 40	0.181	6	0.195	6
	FEMA 356	0.188	8	0.216	11
	DDBD	0.195	10	0.210	10
	NTHA	0.160		0.173	
ESTE - 3	ATC 40	0.046	7	0.092	13
	FEMA 356	0.047	8	0.098	16
	DDBD	0.056	17	0.092	13
	NTHA	0.040		0.070	
OESTE - 1	ATC 40	0.052	2	0.093	5
	FEMA 356	0.053	3	0.098	8
	DDBD	0.061	10	0.093	5
	NTHA	0.050		0.084	
OESTE - 2	ATC 40	0.136	6	0.178	14
	FEMA 356	0.144	9	0.188	17
	DDBD	0.133	5	0.182	16
	NTHA	0.120		0.133	

Tabla 5-1 Resumen de puntos de Desempeño para los puentes sobre la quebrada de Zambiza

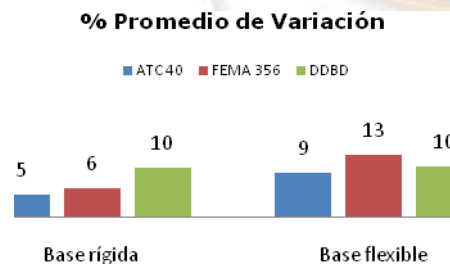


Fig. 5-1 Variación en % de los 3 métodos respecto al NTHA para los puentes sobre la quebrada de Zambiza

Un resumen de del desempeño de las pilas del puente de los puentes de Gualo bajo el sismo de demanda especificado en la sección previa se presenta en la **Tabla 5-2**, en esta tabla se compara

los desplazamientos de desempeño obtenidos por varios métodos con el obtenido del NTHA. Del análisis de estos resultados se puede concluir que ATC 40 predice con mayor exactitud el desempeño de las pilas para base rígida y base flexible con una variación del 7 y 9 % respectivamente **Fig. 5-2**.

PILA	Método	Base rígida		Base flexible	
		Δ	Variación %	Δ	Variación %
ESTE - 1	ATC 40	0.062	10	0.095	12
	FEMA 356	0.061	10	0.096	13
	DDBD	0.072	18	0.100	15
	NTHA	0.050		0.074	
ESTE - 2	ATC 40	0.188	2	0.213	2
	FEMA 356	0.199	5	0.229	1
	DDBD	0.215	9	0.240	4
	NTHA	0.180		0.223	
OE,ESTE - 3	ATC 40	0.099	11	0.123	12
	FEMA 356	0.100	11	0.120	11
	DDBD	0.110	16	0.130	15
	NTHA	0.080		0.097	
OESTE - 1	ATC 40	0.112	6	0.145	14
	FEMA 356	0.117	8	0.144	14
	DDBD	0.125	11	0.155	18
	NTHA	0.100		0.108	
OESTE - 2	ATC 40	0.184	4	0.214	6
	FEMA 356	0.198	8	0.207	4
	DDBD	0.207	10	0.220	7
	NTHA	0.170		0.191	

Tabla 5-2 Resumen de puntos de desempeño para los puentes sobre quebrada Gualo

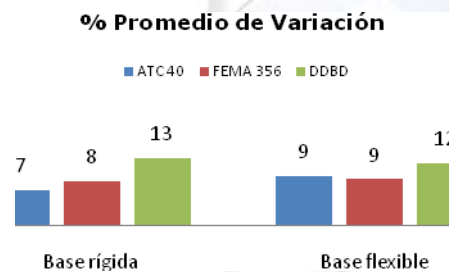


Fig. 5-2 Variación en % de los 3 métodos respecto al NTHA para los puentes sobre quebrada de Gualo

6. CONCLUSIONES

1. Si tomamos como referencia los resultados obtenidos del NTHA se observa que el método del espectro de capacidad resulta ser más efectivo para determinar el punto de desempeño.

2. Como se observa en todos los casos expuestos, el resultado obtenido del NTHA análisis realizado con RUAUMOKO resulta ser menor a los obtenidos con los 3 métodos expuestos. Además los resultados son muy sensibles al valor de amortiguamiento elegido, esto se demostró al cambiar el valor de amortiguamiento, con lo que se consiguieron resultados del punto de desempeño para pila del ejemplo que están en el orden de 0.16 m con 5 % de ξ y 0.92 con 0 % de ξ .
3. Que el método implementado resulta ser de fácil aplicación y de uso general puesto que trabaja directamente con la curva pushover y que el proceso iterativo es rápido y sencillo. además tiene la ventaja de utilizar los modelos de amortiguamiento de DDBD que actualmente han sido desarrollados para varias topologías estructurales.
4. Respecto a comportamiento de las pilas de Zambiza se concluye que:

Tomando como referencia la demanda sísmica obtenida con el NTHA, se espera que bajo el sismo de diseño ninguna de las pilas alcance el estado limite de serviciabilidad.

ATC 40 predice con mayor exactitud el desempeño de las pilas para base rígida y base flexible con una variación del 5 y 9 % respectivamente

5. Respecto a comportamiento de las pilas de Gualo se concluye que:

El comportamiento de la riostra es frágil ya que la falla ocurre por el efecto de corte. Para mejorar la capacidad de esta se le puede proporcionar de un encamisado de fibra de carbono.

Tomando como referencia la demanda obtenida con el NTHA se espera que bajo el sismo de los desplazamientos de la pilas estén próximos al que producirá falla por corte de la riostra.

ATC 40 predice con mayor exactitud el desempeño de las pilas para base rígida y base flexible con una variación del 7 y 9 % respectivamente

RECOMENDACIONES

1. Seguir con el estudio del análisis con el programa RUAUMOKO a fin de llegar a un mejor entendimiento de su manejo y de los parámetros de entrada.

REFERENCIAS

1. Chopra A. and Goal R., (1999), *"CAPACITY-DEMAND-DIAGRAM METHODS FOR ESTIMATING SEISMIC DEFORMATION OF INELASTIC STRUCTURES: PDF SYSTEMS"*, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
2. FEMA 440. "IMPROVEMENT OF NONLINEAR STATIC SEISMIC ANALYSIS PROCEDURES". 2005
3. FEMA 356., (1994), *"SEISMIC REHABILITATION OF FEDERAL BUILDINGS: A BENEFIT/COST MODEL/ VOLUME 2"*. VSP Associates, Inc.
4. CALTRANS, (2004), *"SEISMIC DESIGN CRITERIA"*, VERSION 1.3
5. Priestley M. and Kowalsky M., (2000), *"DIRECT DISPLACEMENT - BASED SEISMIC DESIGN OF CONCRETE BUILDINGS"*. BULLETIN OF THE NEW ZEALAND SOCIETY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING. Vol. 33.
6. Kowalsky M., (2000), *"DEFORMATION LIMIT STATES FOR CIRCULAR REINFORCED CONCRETE BRIDGE COLUMNS"*. JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING.
7. Wai-Fah Chen, Lian Duan, CRC Press, (2000), "Bridge Engineering Handbook".
8. Chung C. Alayed H. "SEISMIC ANALYSIS OF BRIDGES USING DISPLACEMENT-BASED APPROACH".
9. SEAOC., (2003), "Revised Interim Guidelines Performance-Based Seismic Engineering / Force-Displacement Approach for Performance-Based Seismic Engineering". Blue Book.