

## **COMPARACIÓN DE LAS NORMAS SÍSMICAS MÁS UTILIZADAS PARA Puentes CONTINUOS EN EL PERÚ Y SUS MÉTODOS DE ANÁLISIS**

Mg. Daniel Quiun Wong<sup>(1)</sup>, Ing. Jose Acero Martínez<sup>(2)</sup>

<sup>1</sup> Profesor, Pontificia Universidad Católica del Perú

<sup>2</sup> Egresado de la Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú

### **1. Resumen**

La norma actual sismo resistente NTE-E0.30 del Reglamento Nacional de Construcción en el Perú (Ref. 1), ha sido concebida para edificaciones y no incluyen a los puentes, por lo tanto en el Perú se utiliza una gran diversidad de códigos sísmicos para puentes, entre los más utilizados están: el AASHTO STANDARD, AASHTO LRFD, CALTRANS y las Especificaciones para diseño Sismo-Resistente de Puentes Carreteros de Japón.

El presente trabajo tiene el objetivo principal de comparar las consideraciones sísmicas de estos reglamentos para puentes continuos vehiculares, tales como los que se encuentran en vías expresas, puentes urbanos de carreteras tanto principales como secundarios cuya superestructura esté compuesta por losas, vigas T, vigas cajón y/o tijerales; adecuándolas a las condiciones usuales en el Perú. Para ello se compara los coeficientes de aceleración(Z), suelo(S), coeficiente de respuesta sísmica(Espectro de respuesta) y factores de reducción de fuerza sísmica(R). Finalmente, se dan algunos alcances para contribuir a una futura norma de puentes y complementar la Propuesta de Reglamento del Ministerio de Transporte y Comunicaciones del Perú(Ref. 2)

### **2. Introducción**

Cuando se realiza un análisis sísmico de un puente continuo, se consideran varios parámetros sísmicos y muchas veces se utilizan reglamentos no adecuados. En este estudio se va a evaluar todos estos parámetros basándose en estudios ya realizados tales como los de zonificación sísmica, coeficientes de sitio y otros, obteniéndose finalmente un resumen general aplicable, que servirá de guía para diseñadores y estudios subsecuentes que se realicen en puentes.

La comparación se hará mediante una tabla resumen y así mismo se presenta en este artículo un marco general para contribuir a una futura norma sísmica de puentes.

### **3. Metodología**

#### **3.1.Comparación de las normas para puentes.**

En la Tabla N° 1, se muestra la comparación de las Normas consultadas para este trabajo.

Tabla N° 1. Comparación de las normas sísmicas para puentes(Ref. 3 @ 13)

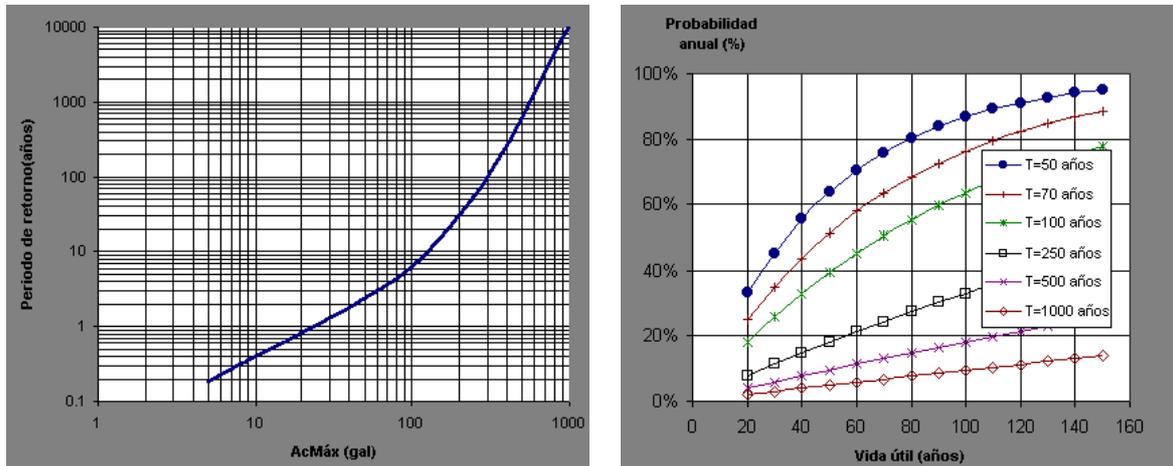
Característica	AASHTO	AASHTO-LRFD	CALTRANS	JAPAN
1. Generalidades	a. Filosofía de diseño	Resistir sismos menores dentro del rango elástico sin sufrir daños. Resistir sismos moderados dentro del rango elástico con algún daño reparable. Resistir sismos severos sin llegar al colapso del conjunto o una parte del puente.	Implica integridad estructural, sin colapso durante un movimiento sísmico. Adecuada capacidad de ductilidad.	Reparación ante sismos moderados y pequeños. Evitar el colapso durante sismos extraordinarios.
2. Carga Sísmica.	a. Respuesta sísmica	Diseño elástico Espectral	Diseño elástico Espectral	Diseño elástico Espectral para magnitudes de evento de B +/-
	b. Periodo de retorno.	475 años	475 años, especifica que puede ser mayor	No define.
	c. Factor Zona	Mapa de contorno de aceleraciones máximas probables en roca	Mapa de contorno de aceleraciones máximas y un promedio de una función de atenuación a la distancia de la falla.	Mapa de factor de modificación de zona.
	d. Consideraciones de importancia.	Dos categorías: esenciales y otros.	Tres categorías: críticos, esenciales y otros.	Factor de modificación de importancia basado en una particularidad del puente
	e. Efectos de sitio	Cuatro tipos de perfil de suelo.	Cinco tipos de perfil de suelo.	Tres tipos de perfil de suelo.
	f. Factor de modificación(R)	No considera la clasif. Por importancia	Considere la clasif. Por importancia	Exigentes en zonas de alta sismicidad.
	g. Amortiguamiento	5% del critico		

3. Análisis.	a. Selección del método.	Depende de la categoría de comportamiento sísmico.	Depende de la regularidad y la importancia del puente	Basado en la complejidad de la estructura solamente. Estructuras de $T > 3$ seg. son casos especiales.	Basado en la complejidad de la estructura
	b. Estático equivalente	Carga uniforme lateral			Método del pórtico con carga estática.
	c. Dinámico elástico	Análisis multimodal (respuesta espectral), también Tiempo-Historia.			
	d. Estático Inelástico	No requiere	No requiere	No requiere	Solo casos especiales.
	e. Dinámico Inelástico	No requiere	No requiere	No requiere	Solo casos especiales.
	f. Combinación direccional.	Caso 1: L+0.3-T Caso 2: T+0.3-L			Cargas longitudinal y transversal examinadas separadamente
4. Efectos Sísmicos.	a. Fuerza de diseño	Reducido por un valor de R		Considera ductilidad y riesgo	Fuerzas elásticas afectadas por valores de ductilidad.
	b. Desplazamiento	Elásticos	Elásticos	Usa rigidez fisurada.	No específica.
	c. Ancho de apoyo mínimo.	Evaluado para acciones sísmica, y de acuerdo a condiciones de tramo.			No específica.

### 3.2. Parámetros sísmicos

**3.2.1. Coeficientes de Aceleración**

El coeficiente de aceleración se determina realizando un análisis de peligro sísmico, aplicando la metodología desarrollada por Cornell(Ref. 14) en términos probabilísticos. Esta metodología integra información sismotectónica, parámetros sismológicos y leyes de atenuación regionales para los diferentes mecanismos de ruptura. El resultado es una curva de peligro sísmico, donde se relaciona la aceleración y su probabilidad anual de excedencia(Fig. 1)



**Fig. N° 1. Curva de peligro sísmico y Probabilidad anual vs Vida útil.**

Para la propuesta en el Perú simplemente se consideran las tres zonas del reglamento sismorresistente E-030(Ref. 1), pero es más detallado el estudio realizado por Alva y Castillo(Ref. 15), con su mapa de distribución de isoaceleraciones.

**3.2.2. Efectos de sitio o coeficiente de sitio.**

El suelo bajo el sitio del puente debe ser investigado para efectos de evaluar su potencial de amplificación de onda sísmica desde la base rocosa hasta la superficie, considerando las propiedades dinámicas del suelo.

Los efectos de sitio son bastante detallados para todos los reglamentos, pero la norma sismorresistente peruana E-030(Tabla N° 2), contiene periodos de vibración del suelo, valor que se utiliza para evaluar el espectro de respuesta, lo cual no ocurre en el reglamento AASHTO.

**Tabla N° 2. Coeficiente de sitio o de suelo de la norma E-0.30.**

Tipo de perfil de suelo	Descripción	Tp (s)	Coficiente de Sitio(S)
S1	- Roca o suelos muy rígidos con velocidades de onda de corte altas.	0.4	1.0
S2	- Suelos intermedios, con características intermedias entre las de S1 y S3.	0.6	1.2
S3	- Suelos flexibles o con estratos de gran espesor.	0.9	1.4
S4	- Suelos excepcionalmente flexible y sitios donde las condiciones geológicas y / o topográficas sean particularmente desfavorables.	-	-

**3.2.3. Coeficiente de Respuesta Sísmica Elástica(Espectro Elástico).**

La NTE E-030(Ref. 1), indica que el espectro elástico es:

$$V = Z \cdot U \cdot C \cdot S \cdot P \dots(1) \quad C = 2.5 \cdot \left( \frac{T_p}{T} \right) \leq 2.5 \dots(2) \quad Sa = Z \cdot U \cdot C \cdot S \cdot g \dots(3)$$

La norma AASHTO LRFD(Ref. 4), indica:

$$C = \frac{1.2 \cdot Z \cdot S}{T^{2/3}} \leq 2.5 \cdot Z, \text{ (Suelos Tipo S1 y S2)} \dots(4)$$

$$C = \frac{1.2 \cdot Z \cdot S}{T^{2/3}} \leq 2.0 \cdot Z, \text{ (Suelos Tipo S3 y S4)} \dots(5)$$

$$C = Z \cdot (0.8 + 4 \cdot T), \text{ (Suelos Tipo S3 y S4 con } T < 0.3 \text{ segundos.)} \dots(6)$$

$$C = \frac{3 \cdot Z \cdot S}{T^{4/3}}, \text{ (Con } T > 4.00 \text{ segundos)} \dots(7)$$

De donde:

V=cortante sísmico.

Z= factor de zona(coeficiente sísmico)

U= factor de uso=1

S= factor de suelo o sitio.

C= coeficiente sísmico, dado por la expresión (2)

P= peso de la superestructura y subestructura contribuyente.

Sa= pseudoaceleración espectral, expresión(3)

g= aceleración de la gravedad.

T= periodo de la estructura de la estructura.

Tp= periodo fundamental del suelo.

Se muestra en la Fig. N° 2, la comparación de los espectros elásticos de las 6 aceleraciones horizontales, registrados en el IGP de Lima, con la norma peruana de 1997, 2003 y la AASHTO 1996. En la Figura N° 3, se muestra la comparación de los coeficientes sísmicos de los diversos códigos para puentes según Kawashima (Ref. 5). En la Fig. N° 4 se compara el espectro de desplazamientos espectrales para Z=0.4 y S=1(Tipo de perfil S1).

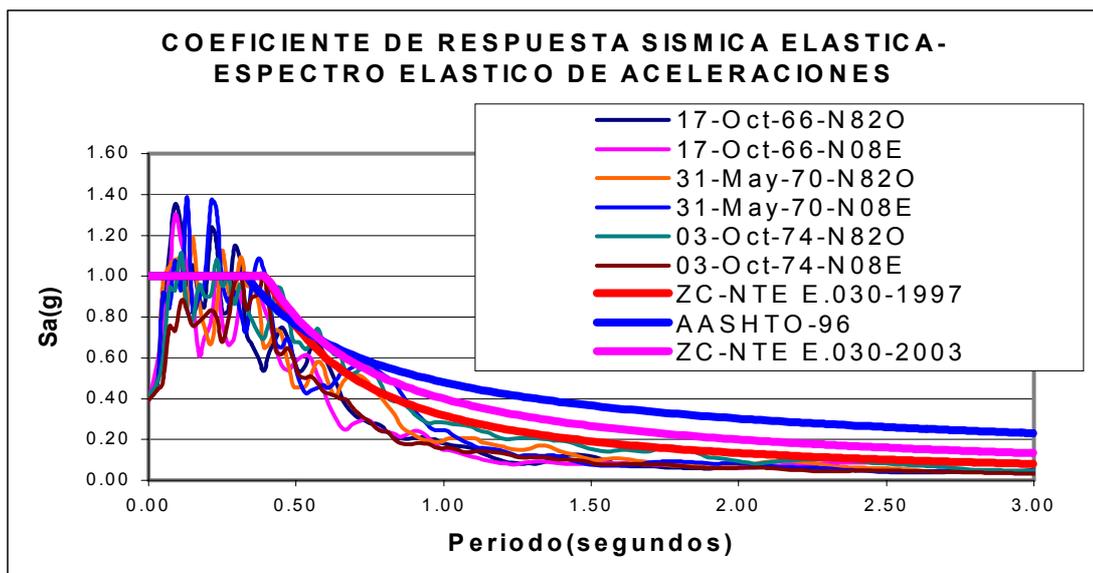


Fig. N° 2. Comparación de Espectros de Pseudoaceleración elásticos para el Perú

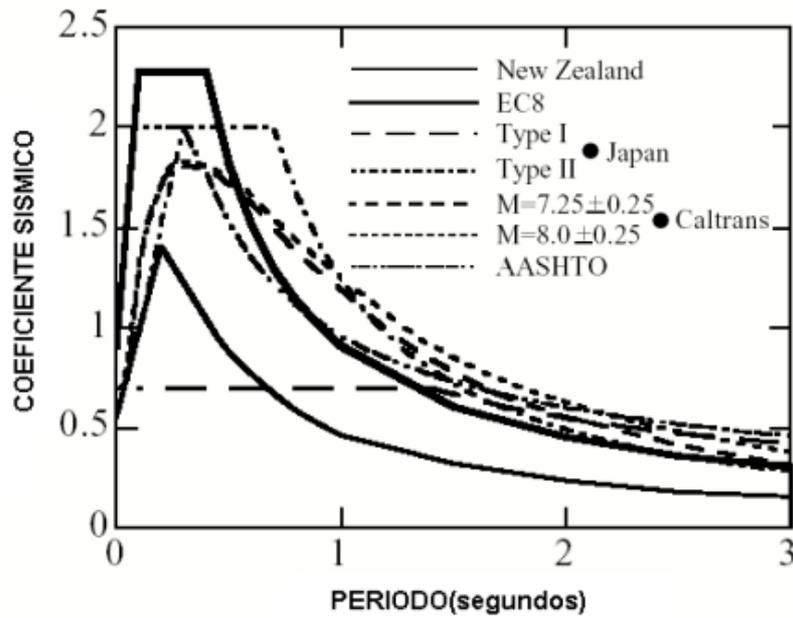


Fig. N° 3. Comparación de Coeficientes sísmico de los diversos códigos para puentes según Kawashima(Ref. 3)-5% Amortiguamiento

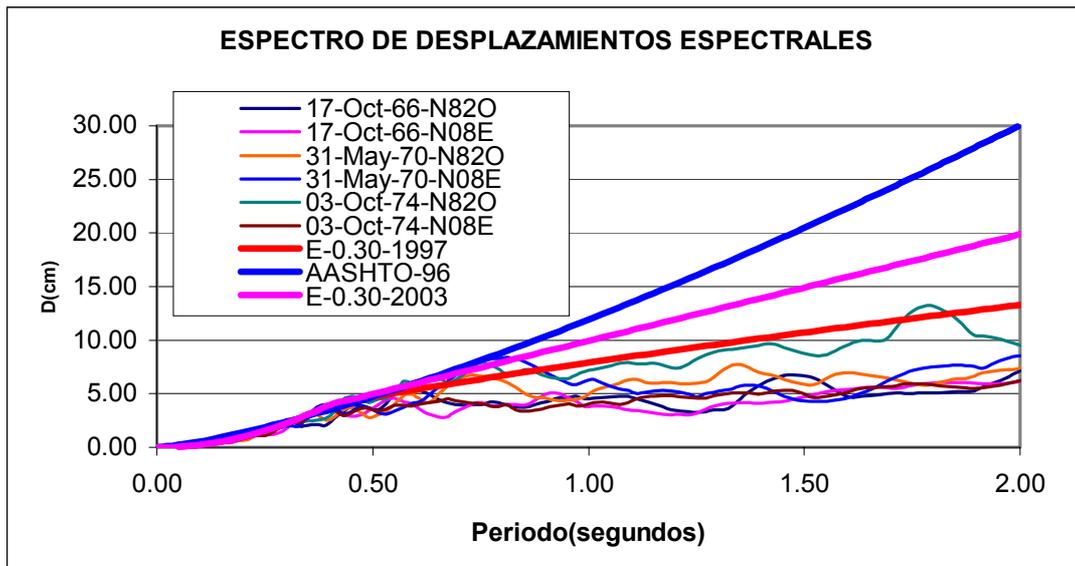


Fig. N° 4. Comparación de Espectros de desplazamiento(5% Amortiguamiento)

### 3.2.4. Factor de Modificación de Respuesta(R)-Ver tabla N° 3

Se propone utilizar el reglamento AASHTO LRFD, que considera valores de R menores para puentes clasificados como críticos y esenciales, ello estaría indicando que la fuerza sísmica es mayor; mientras los valores de R para puentes clasificados como Otros tiene mayor valor de R.

**Tabla N° 3. Factor de Modificación de Respuesta(R) de la AASHTO LRFD, propuesta para el Perú**

SUB – ESTRUCTURA <sup>(1)</sup>	R			CONEXIONES <sup>(3)</sup>	R
	Crítico	Esencial	Otros		
Pilar tipo muro <sup>(2)</sup>	1.5	1.5	2	De la subestructura al estribo	0.8
Pilote de concreto reforzado Únicamente pilotes verticales.	1.5	2	3	Juntas de expansión de una luz de la subestructura	0.8
Uno o más pilotes inclinados	1.5	1.5	2		
Columnas individuales			3	Columnas y pilares sobre pilotes a la superestructura	1.0
Pilotes de acero o acero compuesto con concreto: Únicamente pilotes verticales.	1.5	3.5	5	Columnas o pilares a la cimentación	1.0
Uno o más pilotes inclinados	1.5	2	3		
Columnas múltiples	1.5	3.5	5		

<sup>(1)</sup> El factor R se debe usar para ambos ejes ortogonales de la subestructura.

<sup>(2)</sup> Un pilar tipo placa puede diseñarse como columna en la dirección más débil siempre que cumpla todos los requisitos sísmicos de columna, en tal caso puede utilizarse el coeficiente R de columnas solas.

<sup>(3)</sup> Se recomienda que las conexiones se diseñen para las fuerzas máximas que puedan desarrollarse por plastificación de la columna o las columnas del pórtico. Estas fuerzas son a menudo significativamente menores que aquellas obtenidas usando el factor R=1.

### 3.2.5. Selección del método de análisis

El AASHTO LRFD-98, indica que el método de análisis depende de la regularidad y de la importancia del puente. La regularidad es función del número de tramos y de la distribución de pesos y rigideces, tal como se muestra en las tablas N° 4 y 5. Estas tablas han sido adecuadas al Perú.

**Tabla N° 4. Requerimientos para puentes regulares**

Parámetro	Valor				
Número de tramos	2	3	4	5	6
Máximo ángulo subtendido para puente curvo	90	90	90	90	90
Máxima longitud de tramo en relación a otros	3	2	2	1.5	1.5
Máxima relación de rigidez de pilar de tramo a tramo, excluyendo estribos	-	4	4	3	2

**Tabla N° 5. Requerimientos mínimos y procedimientos para efectos sísmicos**

Zona Sísmica A=Z	Puentes de un solo tramo	Puentes de varios tramos					
		Puentes críticos		Puentes esenciales		Otros puentes	
		Regular	Irregular	Regular	Irregular	Regular	Irregular
1(0.15g)	No requiere análisis sísmico	MM	MM	SM	MM	SM/UL	SM
2(0.30g)		MM	TH	MM	MM	SM/UL	MM
3(0.40g)		TH	TH	MM	MM	SM/UL	MM

UL: Método simplificado o de carga uniforme

SM: Método de análisis espectral Unimodal  
 MM: Método de análisis espectral Multimodal  
 TH: Método de análisis Tiempo – Historia

### 3.3. Ejemplo de aplicación para análisis sísmico del puente

El puente presenta las características geométricas mostradas en la Fig. N° 5.

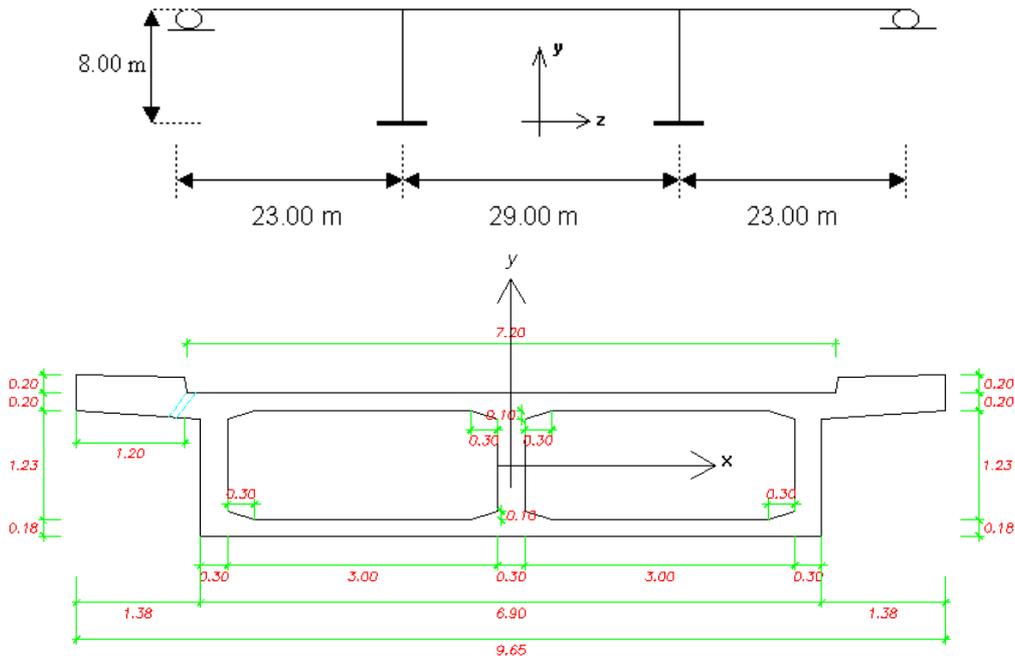


Fig. N° 5. Geometría general del puente(Arriba). Sección transversal del puente(Abajo)

#### Propiedades geométricas

##### Super-estructura

$$A=4.4975 \text{ m}^2 \quad y=0.923 \text{ cm} \quad I_x=1.799 \text{ m}^4$$

$$I_y=30.978 \text{ m}^4 \quad J = 7.5926 \text{ m}^4 \quad A_{vy}=1.44 \text{ m}^2 \quad A_{vy}=2.588 \text{ m}^2$$

##### Subestructura

$$A=3.2 \text{ m}^2 \quad J=0.5967 \text{ m}^4 \quad I_x=0.1707 \text{ m}^4$$

$$I_y=4.2667 \text{ m}^4 \quad A_{vx}=2.667 \text{ m}^2 \quad A_{vy}=2.667 \text{ m}^2$$

#### 3.3.1. Consideraciones tomadas para el análisis sísmico del puente ejemplo

En el Perú se cuenta con varios estudios de zonificación sísmica; para este ejemplo se considera  $Z=0.4$  de la Norma E0.30(2003). Para la clasificación de importancia se considera para este ejemplo, un puente de tipo esencial(Ref. 2), cuya descripción es: Aquellos puentes que deben permitir el paso de vehículos de emergencia para sismos de diseño (475 años de periodo de retorno). El perfil de suelo se considera S2, con lo que el coeficiente de sitio o factor de suelo  $S=1.2$  y el periodo  $T_p=0.6$  seg.

Con todas estas consideraciones y con la Tabla N° 5 se puede determinar el requerimiento mínimo para efectos sísmicos, el cual muestra que el procedimiento a utilizar sería el método de análisis multimodal espectral. Para efectos comparativos de este ejemplo se realizará además el Método de análisis espectral Unimodal(SM), el Método de análisis espectral Multimodal(MM), y además el Método de análisis Tiempo – Historia(TH).

#### 3.2.2. Análisis espectral Unimodal(SM)

Los resultados se muestran en la Tabla N° 6, utilizando la metodología de la Ref. 4: Primeramente se calcula el desplazamiento estático  $U_s(x)$  debido a una carga uniforme  $P_0$  (para ambas direcciones como lo muestra la Fig. N° 6), la rigidez lateral del puente  $K$ , el peso total  $W$ , a partir de las siguientes expresiones:

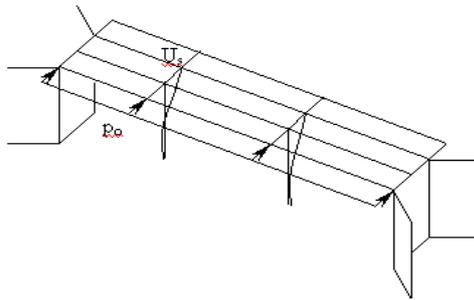
$$K = \frac{P_0 \cdot L}{U_{smáx}} \dots (8) \qquad W = \int w(x) dx \dots (9)$$

Donde :

$L$  : longitud total del puente

$U_{smáx}$  : máximo valor de  $U_s(x)$

$w(x)$ : peso por unidad de longitud de la carga muerta de la superestructura y sub-estructura tributaria del puente.



**Fig. N° 6. . Fuerza  $P_0$  aplicada en una dirección**

Seguidamente se calcula los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  para la dirección longitudinal y transversal:

$$\alpha = \int U_s(x) dx \quad \beta = \int w(x) \cdot U_s(x) dx \quad \gamma = \int w(x) \cdot (U_s(x))^2 dx \dots (10)$$

De donde:

$\alpha$  : longitud<sup>2</sup>

$\beta$  : fuerza por longitud

$\gamma$  : fuerza por longitud<sup>2</sup>

Luego se calcula el periodo de vibración del puente usando la siguiente expresión:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{p_0 \cdot g \cdot \alpha}} \dots (11) \quad g = \text{gravedad}$$

Finalmente se calcula la carga sísmica estática equivalente a partir de la expresión:

$$P_{e(x)} = \frac{\beta \cdot C_s \cdot w(x)}{\gamma} \cdot U_{(x)} \dots (12) \quad C: \text{coeficiente de respuesta sísmica elástica (Ec. 2)}$$

### 3.2.3. Análisis espectral Multimodal (MM)

Este método es apropiado para puentes con una geometría irregular que induce desplazamientos en las direcciones principales (longitudinal, transversal y vertical), en cada modo de vibración. La respuesta está compuesta por la contribución de un número plural de modos que contribuyen en la respuesta total de la estructura. Se debe usar el espectro de respuesta elástico (Ec. 2 y 3). Debe emplearse un programa de computador que realice el análisis dinámico espacial, teniendo en cuenta los efectos de acoplamiento en la respuesta total de la estructura del puente.

## 4. Conclusiones

- 4.1. El espectro de respuesta sísmica elástica debe ser el establecido por la NTE E-030(2003) y no la de la AASHTO, ya que no es acorde a la sismicidad local.
- 4.2. Los factores de modificación de respuesta(R), que se deben utilizar son los de la Ref. 4, pero en zonas de alta sismicidad consultar la Ref. 10, y no utilizar los factores de reducción de la norma E-030, ya que son mucho mayores y reducen la fuerza sísmica.
- 4.3. El análisis espectral Unimodal no considera los estribos como elementos que contribuyen a la rigidez del sistema.
- 4.4. Los resultados del análisis multimodal y tiempo historia que se han realizado se muestra en Tabla N° 6 :

**Tabla N° 6. Comparación de resultados para puente ejemplo**

<b>Método de Análisis</b>	<b>Periodo</b>		<b>Fuerza Basal</b>		<b>Desplazamiento</b>	
	<b>Tz(seg.)</b>	<b>Tx(seg.)</b>	<b>Fz(Tn)</b>	<b>Fx(Tn)</b>	<b>Dz(m)</b>	<b>Dx(m)</b>
Unimodal	0.4319	0.0865	932.4	932.55	0.0463	0.0019
Multimodal AASHTO	0.4418	0.1507	879.40	729.03	0.0492	0.005532
Multimodal E-030	0.4418	0.1507	881.63	729.03	0.0493	0.005532
Tiempo Historia(03-10-74-N82W)	0.4418	0.1507	856.7	553	0.04794	0.004166
Tiempo Historia(03-10-74-N08E)	0.4418	0.1507	536.3	533.9	0.0301	0.004158

4.4. Se concluye que las fuerzas de sismo en el análisis Unimodal(AASHTO), resultan mayores que las realizadas con un análisis multimodal o de tiempo historia, en consecuencia el análisis Unimodal es más conservador.

## **5. Bibliografía**

1. Norma Sismorresistente E.030. SENCICO(2003)
2. Propuesta de Reglamento de Puentes. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. Ministerio de Transporte y Comunicaciones(2002)
3. M.J. Ryall, G.A.R. Parke and J.E. Harding. "The Manual of Bridge Engineering"(2000).
4. Reglamento AASHTO-LRFD(1998).
5. Takahashi. Seismic Design and retrofit of bridges(2000)
6. M y H Bangash. "Prototype bridge structures"(1999).
7. Richart M. Backer. "Design of Highway Bridges"(1997).
8. Reglamento AASHTO(1986).
9. Publicación de la Federal Highway Administration (FHWA)-RD-94-052.
10. Publicaciones de CALTRANS (1998).
11. Reglamento sísmico de puentes de Japón (1996).
12. Reglamento EUROCODE-98-Part 2 (1998).
13. Publicaciones: Journal of Bridge Engineering.
14. Cornell A., "Engineering Seismic Risk Analysis"(1968)
15. Alva y Castillo. "Peligro Sísmico en el Perú"(1993)