

# Curso Diseño de Puentes - AASHTO

Prof. Dr. Matías A. Valenzuela

# Agradecimientos

- Dr. Rafael Foinquinos Mera
- Dr. Carlos G. Matos Flores-Guerra
- Dr. Sergio F. Breña
- Dr. Hernán Pinto Arancet
- Ing. José Luis Seguel

# Tópicos del Curso

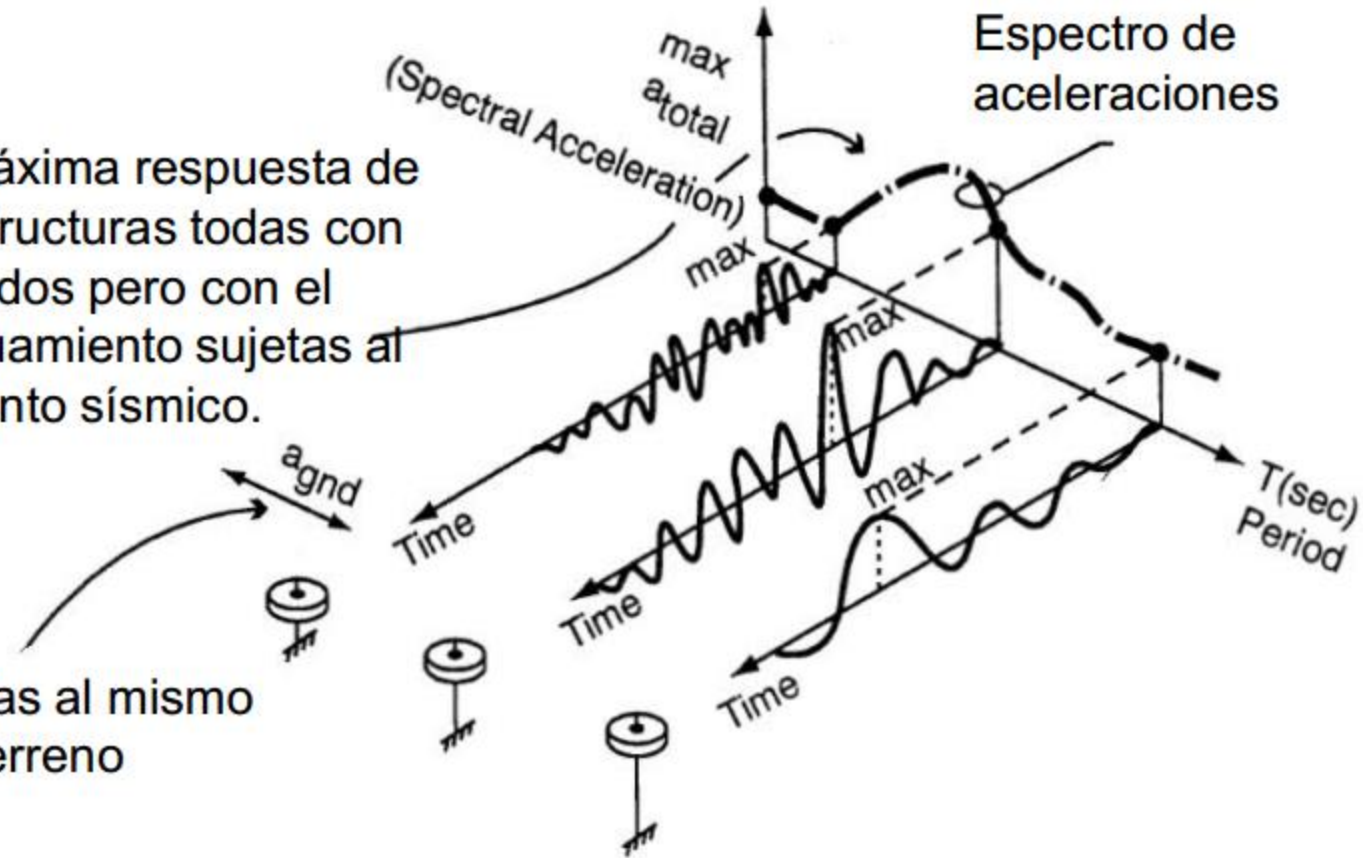
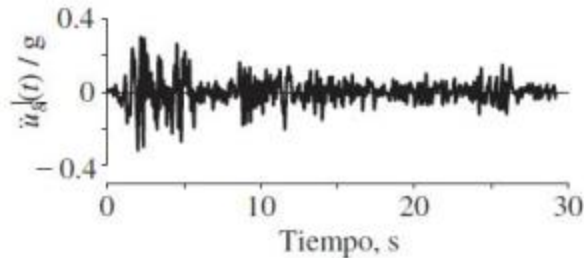
- 1. Filosofía del Código LRFD
- 2. Cargas de Servicio en Subestructuras
- 3. Cargas Extremas en Puentes
- 4. Análisis Estructural Caso 1
- 5. Introducción al Concreto Estructural
- 6. Propiedades materiales Concreto Estructural
- 7. Diseño Flexión
- 8. Diseño Corte
- 9. Diseño de Puente 1 Vano
- 10. Acero Estructural
- 11. Viga Acero Estructural
- 12. Diseño Puente 3 vanos continuo
- 13. Losa Estructural
- 14. Introducción Subestructura
- 15. Cimentaciones
- 16. Estribo
- 17. Pilares – Cepas
- **18. Condición Sísmica**
- **19. Diseño por Fuerza**

# Espectro de Respuesta (Revisión Breve)

## Espectro de Respuesta : Definición

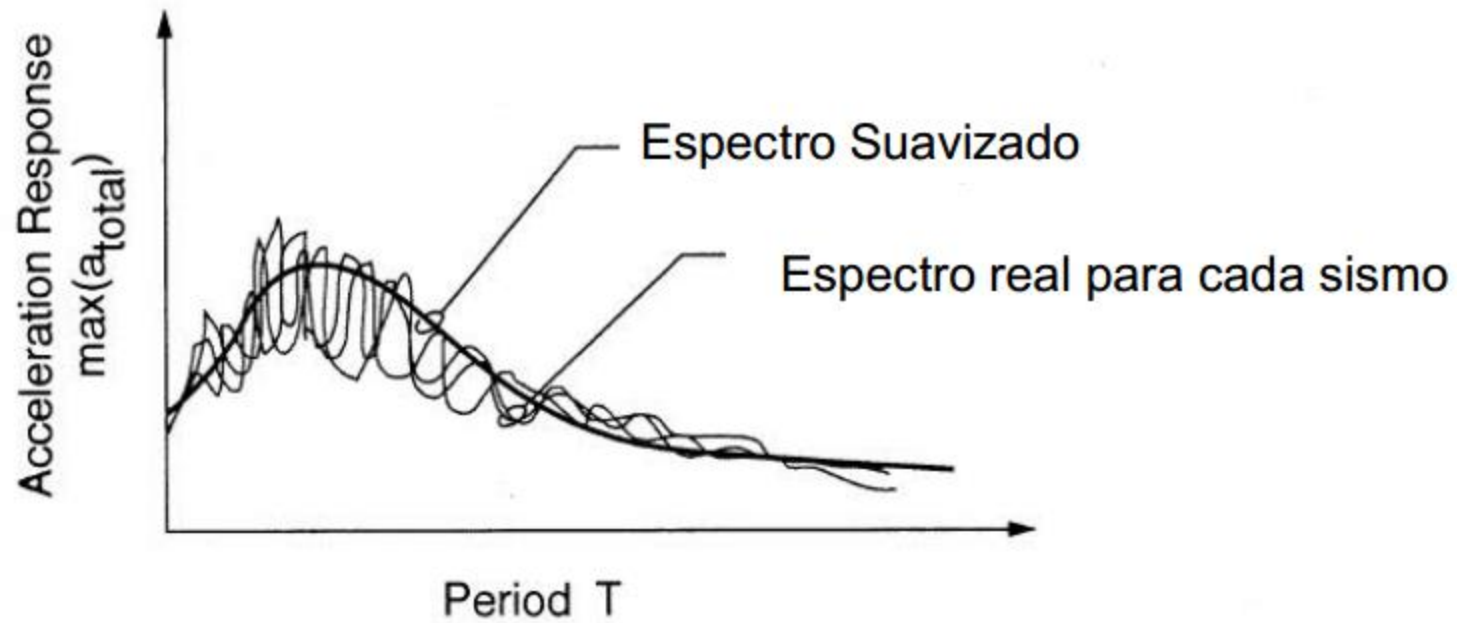
Grafico de la máxima respuesta de un grupo de estructuras todas con diferentes periodos pero con el mismo amortiguamiento sujetas al mismo movimiento sísmico.

Estructuras sujetas al mismo movimiento del terreno



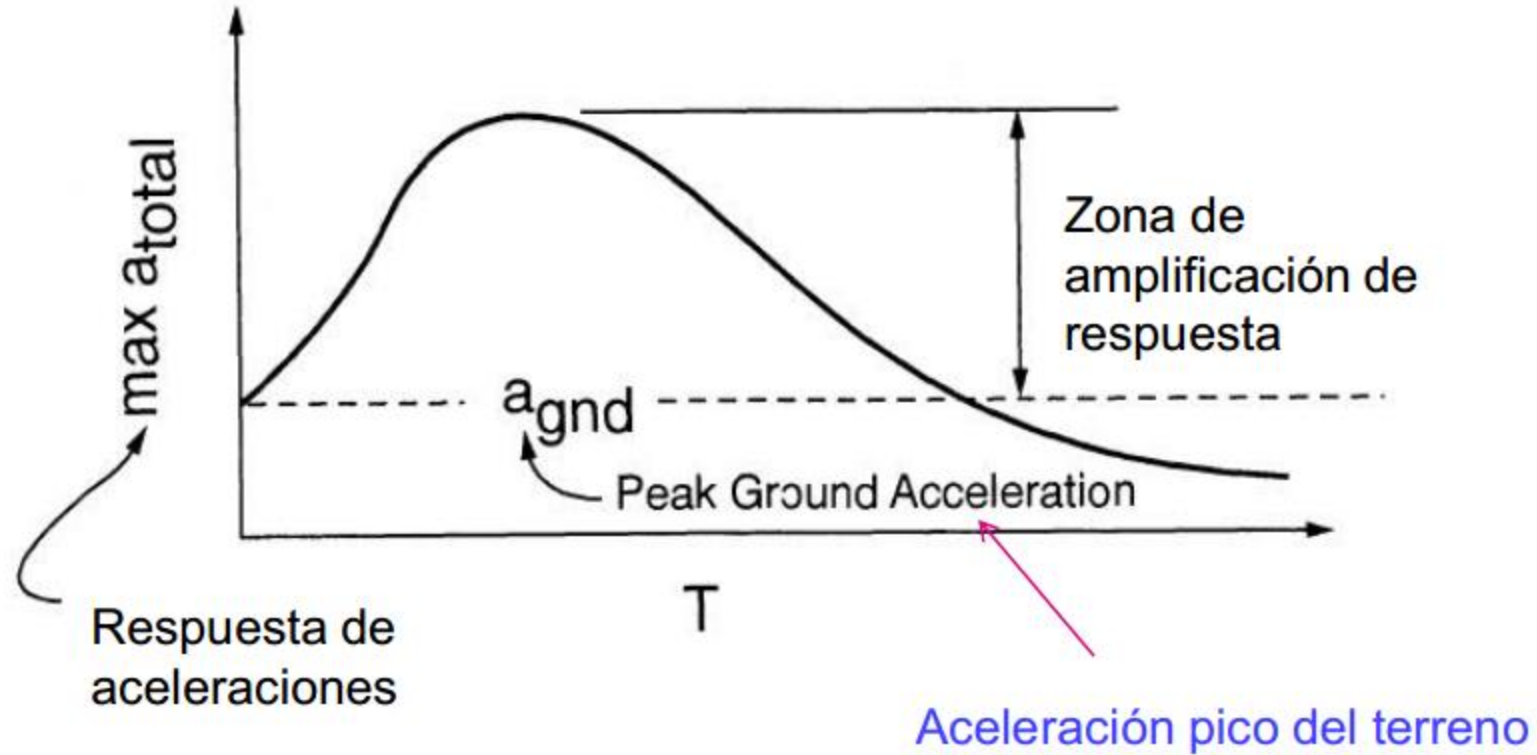
## ***Espectro de Respuesta (2)***

### ***Espectro real vs. Espectro suavizado***



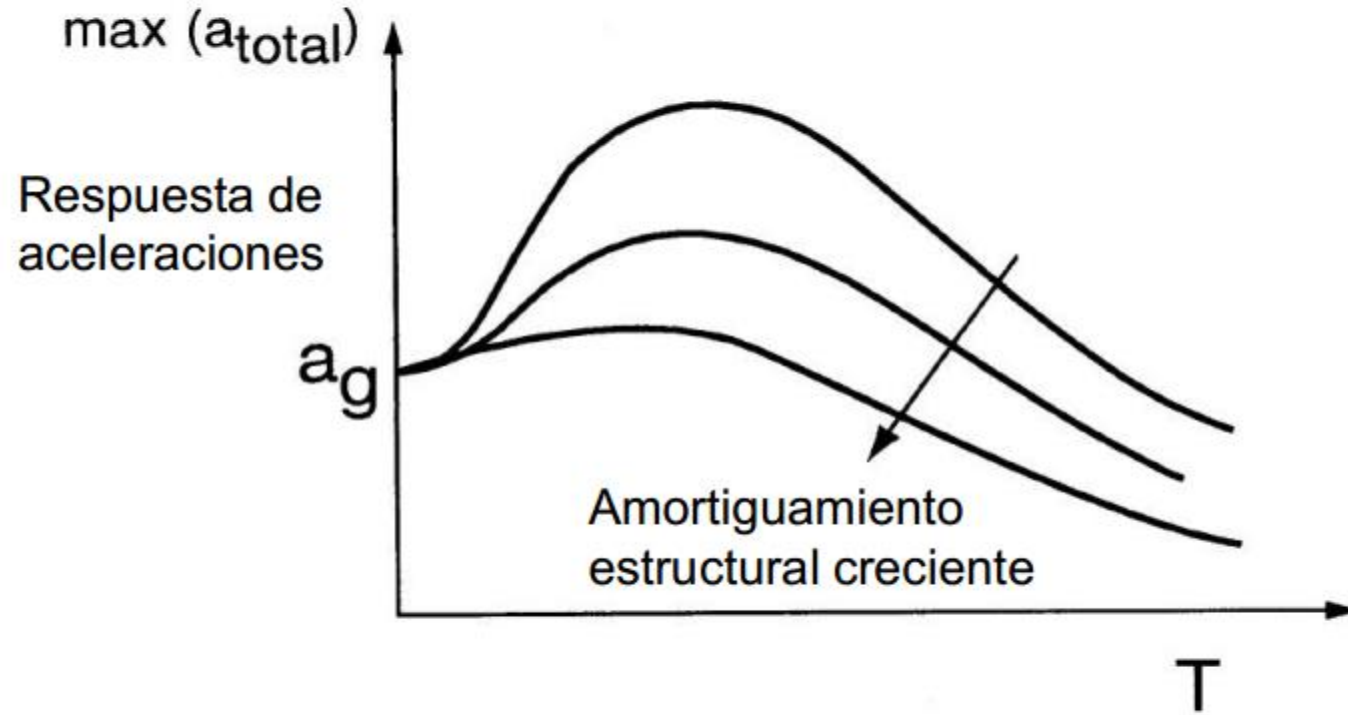
## Espectro de Respuesta (3)

### Forma General del Espectro de Respuesta



# Espectro de Respuesta (4)

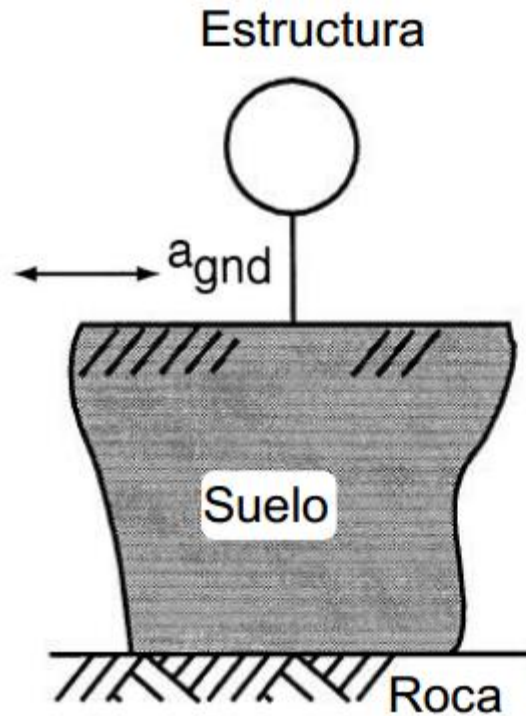
**Espectro de Respuesta – Efecto del amortiguamiento**



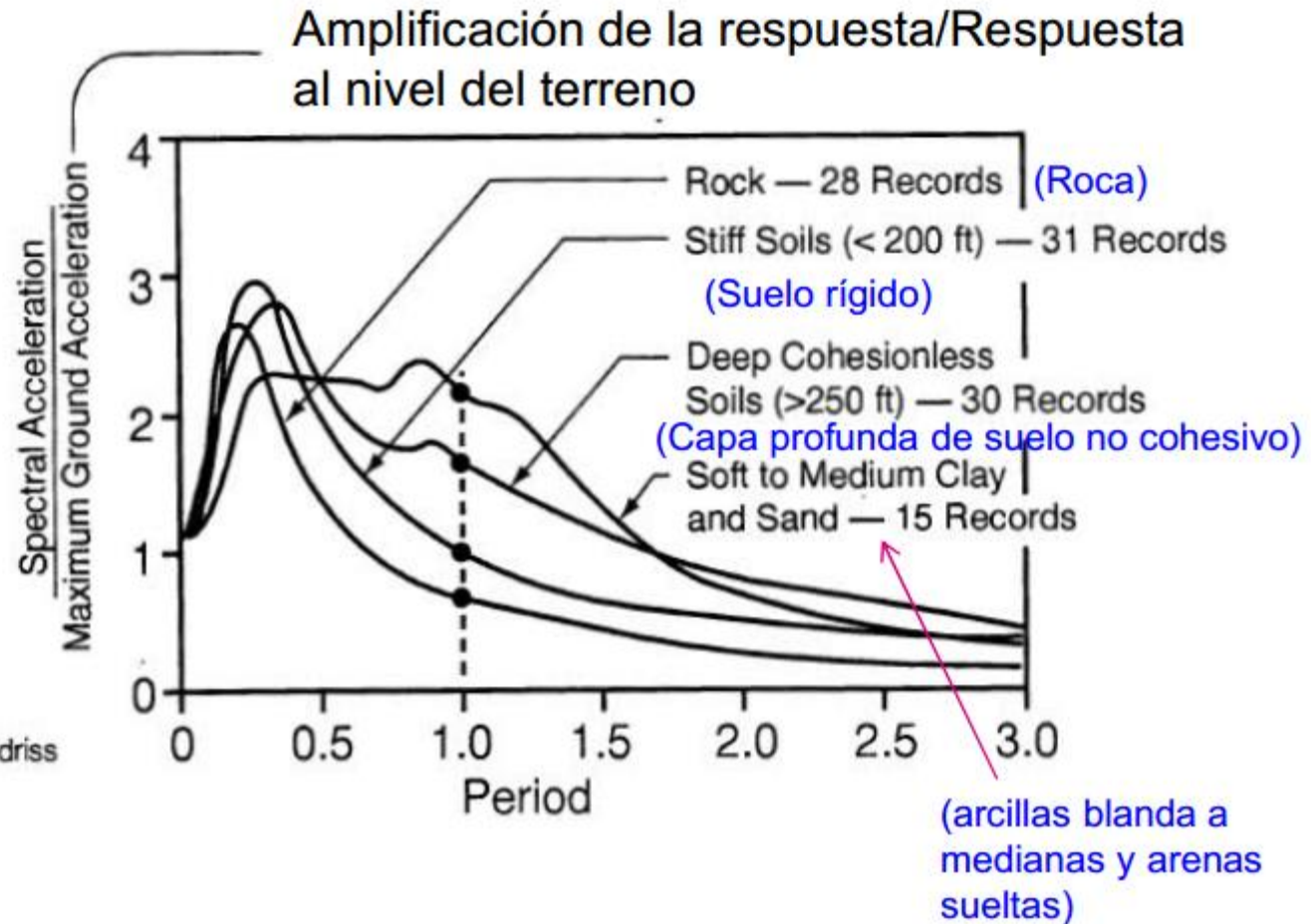


# Espectro de Respuesta (5)

## Espectro de Respuesta – Efecto de las condiciones del suelo



Seed & Idriss



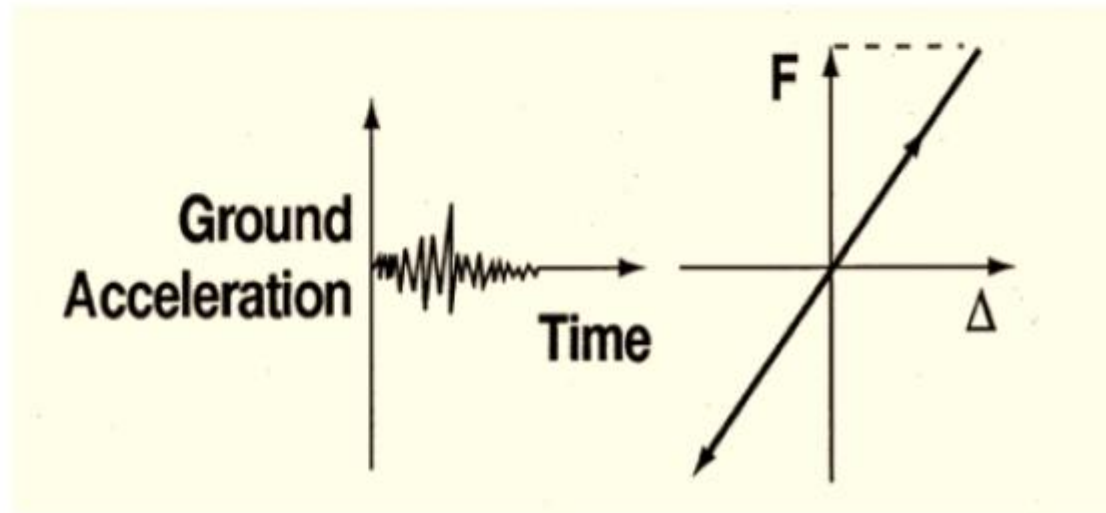


## Filosofía del Diseño Sísmico (1)

*La Filosofía de diseño de la Norma AASHTO depende fundamentalmente de las siguientes 3 observaciones:*

*1. Los sismos de tamaño moderado y grandes generan fuerzas resistentes considerables en sistemas estructurales elásticos. El diseño elástico para este nivel de fuerzas sería bastante antieconómico.*

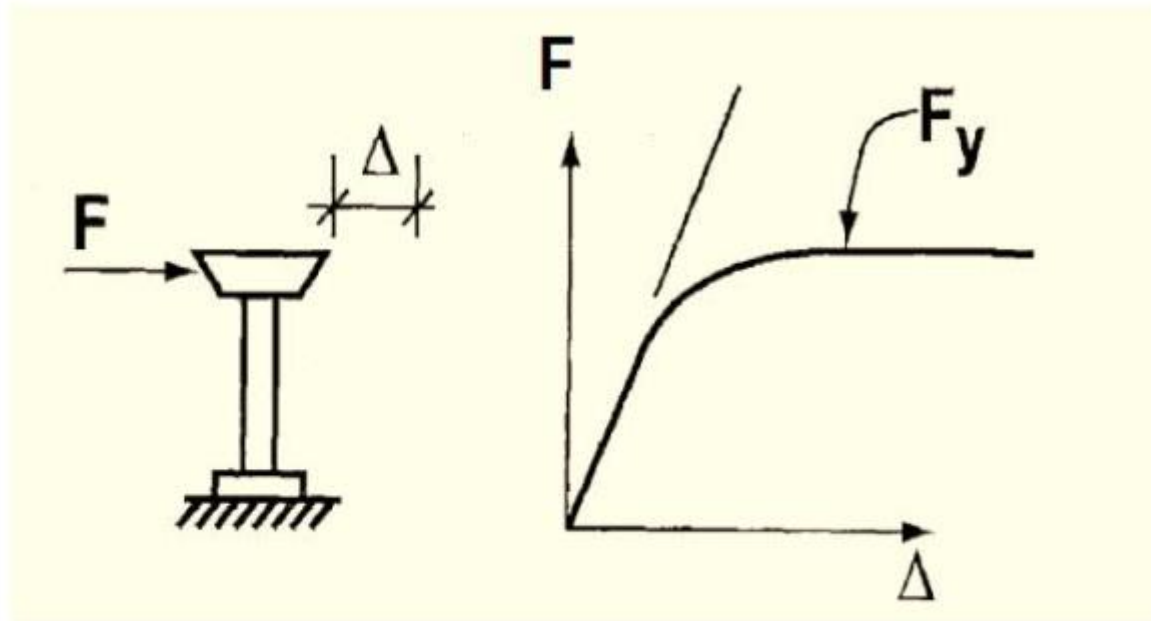
*Adicionalmente siempre habría la posibilidad de que se presentara un sismo mas grande que el anticipado.*



*Respuesta  
elástica*

## **Filosofía del Diseño Sísmico (2)**

**2.** Si se permite deformación inelástica en elementos claves de la estructura y se detallan estos elementos de tal manera que se comporten de manera dúctil tal que las capacidad de deformación exceda la demanda de deformación impuesta por el sismo, se logran diseños seguros y económicos.

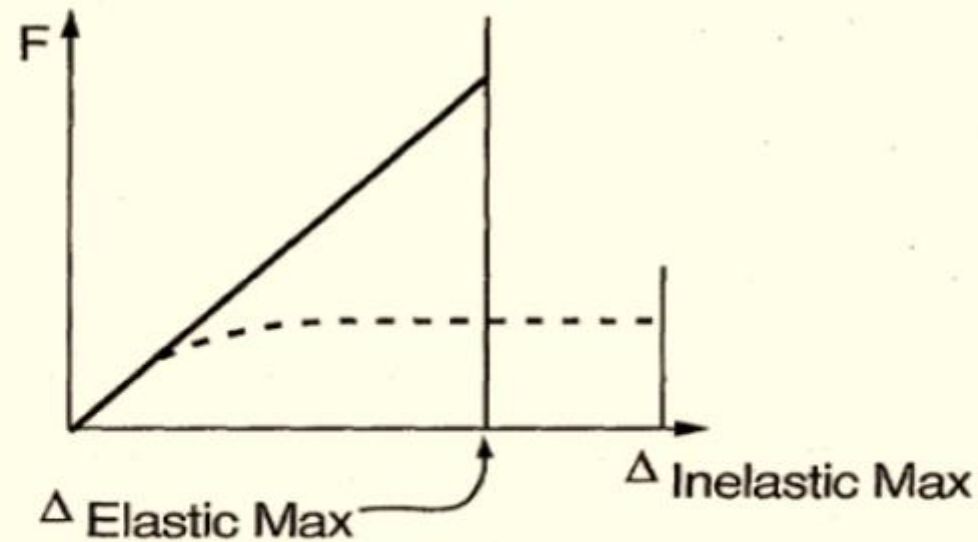


*Respuesta  
inelástica*

## **Filosofía del Diseño Sísmico (3)**

**3.** Muchos análisis rigurosos tiempo-historia de estructural inelásticas han demostrado que el análisis convencional elástico predice adecuadamente el máximo desplazamiento en la estructura. Ósea

$$\Delta_{Inelastico Max} \cong \Delta_{elastico Max}$$



*Desplazamientos elásticos e inelásticos máximos*



## **Filosofía del Diseño Sísmico (4)**

*En base a estas observaciones, la siguiente filosofía de diseño ha sido desarrollada:*

- 1. Para sismos pequeños y moderados la estructura deberá comportarse dentro del rango elástico con mínimos daños.*
- 2. La demanda sísmica de los elementos estructurales es determinada basado en el sismo que se espera en el sitio con un periodo de recurrencia de 1000 años (“sismo de diseño”).*
- 3. El puente no debe tener un colapso total o parcial cuando es expuesto a movimientos sísmicos de intensidad moderada a grande. El daño estructural es aceptable pero debe ocurrir de manera dúctil y debe ser de fácil detección y accesible para inspección y subsecuente reparación.*

## **Metodologías de Diseño**

- *Tradicionalmente el diseño sísmico se ha basado en un método de fuerzas (Force-Based Method, FBM). Este es el método usado por la Norma “AASHTO LRFD Bridge Design Specification” .*
- *Una alternativa es el método basado en desplazamientos (Displacement-Based Method, DBM) la cual es usada por la guía “AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design”*

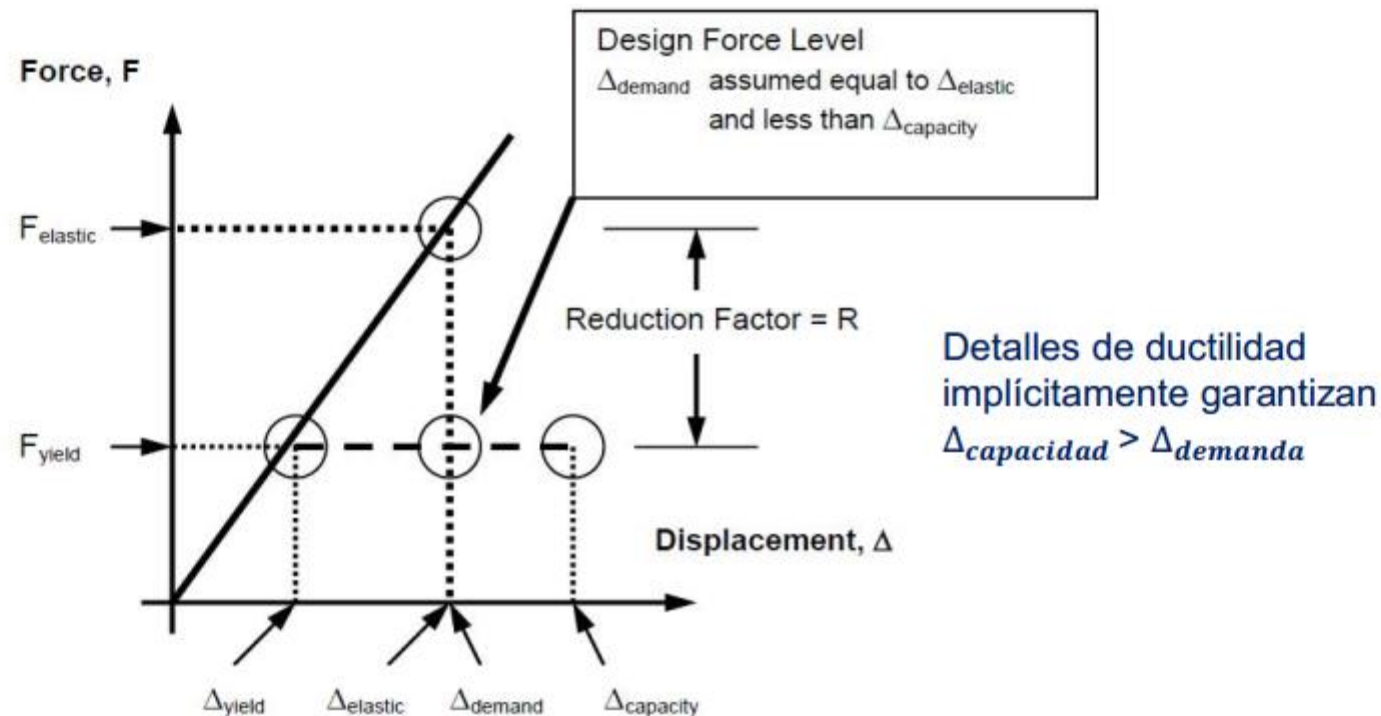
*Esta sección presenta el tradicional método de fuerzas*

# Método Basado en Fuerzas

- Las fuerzas de diseño son obtenidas dividiendo las fuerzas sísmicas elásticas por un factor de modificación de respuesta  $R$ .
- Se asume que la columna fluirá cuando este sujeta al terremoto de diseño a un nivel de fuerza igual a la demanda elástica reducida.

$$\text{Se asume : } \Delta_{\text{demanda}} = \Delta_{\text{elastico}} < \Delta_{\text{capacidad}}$$

- La capacidad de desplazamiento no se verifica directamente, en vez se prescriben detalles de refuerzo que garantizan un comportamiento dúctil





# Clasificación Operacional del Puente

AASHTO 3.10.5 clasifica los puentes como:

Categorías de Operación	Descripción
Puentes críticos	Deben permanecer abiertos para todo tipo de tráfico después del sismo de diseño (1000 años de periodo de retorno), y abierto para el paso de vehículos de emergencia o por razones de seguridad/defensa después de un sismo muy grande (2500 años de periodo de retorno).
Puentes esenciales	Deben permanecer abiertos para el paso de vehículos de emergencia o por razones de seguridad/defensa después del sismo de diseño (1000 años de periodo de retorno).
Otros puentes	Pueden ser cerrados para reparación después del sismo de diseño (1000 años de periodo de retorno).

La mayor parte de la Norma LRFD Specifications y la totalidad del Guide Specifications están dedicados a la categoría de “otros puentes”.

Nota: El Manual de Carreteras (3.1003.303) clasifica los puentes en:

Puentes y Estructuras Esenciales

CI = I

Otros Puentes y Estructuras

CI = II



# **Pasos Generales para el Diseño Sísmico**

*Estos pueden agruparse como sigue:*

## **Parte A: Análisis de Demanda**

**Paso 1:** *Determinación de las cargas sísmicas en la localización de la estructura.*

*a) Peligro sísmico (aceleración pico del terreno, PGA y otros parámetros sísmicos obtenidos por ejemplo de mapas)*

*b) Condiciones del suelo*

*c) Determinación del espectro de diseño*

**Paso 2:** *a) Determinación de la zona sísmica (LRFD Specifications) o la categoría de diseño sísmico (Guide Specifications)*

*b) Analizar el puente usando uno de los posibles métodos de análisis dinámico de acuerdo a la complejidad del puente.*

*c) Realizar el análisis en dos direcciones ortogonales y combinar los resultados para obtener valores de diseño.*

## **Pasos generales para el Diseño Sísmico**

### **Parte B: Diseño por capacidad**

**Paso 3:** *Seleccionar en el puente las localizaciones donde se permitirá la formación de rotulas plásticas (sistema estructural sismo resistente).*

**Paso 4:** *Diseñar los elementos que fluirán (rotulas plásticas) de tal manera que tengan una capacidad en exceso de la demanda obtenida en el Paso 2. Detallar estos lugares para que posean comportamiento dúctil.*

**Paso 5:** *Proveer suficiente capacidad a los elementos estructurales que no fluirán de tal manera que se comporten elásticamente cuando estén sujetas a las fuerzas generadas por la plastificación de las rotulas plásticas.*

## **Peligro Sísmico**

*El Servicio geológico de los Estados Unidos (US Geological Services) preparo para AASHTO una serie de mapas con los siguientes parámetros sísmicos:*

- » **PGA**, *Aceleración horizontal pico del terreno*
- » **Ss**, *Coeficiente de aceleraciones horizontales espectrales para periodo de 0.2 segundos (periodo corto)*
- » **S1**, *Coeficiente de aceleraciones horizontales espectrales para periodo de 1 segundo (periodo largo)*

*Estos parámetros corresponden a una probabilidad de excedencia de 7% en 75 años, lo cual corresponde a un periodo de retorno de 1000 años aproximadamente.*

- *Los valores son obtenidos de las Figuras 3.10.2.1-1 a 3.10.2.1-21 de AASHTO.*



# Mapa para PGA

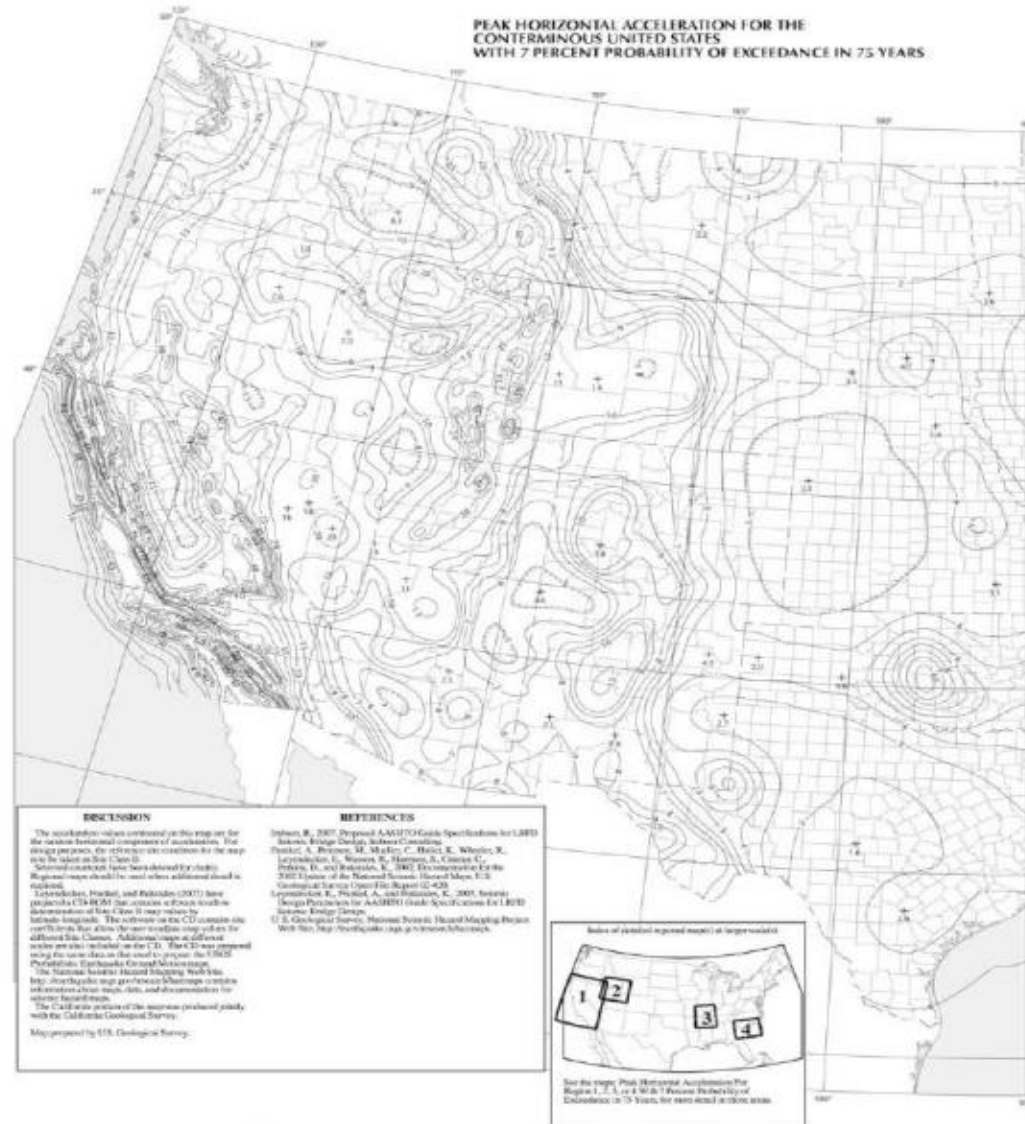


Figure 3.10.2.1-1—Horizontal Peak Ground Acceleration Coefficient for the Conterminous United States (PGA) with Seven Percent Probability of Exceedance in 75 yr (Approx. 1000-yr Return Period)

# Mapa Ss

HORIZONTAL SPECTRAL RESPONSE ACCELERATION FOR THE  
CONTINUOUS UNITED STATES OF 0.2-SECOND PERIOD  
(5 PERCENT CRITICAL DAMPING)  
WITH 7 PERCENT PROBABILITY OF EXCEEDANCE IN 75 YEARS

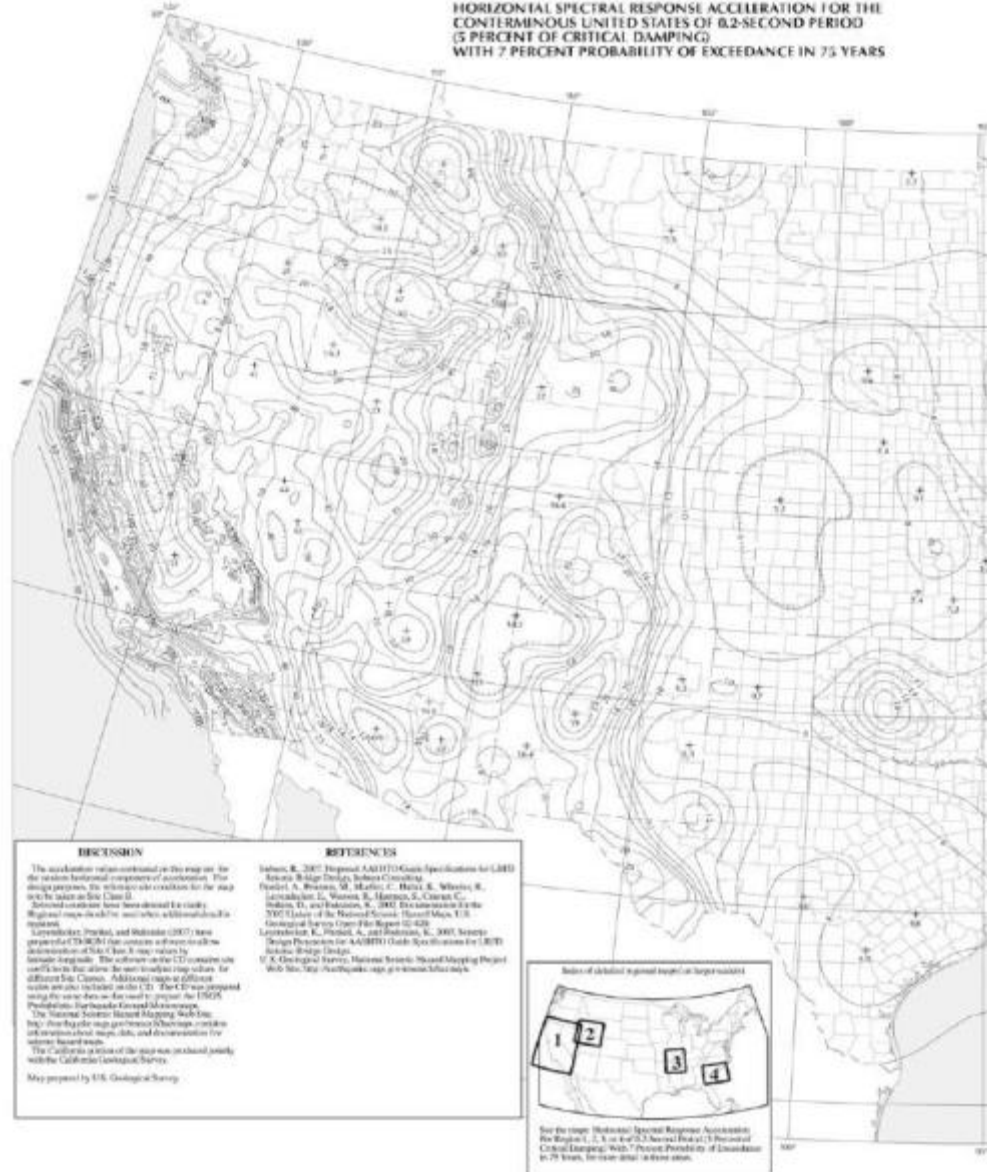


Figure 3.10.2.1-2—Horizontal Response Spectral Acceleration Coefficient for the Conterminous United States at Period of 0.2 s ( $S_s$ ) with Seven Percent Probability of Exceedance in 75 yr (Approx. 1000-yr Return Period) and Five Percent Critical Damping

# Mapa S1

HORIZONTAL SPECTRAL RESPONSE ACCELERATION FOR THE CONTINUOUS UNITED STATES OF 1.0-SECOND PERIOD (5 PERCENT CRITICAL DAMPING) WITH 7 PERCENT PROBABILITY OF EXCEEDANCE IN 75 YEARS

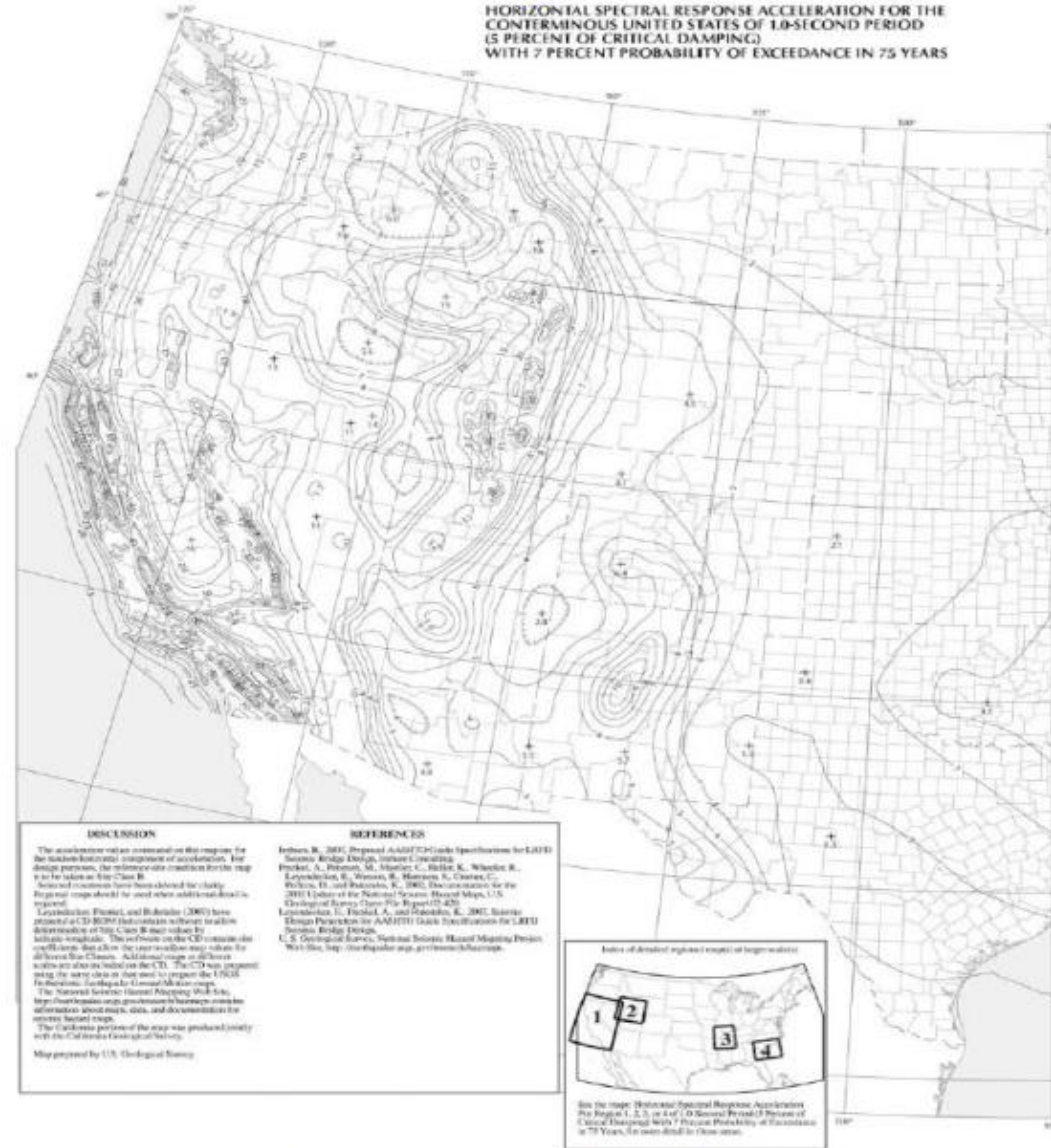


Figure 3.10.2.1-3—Horizontal Response Spectral Acceleration Coefficient for the Conterminous United States at Period of 1.0 s ( $S_h$ ) with Seven Percent Probability of Exceedance in 75 yr (Approx. 1000-yr Return Period) and Five Percent Critical Damping



## **Efectos de Sitio (tipo de suelo)**

- *Las condiciones locales del suelo amplifican o deamplifican las ondas sísmicas. Los valores de PGA, S<sub>s</sub> y S<sub>1</sub> dados en los mapas corresponden a la respuesta en roca.*
- *AASHTO (3.10.3) clasifica los suelos de A a F*

Site Class	Soil Type and Profile
A	Hard rock with measured shear wave velocity, $\bar{v}_s > 5,000$ ft/s
B	Rock with $2,500$ ft/sec $< \bar{v}_s < 5,000$ ft/s
C	Very dense soil and soil rock with $1,200$ ft/sec $< \bar{v}_s < 2,500$ ft/s, or with either $\bar{N} > 50$ blows/ft, or $\bar{s}_u > 2.0$ ksf
D	Stiff soil with $600$ ft/s $< \bar{v}_s < 1,200$ ft/s, or with either $15 < \bar{N} < 50$ blows/ft, or $1.0 < \bar{s}_u < 2.0$ ksf
E	Soil profile with $\bar{v}_s < 600$ ft/s or with either $\bar{N} < 15$ blows/ft or $\bar{s}_u < 1.0$ ksf, or any profile with more than 10 ft of soft clay defined as soil with $PI > 20$ , $w > 40$ percent and $\bar{s}_u < 0.5$ ksf
F	Soils requiring site-specific evaluations, such as: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Peats or highly organic clays (<math>H &gt; 10</math> ft of peat or highly organic clay where <math>H</math> = thickness of soil)</li> <li>• Very high plasticity clays (<math>H &gt; 25</math> ft with <math>PI &gt; 75</math>)</li> <li>• Very thick soft/medium stiff clays (<math>H &gt; 120</math> ft)</li> </ul>

Exceptions: Where the soil properties are not known in sufficient detail to determine the site class, a site investigation shall be undertaken sufficient to determine the site class. Site classes E or F should not be assumed unless the authority having jurisdiction determines that site classes E or F could be present at the site or in the event that site classes E or F are established by geotechnical data.



## ***Efectos de Sitio (tipo de suelo)***

- *Una traducción y conversión de unidades de la tabla anterior es (a excepción del suelo tipo F):*

<b>Tipo de perfil de suelo</b>	<b>Descripción del perfil de suelo</b>
A	Roca dura, con velocidades de onda $V_s > 1500 \text{ m/s}$
B	Roca, con velocidades de onda de corte $760 \text{ m/s} < V_s < 1500 \text{ m/s}$
C	Suelo muy denso apoyado sobre roca, con velocidades de onda de corte $360 \text{ m/s} < V_s < 760 \text{ m/s}$ , con SPT de $N > 50$ , o resistencia al corte no drenada mayor a $100 \text{ kPa}$ .
D	Suelo rígido con velocidades de onda de corte $180 \text{ m/s} < V_s < 360 \text{ m/s}$ , con SPT de $15 < N < 50$ , ó resistencia al corte no drenada mayor a $100 \text{ kPa}$ .
E	Perfil de suelo con velocidades de onda de corte $V_s < 180 \text{ m/s}$ , o con un perfil de más de $3 \text{ m}$ de espesor de arcilla blanda ( $IP > 20$ y $w > 40\%$ ) y resistencia al corte no drenada menor a $25 \text{ kPa}$ .
F	Véase la tabla en la pagina anterior.

- *El Código Sísmico de Puentes Chileno Considera 4 tipos de suelos, la equivalencia con AASHTO es aproximadamente:  
Suelo Tipo 1 = Tipo A, Suelo Tipo 2 = Tipo C,  
Suelo Tipo 3 = Tipo D, Suelo Tipo 4 = Tipo E,*

## Coeficientes de Sitio

- Estos son coeficientes de amplificación/ deamplificación de los valores espectrales para: a) Periodo cero, ( $F_{PGA}$ ), b) Periodo corto, ( $F_a$ ) y c) Periodo largo, ( $F_v$ ) para los diferentes tipos de suelos ( A a F).

**Table 3.10.3.2-1—Values of Site Factor,  $F_{pga}$ , at Zero-Period on Acceleration Spectrum**

Site Class	Peak Ground Acceleration Coefficient ( $PGA$ ) <sup>1</sup>				
	$PGA < 0.10$	$PGA = 0.20$	$PGA = 0.30$	$PGA = 0.40$	$PGA > 0.50$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F <sup>2</sup>	*	*	*	*	*

Notes:

<sup>1</sup>Use straight-line interpolation for intermediate values of  $PGA$ .

<sup>2</sup>Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis should be performed for all sites in Site Class F.

## Coeficientes de Sitio (2)

**Table 3.10.3.2-2—Values of Site Factor,  $F_s$ , for Short-Period Range of Acceleration Spectrum**

Site Class	Spectral Acceleration Coefficient at Period 0.2 sec ( $S_s$ ) <sup>1</sup>				
	$S_s < 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s > 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F <sup>2</sup>	*	*	*	*	*

Notes:

<sup>1</sup>Use straight-line interpolation for intermediate values of  $S_s$ .

<sup>2</sup>Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis should be performed for all sites in Site Class F.

**Table 3.10.3.2-3—Values of Site Factor,  $F_l$ , for Long-Period Range of Acceleration Spectrum**

Site Class	Spectral Acceleration Coefficient at Period 1.0 sec ( $S_l$ ) <sup>1</sup>				
	$S_l < 0.1$	$S_l = 0.2$	$S_l = 0.3$	$S_l = 0.4$	$S_l > 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F <sup>2</sup>	*	*	*	*	*

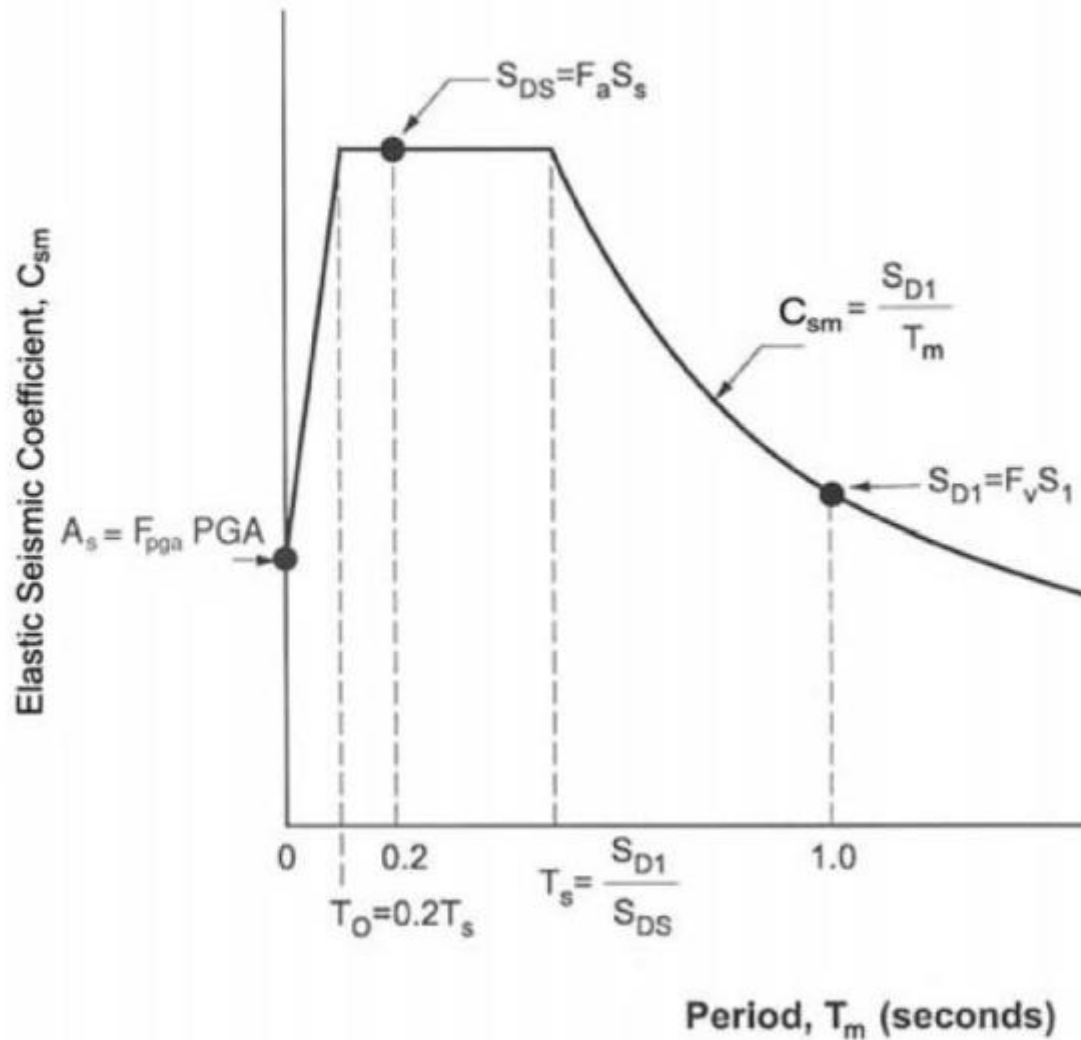
Notes:

<sup>1</sup>Use straight-line interpolation for intermediate values of  $S_l$ .

<sup>2</sup>Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis should be performed for all sites in Site Class F.



# Espectro de Respuesta de Diseño



El espectro de respuesta se construye usando el método de los 3 puntos.

Figure 3.10.4.1-1—Design Response Spectrum

# Coeficiente de respuesta sísmica elástica, $C_{sm}$

## 3.10.4.2—Elastic Seismic Response Coefficient

For periods less than or equal to  $T_0$ , the elastic seismic coefficient for the  $m$ th mode of vibration,  $C_{sm}$ , shall be taken as:

$$C_{sm} = A_S + (S_{DS} - A_S) (T_m / T_0) \quad (3.10.4.2-1)$$

in which:

$$A_S = F_{pga} PGA \quad (3.10.4.2-2)$$

$$S_{DS} = F_a S_S \quad (3.10.4.2-3)$$

where:

$PGA$  = peak ground acceleration coefficient on rock (Site Class B)

$S_S$  = horizontal response spectral acceleration coefficient at 0.2-sec period on rock (Site Class B)

$T_m$  = period of vibration of  $m$ th mode (s)

$T_0$  = reference period used to define spectral shape =  $0.2 T_S$  (s)

$T_S$  = corner period at which spectrum changes from being independent of period to being inversely proportional to period =  $S_{D1} / S_{DS}$  (s)

For periods greater than or equal to  $T_0$  and less than or equal to  $T_S$ , the elastic seismic response coefficient shall be taken as:

$$C_{sm} = S_{DS} \quad (3.10.4.2-4)$$

For periods greater than  $T_S$ , the elastic seismic response coefficient shall be taken as:

$$C_{sm} = S_{D1} / T_m \quad (3.10.4.2-5)$$

in which:

$$S_{D1} = F_v S_1 \quad (3.10.4.2-6)$$

where:

$S_1$  = horizontal response spectral acceleration coefficient at 1.0 sec period on rock (Site Class B)

## **Zonas y Categorías de Diseño Sísmico**

- *La terminología de Zonas Sísmicas es usada por LRFD Specifications mientras que el Guide Specifications usa Categorías de Diseño Sísmico.*
- *La zonificación o categorización esta basada en el coeficiente espectral de aceleraciones a periodos de 1 segundo ( $S_{D1}$ ).*
- *Desde que  $S_{D1}$  depende del peligro sísmico local y de los efectos locales del suelo, la clasificación es dependiente de la aceleración regional y amplificaciones del suelo.*
- *Como ejemplo es posible tener un sitio con suelo pobre que tenga una clasificación mas alta que un sitio cercano con suelo firme.*

## Zonas y Categorías de Diseño Sísmico (2)

- *En general esta clasificación sirve para determinar, métodos de análisis, longitudes de soporte, requerimientos de ductilidad etc.*

Acceleration Coefficient, $S_{DI}$	Seismic Zone – LRFD Specifications	Seismic Design Category (SDC) – Guide Specifications
$S_{DI} \leq 0.15$	1	A
$0.15 \leq S_{DI} < 0.30$	2	B
$0.30 \leq S_{DI} < 0.50$	3	C
$0.50 \leq S_{DI}$	4	D



## **Análisis para Cargas Sísmicas**

- *Los métodos para el cálculo de la respuesta de la estructura para carga sísmicas están basados en los principios de la dinámica estructural. Los siguientes métodos son considerados en la Norma AASHTO:*
  - » *Método de la carga uniforme (UL)*
  - » *Método de Análisis Espectral Unimodal (SM)*
  - » *Método de análisis espectral multimodal (MM)*
  - » *Método de análisis Tiempo-Historia (TH)*
- *Los métodos UL y SM están basados en el periodo fundamental de vibración de la estructura y se aplican por lo general a puentes simples y regulares.*

## **Requerimientos para el Método de Análisis**

*El tipo de método a usar depende de la zona sísmica y de la regularidad del puente. La Norma AASHTO requiere:*

**Table 4.7.4.3.1-1—Minimum Analysis Requirements for Seismic Effects**

Seismic Zone	Single-Span Bridges	Multispan Bridges					
		Other Bridges		Essential Bridges		Critical Bridges	
		regular	irregular	regular	irregular	regular	irregular
1	No seismic analysis required	*	*	*	*	*	*
2		SM/UL	SM	SM/UL	MM	MM	MM
3		SM/UL	MM	MM	MM	MM	TH
4		SM/UL	MM	MM	MM	TH	TH

**Table 4.7.4.3.1-2—Regular Bridge Requirements**

Parameter	Value				
	2	3	4	5	6
Number of Spans	2	3	4	5	6
Maximum subtended angle for a curved bridge	90°	90°	90°	90°	90°
Maximum span length ratio from span to span	3	2	2	1.5	1.5
Maximum bent/pier stiffness ratio from span to span, excluding abutments	—	4	4	3	2

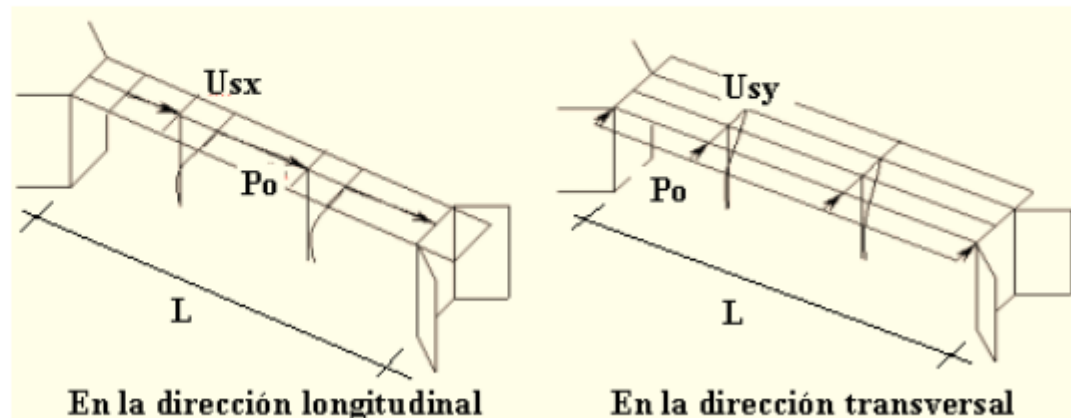
## Método de la carga uniforme (UL)

- El método está basado en el modo fundamental de vibración, tanto en dirección transversal como longitudinal. El periodo de este modo de vibración debe ser calculado usando un modelo de un solo grado de libertad masa-resorte.
- La rigidez de este resorte equivalente debe calcularse usando el desplazamiento máximo que ocurre cuando una carga lateral uniforme arbitraria es aplicada a la superestructura del puente.

### Pasos:

Paso 1: Calcular el desplazamiento estático horizontal  $U_s(x)$  y  $U_s(y)$  debido a una carga uniforme,  $P_o$ , horizontal, la carga es aplicada a todo lo largo del puente.

Fuerza  $P_o$  aplicada en ambas direcciones



## **Método de la carga uniforme (UL, 2)**

Paso 2: Calcular la rigidez lateral del puente,  $K$ , el peso total,  $W$ , del puente.

$$K = P_0 \cdot L / U_{smax}, \quad y \quad W = \int w(x) dx$$

Donde :

$L$  = longitud total del puente.

$U_{smax}$  = máximo valor de  $U_s(x)$  o  $U_s(y)$

$w(x)$  = peso por unidad de longitud de la carga muerta de la superestructura y subestructura tributaria del puente

Paso 3: Calcular el periodo de vibración del puente en ambas direcciones.

$$T = 2.\pi.\sqrt{\frac{W}{g \cdot K}}$$



## **Método de la carga uniforme (UL, 3)**

Paso 4: Calcular la carga sísmica estática equivalente a partir de

$$P_e = \frac{C_{sm} \cdot W}{L}$$

Donde:

$C_{sm}$  = coeficiente de respuesta sísmica elástica (sin dimensiones) para el periodo  $T$ .

$P_e$  = carga uniforme sísmica equivalente por unidad de longitud de puente, aplicada para representar el modo primario de vibración.

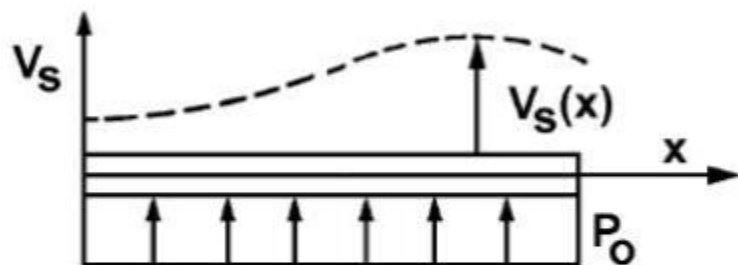
Paso 5: Calcular los desplazamientos y fuerzas de miembro escalando los resultados del primer paso por la relación  $P_e/P_o$ .

## ***Método de Análisis Espectral Unimodal (SM)***

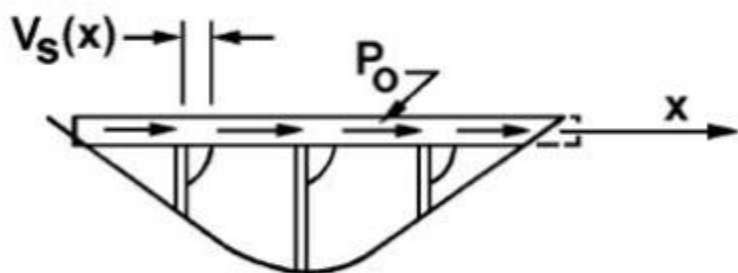
- *El método está basado en el modo fundamental de vibración, tanto en dirección transversal como longitudinal.*
- *La forma del primer modo y el periodo de la estructura es aproximado usando la deflexión del puente debido a carga lateral uniforme arbitraria aplicada a la superestructura del puente.*
- *La aplicación del método es como sigue:*

## Método de Análisis Espectral Unimodal (SM, 2)

- Calculate the static displacements  $v_s(x)$  due to an assumed uniform loading  $p_o$  as shown in Figure C4.7.4.3.2b-1:



PLAN VIEW, TRANSVERSE LOADING



ELEVATION VIEW, LONGITUDINAL LOADING

- Calculate factors  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\gamma$  as:

$$\alpha = \int v_s(x) dx \quad (C4.7.4.3.2b-1)$$

$$\beta = \int w(x)v_s(x) dx \quad (C4.7.4.3.2b-2)$$

$$\gamma = \int w(x)v_s^2(x) dx \quad (C4.7.4.3.2b-3)$$

where:

$p_o$  = a uniform load arbitrarily set equal to 1.0 (kip/ft)

$v_s(x)$  = deformation corresponding to  $p_o$  (ft)

$w(x)$  = nominal, unfactored dead load of the bridge superstructure and tributary substructure (kip/ft)

- Calculate the period of the bridge as:

$$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma}{p_o g \alpha}} \quad (C4.7.4.3.2b-4)$$



## Método de Análisis Espectral Unimodal (SM, 3)

- Using  $T_m$  and Eqs. 3.10.4.2-1, 3.10.4.2-4, or 3.10.4.2-5, calculate  $C_{sm}$ .
- Calculate the equivalent static earthquake loading  $p_e(x)$  as:

$$p_e(x) = \frac{\beta C_{sm}}{\gamma} w(x) v_z(x) \quad (\text{C4.7.4.3.2b-5})$$

where:

$C_{sm}$  = the dimensionless elastic seismic response coefficient given by Eqs. 3.10.4.2-1, 3.10.4.2-4, or 3.10.4.2-5

$p_e(x)$  = the intensity of the equivalent static seismic loading applied to represent the primary mode of vibration (kip/ft)

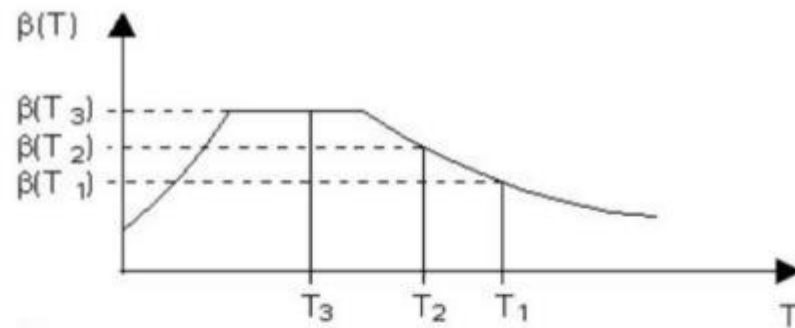
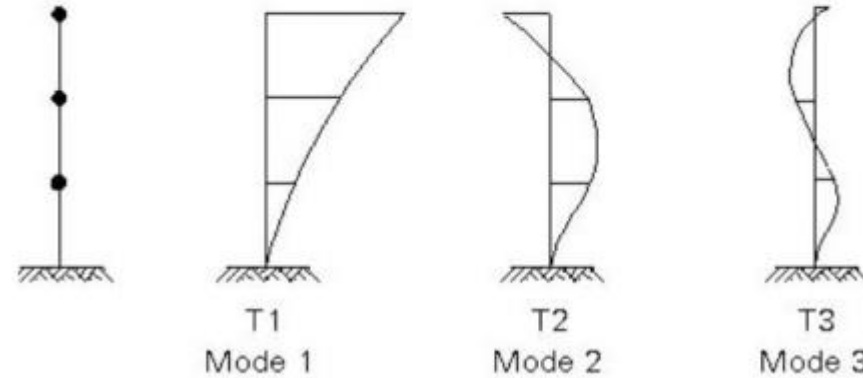
- Apply loading  $p_e(x)$  to the structure, and determine the resulting member force effects.



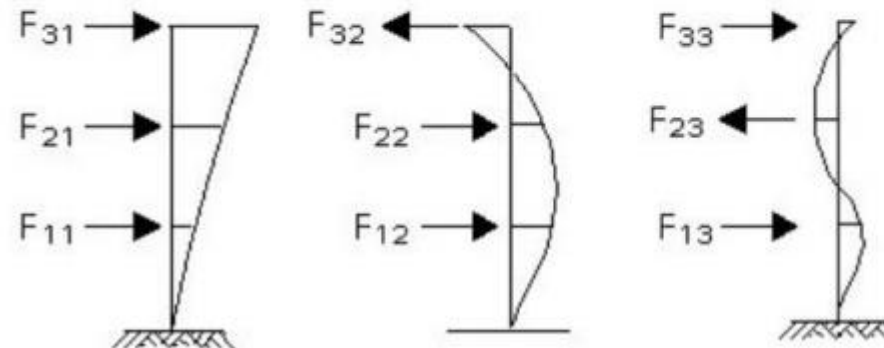
# Método de Análisis Espectral Multimodal (2)

Los pasos del método son ilustrados gráficamente como sigue:

- Paso 1: Computo de periodos y formas modales



- Paso 2: Lectura de los valores espectrales

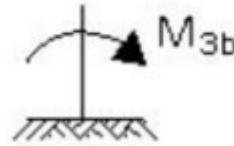
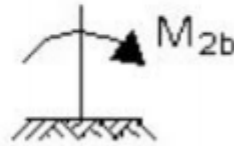
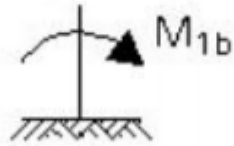


- Paso 3: Calculo de fuerzas modales

## Método de Análisis Espectral Multimodal (3)

- Paso 4: Calculo de  $M$ ,  $V$ ,  $N$  para cada modo

Ejemplo: Momento en la base:



- Paso 5: Calculo de fuerza resultante,  $M_b = \sqrt{M_{1b}^2 + M_{2b}^2 + M_{3b}^2}$
- Las respuestas modales generalmente se combinan usando la raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SRSS) de las diversas respuestas modales.
- Cuando las frecuencias de una estructura no difieren en más del 10%, se deben emplear diferentes reglas de combinación (método de la Combinación Cuadrática Completa, CQC, es recomendada por AASHTO). Este tipo de combinación toma en cuenta la interacción entre modos muy cercanos.

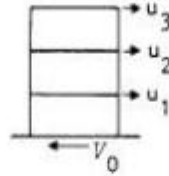


## ***Método de análisis Tiempo-Historia (TH)***

- *Se requieren métodos rigurosos de análisis para puentes clasificados como críticos, y/o aquellos que son geoméricamente complejos o cercanos a fallas activas. Los métodos de tiempo-historia son recomendados en estos casos.*
- *Cualquier método de análisis de tiempo-historia paso a paso utilizados para el análisis elástico o inelástico deberán cumplir con los requisitos del artículo 4.7 de AASHTO.*
- *La sensibilidad de la solución numérica al tamaño del paso de integración será determinado. Para materiales no lineales se llevará a cabo un estudio de sensibilidad para investigar los efectos de las variaciones en propiedades histéricas del material.*
- *El tiempo-historia de las aceleración del terreno usadas para describir las cargas sísmicas se seleccionarán en conformidad con el artículo 4.7.4.3.4b.*

# Método de análisis Tiempo-Historia (2)

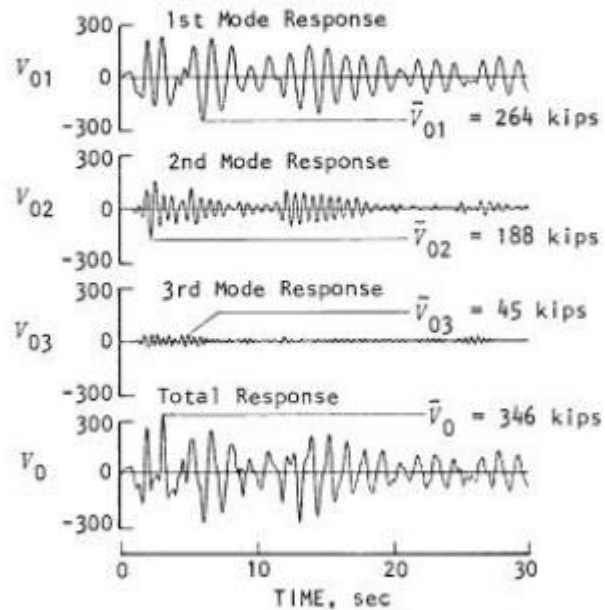
- Ejemplo de tiempo-historia modal (valido para estructuras lineales):



(a) Idealized three-story building



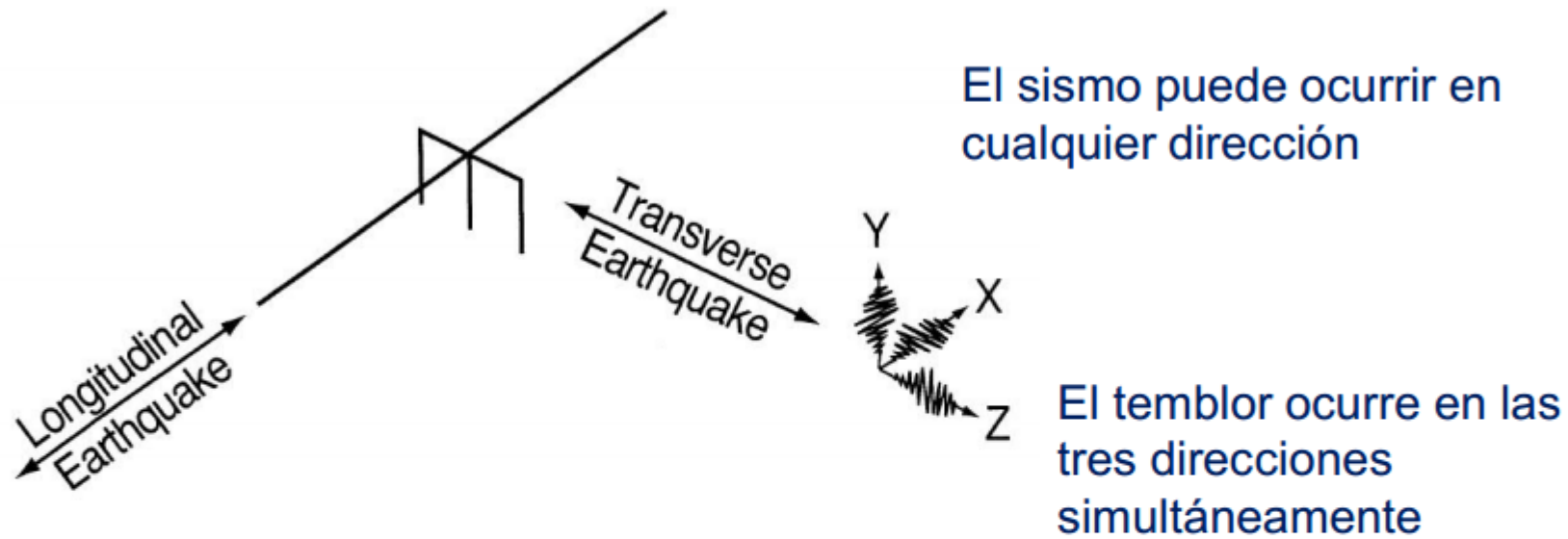
(b) El Centro ground motion - S00E Component  
May 18, 1940



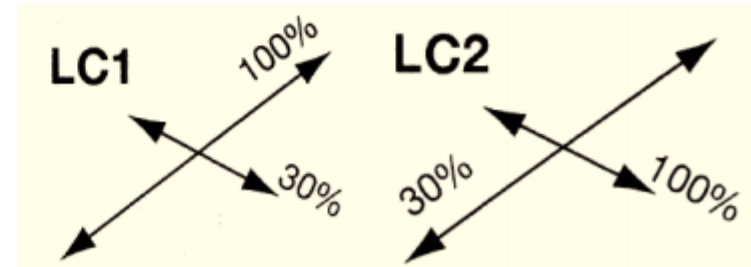
(d) Base shear

Nótese que usando SRSS  
Resulta en  $V = 327$  k.

# Combinación de los Efectos Sísmicos



- *AASHTO* usa el análisis en dos direcciones ortogonales. Como los máximos no ocurren simultáneamente, ellos son combinados como sigue:
  - » **LC1=100% Long + 30% Trans**
  - » **LC2=30% Long + 100% Trans**

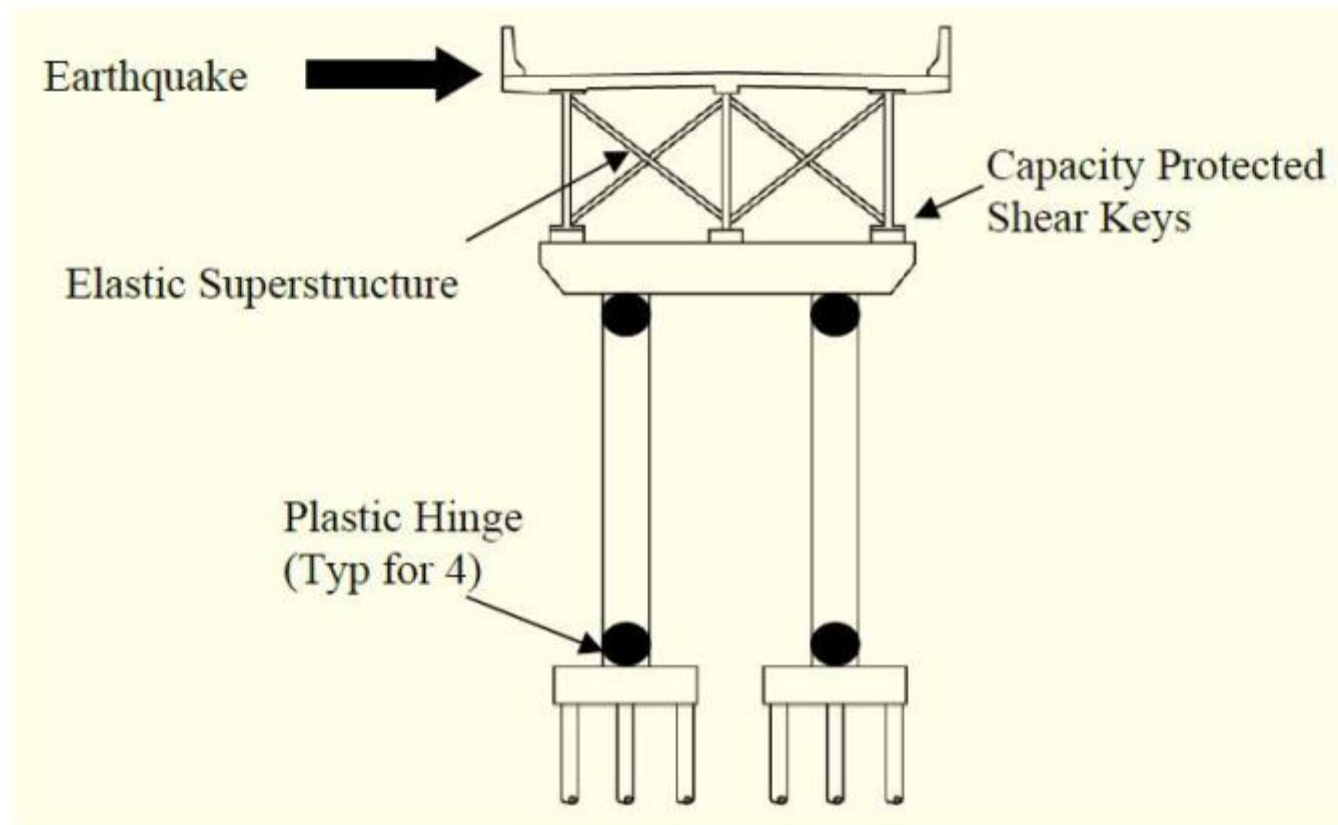


# **Sistemas Estructurales Sismo Resistentes**

*El Guide Specification permite el uso de tres tipos de sistemas estructurales.*

## Sistema Tipo 1

*Subestructura dúctil con superestructura esencialmente elástica*

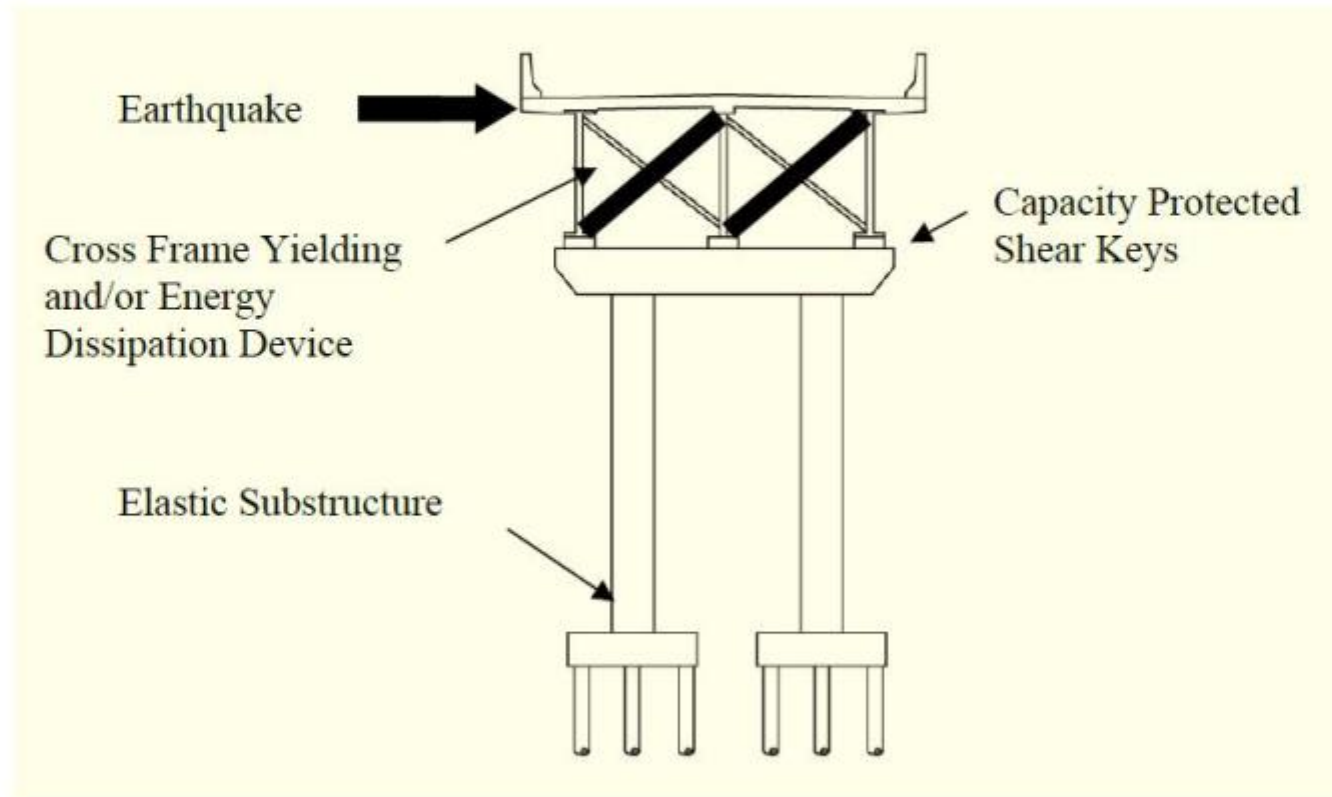




# ***Sistemas Estructurales Sismo Resistentes***

## *Sistema Tipo 2*

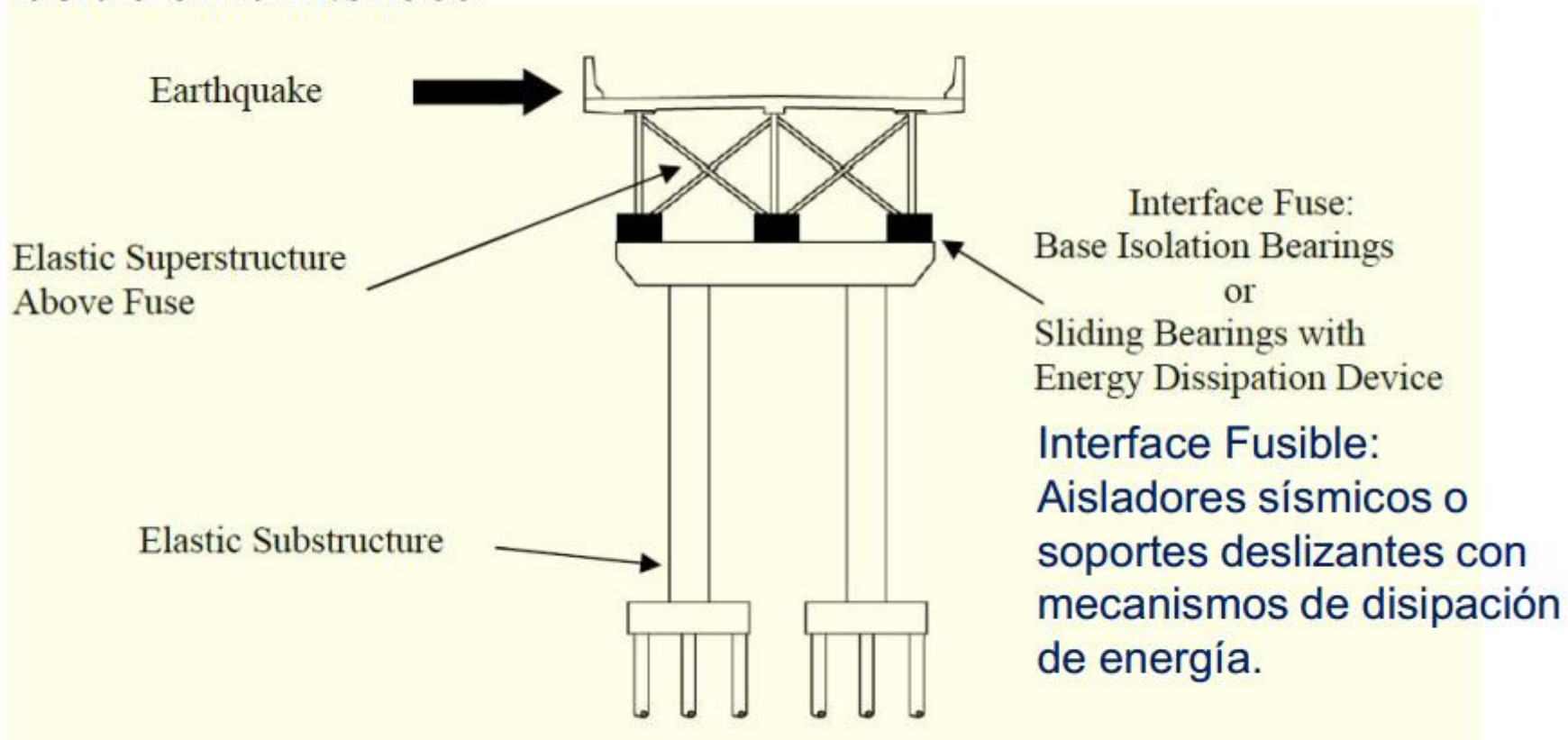
*Estructura esencialmente elástica con superestructura dúctil*



# Sistemas Estructurales Sismo Resistente

## Sistema Tipo 3

*Superestructura elástica y estructura elástica con un elemento fusible en la interface*



Estos tipos de puentes son diseñados usando “AASHTO Guide Specification for Seismic Isolation Design”

## **Factor de Modificación de Respuesta - R**

- *La metodología de fuerzas (FBM) de la Norma AASHTO LRFD usa Factores de Modificación de Respuesta, R, para determinar las fuerzas de sísmicas de diseño.*
- *Las fuerzas de sísmicas de diseño para la subestructura y las conexiones se obtienen dividiendo las fuerzas obtenidas del análisis sísmico elástico por el factor R. Estas fuerzas se usan para la selección de refuerzo o la verificación de la sección para la carga sísmica.*

Table 3.10.7.1-1—Response Modification Factors—Substructures

Substructure	Operational Category		
	Critical	Essential	Other
Wall-type piers—larger dimension	1.5	1.5	2.0
Reinforced concrete pile bents			
• Vertical piles only	1.5	2.0	3.0
• With batter piles	1.5	1.5	2.0
Single columns	1.5	2.0	3.0
Steel or composite steel and concrete pile bents			
• Vertical pile only	1.5	3.5	5.0
• With batter piles	1.5	2.0	3.0
Multiple column bents	1.5	3.5	5.0

## ***Factor de Modificación de Respuesta - R***

Table 3.10.7.1-2 Response Modification Factors—Connections

Connection	All Operational Categories
Superstructure to abutment	0.8
Expansion joints within a span of the superstructure	0.8
Columns, piers, or pile bents to cap beam or superstructure	1.0
Columns or piers to foundations	1.0