

Calculo sísmico de puentes. Estudio comparativo

C. Huerta,
J.J. López Cela
SINEX, S.A.

E. Alarcón
U. Politécnica de Madrid
E.T.S.I.I. Dep. Mecánica Estructural

INTRODUCCION

Debido a su condición de estructura pura, los puentes gozan de una especial consideración entre los profesionales de la ingeniería, lo que hace que, tanto las técnicas de diseño y cálculo, como las de construcción y puesta en obra, alcancen unas cotas de calidad difíciles de encontrar en otros tipos de obra. Por ello, tradicionalmente, estas estructuras han sido consideradas como seguras frente a la acción de los terremotos, y sólo ocasionalmente se ha prestado especial atención a la realización del cálculo sísmico correspondiente.

Cabría citar las dificultades de comprensión de los mecanismos de respuesta dinámica de las estructuras que, sólo en los últimos años, y gracias al uso de modelos numéricos en ordenador, ha sido posible superar. Estas dificultades son especialmente llamativas en los puentes, donde la respuesta de la superestructura está íntimamente ligada a la de la infraestructura.

En este artículo se presenta el estudio sísmico de distintos tipos de puentes, con el fin de establecer cuáles de ellos pueden ser calculados con métodos sencillos.

El desarrollo se centra en la comparación de los esfuerzos y desplazamientos que se obtienen cuando se analiza la estructura modelada con elementos finitos, utilizando el Análisis Modal Espectral (que se considera un método apropiado para la realización de cálculos lineales), con los que se obtienen por métodos simplificados. Para poder comparar la importancia de las cargas sísmicas frente a las cargas de diseño establecidas en la Norma de Cálculo de Puentes

de Carreteras, se ha utilizado un espectro de respuesta, para el movimiento del suelo, correspondiente a una estructura situada en una zona sísmica intermedia, con un valor máximo de 15% de g.

MODELO DE LA SOLICITACION

El modelo más habitual para la definición de la carga que produce el terremoto es el del espectro de respuesta que se construye a partir de la respuesta máxima de varios sistemas de 1 grado de libertad, con diferentes frecuencias de resonancia y relaciones de amortiguamiento, siendo la excitación un movimiento en la base igual al producido por el terremoto.

Para la selección del espectro de respuesta utilizado en los ejemplos, se ha chocado con una dificultad esencial: La Norma Española PDS-1, que no ha sido renovada desde 1974, presenta una deficiente definición de la acción sísmica, tanto en lo referente a las aceleraciones máximas, como en las definiciones de riesgo sísmico y espectro de diseño.

En el presente estudio se ha intentado corregir en lo posible las deficiencias señaladas, escogiendo un espectro de diseño en el sentido de la seguridad, modificando al alza el propuesto por la PSD-1, y acercándolo al Eurocódigo, supuesta una ductilidad global, en desplazamientos, de 2,5. En la Figura 1 se presenta el espectro propuesto, y el del Eurocódigo, para tres tipos de terrenos, normalizados a 1 g, y para estructuras con un 5% de amortiguamiento crítico.

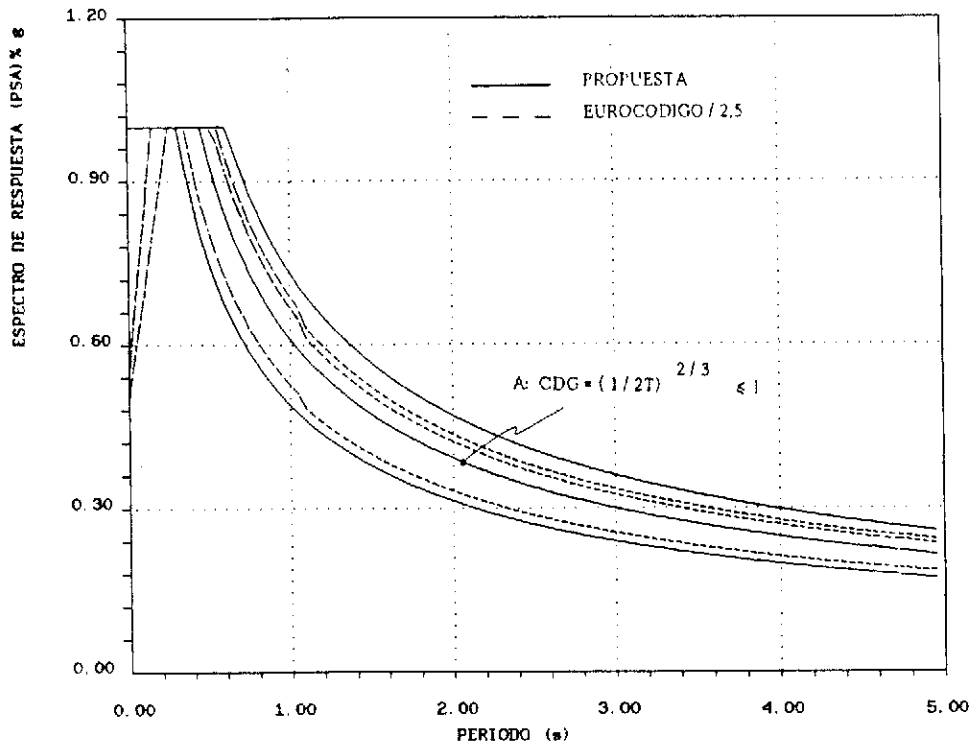


Fig. 1. Comparación del Espectro Normalizado utilizado y el del EUROCODIGO (ductilidad 2.5).

La aplicación de dicho espectro a una estructura situada en una zona sísmica intermedia, y en un terreno intermedio, supone aplicar un 15% de g. como aceleración máxima del suelo para movimientos horizontales (en el mapa sísmico de España que se está manejando en la actualidad, hay valores hasta del 24% de g.), y, por lo tanto, multiplicar el espectro intermedio (A) presentado en la Figura anterior.

La excitación en la dirección vertical se estima en el 70% de la anterior.

MODELO DE LA ESTRUCTURA

El modelo de la estructura se puede realizar utilizando alguno de los métodos de discretización que permita la resolución de las ecuaciones obtenidas del planteamiento general. En este caso se ha optado por un modelo de elementos viga tridimensionales, y se han respetado los criterios habituales en el modelado para los estudios dinámicos: masas concentradas, pero con elementos de poca longitud en los estribos y apoyos de pilares (para evitar una pérdida excesiva de masa en los grados de libertad impedidos que podría falsear los resultados), nudos en los cuartos de la luz de las vigas y en los tercios de los pilares, consideración de las discontinuidades debidas a las juntas de dilatación de los tableros, condiciones de contorno teniendo en cuenta las características específicas del estribo

(en un puente esviado, las condiciones de desplazamiento se deben establecer en los ejes del tablero, y las de giro en los ejes del estribo), etc.

En la mayoría de los ejemplos analizados se ha reducido el tablero a una viga con características tridimensionales, calculándose las propiedades de los pilares (cuando están formados por varias pilas) suponiendo que el tablero se mueve sobre ellos como un sólido infinitamente rígido. En la Figura 2 se presenta el caso de 2 y 3 pilas.

MÉTODOS DE CALCULO EMPLEADOS

Después del estudio de los distintos métodos que existen para la realización del cálculo sísmico de puentes, se han seleccionado los siguientes, con el fin de realizar un análisis comparativo entre ellos.

Análisis modal espectral: El número de modos utilizado ha sido tal, que se ha movilizó el 90% de la masa. Se han considerado dos reglas de combinación, para comprobar su influencia:

RMS: Raíz cuadrada de la suma de cuadrados.

$$Z_{\text{TOTAL}} = \sqrt{\sum_i Z_i^2}$$

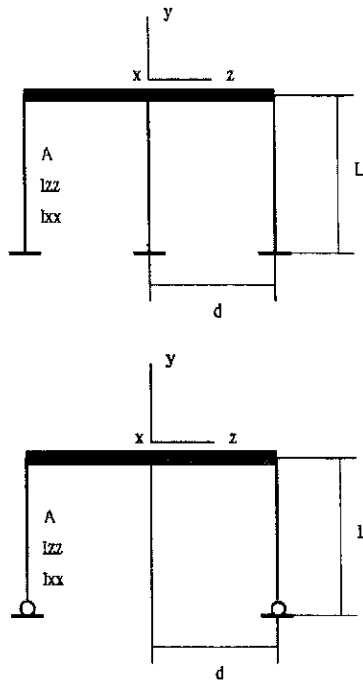


Fig. 2. Propiedades equivalentes de las pilas.

CQC: Combinación cuadrática. Acopla todos los modos a través de un coeficiente que depende de la relación de frecuencias y del % de amortiguamiento.

$$Z_{TOTAL} = \sqrt{\sum_i \sum_j E_{ij} Z_i Z_j}$$

$$E_{ij} = 1$$

$$E_{ij} = f \left[\frac{W_i}{W_j}, Z \right]$$

Análisis modal espectral + "Modo residual": Consiste en considerar los modos más importantes, y aproximar la respuesta de los modos despreciados por su contribución estática. Cuando se aplica esta aproximación, se deben considerar todos los modos incluidos en el rango de frecuencia de la excitación, y aproximar el resto. En el presente estudio, se ha pretendido comprobar la bondad del método, y por ello, se ha aplicado con el primer modo significativo; en los casos en que esta aproximación no ha resultado eficaz, se han utilizado todos los modos hasta 2 Hz, aproximadamente. El contenido en frecuencia del terremoto llega hasta los 33 Hz, pero se han considerado sólo hasta 2 Hz ya que a partir de esta frecuencia el espectro de diseño utilizado es uniforme; este valor uniforme es la aceleración que se ha aplicado al "Modo Residual". Por lo tanto, esto último supone aceptar la combinación de los modos altos como la suma de sus respuestas, con su signo.

$$A^* = 3A \quad I_{xx}^* = \frac{A \cdot d^2}{2}$$

$$I_{yy}^* = \frac{48 I_{zz} (1 + \nu)}{L^2} d^2$$

$$I_{zz}^* = 3 I_{zz} \quad A_{CORTANTE}^* = \frac{72 I_{xx} (1 + \nu)}{L^2}$$

$$A^* = 2A \quad I_{xx}^* = \frac{A \cdot d^2}{2}$$

$$I_{yy}^* = \frac{48 I_{zz} (1 + \nu)}{L^2} d^2$$

$$I_{zz}^* = 2 I_{zz} \quad A_{CORTANTE}^* = \frac{12 I_{xx} (1 + \nu)}{L^2}$$

$$Z_{TOTAL} = \sqrt{\sum_i Z_i^2 + Z_{RES}^2}$$

$$Z_{RES} = Z_{ESTATICA} - \sum Z_i (w = 0)$$

Método simplificado: Se ha utilizado la aproximación de Rayleigh, y sólo se tiene en cuenta el primer modo de vibración. Se sustituye el cálculo dinámico por un análisis estático realizado con una carga equivalente que se obtiene a partir del modo calculado.

Método simplificado + "Modo residual" (Combinación RMS): Este análisis adicional, se ha realizado en algunos casos, con el fin de comprobar si las deficiencias que presenta el método simplificado, se pudiesen corregir con esta aproximación.

$$Z_{TOTAL} = \sqrt{Z_{SIMPLIFICADO}^2 + Z_{RES}^*}$$

$$Z_{RES}^* = Z_{ESTATICA} - Z_{SIMPLIFICADO}$$

Los métodos anteriores, se han aplicado en las tres direcciones del sismo: longitudinal (eje x), transversal (eje z) y vertical (eje y), con los ejemplos que se presentan en el apartado siguiente.

Para cada puente, se han obtenido las cargas estáticas que se deben utilizar para el dimensionamiento, según la norma "Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera", con el fin de analizar la importancia relativa de las cargas producidas por el sismo.

Todos los resultados se han analizado realizando los siguientes pasos:

—Dibujo de las deformadas de los modos de vibración.

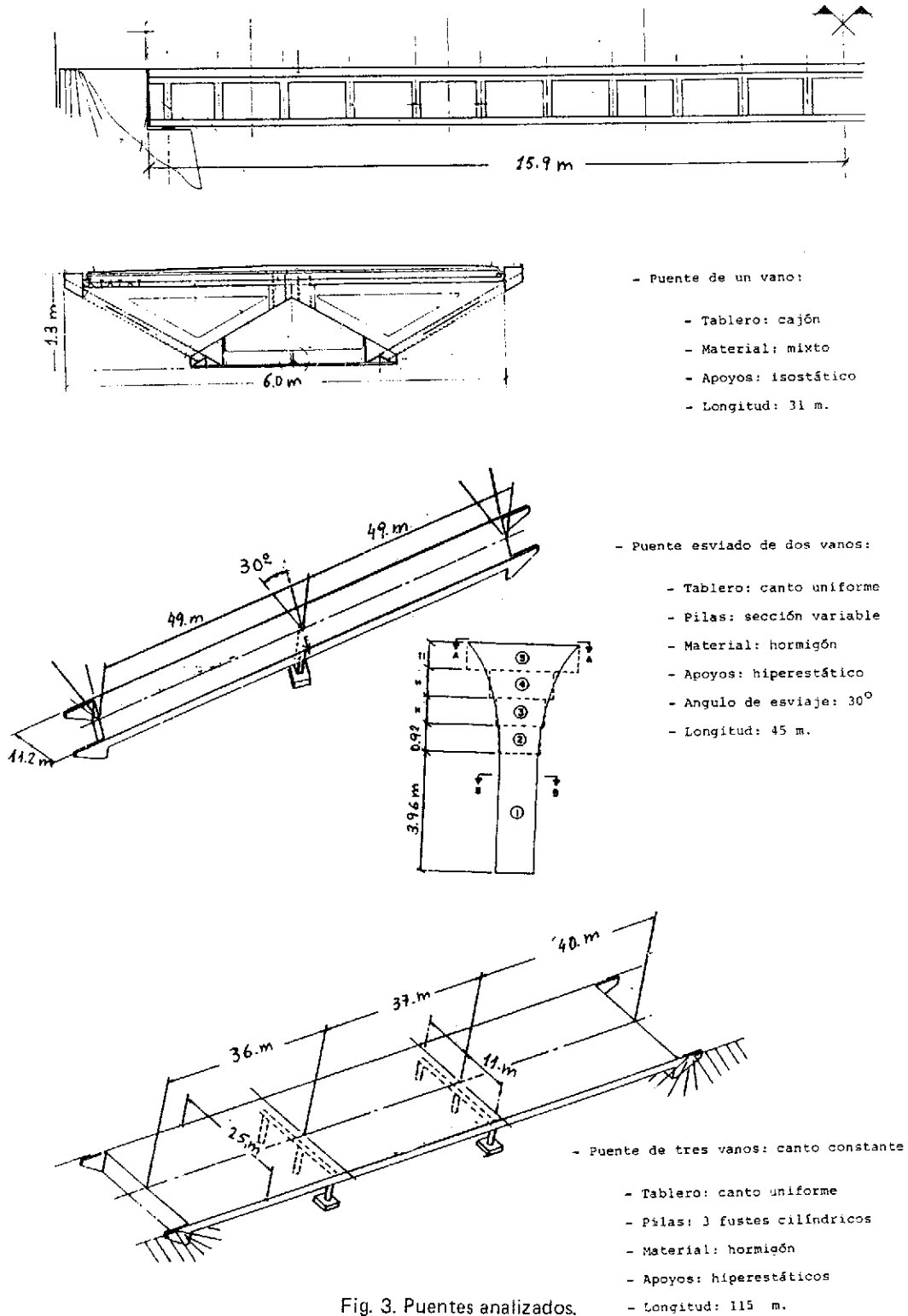
—Tablas, para todos los métodos empleados, de desplazamientos (ejes globales) y esfuerzos (ejes locales).

—Tablas con las fuerzas de reacción (ejes globales) de todos los métodos.

—Diagramas de esfuerzos (ejes locales).

EJEMPLOS ANALIZADOS

En las figuras 3 y 4 se presenta un esquema, en una breve descripción, con las características fundamentales de cada uno de los ejemplos analizados.



- Puente de un vano:

- Tablero: cajón
- Material: mixto
- Apoyos: isostático
- Longitud: 31 m.

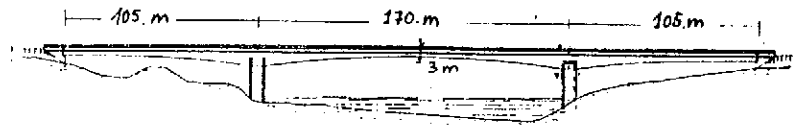
- Puente esviado de dos vanos:

- Tablero: canto uniforme
- Pilas: sección variable
- Material: hormigón
- Apoyos: hiperestático
- Angulo de esviaje: 30°
- Longitud: 45 m.

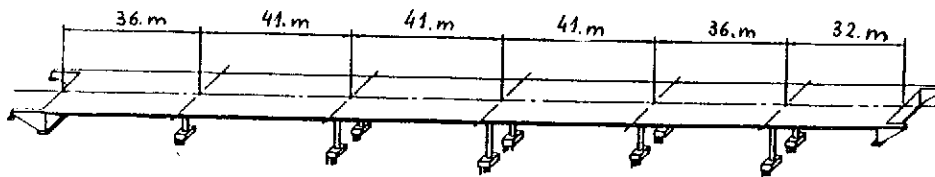
- Puente de tres vanos: canto constante:

- Tablero: canto uniforme
- Pilas: 3 fustes cilíndricos
- Material: hormigón
- Apoyos: hiperestáticos
- Longitud: 115 m.

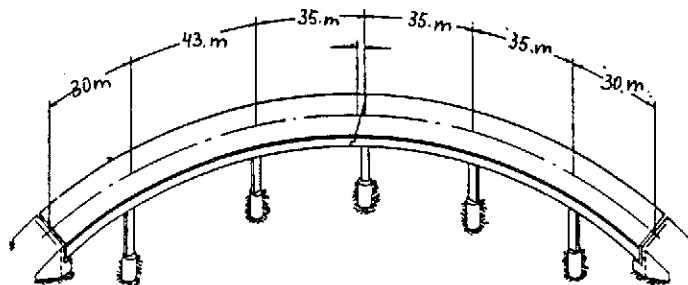
Fig. 3. Puentes analizados.



- Puente de tres vanos: canto variable
- Tablero: canto variable
- Pilas: 2 pantallas separadas
- Material: hormigón
- Apoyos: hiperestáticos
- Longitud: 380 m.



- Puente de seis vanos
- Tablero: canto uniforme
- Pilas: 2 fustes cilíndricos, alturas variables
- Material: hormigón
- Apoyos: hiperestáticos
- Longitud: 228 m.



- Puente circular: 6 vanos
- Tablero: canto uniforme
- Pilas: 1 fuste de sección constante
- Material: hormigón
- Apoyos: hiperestáticos
- Longitud: Desarrollo: 312 m.
- Radio de curvatura: 152 m.

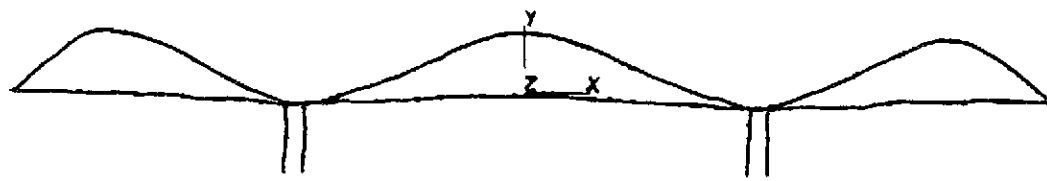
Fig. 4. Puentes analizados.

RESULTADOS OBTENIDOS

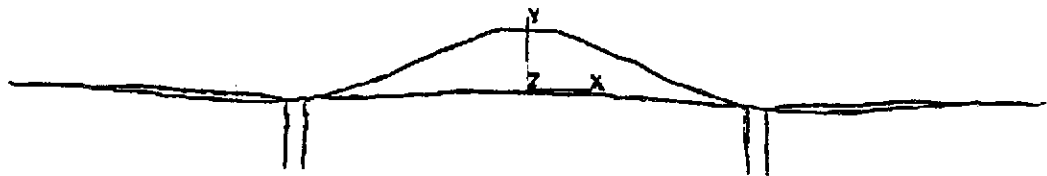
En la Figura 5 se presentan las deformadas de uno de los ejemplos, obtenidas con los distintos métodos de cálculo.

Como apoyo de las conclusiones que a continuación se enumeran, se adjuntan las tablas resumen de los cálculos realizados.

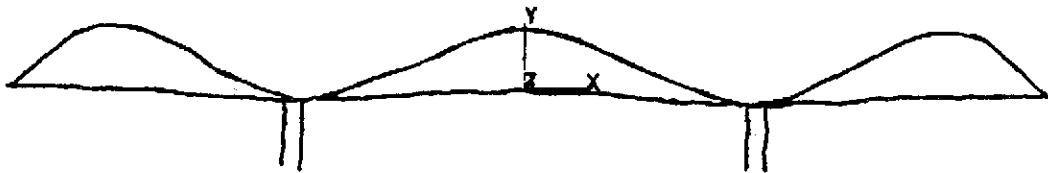
ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL. EJE VERTICAL



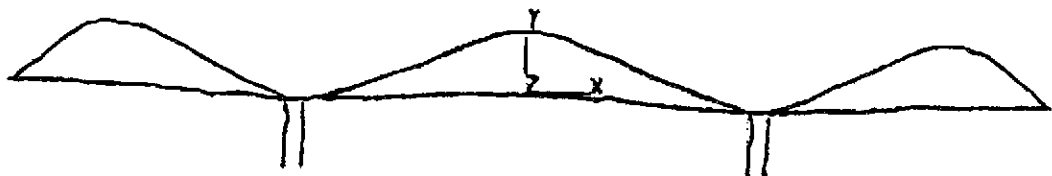
METODO SIMPLIFICADO



"MODO RESIDUAL" + PRIMER MODO



"MODO RESIDUAL" + 3 MODOS



METODO SIMPLIFICADO + "MODO RESIDUAL"

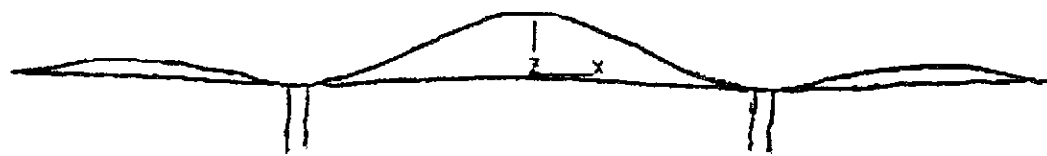


Fig. 5. Deformada del puente de 3 vanos, con canto A variable.

En dichas tablas se recogen los datos más característicos del sismo en cada eje (frecuencias y masas movilizadas), la fuerza total del sismo en cada eje, y una comparación cualitativa entre los distintos métodos analizados.

Para esta comparación, se toman como referencia los resultados del análisis modal espectral, con combinación RMS, y se reseñan las principales diferencias en desplazamientos (D), esfuerzos (E ó F_x : axil, $F_y - F_z$: cortante, M_x : torsor, $M_y - M_z$: flector) y la fuerza de reacción

total (F).

Los símbolos que se utilizan para la comparación son:

- \cong muy similares
- \equiv iguales
- $<$ algo menor (mayor)
- \ll mucho menor.

Cuando en la esquina superior derecha aparece un *, indica que se acepta como válido el cálculo realizado con el método que se compara.

TABLA 1
Resumen Puente de 1 vano

Masa total = $1,12 \times 10^5$ Kg	Longitudinal eje X	Vertical eje Y	Transversal eje Z
N. ^o de modos obtenidos/ % de masa movilizada	—	30 88%	30 82%
1. ^{er} modo: Frecuencia (Hz)/ % de masa movilizada	—	2,726 75%	7,198 74%
1. ^{er} modo significativo Frec. (Hz)/% m. mov.	—	2,726 75%	7,198 74%
Modo M. simplificado Frec. (Hz)/% m. mov.	—	2,51 81%	7,031 77%
Cargas estáticas de diseño Fuerzas totales (M)	Frenado $0,37 \times 10^5$	P.P. + S. Car. 185×10^4	Viento $1,21 \times 10^5$
Fuerza de reacción total en cada eje: RMS (M)	$1,65 \times 10^5$	$1,08 \times 10^4$	$1,55 \times 10^5$
Comp. despl./fuerzas RMS # CQC	—	* CQC \equiv RMS	—
Comp. despl./fuerzas RMS # Método simplificado	—	* $F_{MS} < F_{RMS}$	* $D_{MS} > D_{RMS}$ $M_{XMS} \cong M_{XRMS}$ $F_{MS} < F_{RMS}$
Comp. despl./fuerzas RMS # *Modos + Modo residual	—	* $F_{MR} \gtrsim F_{RMS}$	* $F_{MR} \gtrsim F_{RMS}$
Comp. despl./fuerzas RMS # M. simp. + Modo residual	—	* $F_{SMR} \gtrsim F_{RMS}$	* $D_{SMR} > D_{RMS}$ $M_{XSMR} \cong M_{XRMS}$ $F_{SMR} > F_{RMS}$

TABLA 2

Resumen Puente 2 vanos Esviado (30º)

Masa total = $9,63 \times 10^5$ Kg	Longitudinal eje X	Vertical eje Y	Transversal eje Z
N.º de modos obtenidos/ % de masa movilizada	20 99%	20 95%	30 93%
1.º modo: Frecuencia (Hz)/ % de masa movilizada	0,9206 90%	2,269 76%	1,429 64%
1.º modo significativo Frec. (Hz)/% m. mov.	0,9206 90%	2,269 76%	1,429 64%
Modo M. simplificado Frec. (Hz)/% m. mov.	1,047 94%	2,289 48%	1,478 76%
Cargas estáticas de diseño Fuerzas totales (M)	Frenado $2,22 \times 10^5$	P.P. x S. Car. $13,9 \times 10^6$	Viento $3,92 \times 10^5$
Fuerza de reacción total en cada eje: RMS (M)	$8,39 \times 10^5$	$0,46 \times 10^3$	$7,19 \times 10^5$
Comp. despl./fuerzas RMS # CQC	* CQC \leq RMS	* CQC \equiv RMS	* CQC \cong RMS
Comp. despl./fuerzas RMS # Método simplificado	$D_{MS} \geq D_{RMS}$ $M_{y_{MS}}^{TAB} \leq M_{y_{RMS}}^{TAB}$ $F_{MS} \geq F_{RMS}$	* MS \geq RMS	$F_{y_{MS}}^{TAB} \ll F_{y_{RMS}}^{TAB}$ $M_{z_{MS}}^{TAB} \ll M_{z_{RMS}}^{TAB}$
Comp. despl./fuerzas RMS # *Modos + Modo residual	* = 3 $D_{MR} \leq D_{RMS}$ $F_{MR} \leq F_{RMS}$	* = 1 MR \equiv RMS	* = 3 MR \equiv RMS
Comp. despl./fuerzas RMS # M. simp. + Modo residual	$D_{SMR} \geq D_{RMS}$ $M_{y_{SMR}}^{TAB} \leq M_{y_{RMS}}^{TAB}$ $F_{SMR} \geq F_{RMS}$	* SMR \geq RMS	$F_{y_{SMR}}^{TAB} \ll F_{y_{RMS}}^{TAB}$ $M_{z_{SMR}}^{TAB} \ll M_{z_{RMS}}^{TAB}$

TABLA 3

Resumen Puente 3 vanos canto constante

Masa total = $3,29 \times 10^6$ Kg	Longitudinal eje X	Vertical eje Y	Transversal eje Z
N. ^o de modos obtenidos/ % de masa movilizada	31 99%	31 95%	31 93%
1. ^{er} Modo: Frecuencia (Hz)/ % de masa movilizada	1,611 94%	2,13 15%	3,23 80%
1. ^{er} Modo significativo Frec. (Hz)/% m. mov.	1,611 94%	3,90 60%	3,23 80%
Modo M. simplificado Frec. (Hz)/% m. mov.	1,627 96%	2,17 2,70 32% 52%	3,55 78%
Cargas estáticas de diseño Fuerzas totales (M)	Frenado $5,66 \times 10^5$	P.P. + S. Car. $43,63 \times 10^6$	Viento $0,45 \times 10^6$
Fuerza de reacción total en cada eje: RMS (M)	$39,6 \times 10^5$	$2,21 \times 10^6$	$3,95 \times 10^6$
Comp. despl./fuerzas RMS # CQC	* CQC \equiv RMS	* CQC \equiv RMS	* CQC \equiv RMS
Comp. despl./fuerzas RMS # Método simplificado	* $F_{XMS}^{PILAR} < F_{XRMS}^{PILAR}$	* CARGA ALTERN $D_{MS} > D_{RMS}$ $F_{XMS}^{PILAR} < F_{XRMS}^{PILAR}$	* MS \equiv RMS
Comp. despl./fuerzas RMS # *Modos + Modo residual	* ★ = 1 MR \equiv RMS	* ★ = 1 MR \equiv RMS	* ★ = 1 MR \equiv RMS
Comp. despl./fuerzas RMS # M. simp. + Modo residual	* $F_{XSMR}^{PILAR} < F_{XRMS}^{PILAR}$	—	* SMR \equiv RMS

TABLA 4

Resumen Puente 3 vanos canto variable

Masa total = $1,23 \times 10^7$ Kg	Longitudinal eje X	Vertical eje Y	Transversal eje Z
N. ^o de modos obtenidos/ % de masa movilizada	30 97%	30 78%	30 87%
1. ^{er} modo: Frecuencia (Hz)/ % de masa movilizada	0,377 95%	0,9898 4%	0,8962 36%
1. ^{er} modo significativo Frec. (Hz)/% m. mov.	0,377 95%	1,737 41%	1,965 45%
Modo M. simplificado Frec. (Hz)/% m. mov.	0,41 96%	1,42 39%	0,981 51%
Cargas estáticas de diseño Fuerzas totales (M)	Frenado $0,95 \times 10^6$	P.P. + S. Car. $140,36 \times 10^6$	Viento $1,48 \times 10^6$
Fuerza de reacción total en cada eje: RMS (M)	$5,68 \times 10^6$	$14,90 \times 10^6$	$11,2 \times 10^6$
Comp. despl./fuerzas RMS # CQC	* CQC \equiv RMS	* CQC \equiv RMS	* CQC \equiv RMS
Comp. despl./fuerzas RMS # Método simplificado	* MS \geq RMS	* MS \neq RMS (Vano lateral)	* $D_{MS}^{VANO\ LAT} \ll D_{RMS}^{VANO\ LAT}$ $F_{ZMS}^{PILAR} \ll F_{RMS}^{PILAR}$
Comp. despl./fuerzas RMS # *Modos + Modo residual	* ★ = 1 MR \equiv RMS	* ★ = 1 $My_{MR} \ll My_{RMS}$	* ★ = 3 MR \equiv RMS
Comp. despl./fuerzas RMS # M. simp. + Modo residual	* SMR $>$ RMS	* SMR \neq RMS	* SMR \approx RMS

TABLA 5

Resumen Puente 6 vanos canto constante

Masa total = $5,64 \times 10^6$ Kg	Longitudinal eje X	Vertical eje Y	Transversal eje Z
N. ^o de modos obtenidos/ % de masa movilizada	25 96%	40 86%	25 88%
1. ^{er} modo: Frecuencia (Hz)/ % de masa movilizada	1,660 29%	1,660 1%	0,7212 64%
1. ^{er} modo significativo Frec. (Hz)/% m. mov.	1,660 29%	1,687 4%	0,7212 64%
Modo M. simplificado Frec. (Hz)/% m. mov.	2,5 97%	1,81 21%	0,782 65%
Cargas estáticas de diseño Fuerzas totales (M)	Frenado $0,71 \times 10^6$	P.P. + S. Car. $69,6 \times 10^6$	Viento $0,90 \times 10^6$
Fuerza de reacción total en cada eje: RMS (M)	$5,01 \times 10^6$	$3,55 \times 10^6$	$3,59 \times 10^6$
Comp. despl./fuerzas RMS # CQC	$\frac{F_{CENTRAL}^{PILAR}}{X_{CQC}} <$ $< \frac{F_{CENTRAL}^{PILAR}}{X_{RMS}}$	* CQC \neq RMS	* CQC \equiv RMS
Comp. despl./fuerzas RMS # Método simplificado	MS \neq RMS	$E_{MS} < F_{RMS}$	* MS \neq RMS $F_{ZMS}^{1ST} < F_{ZRMS}^{1ST}$
Comp. despl./fuerzas RMS # *Modos + Modo residual	* = 4 MR \equiv RMS	* = 4 $F_{XMR}^{TAB} < F_{XRMS}^{TAB}$ $F_{YMR}^{TAB} < F_{YRMS}^{TAB}$	* = 1 MR \equiv RMS $F_{ZMR}^{TAB} > F_{ZRMS}^{TAB}$
Comp. despl./fuerzas RMS # M. simp. + Modo residual	—	—	* SMR \equiv RMS $F_{ZSMR}^{TAB} > F_{ZRMS}^{TAB}$

TABLA 6
Resumen Puente curvo

Masa total = $4,31 \times 10^6$ Kg	Longitudinal eje X	Vertical eje Y	Transversal eje Z
N. ^o de modos obtenidos/ % de masa movilizada	20 96%	40 87%	20 90%
1. ^{er} modo: Frecuencia (Hz)/ % de masa movilizada	2,547 40%	2,529 1%	2,529 52%
1. ^{er} modo significativo Frec. (Hz)/% m. mov.	2,547 40%	4,665 72%	2,529 52%
Modo M. simplificado Frec. (Hz)/% m. mov.	2,87 86%	4,38 87%	2,63 85%
Cargas estáticas de diseño Fuerzas totales (M)	Frenado $0,41 \times 10^6$	P.P. + S. Car. $50,6 \times 10^6$	Viento $0,83 \times 10^6$
Fuerza de reacción total en cada eje: RMS (M)	$4,28 \times 10^6$	$2,95 \times 10^6$	$4,19 \times 10^6$
Comp. despl./fuerzas RMS # CQC	$DY_{CQC} < DY_{RMS}$ $Fy_{CQC}^{TAB} < Fy_{RMS}^{TAB}$	$DZ_{CAI} < DZ_{RMS}$ $FZ_{CAI} < FZ_{RMS}$	CQC \cong RMS
Comp. despl./fuerzas RMS o CQC # Método simplificado	$Fx_{MS}^{PILAR} < Fx_{CAI}^{PILAR}$ $Fd_{MS}^{PILAR} < Fd_{CAI}^{PILAR}$	MS \neq CQC MS \neq RMS	MS \neq CQC MS \neq RMS

La elaboración de estos resúmenes se ha realizado a partir de tablas cuantitativas previas. Las principales conclusiones que se obtienen para cada caso analizado son:

Puente de un vano: Cualquier método de los analizados es válido para el estudio, aunque el uso del método simplificado dé como resultado fuerzas de reacción menores. En el eje transversal, este método predice torsiones mayores. Esto es debido a la utilización de la deformada

producida por la carga de viento, que debido al gran detalle con que se ha modelado el puente, no se aplica exactamente en el eje del mismo. El problema de las fuerzas de reacción, se soluciona con la aplicación del "modo residual". Una de las principales conclusiones obtenidas para este puente, en el que se ha utilizado un modelo con un gran número de g.d.l., es la buena aproximación que se consigue con el cálculo de sólo 1 modo de vibración en cada eje y el "Modo residual", frente a la necesidad de calcular más

de 30 modos para llegar al 90% de la masa movilizada.

Puente esviado de dos vanos: Cualquiera de los métodos es aceptable para el cálculo del sismo vertical, mientras que para los sismos horizontales, el método simplificado no es capaz de recoger el comportamiento de la estructura, debido a que los primeros modos de vibración tienen deformaciones importantes, tanto en el eje longitudinal como en el transversal.

El uso del modo residual, permite obtener resultados análogos al RMS, con el cálculo de muy pocos modos. En la comparación entre la combinación CQC y RMS, se observa que la primera predice valores algo menores para el eje longitudinal, mientras que en el eje transversal unos valores son mayores y otros menores. Este efecto se produce cuando modos significativos tienen frecuencias muy cercanas, y la contribución de las distintas variables tienen signos contrarios.

Puente de tres vanos: Canto constante: En este caso, los sismos horizontales pueden ser analizados por cualquiera de los métodos, ya que si bien la aplicación del método simplificado en el eje longitudinal subestima el esfuerzo axil en los pilares, esta sollicitación será siempre mucho menor que la producida por las cargas de peso propio. Para el sismo vertical, se han intentado dos aproximaciones. Con la primera se ha pretendido utilizar la deformada del primer modo de vibración con desplazamientos apreciables en el eje vertical (carga alterna), y con la segunda, el modo que más masa moviliza (carga en el mismo sentido: peso propio). La frecuencia obtenida para el primer caso es más aproximada que la del segundo, pero en ninguno de los casos se obtiene un cálculo final razonable.

El problema vuelve a ser el acoplamiento del movimiento según dos direcciones en un solo modo, que en este caso se producen entre el horizontal y el vertical.

Puente de tres vanos: canto variable: Las conclusiones respecto a los métodos que son válidos, son análogas a las expuestas en el párrafo anterior. En este caso, para el método simplificado, en el eje vertical se ha utilizado la carga en la misma dirección, obteniéndose una frecuencia inferior a la del modo correspondiente. La principal diferencia de este puente con el anterior, está en la longitud del vano central (170 m) y de los laterales (105 m). Por esta razón, en este puente, y para el sismo vertical, el método simplificado reproduce las cargas en el vano central, y son muy distintas las obtenidas en el vano lateral.

Puente de seis vanos: En este ejemplo, sólo se ha conseguido obtener una aproximación razonable con el método simplificado en el sismo en la dirección transversal. El esfuerzo cortante en

el estribo es menor que el obtenido con la combinación RMS. Para mejorar la aproximación, se puede añadir el modo residual, que aunque predice cortantes mayores en el tablero, implica un margen de seguridad adicional.

Para el estudio de los sismos producidos en los ejes longitudinal y vertical, se pueden considerar dos puentes de tres vanos, debido a la existencia de una junta de dilatación en el pilar central. Se vuelve a producir el efecto detectado en el puente de 3 vanos de canto constante, de un acoplamiento entre los desplazamientos en el eje longitudinal y vertical. En este caso, el problema se hace más patente que en el puente anterior, impidiendo la aplicación del método simplificado para el análisis.

Este fenómeno se presenta debido al acoplamiento de las frecuencias de vibración que se obtienen del movimiento del tablero como sólido rígido sobre los pilares y la flexión del tablero como viga continua. Ambas son muy similares, e incluso esta última algo menor que la primera y, por lo tanto, se puede prever un fuerte acoplamiento de la respuesta en ambos ejes.

Puente curvo: Este ejemplo se ha incluido en el análisis, con el fin de cubrir una tipología más, aunque ya se ha expuesto por diversos autores que, dada la complejidad y grado de acoplamiento entre los distintos ejes, no es válida la utilización del método simplificado.

CONCLUSIONES

Como conclusiones generales de los distintos ejemplos analizados se obtienen:

—Las cargas producidas por los sismos horizontales, en zonas medias (grado MSK VII: 15% g) son mayores que las de diseño estático para estos ejes, mientras que las producidas por los sismos verticales son siempre mucho menores que las estáticas correspondientes. Por lo tanto, para los análisis sencillos, en los que se puede aplicar el método simplificado, sólo es necesario analizar los sismos horizontales.

Esta conclusión se aplica en la mayoría de las normas de cálculo sísmico de puentes, pero para el caso de puentes pretensados se debe considerar con cierta precaución, ya que la carga sísmica vertical provoca en el tablero momentos de signo contrario a los normalmente utilizados para el dimensionado, pudiendo producir tensiones no consideradas.

—Una buena aproximación del método simplificado, sólo se puede asegurar cuando:

- a) El grado de esviaje del puente no sea elevado (algunos autores hablan de 20°).
- b) La longitud de los vanos sea más o menos uniforme.

c) La rigidez de los pilares, ante un movimiento como sólido del tablero, sea claramente menor que la rigidez a flexión de éste.

—Con el Análisis Modal Espectral, la utilización de la combinación RMS o CQC, no asegura valores mayores y por tanto estar del lado de la seguridad. De cualquier forma, para cuando los modos tienen frecuencias con diferencias menores al 10%, se recomienda el uso de la CQC.

—El uso del "Modo Residual" con el Análisis Modal Espectral, presenta claras ventajas, especialmente en los ejes transversal y vertical, ya que evita el cálculo de un gran número de modos.

—El uso del "Modo Residual" con el método simplificado, en general no aporta grandes ventajas. El único beneficio que se puede considerar es la obtención de cargas más realistas en los apoyos, ya que, de alguna forma, se está considerando toda la masa del puente.

AGRADECIMIENTO

El trabajo presentado, ha sido realizado bajo el patrocinio de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Se agradece especialmente la colaboración y aportación de ideas de D. Ramón del Cuvillo.

REFERENCIAS

1. AASHTO (1977) Standard Specifications for Highway Bridges.
2. ASCE (1981) Recommended Design Loads for Bridges. Proceedings of the ASCE, SI-7, July 1981.
3. EUROCODIGO B (1988) Commission of the European Communities "Structures in Seismic Regions Design".

4. LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES (1985). Estudio para la redacción de unas recomendaciones para el cálculo de Puentes de Carretera frente a Acciones Sísmicas. MOPU.

5. PDS-1. Normas Sismorresistentes 1974.

RESUMEN

Se presenta un estudio comparativo del cálculo sísmico de cinco puentes diferentes, utilizando diversos procedimientos. El objetivo es establecer la validez de los métodos sencillos, habitualmente utilizados, en función del tipo estructural del puente.

El desarrollo se centra en el estudio de la importancia de las cargas dinámicas producidas en un puente situado en una zona sísmica intermedia, respecto de las cargas estáticas exigidas por la Norma de Cálculo de Puentes de Carreteras, haciendo especial mención de las diferencias que aparecen cuando la estructura está realizada en hormigón pretensado.

SUMMARY

An study comparing the seismic response of five bridges is presented. The objective is to weight the results obtained with different computational methods in order to establish the respective fields of application.

Two combination rules (RMS & CQC), the approximate (Rayleigh based) method and the modal acceleration method are compared.

All methods compute the structural response using the spectral modal method.