

Excitación sísmica asíncrona en puentes: patrones de asincronismo, métodos de análisis y tipologías estudiadas

Asynchronous seismic excitation in bridges: asynchronous patterns, analysis methods and structural types studied

J. Ardila^{1*}, G. Chio *, J. Benjumea*

*Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 25/10/2017

Fecha de Aceptación: 23/01/2018

PAG 93-110

Abstract

This paper shows the importance of performing an asynchronous dynamic analysis for some bridge types. First, the existence and damage caused by the asynchronous seismic excitation are explored. Then, the general mathematic expression that describes the movement of structures under non-uniform seismic excitation in its supports and the asynchronous patterns that characterize the asynchronous phenomenon (wave passage, loss of correlation, and local site effect) are introduced. In a general approach, the analysis methods that have been implemented and the design codes that emphasize the importance of asynchronous analysis on bridges are also presented. Finally, the results obtained by some authors interested in bridges subjected to asynchronous seismic excitation for several structural types are discussed.

Keywords: Asynchronous analysis, uniform analysis, asynchronous seismic excitation, uniform seismic excitation, bridge

Resumen

El presente documento pretende exponer la importancia de realizar un análisis dinámico asíncrono para algunos tipos de puentes. Primero, se exploran los antecedentes que evidencian la existencia y los daños producidos por la excitación sísmica asíncrona. Luego, se presenta la expresión matemática general que describe el movimiento de estructuras con excitación sísmica no uniforme en los apoyos y se determinan los patrones de asincronismo que caracterizan adecuadamente el fenómeno de asincronismo: onda pasajera, pérdida de coherencia y efecto local de sitio. Además, de manera general, se presentan los métodos de análisis que han sido implementados y las normativas que enfatizan la importancia del análisis asíncrono en puentes. Por último, se discuten los resultados obtenidos por algunos autores interesados en puentes sometidos a excitación sísmica asíncrona según la tipología.

Palabras clave: Análisis asíncrono, análisis uniforme, excitación sísmica asíncrona, excitación sísmica uniforme, puente

1. Introducción

Desde sus comienzos, los análisis sísmicos lineales y no lineales realizados en puentes atirantados se llevaron a cabo mediante métodos determinísticos. En estos, se asume que los movimientos sísmicos llegan a todos los apoyos de la estructura al mismo tiempo, es decir, ocurre una excitación sísmica uniforme considerando velocidades de propagación de la onda sísmica infinita (Soyluk y Dumanoglu, 2000). Según (Luco y Wong, 1986), los registros sísmicos obtenidos a partir de arreglos de acelerómetros tales como el SMART1 en Taiwán, revelaron variaciones en la onda sísmica en el espacio y el tiempo, de allí que en la década de los sesentas se inició la inclusión de métodos en los cuales la excitación sísmica era asíncrona, es decir, que los movimientos sísmicos llegaban a los apoyos con un desfase temporal, debido a que las velocidades de propagación de la onda sísmica se asumen finitas en función de la rigidez del suelo (Valdebenito y Aparicio, 2005) (Burdette et al., 2008).

Los primeros análisis asíncronos se llevaron a cabo en estructuras extensas y de múltiples soportes tales como líneas de transmisión de energía (Mehanny et al., 2014), (Ghobarah

et al., 1996), las presas (Bayraktar et al., 1996), edificios simétricos y asimétricos donde se puede evaluar la componente torsional debido a la excitación múltiple en sus apoyos según (Hao, 1997), y líneas de vida (Deodatis, 1996).

Investigadores interesados en el fenómeno asíncrono han enfocado sus esfuerzos en estudiar su efecto en puentes de diversas tipologías. Algunos ejemplos de dichos estudios son: (Wang et al., 1999) analizando puentes de grandes luces; (Alvarez et al., 2002), (Álvarez y Aparicio, 2003) incluyendo asincronismo en puentes de luces medias como los puentes arco; (Nutti y Vanzi 2005) interesados en puentes de poca longitud; y otros como (Fernandez et al., 2013) quienes encontraron de manera general que si la longitud del puente es mayor a la longitud de onda del movimiento sísmico o que si existe algún accidente topográfico considerable, entonces partes del puente estarán sujetas a excitaciones diferentes y considerables en sus apoyos. En la misma línea, (Kaiming et al., 2013) también resaltan la importancia de realizar análisis asíncrono en puentes sometidos a cambios topográficos bruscos.

La presente revisión pretende mostrar el estado actual del conocimiento respecto a los aportes realizados por diferentes investigadores, quienes han estudiado el comportamiento de puentes sometidos a la excitación sísmica asíncrona. Con lo anterior, se pretende reunir las evidencias necesarias para determinar bajo qué condiciones debe

¹ Autor de Correspondencia:

Universidad Industrial de Santander, Colombia
E-mail: john.ardila1@correo.uis.edu.co



realizarse un análisis asíncrono en puentes y que herramientas existen para llevar a cabo el tipo de análisis mencionado. Para cumplir dicho fin, el documento rescata los antecedentes, es decir, daños en estructuras atribuidos al asincronismo; los métodos de análisis disponibles con sus ventajas y desventajas; los requerimientos plasmados en normativas y guías de diseño, los cuales introducen el análisis asíncrono teniendo en cuenta parámetros como la longitud total del puente, el tipo de suelo de apoyo, entre otros; y los resultados obtenidos de análisis asíncronos en puentes agrupados por tipologías. El documento finaliza presentando las conclusiones relevantes de la revisión realizada.

2. Antecedentes

La necesidad de realizar un análisis asíncrono en puentes se ha justificado, en gran medida, debido a la falla de una porción del viaducto interestatal 10 y el Gavin Canyon Bridge durante el sismo de Northridge en 1994, y el colapso parcial de algunos viaductos de la ciudad de Kobe en 1995. Dichas fallas se atribuyeron a complejidades geométricas como el esviaje en los estribos para el caso del Gavin Canyon Bridge, juntas de expansión inadecuadas, movimientos diferenciales a nivel de la cimentación y movimientos torsionales semejantes a los de una serpiente (efecto de serpiente), siendo los dos últimos efectos asociados a la excitación sísmica asíncrona (Burdette et al., 2006). Vale la pena mencionar que el colapso parcial de algunos viaductos de la ciudad de Kobe se debe en parte a los efectos del suelo sobre la estructura a nivel local, especialmente en suelos blandos donde el terreno filtra el contenido de frecuencias del terremoto, produciendo ondas superficiales teniendo el periodo propio del suelo y generando daños importantes sobre la estructura cuando el periodo fundamental de la estructura es similar al periodo propio del suelo (Barbat et al., 2005).

Adicionalmente, gracias al constante monitoreo del puente Evgripos en Grecia desde 1994, se tienen registros de eventos sísmicos de baja intensidad los cuales sustentan la presencia de desplazamientos diferenciales a nivel de los apoyos, atribuidos a la excitación sísmica asíncrona; según (Karakostas et al., 2011) dicho fenómeno puede ser favorable al reducir los desplazamientos en el centro de la luz y los momentos flectores en la base de las pilas, sin embargo, pueden ser perjudiciales al aumentar los desplazamientos en la parte superior de las pilas y las fuerzas internas fuera del plano de los momentos flectores.

3. Excitación Multisoporte

Para estructuras con excitación multisoporte en las cuales se requiere incluir los grados de libertad en los soportes, la ecuación de equilibrio dinámico general puede escribirse como (Chopra, 2014):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{M}_c \\ \mathbf{M}_c^T & \mathbf{M}_g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \ddot{\mathbf{u}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{C}_c \\ \mathbf{C}_c^T & \mathbf{C}_g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{u}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{K}_c^T & \mathbf{K}_g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{u} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{F} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Donde,

\mathbf{M} , \mathbf{C} y \mathbf{K} , son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez respectivamente, asociadas a los grados de libertad sin restricciones.

\mathbf{M}_g , \mathbf{C}_g y \mathbf{K}_g , son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez respectivamente, asociadas a los grados de libertad de los soportes.

\mathbf{M}_c , \mathbf{C}_c y \mathbf{K}_c , son las matrices de acople de masa, amortiguamiento y rigidez respectivamente, asociadas a ambos conjuntos de grados de libertad.

\mathbf{x} , es el vector desplazamiento total de los grados de libertad sin restricciones.

\mathbf{u} , es el vector desplazamiento en los soportes.

\mathbf{F} , es el vector fuerza en los grados de libertad de los soportes.

(Bayraktar et al., 1996), (Hao 1997), (Konakli y Kiureghian, 2011), entre otros, han determinado que el desplazamiento total (\mathbf{x} en la ecuación 1) de un punto en la estructura bajo análisis asíncrono, puede expresarse como la suma de dos componentes: una dinámica (\mathbf{x}_d), producida por fuerzas inerciales y otra pseudo-estática (\mathbf{x}_{ps}), producida por movimientos diferenciales en la base, ver ecuación 2.

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{u} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_{ps} \\ \mathbf{u} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_d \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

La primera parte de la ecuación 2, proporciona las fuerzas (\mathbf{F}_s) necesarias en los apoyos, los cuales imponen estáticamente los desplazamientos diferenciales \mathbf{x}_{ps} , a nivel de la cimentación para cada instante de tiempo, mediante la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{K}_c^T & \mathbf{K}_g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{u} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_s \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Ahora, tomando la primera línea de la ecuación 1, se tiene:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{M}_c\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_c\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{x} + \mathbf{K}_c\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (4)$$

Reemplazando la ecuación 2 en la ecuación 4, se tiene:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}\mathbf{x}_d = \mathbf{F}_{ef}(t) \quad (5)$$

Donde el vector de fuerzas sísmicas efectivas estará dado por:

$$\mathbf{F}_{ef}(t) = -(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_{ps} + \mathbf{M}_c\ddot{\mathbf{u}}) - (\mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}_{ps} + \mathbf{C}_c\dot{\mathbf{u}}) - (\mathbf{K}\mathbf{x}_{ps} + \mathbf{K}_c\mathbf{u}) \quad (6)$$

El vector de fuerzas sísmicas efectivas puede escribirse de una manera más simplificada, teniendo en cuenta la Ecuación 3.

$$\mathbf{K}\mathbf{x}_{ps} + \mathbf{K}_c\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (7)$$

De esta manera, los desplazamientos pseudo-estáticos \mathbf{x}_{ps} se pueden expresar en términos de desplazamientos específicos en los apoyos \mathbf{u} .

$$\mathbf{x}_{ps} = \mathbf{l}\mathbf{u} \quad (8)$$

$$\mathbf{l} = -\mathbf{K}^{-1}\mathbf{K}_c \quad (9)$$

Donde, \mathbf{l} es la matriz de influencia encargada de describir la influencia que tiene cada desplazamiento en los apoyos sobre cada grado de libertad atribuido a la superestructura. Sustituyendo las ecuaciones 7 y 8 en la ecuación 6, se tiene:

$$\mathbf{F}_{ef}(\mathbf{t}) = -(\mathbf{M}\mathbf{l} + \mathbf{M}_c)\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{t}) - (\mathbf{C}\mathbf{l} + \mathbf{C}_c)\dot{\mathbf{u}}(\mathbf{t}) \quad (10)$$

Si se prescriben las aceleraciones $\ddot{u}(\mathbf{t})$ y las velocidades $\dot{u}(\mathbf{t})$ del terreno en los soportes, con la Ecuación 10 se conocen las fuerzas sísmicas efectivas, y así se completa la formulación de la ecuación que controla el movimiento asíncrono.

El principal inconveniente de aplicar el concepto de movimiento asincrónico ha sido establecer la forma adecuada de caracterizar e introducir la excitación sísmica asíncrona en el análisis dinámico (Lou y Zerva, 2005), específicamente en la forma de obtener o generar los registros sísmicos para cada uno de los soportes de la estructura. (Ramadam y Novak, 1993) propusieron una técnica de generación aleatoria de desplazamientos incluyendo características no estacionarias, utilizando una función sinusoidal en función del tiempo. Sin embargo, en la actualidad existen tres formas de obtener los sismogramas artificialmente (Sgambi et al., 2014):

- i) Seleccionando y modificando acelerogramas reales.
- ii) Generando acelerogramas artificiales en base a un modelo de fuente sísmica.
- iii) Generando acelerogramas artificiales compatibles con el espectro de respuesta local.

Cabe resaltar que ninguna de las técnicas mencionadas anteriormente está exenta a errores o aproximaciones en comparación a un evento sísmico real. Por ejemplo (Deodatis, 1996), intentó aportar eficiencia computacional a los métodos de generación de sismogramas artificiales incluyendo la transformada de Fourier, pero el método propuesto deja de lado la componente no estacionaria inherente en sismos.

4. Patrones de Asincronismo

A la excitación sísmica asíncrona se le atribuyen cuatro patrones de asincronismo, según (Mezoueret et al., 2010), (Ramadam et al., 2015) y (Snaebjornsson y Sigbjornsson, 2008). Sin embargo, de manera general existen seis patrones de asincronismo según (Valdebenito y Aparicio, 2005): onda pasajera, fenómeno de incoherencia, condiciones locales de suelo, atenuación inelástica, expansión geométrica y extensión de la fuente sísmica. Los últimos tres patrones no tienen mayor incidencia en la excitación sísmica asíncrona, por lo tanto, los patrones de asincronismo más utilizados según (Sextos et al., 2004) son:

i) Onda pasajera: desfase temporal en la llegada de la onda a cada uno de los apoyos de la estructura. El efecto de onda pasajera en función de la frecuencia angular (ω) y la distancia entre apoyos (d_{kl}), se determina como:

$$\gamma_{kl}^{(w)}(\omega) = \exp\left[-\frac{i\omega d_{kl}^L}{V_{app}}\right] \quad (11)$$

Donde,
 d_{kl}^L , es la proyección de d_{kl} en la dirección de propagación y
 V_{app} , velocidad aparente de la onda en el medio rcososo.

ii) Fenómeno de incoherencia o pérdida de coherencia: pérdida de similitud entre señales debido a las múltiples reflexiones, refracciones y superposiciones durante la propagación de la onda en el medio discontinuo y heterogéneo. El efecto por pérdida de coherencia en función de la frecuencia angular (ω), se determina como:

$$\gamma_{kl}^{(i)}(\omega) = \cos[\beta(d_{kl}, \omega)] \exp\left[-\frac{1}{2}\alpha^2(d_{kl}, \omega)\right] \quad (12)$$

Donde,
 d_{kl} , distancia horizontal entre los apoyos k y l , y
 α y β , son ángulos que dependen de d_{kl} y ω .

iii) Condiciones locales de suelo: la variación significativa del tipo de suelo sobre el cual se encuentran cimentados los diferentes apoyos de la estructura produce modificaciones a la aceleración pico del suelo y la frecuencia del movimiento telúrico en superficie, características que dependen del tipo de suelo, las condiciones del lugar y el contraste de velocidades entre capas superpuestas. El efecto local de sitio en función de la frecuencia angular (ω), se determina como:

$$\gamma_{kl}^{(s)}(\omega) = \exp[i\theta_{kl}^{(s)}(\omega)] \quad (13)$$

$$\tan^{-1}\left[\frac{\theta_{kl}^{(s)}(\omega)}{\omega_k^2(\omega_k^2 - \omega^2) + 4\xi_k^2\omega_k^2\omega^2}\right] - \tan^{-1}\left[\frac{-2\xi_l\omega_l\omega^3}{\omega_l^2(\omega_l^2 - \omega^2) + 4\xi_l^2\omega_l^2\omega^2}\right] \quad (14)$$



Donde,
 ξ_k y ξ_l , relaciones de amortiguamiento del suelo en los puntos k y l , respectivamente.
 ω_k y ω_l , frecuencias de resonancia del suelo en los puntos k y l , respectivamente.

La excitación sísmica asíncrona se descompone entonces en tres partes mediante la función de coherencia (γ_{kl}):

$$\gamma_{kl}(\omega) = \gamma_{kl}^{(i)}(\omega) \gamma_{kl}^{(w)}(\omega) \gamma_{kl}^{(s)}(\omega) \quad (15)$$

Donde,
 ω , frecuencia angular, y γ_{kl} , la función de coherencia entre los apoyos k y l , en función de la frecuencia angular ω .

Los subíndices k y l , indican los punto k y l de la estructura con $k, l = 1, 2, \dots, N$ apoyos.

Los superíndices (i), (w) y (s), hacen referencia a el efecto de incoherencia, el efecto de onda pasajera y el efecto local de sitio, respectivamente.

(Luco y Wong, 1986), encontraron que algunos patrones son más críticos que otros en cuanto al aumento de la respuesta total de la estructura, por lo tanto, recomiendan tenerlos en cuenta por separado y en conjunto. Por otra parte, (Soyluka y Avanoğlu, 2012) proponen que la excitación sísmica asíncrona debe ir siempre acompañada de la interacción suelo estructura en puentes atirantados, esto con el fin de representar fielmente el fenómeno del asincronismo.

5. Métodos de Análisis: Evolución

En 1986, (Harichandran y Vanmarcken, 1986) propusieron un primer modelo empírico para caracterizar la pérdida de coherencia entre las señales sísmicas de dos estaciones ubicadas a una distancia determinada. Los autores basaron su modelo en los datos obtenidos del arreglo de acelerogramas SMART1 en Taiwán. En esta misma línea, (Luco y Wong, 1986) propusieron un modelo de coherencia analítico, basándose en la física de la propagación de ondas en medios aleatorios.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos al emplear los modelos propuestos por (Harichandran y Vanmarcke, 1986) y (Luco y Wong, 1986), modelo 1 y modelo 2, respectivamente, (Soyluk y Dumanoglu, 2004) usaron el puente Jindo en Corea del Sur como caso de estudio. Dicho puente se compone de una luz principal de 344 m y dos vanos laterales de 70 m cada uno. Los autores encontraron que el modelo 1 produce momentos flexores en las pilas y el tablero de mayor magnitud que el modelo 2, esto debido a que los rangos de frecuencia baja son controlados por el primer modelo, ver Figuras 1 y Figura 2.

Actualmente, existen varios métodos que caracterizan la excitación sísmica asíncrona. (Konakli y Kiureghian, 2011) llevaron a cabo una revisión rigurosa de metodologías que caracterizan el asincronismo, las cuales son consideradas por los autores como herramientas de análisis de puentes sometidos a excitación sísmica asíncrona. A continuación se presenta una breve descripción de dichas herramientas:

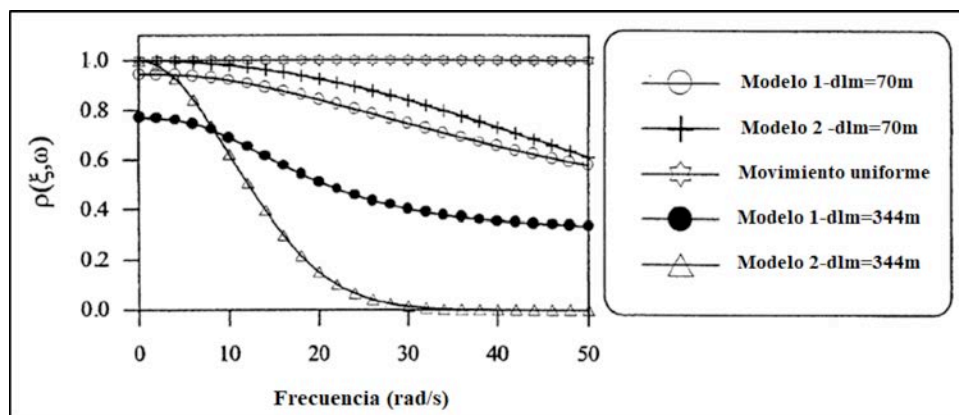


Figura 1. Variación del efecto de incoherencia dependiendo de la distancia entre apoyos y la frecuencia (Soyluk y Dumanoglu, 2004)

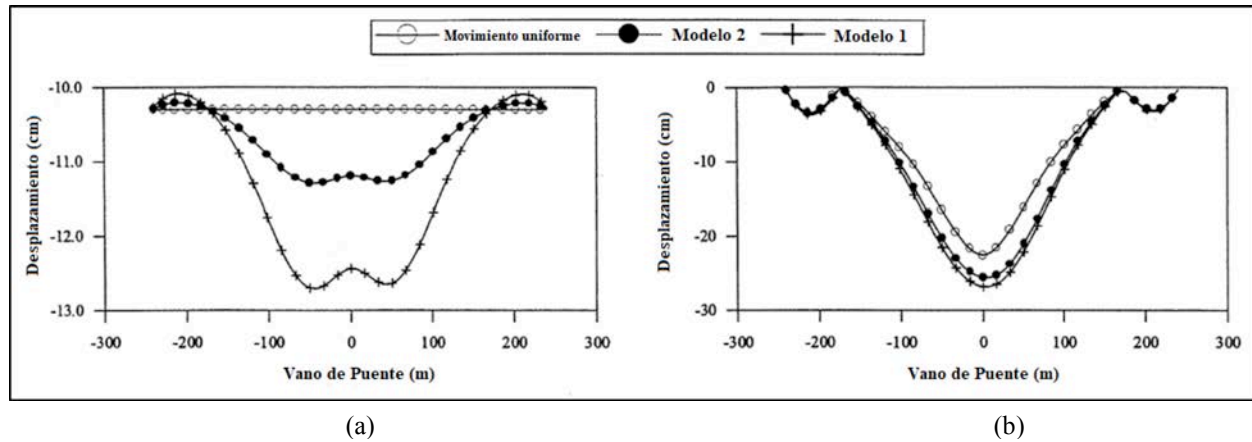


Figura 2. Valores máximos de desplazamiento en el tablero del puente Jindo (excitación general en suelo medio, $v_{app} = 600 \text{ m/s}$): componente (a) pseudo-estática y (b) dinámica (Soyluk y Dumanoglu, 2004)

5.1 Vibraciones aleatorias (mecánica estadística)

En 2003, (Dumanoglu y Soylik, 2003) utilizaron el método de vibraciones aleatorias, el cual se basa en relacionar valores estadísticos de las fuerzas excitadoras con las correspondientes fuerzas internas que surgen como respuesta a la excitación. Este método sugiere un conjunto de movimientos mutuamente estacionarios, generando finalmente tres componentes de desplazamiento en la respuesta estructural: dinámica, pseudo-estática y de covarianza; la última representa la parte estadística del problema, pero por cuestiones prácticas es despreciada debido a su baja contribución en la respuesta total. Por otro lado (Soyluk, 2004) comparó tres métodos de análisis basados en la teoría de las vibraciones aleatorias: el análisis espectral, la función de densidad espectral de poder basada en el espectro de respuesta y el método del espectro de respuesta. Los tres métodos utilizaban la función de densidad espectral cruzada ($S_{\ddot{u}_k \ddot{u}_l}$) en función de la frecuencia angular, ver Ecuación 7.

$$S_{\ddot{u}_k \ddot{u}_l}(\omega) = \gamma_{kl}(\omega) [S_{\ddot{u}_k \ddot{u}_k}(\omega) S_{\ddot{u}_l \ddot{u}_l}(\omega)] \quad (16)$$

$$S_{\ddot{u}_k \ddot{u}_k}(\omega) = S_0 \left[\frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \right] \left[\frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \right] \quad (17)$$

Donde,

S_0 , es la amplitud del ruido blanco de la aceleración en la roca madre (bedrock).

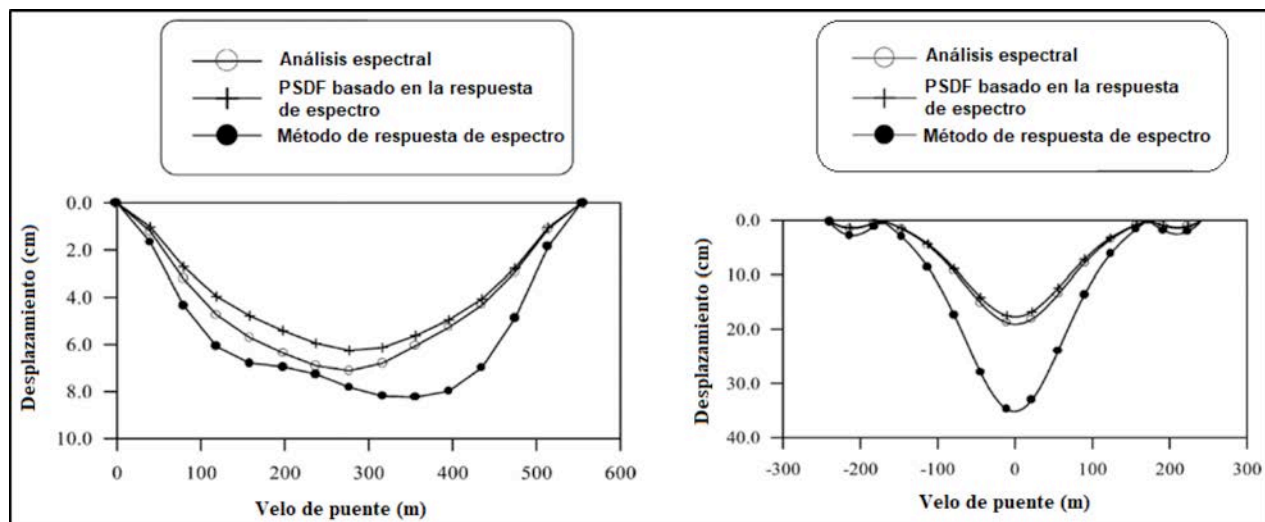
ω_g y ζ_g , son la frecuencia angular y el coeficiente de amortiguamiento del primer filtro, respectivamente.

ω_f y ζ_f , son la frecuencia angular y el coeficiente de amortiguamiento del segundo filtro, respectivamente.

γ_{kl} , función de coherencia entre las estaciones k y l .

La principal diferencia entre los métodos era la forma en la que se obtenía la respuesta máxima. En la Figura 3, se observa la respuesta de un puente en arco y uno atirantado analizados con los tres métodos, mostrando cierta similitud los dos primeros métodos, mientras el tercero produce mayores desplazamientos en la luz de ambos puentes.





(a) (b)

Figura 3. Desplazamiento máximo absoluto vertical del puente modelo: (a) en arco, (b) atirantado (Soyluk y Dumanoglu, 2004)

Cabe resaltar que el método de vibraciones aleatorias sugiere un conjunto de movimientos mutuamente estacionarios, lo que implica una gran desventaja pues la naturaleza aleatoria de los sismos produce procesos energéticos que varían en función del tiempo y el espacio. Otra de las desventajas es que en la práctica ingenieril el método no es muy aplicado, pues lo típico es determinar fuerzas sísmicas de entrada mediante análisis cronológicos o análisis espectral.

5.2 Análisis cronológico lineal/no-lineal

El método consiste en generar sismogramas para cada uno de los apoyos empleando la función de coherencia, la cual contiene los efectos de onda pasajera, pérdida de coherencia y efecto local de sitio. La coherencia se caracteriza con el triple producto mostrado en la Ecuación (5) (Zhang, et al., 2009), o utilizando registros reales tomados de un arreglo de acelerogramas, como el caso del SMART 1, el Pinyon Flat del Observatorio de Geofísica de California utilizado por (A. Abrahamson, 2007) o el conjunto de acelerogramas del puente Evripos en Grecia (Sextos, Karakostas et al., 2015). Sin embargo, (Kassawara y Sandell, 2006) proponen un modelo aceptable basado en el análisis de 12 arreglos sismográficos, el cual se recomienda para cualquier condición de sitio, magnitud de sismo y distancia entre estaciones, exceptuando el caso de condiciones topográficas abruptas.

Para la generación de acelerogramas que incluyan la excitación sísmica asíncrona existen métodos como el empleado por (Ghobarah et al., 1996), que utiliza una técnica de generación estacionaria aleatoria de desplazamientos, la cual posee la ventaja de modular en el tiempo la simulación estacionaria para proporcionar la no estacionariedad temporal, como lo indica la siguiente expresión:

$$\mathbf{u}_{rn}(t) = \mathbf{u}_r(t) \text{sen} \left(\frac{\pi t}{T} \right) \quad (18)$$

Donde,
 \mathbf{u}_{rn} , función de desplazamiento no estacionaria.
 \mathbf{u}_r , función de desplazamiento estacionaria.
 t , variable independiente que representa el tiempo.
 T , es la duración del movimiento de tierra.

Sin embargo, la no estacionariedad temporal no garantiza la no estacionariedad espectral del movimiento y esta última característica se debe tener en cuenta para el análisis de estructuras histeréticas según (Konakli y Kiureghian, 2011). Mediante una función evolutiva de densidad espectral en potencia puede atribuirse la no estacionariedad espectral, el inconveniente es que aún no existe un método general o estudios que validen si físicamente se lleva a cabo cinemática en el movimiento cuando se utiliza una función evolutiva de densidad espectral en potencia.

5.3 Espectro de respuesta

El método de espectro de respuesta utilizado en el análisis asíncrono se basa en el enfoque de las vibraciones aleatorias, pero tiene la ventaja de introducir implícitamente un espectro de respuesta a la estructura lo cual es práctico desde el punto de vista del diseñador (Liang y Shoulei, 2013) (Cacciola y Deodatis, 2011). Adicionalmente, el espectro de respuesta que se obtiene incluye inherentemente la no estacionariedad. La gran desventaja es que el método emplea solo superposición modal y se limita al análisis lineal.

5.4 Simulación a partir acelerogramas reales

El método más sencillo de modelar la excitación sísmica asíncrona teniendo en cuenta solo el efecto de onda pasajera, es mediante la modificación de un sismograma real. Existen estaciones sismológicas a nivel mundial que

SPANISH VERSION.....

monitorean continuamente y almacenan información de eventos sísmicos significativos. Dicho material puede implementarse en el análisis asíncrono teniendo en cuenta el efecto de onda pasajera. Se trata de asignarle un acelerograma a cada apoyo de la estructura desfasándolo temporalmente en la dirección de ataque de la onda (Valdebenito y Aparicio, 2005) (Álvarez et al., 2012) (Konakli y Der Kiureghian, 2012). El método se extiende al análisis no-lineal según (Ghobarah et al., 1996) y (Álvarez et al., 2006), este método es poco elaborado si se compara con el método mencionado en el numeral 5.1 y su principal desventaja radica en la no inclusión de otros patrones de asincronismo.

6. Normativas y Códigos

Existen normativas y guías de diseño como la (AASHTO, 1996) (American Association of State Highway and Transpor, 1996), ATC (Applied Technology Council, 1996), la ATCM (Applied Technology Council and Multidisciplinar y Multidisciplinary Center, 2003), el informe sobre interacción suelo estructura presentado por el comité asesor del CALTRANS (Caltrans, 1999) y DSHB (Japan Road Association, 2000) que acotan el análisis asíncrono en puentes solo si la longitud total excede los 600 m (Sextos y Kappos, 2009). Por otro lado, el Euro-código 8 (EC8) (Comité Europeo de Normalización, 2012) propone considerar el asincronismo solo si: i) existen discontinuidades geológicas, fallas cercanas o características topográficas abruptas; ii) la longitud del puente supera los 600 m. La segunda consideración se ha puesto en duda gracias a estudios como el realizado por (A. S. y E. G., 1994), en el cual se resalta la importancia de realizar análisis asíncrono en puentes arco metálicos con luz principal mayor a 400 m. En la misma línea (Álvarez et al., 2012) encontraron que para puentes arco de hormigón, el movimiento asíncrono genera aumento en la demanda de rotación de los arranques del arco por flexión y en la fluctuación de las cargas axiales en puentes mayores a 400 m. Sin embargo, se han venido haciendo propuestas basadas en investigación al EC8, con el fin de incluir límites más bajos en cuanto a la longitud total del puente, dependiendo del tipo de suelo en el que se encuentre apoyado (Sextos y Kappos, 2009).

El EC8 propone tres métodos de análisis asíncronos: el primero tiene que ver con la descripción del movimiento en los apoyos como una componente de un campo aleatorio, homogéneo en espacio y estacionario en el tiempo; el segundo se trata de un modelo aleatorio simplificado y el tercero es un modelo cinemático puro, que se basa en desarrollar un conjunto de desplazamientos estáticos relativos (Valdebenito y Aparicio, 2005). Los métodos son poco confiables debido a que, desde el punto de vista de cantidades de material, no existe diferencia entre diseñar bajo condiciones de excitación sísmica asíncrona y uniforme, pues la respuesta no varía substancialmente, mientras que métodos más elaborados si generan diferencias importantes. Adicionalmente, los métodos del EC8 no logran identificar puntos de falla, ni permiten trabajar con modos de vibración

altos, los cuales caracterizan la excitación sísmica asíncrona. Por último, según (Sextos y Kappos, 2009), no son aplicables a puentes curvos.

En el 2005, (Nuti y Vanzi, 2005) realizaron un estudio con el fin de establecer criterios de diseño para puentes bajo excitación sísmica asíncrona para la actualización del código Italiano de puentes. El método de análisis empleado por Nuti se basó en los principios fundamentales de la teoría de las vibraciones aleatorias y los elementos estructurales se idealizaron elásticos y lineales, lo cual genera una desventaja cuando se requiera realizar un análisis inelástico y no-lineal. Adicionalmente, el método fue creado con el fin de aplicarlo a estructuras con dos apoyos y aunque se puede extender a múltiples apoyos, no existe una correlación entre apoyos y no se tiene en cuenta el efecto de sitio. En dicho estudio, (Nuti y Vanzi, 2005) analizaron un puente con un solo vano de 32 m de longitud total, apoyado en suelo blando y encontraron que para el caso asíncrono los desplazamientos diferenciales en los estribos superaban en 98 mm a los 14 mm propuestos por el Eurocódigo y el Código Italiano de Protección Civil, dando importancia a la inclusión de análisis asíncrono incluso en puentes de poca longitud y a la necesidad de actualizar los códigos de diseño.

7. Tipologías Analizadas

De manera general, (Fernandez et al., 2013) encontraron que si la longitud de un puente es mayor a la longitud de onda del movimiento sísmico o si existe algún accidente topográfico considerable (Kaiming et al., 2013), entonces partes del puente estarán sujetas a excitaciones diferentes y considerables en sus apoyos. A continuación se presentan los resultados de trabajos realizados por investigadores interesados en comparar el análisis clásico con el análisis asíncrono para algunas tipologías de puentes.

7.1 Puentes en arco

(Álvarez et al., 2002) y (Álvarez y Aparicio, 2003) resaltan la necesidad de llevar a cabo análisis asíncrono en puentes arco con luz principal mayor a 427 m, debido al aumento de fuerzas axiales en los riñones del arco.

(Álvarez et al., 2012) analizaron el puente prototipo de la Figura 4, de longitud total 600 m y luz principal de 400m. El análisis asíncrono generó un aumento en la rotación media del apoyo izquierdo en un 124% respecto al análisis clásico (ver Figura 5a), debido principalmente al incremento del desplazamiento vertical en el centro de la luz como se observa en la Figura 5b. Sin embargo, la capacidad de rotación en los apoyos no fue superada y los desplazamientos en longitudinales y transversales se redujeron en un 50% aproximadamente. Los autores no generalizan la respuesta de puentes en arco bajo excitación sísmica asíncrona, por lo tanto, resaltan la importancia de comparar las respuestas bajo excitación sísmica asíncrona y uniforme (Álvarez et al., 2006).



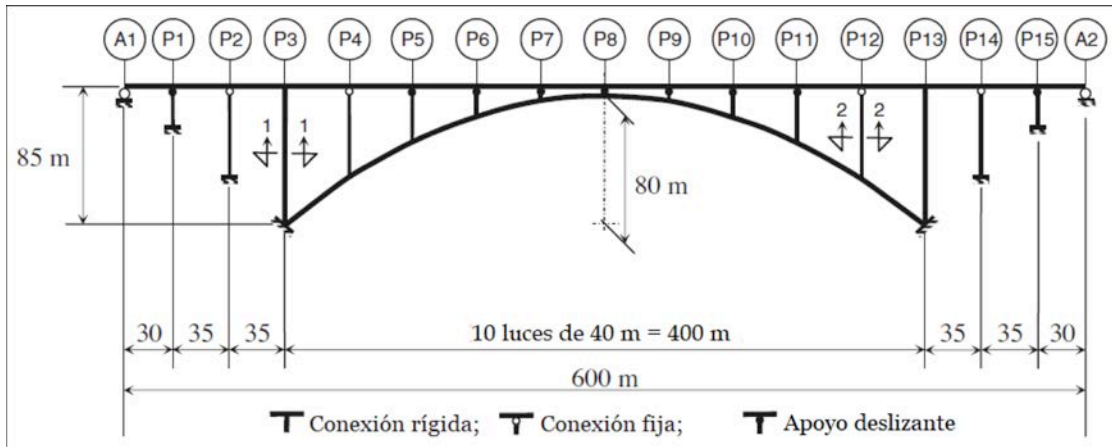


Figura 4. Vista longitudinal del puente prototipo estudiado por Álvarez y Jara (Puente en arco) (Álvarez et al., 2012)

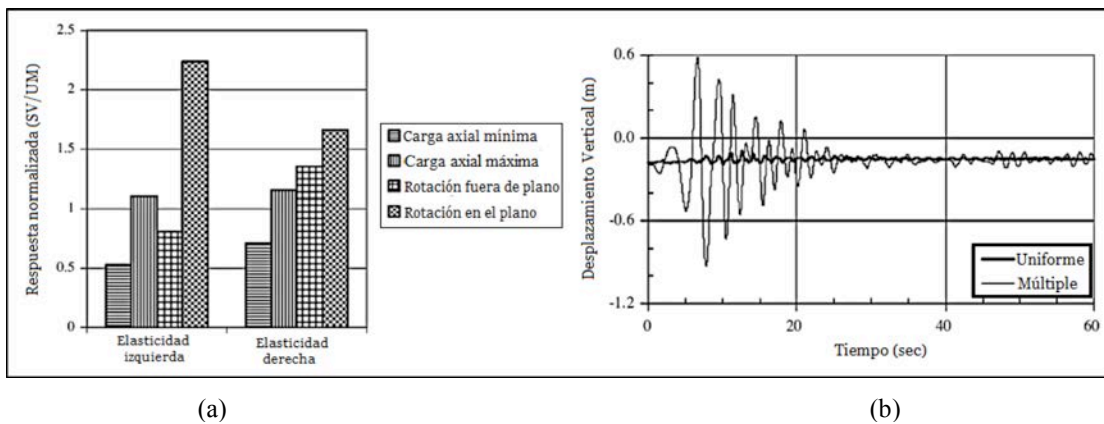


Figura 5. (a) Respuesta en los estribos del puente arco, sometido a excitación sísmica asíncrona. (b) Desplazamientos verticales con análisis cronológico en el centro del claro (Sismo de Campano-Lucano, Estación Sturmo) (Álvarez et al., 2012)

Por otra parte, (Kaiming et al., 2013) usando como caso de estudio el puente en arco metálico ubicado sobre el río Yeshan (China) (Figura 6), de luz principal igual a 124 m, encontraron que al combinar el efecto de onda pasajera y la pérdida de coherencia, juntos generan un incremento de hasta un 90% en las fuerzas axiales en el centro del cordón superior del arco; mientras que los momentos flexionantes fuera y dentro del plano no presentan variación significativa. Así mismo, se detectó un incremento de las fuerzas axiales a

lo largo del cordón inferior y superior de hasta un 60%, comparando excitación sísmica asíncrona para condiciones de suelo homogéneo y heterogéneo, dejando en evidencia que no tener en cuenta los tres patrones de asincronismo, solo incluir el efecto de onda pasajera o no tener en cuenta las condiciones del suelo de apoyo en puentes de este tipo, podría subestimar la demanda por carga axial en ciertos elementos estructurales del arco.

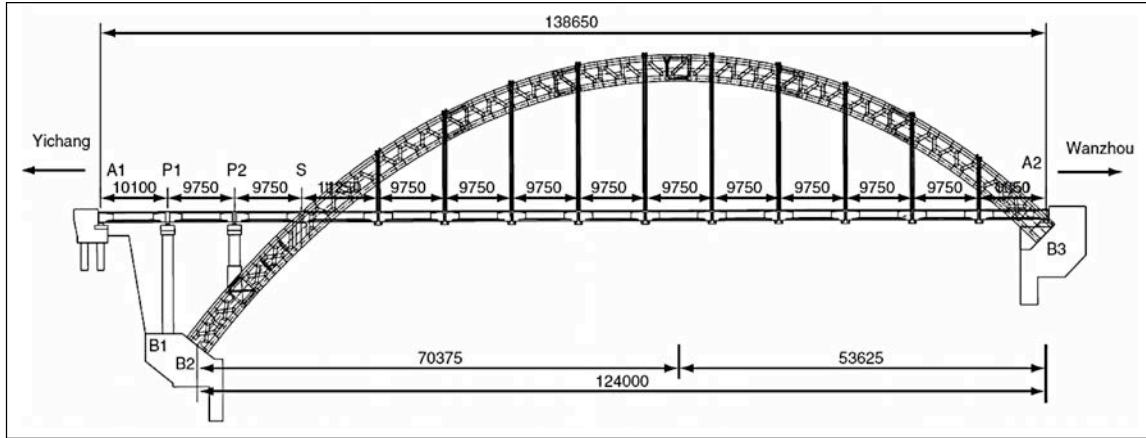


Figura 6. Vista en elevación del puente en arco del río Yeshan, China. Unidades: mm (Kaiming et al., 2013)

7.2 Puentes viga cajón

Para el primer estudio de puentes viga cajón bajo excitación sísmica asíntrica, (Konakli y Kiureghian, 2011) utilizaron cuatro puentes con irregularidades en planta y en altura, ver Tabla 1.

Los autores encontraron que en los puentes más flexibles como el Penstock y el South Ingram Slough, se aumentan considerablemente las derivas en las pilas cuando se tienen en cuenta la onda pasajera y una fuerte pérdida de

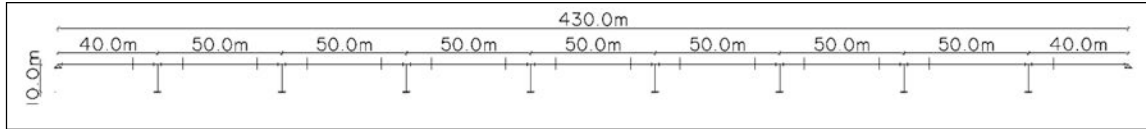
coherencia entre señales, pero el escenario más crítico es la combinación de los tres patrones de asincronismo, es decir, onda pasajera, pérdida de coherencia y efecto local de sitio. Por otra parte, los autores clasifican el análisis sincrónico como conservador para el caso de puentes viga cajón con periodos fundamentales bajos como el Auburn Ravine y el Big Rock Wash.

Tabla 1. Características de los puentes modelo (Konakli y Kiureghian, 2011)

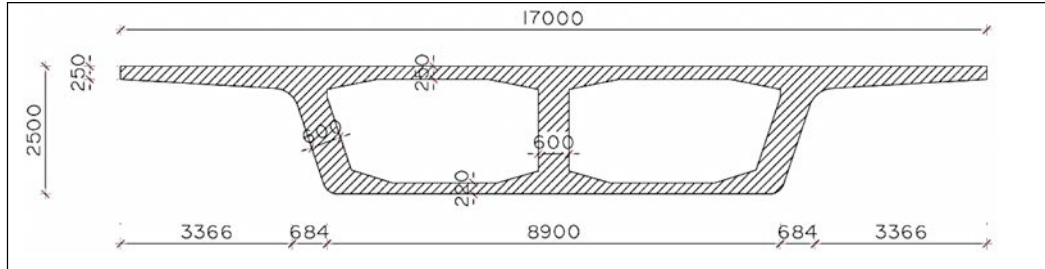
Puente	Longitud total	Ancho del tablero	No. de columnas	Periodo fundamental
Auburn Ravine	166.40 m	13.50 m	5	0.59 s
Big Rock Wash	100.00 m	24.87 m	2	0.61 s
South Ingram Slough	69.30 m	16.20 m	1	1.24 s
Penstock	167.31 m	12.90 m	3	2.38 s

(Mehanny et al., 2014) (Ramadam et al., 2015), realizaron un análisis asíntrico cronológico no-lineal a un puente continuo de viga cajón (ver Figura 7) con una longitud total de 430m, compuesto por nueve vanos, con el fin de determinar el impacto de la onda pasajera en el comportamiento sísmico de este tipo de puentes. El análisis fue desarrollado en el software Opensees y se usaron 20 registros sísmicos de la base de datos del Pacific Earthquake Engineering Center. Los autores determinaron que en la

dirección longitudinal, el tablero continuo trabaja como un diafragma rígido que minimiza el efecto de onda pasajera, haciendo a la excitación sísmica uniforme el escenario más conservador para el diseño sísmico. Sin embargo, en la dirección transversal, los autores recomiendan tener en cuenta el efecto de onda pasajera cuya severidad depende del contenido de frecuencias del sismo, siendo más crítica para rangos de alta frecuencia, con el fin de no subestimar la probabilidad de falla de la estructura.



(a)



(b)

Figura 7. Puente caso de estudio: (a) Vista longitudinal, (b) Sección típica del tablero (dimensiones en mm)

(Mehanny et al. 2014)

(Mehanny et al., 2014) construyeron curvas de fragilidad que constituyen una representación de la relación entre la probabilidad de alcanzar estados límite y de exceder el nivel de intensidad sísmico, con lo cual se determinó que para suelos blandos, la sensibilidad y la vulnerabilidad sísmica bajo excitación sísmica asincrónica es mayor que en suelos firmes con una excedencia de la frecuencia anual de hasta 7.1 veces en la dirección longitudinal. Sin embargo, el enfoque contiene incertidumbre en el modelamiento ya que la frecuencia media anual de colapso puede ser subestimada en hasta un 80%.

7.3 Puentes de múltiples vanos

Según (Wang et al., 2003), el análisis asincrónico se debe tener en cuenta en puentes de múltiples vanos, de manera que se garantice la seguridad y funcionalidad de la estructura. En un estudio realizado por (Sextos y Kappos, 2009), en el cual se analizaron 27 tipos de puentes de múltiples vanos con diferentes longitudes en los vanos, se encontró que en puentes con longitud total mayor a los 333 m predominan los resultados del análisis asincrónico respecto al análisis clásico. Por ejemplo, en la Figura 8, para el puente tipo con 400 m de longitud total, se observa un incremento por encima del 60% respecto a los momentos flexionantes en la base de las pilas, siendo el escenario asincrónico el más desfavorable en tal caso.

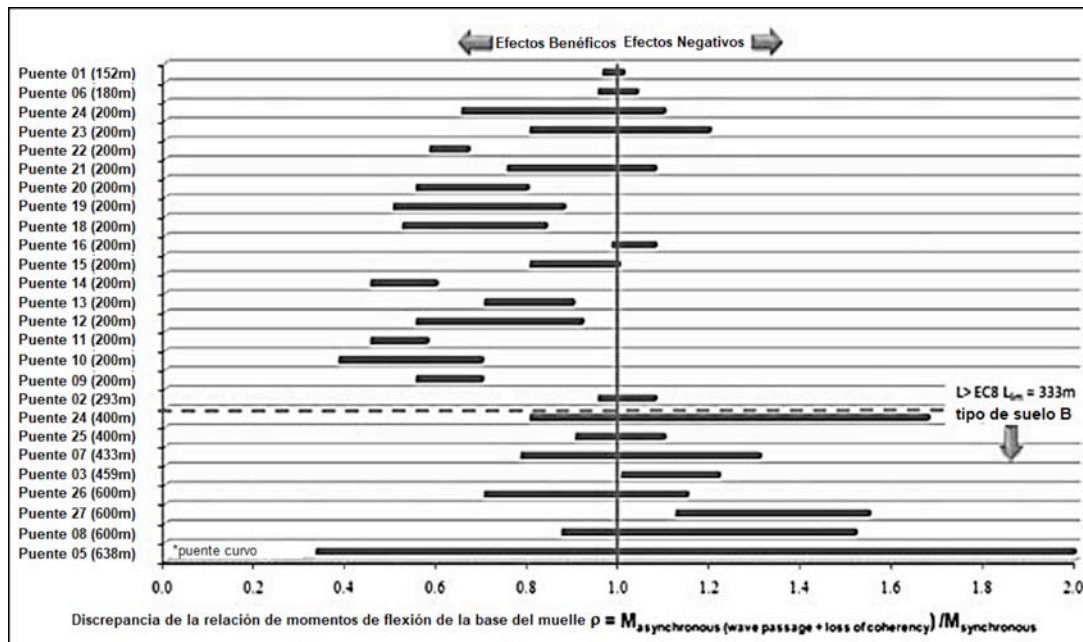


Figura 8. Variación del impacto de 27 puentes sometidos a excitación sísmica asincrónica, considerando el efecto de onda pasajera y pérdida de coherencia (Sextos y Kappos, 2009)

En 1998, (Price y Eberhard, 1998) propusieron un método para determinar previamente si se debe hacer análisis asíncrono en puentes, basados en la constante de participación C_p (ver ecuación 19). Si la constante de participación tiende a infinito, la componente dinámica del desplazamiento predomina, es decir, el asincronismo es irrelevante. En caso contrario se debería tener en cuenta el análisis asíncrono. Aunque el método funciona en los modelos propuestos por (Price y Eberhard 1998), no se puede generalizar el comportamiento de dicha tipología. Por otro lado, se detectó que en un 62% de los modelos, la componente dinámica de las reacciones en los apoyos extremos fueron superadas por la excitación sísmica asíncrona entre un 75 y 180%, teniendo en cuenta sólo pérdida de coherencia. Sin embargo, la componente dinámica de las reacciones en los apoyos centrales fue superada por la excitación sísmica uniforme en un 80% de los modelos.

$$C_p = \frac{T_0 V_{app}}{L_s} \quad (19)$$

Donde,

T_0 , es el periodo fundamental del puente, V_{app} , es la velocidad aparente de la onda en el medio rocoso, y L_s , es la longitud de cada vano.

La pérdida de coherencia es el patrón que produce mayor aumento en fuerzas internas y desplazamientos según (Saxena et al., 2000), (Price y Eberhard, 1998), (Lou y Zerva, 2005), (Burdette y Elnashai, 2008). Sin embargo, los autores recomiendan tener en cuenta los tres patrones de asincronismo por separado y en conjunto. (Mezouer et al., 2010) determinaron que cuando el periodo fundamental del suelo (T_s) es igual a el periodo fundamental del puente (T_p), el análisis asíncrono no es necesario. Si T_p tiende a 1.85s, la onda pasajera afecta en mayor medida la respuesta estructural. A medida que la estructura se hace más flexible, el efecto de pérdida de coherencia domina la respuesta del puente y para $T_p > 2.1$ s, la pérdida de coherencia domina la respuesta incluso en suelo rígido.

Adicionalmente, (Kleoniki et al., 2015) analizaron un puente de 168 m de longitud total, compuesto de 4 vanos apoyados en 3 columnas centrales unidas monolíticamente al tablero. El perfil geológico fue la variable clave en los modelos (ver Figura 9), determinando de esa manera la influencia en la respuesta dinámica no lineal de puentes con múltiples vanos sometidos a excitación sísmica asíncrona. Así mismo, los autores proponen tener en cuenta en el análisis asíncrono factores como: la topografía, las características geológicas de las capas superpuestas sobre las que se apoya la estructura y toda discontinuidad en el suelo que produzca cambios en el contenido de frecuencia de la onda en superficie, debido a la influencia directa en la respuesta del puente.

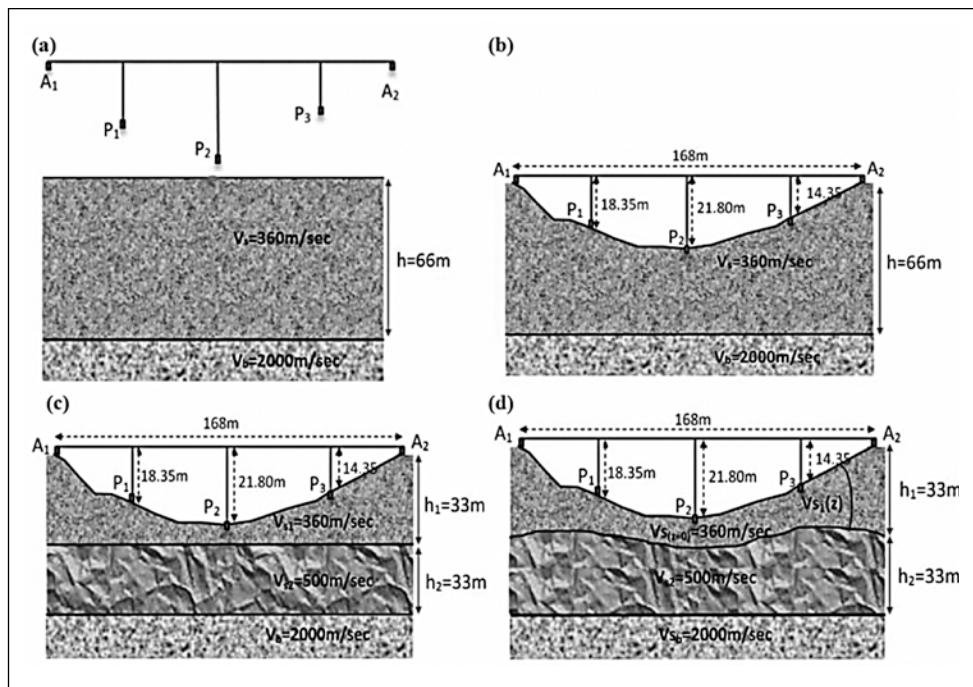


Figura 9. Cuatro tipos de perfiles geológicos para el caso de estudio: a) tipo A, b) tipo B, c) tipo C y d) tipo D (Kleoniki et al., 2015)

(Burdette y Elnashai, 2008), (Price y Eberhard, 1998); (Wang et al., 2008), entre otros, encontraron que los periodos fundamentales de la estructura eran suprimidos al realizar el análisis asíncrono y los modos asimétricos comenzaban a

jugar un papel importante, produciendo efectos torsionales como el serpienteo (ver Figura 10). Este tipo de desplazamiento podría pasarse por alto en la fase de diseño si se considera una excitación sísmica sincrónica o uniforme.

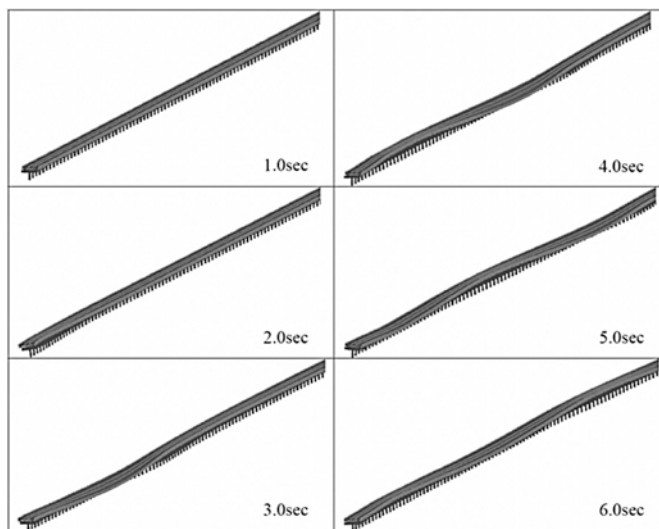
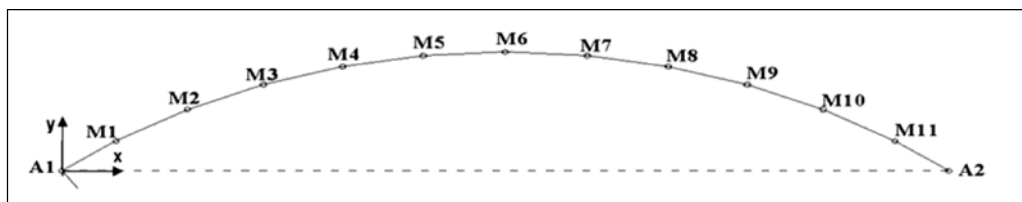


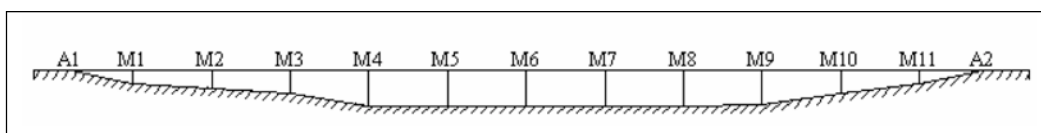
Figura 10. Instantáneas de los desplazamientos sufridos por el puente debido a la excitación sísmica asíncrona (Wang, et al., 2008)

(Sextos et al., 2004) se interesaron en el puente Krystallogipi, debido a su irregularidad en planta y en altura (ver Figura 11), y realizaron un análisis asíncrono variando el ángulo de ataque de la onda. Los resultados de dicho análisis les sirvieron para concluir que el ángulo de ataque (plano horizontal) juega un papel secundario en el análisis asíncrono. Sin embargo, según (Fernandez et al., 2013) el ángulo de incidencia (plano vertical) de la onda si es

importante. Esta conclusión fue obtenida luego de analizar dos puentes con tres vanos, cada vano de 50 m y pilas de 55 m de altura aproximadamente; la diferencia radicaba en el tipo de apoyo entre la viga y la pila, siendo considerados dos tipos de apoyo: M1 apoyo elastomérico y M2 apoyo monolítico. El ángulo de incidencia crítico para el primer tipo de apoyo fue de 60° y mientras que para la conexión rígida fue de 30°.



(a)



(b)

Figura 11. Puente Krystallogipi: (a) vista en planta, (b) alimetría del puente (Sextos et al., 2004)

SPANISH VERSION.....

(Feng y Kim, 2003), (Saxena et al., 2000), tomaron como casos de estudio el puente Santa Clara compuesto de 12 vanos, con 500 m de longitud total y el puente TYOH compuesto de 5 vanos y una longitud total de 242m. Mediante análisis no lineales identificaron un incremento en la demanda de ductilidad para las columnas, comparado con el análisis clásico. El estudio de (Feng y Kim, 2003) es el primero en proponer curvas de fragilidad en condiciones de excitación sísmica asíncrona, las cuales aportan información útil para tener en cuenta en la actualización de los códigos de diseño. Según (Feng y Kim, 2003), la probabilidad de fallas en la estructura puede incrementarse hasta 2.3 veces, si se considera la excitación sísmica asíncrona dentro del análisis y posterior diseño.

7.4 Puentes atirantados

Diversos autores se han interesado por analizar los efectos de la excitación sísmica asíncrona en el puente metálico atirantado Jindo, el cual se encuentra cimentado sobre un suelo variable, posee una luz central de 344 m y dos vanos laterales de 70 m cada uno.

(Soyluka y Avanoğlu, 2012) encontraron interesantes las características del puente Jindo para llevar a cabo un análisis asíncrono, teniendo en cuenta la interacción suelo estructura, adicionando los tres patrones de asincronismo por separado y en conjunto. El patrón que más afecta, si se considera la interacción suelo estructura, es el efecto local de sitio, aumentando la demanda en el tablero y en las torres (ver Figura 12), donde, F, M y S representan suelos firme, medio y suave, respectivamente, en cada uno de los cuatro apoyos del puente).

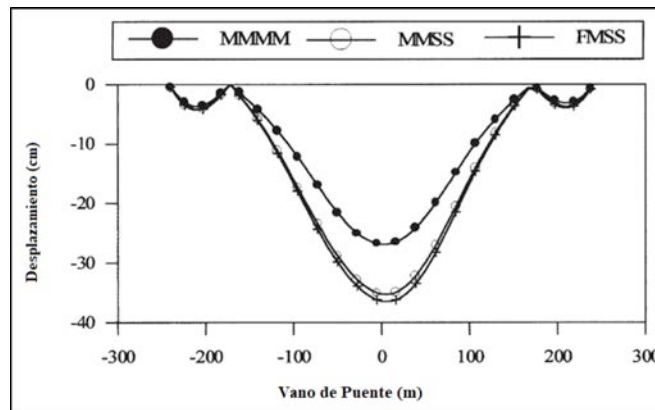


Figura 12. Desplazamientos verticales máximos de la componente dinámica en el tablero del puente Jindo (Dumanoglu y Soyuluk, 2003)

Por otro lado, (Valdebenito y Aparicio, 2005) y (Soyluk y Dumanoglu, 2000) también estudiaron el puente Jindo y basados en los resultados determinaron que para puentes atirantados de grandes luces, el patrón que más afecta la respuesta es el efecto de onda pasajera, pues al disminuir la velocidad aparente de onda, se incrementa el desfase temporal entre fuerzas sísmicas aplicadas en los apoyos del puente, lo cual afecta directamente la respuesta

estructural, ver Figura 13 y Figura 14. Sin embargo, la onda pasajera no es la única variable importante, también los son la longitud del claro, la rigidez estructural, la redundancia estática, el ángulo de incidencia de la onda y la razón de la inercia torre/tablero, lo que dificulta establecer de manera general si el caso desfavorable para puentes atirantados es la excitación sísmica asíncrona.

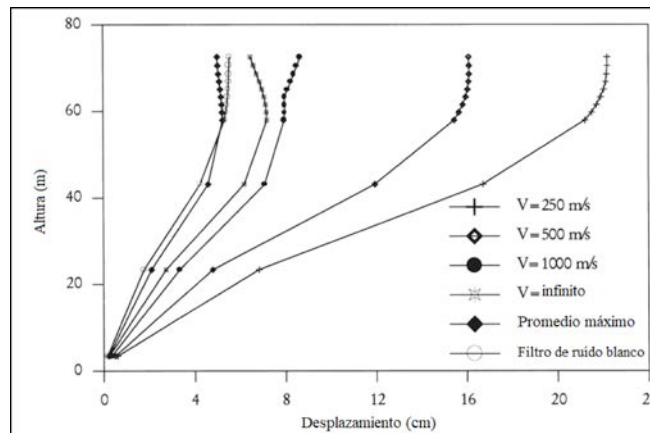


Figura 13. Desplazamiento horizontal de la torre que se encuentra en la isla variando la velocidad aparente de onda en el puente Jindo (Soyluk y Dumanoglu, 2000)

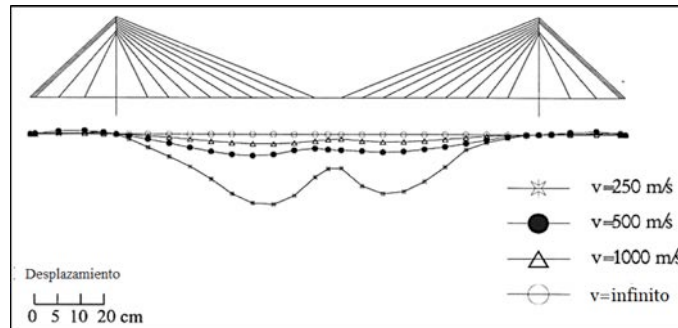


Figura 14. Componente pseudo-estática de desplazamiento en el tablero del puente Jindo variando la velocidad aparente de onda (Soyluk y Dumanoglu, 2000)

(Karakostas et al., 2011) emplearon un modelo de elementos finitos tridimensional del puente Evripos (Figura 15), al que asignaron registros reales del sismo de Atenas (1999). A partir de los resultados se determinó que: la excitación sísmica asíncrona es beneficiosa para los momentos flexionantes en las pilas y para los desplazamientos en la luz central del tablero. En cuanto a los momentos flexionantes fuera del plano y los desplazamientos en la parte alta de las pilas, el movimiento asíncrono es claramente crítico y el incremento de los desplazamientos varía en función del cambio en la amplitud del espectro de

Fourier, es decir, que depende de los valores de aceleración pico contenidos en el rango de frecuencias de los modos altos.

De acuerdo a (Abdel et al., 2011), los modos superiores son una herramienta clave para entender el rol del asincronismo en la respuesta sísmica de puentes. Debido a que dichos modos son fundamentalmente asimétricos, la implementación de sistemas de control bajo excitación sísmica asíncrona se dificulta, reduciendo la eficiencia de los dispositivos de disipación de energía, sean activos, semi-activos o pasivos.

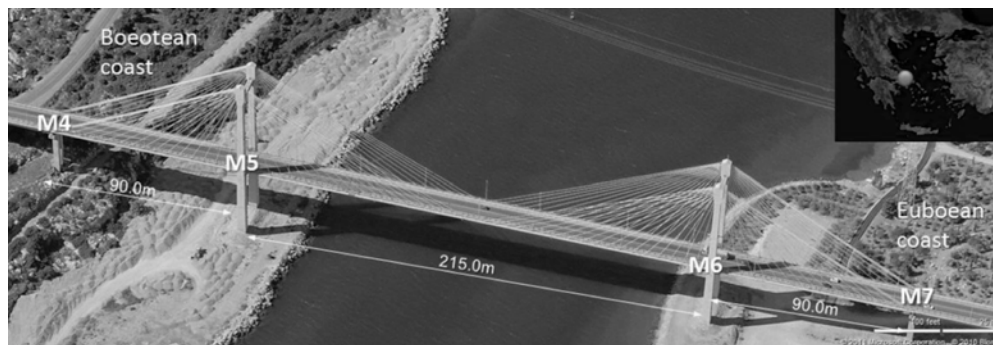


Figura 15. Puente atirantado Evripos, Grecia (Karakostas et al., 2011)

7.5 Puentes colgantes

(Harichandran et al., 1996) realizaron un primer análisis asíncrono al puente Golden Gate (Estados Unidos). En dicho análisis, los autores encontraron que la componente de mayor influencia es la dinámica. Sin embargo, la componente pseudo-estática y de covarianza aportan significativamente al desplazamiento total en el centro del claro principal, por lo tanto, para el caso de la excitación sísmica asíncrona, la respuesta es crítica en el centro del

claro principal, pero en el resto de la estructura la respuesta es subestimada respecto a la excitación sísmica uniforme. Por otra parte, la componente de covarianza es mayor que la pseudo-estática, para el caso de estructuras con modos de bajas frecuencias. Adicionalmente, mencionan que el efecto de onda pasajera produce efectos críticos en sentido transversal, debido a que el asincronismo excita modos asimétricos de la estructura.

SPANISH VERSION.....

El puente Golden Gate también fue estudiado por (Ahmed y Lawrence, 1982), quienes aseguran que considerar solo el efecto de onda pasajera subestima la respuesta estructural, debido a que en ciertos casos, la tensión en los cables aumenta en gran medida al considerar la incoherencia, dando importancia a la rigidez y las condiciones locales de suelo. Es decir, a mayor rigidez en la estructura, mayor será la respuesta bajo excitación sísmica asincrónica, por lo tanto, los tres patrones se deben tener en cuenta por separado y en conjunto para el análisis asincrónico de puentes colgantes.

(Nurdan, et al., 2016) realizaron análisis asincrónico al puente colgante Fatih Sultan Mehmet en Turquía que posee una luz central de 1090 m de largo y dos vanos laterales de 210 m cada uno. En el análisis mencionado, los autores encontraron aumento del 21% y 18% en las fuerzas axiales de tensión en el cable principal y de los cables verticales, respectivamente. La razón del incremento se asocia a movimientos opuestos de las torres debido a la excitación sísmica asincrónica (ver Figura 16), aumentando también las fuerzas de cortante en la base de las torres.

En 1999, (Wang et al., 1999) analizaron el puente Jiangyin Yangtse (China) (ver Figura 17) considerando solo el efecto de onda pasajera, asumiendo de antemano que dicho patrón sería el más crítico y haciendo énfasis en la importancia de tener en cuenta las diferencias geológicas que se pueda presentar en los apoyos de puentes de grandes luces. Según Wang y Wei, el error producido al despreciar el efecto de coherencia es de aproximadamente el 15%, por lo tanto, para efectos prácticos es aceptable despreciar dicho efecto. En el estudio mencionado anteriormente se detectaron intervalos de velocidad aparente de la onda críticos que afectan la respuesta del puente así: las velocidades por debajo de los 3000 m/s y los 6000 m/s, pueden afectar hasta un 15% y un 5% los desplazamientos relativos en la parte superior de las torres norte y sur, respectivamente; así mismo, las velocidades por debajo de los 2500 m/s pueden afectar hasta un 5% el cortante y momento flectores en la base de la pila norte; por otra parte, para velocidades inferiores a los 1500 m/s o superiores a los 3000 m/s, los cortantes y momentos flectores en la base de la pila sur pueden incrementarse hasta un 2%.

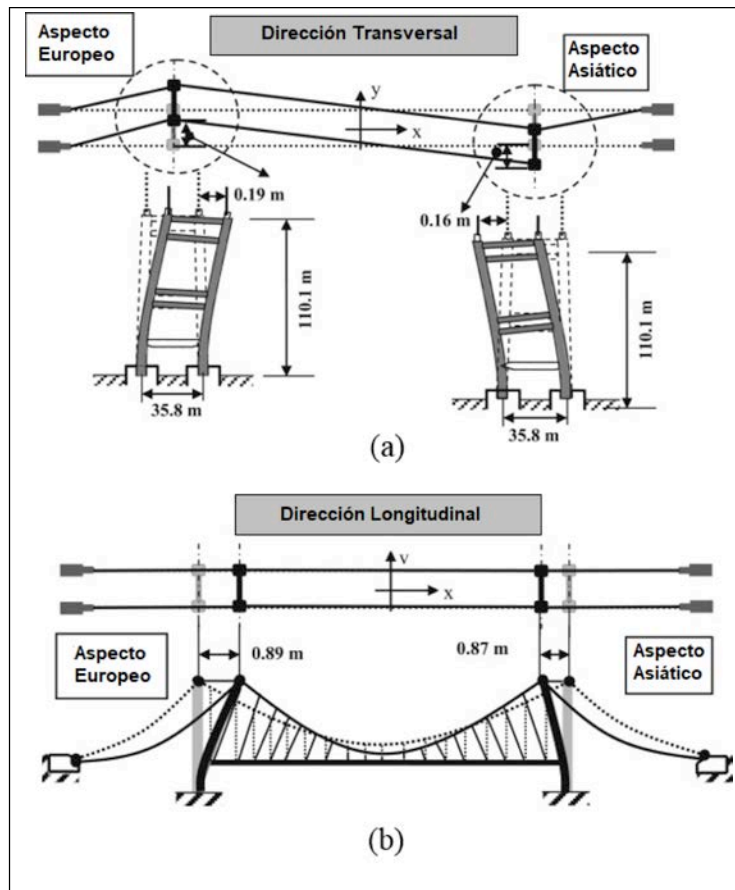


Figura 16. Deformadas del puente Fatih Sultan Mehmet: (a) desplazamiento transversal de las torres para el caso asincrónico, (b) desplazamiento longitudinal de las torres para el caso asincrónico (Nurdan et al., 2016)



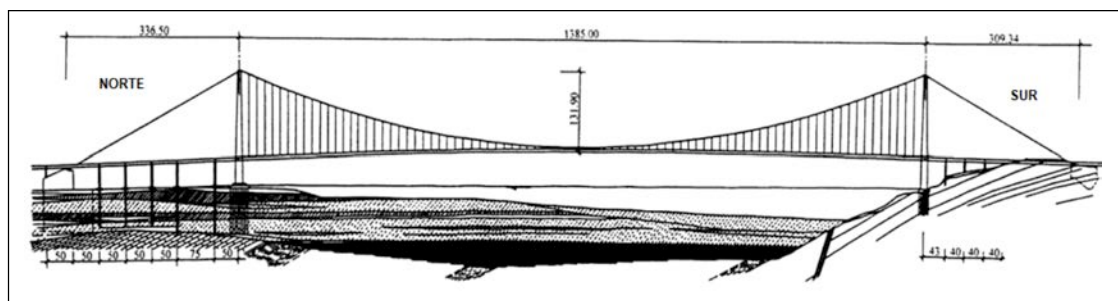


Figura 17. Vista en elevación del puente Jiangyin Yangtze (Wang et al., 1999)

(Karmakar et al., 2012) Propusieron una técnica de simulación para realizar un análisis asíncrono no lineal con historias en el tiempo en el puente Vincent Thomas en Estados Unidos. La validación del modelo se llevó a cabo mediante la comparación de acelerogramas sintéticos generados con información recolectada de vibraciones ambientales y de los registros del sismo ocurrido en Chino (Hills 2008). Se consideraron tres escenarios:

(i) excitación sísmica asíncrona, considerando los tres patrones de asincronismo.

(ii) peor caso uniforme, el acelerograma sintético que produce los valores más grandes de desplazamiento máximo pico.

(iii) mejor caso uniforme, el acelerograma sintético que produce los valores más pequeños de desplazamiento máximo pico.

Aunque la mayor demanda de fuerzas fue dominada por el peor caso uniforme, en algunos tramos del tablero la excitación sísmica asíncrona superó la respuesta del peor caso uniforme.

8. Conclusiones

En este trabajo, se realizó un estado del arte sobre el estudio de la excitación sísmica asíncrona aplicada a puentes. Las principales conclusiones obtenidas se pueden resumir de la siguiente manera:

1) No es posible generalizar el comportamiento estructural de puentes sometidos a excitación sísmica asíncrona, por lo tanto, se requiere realizar análisis asíncrono cuando probablemente las condiciones de sitio (topografía, geología, presencia de fallas, entre otros) y las características estructurales (rigidez, longitud del vano principal, múltiples apoyos, entre otras) amplifiquen la respuesta estructural.

2) Existen métodos de análisis, como las vibraciones aleatorias, que presentan un enfoque muy elaborado y poco práctico desde el punto de vista de la ingeniería para estudiar el fenómeno de asincronismo en puentes. Por lo tanto, los análisis dinámicos lineales o no lineales basados en integración directa y resultan más atractivos.

3) Las normativas y guías de diseño para puentes, aunque presentan límites y condiciones bajo los cuales se debe realizar un análisis asíncrono, han venido evolucionando y presentando mejoras tanto en las restricciones como en los métodos de análisis, con el fin de ampliar dichos límites y condiciones que provean seguridad y funcionalidad estructural. De manera general, diversos autores enfatizan la importancia de introducir el análisis asíncrono en normativas y guías de diseño en zonas con actividad sísmica alta, cuando exista una creciente demanda de puentes extensos, de grandes y medianas luces, que puedan presentar cambios abruptos en sus condiciones de apoyo (tipo de suelo variable), topografía o cuando existan fallas cercanas.

4) En general, se admiten tres patrones de asincronismo para realizar el análisis asíncrono: la pérdida de coherencia, la onda pasajera y el efecto local de sitio. Sin embargo, diversos autores recomiendan tener en cuenta los tres patrones por separado y en conjunto, para tener una visión más clara del comportamiento estructural del puente analizado.

9. Financiamiento

El estudio Excitación sísmica asíncrona en puentes: estado del arte, se realizó gracias al apoyo económico de la Universidad Industrial de Santander.

10. Referencias

- AASHTO (1996), American Association of State Highway and Transport. Interim revisions to the AASHTO standard specifications for highway bridges: division I-A, Seismic Design. Washington, 1996.
- Abdel Raheem, Shehata E.; Hayashikawa, Toshiro; Dorka, Uwe (2011), Ground Motion Spatial Variability Effects on Seismic Response Control of Cablestayed Bridges. *Earthquake Engineering And Engineering Vibration* 10, no. 1 (2011): 37-49. DOI: 10.1007/s11803-011-0045-5
- Abrahamson, Norman A. (2007), Hard-Rock Coherency Functions Based on the Pinyon Flat Array Data. Piedmont: EPRI, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0721/ML072190359.pdf>

SPANISH VERSION.....

- Ahmed M. , Abdel-Ghaffar, Rubin Lawrence I.. (1982)**, Suspension Bridge Response to Multiple-Support Excitations. Engineering Mechanics Division 108, no. 2: 419-435. <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0034014>
- Álvarez, J. J.; Aparicio, A. C. ; Jara, J. M. ; Jara, M. (2012)**, Seismic Assessment of a Long-Span Arch Bridge Considering the Variation in Axial Forces Induced by Earthquakes. Engineering Structures 34 (2012): 69-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.09.013>
- Álvarez Sereno, José de Jesús; Bengoechea, Ángel Carlos Aparicio (2003)**, Comportamiento Sísmico de Puentes Arco. Un Panorama del Estado del Conocimiento. Revista de Ingeniería Sísmica, no. 68: 21-53. <http://www.redalyc.org/comocitar.oi?id=61806802>
- Álvarez, José de Jesús ; Jara, Manuel; Hernández, Hugo; Bengoechea, Ángel Carlos Aparicio. (2006)**, Evaluación de la Respuesta de Grandes Puentes en Arco ante Movimientos Sísmicos Fuertes. Revista de Ingeniería Sísmica, no. 75 (2006): 23-46.
- Alvarez Sereno, José de Jesús; Parra, Nicolás G.; Bengoechea, Angel C. Aparicio (2002)**, Comportamiento Estructural de Puentes en Arco Sometidos a Movimiento de Fuente Cercana. Puebla, México: XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, 2002. http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_12/te_04/ar_14.pdf
- Apaydin, Nurdan Memisoglu; Bas, Selcuk; Harmandar, Ebru. (2016)**, Response of the Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge Under Spatially Varying Multi-Point Earthquake Excitations. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 84 (2016): 44-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.01.018>
- Applied Technology (1996)**. Council. Improved Seismic Design Criteria for California Bridges. Redwood City, California, 1996.
- Applied Technology (2003)**, Council and Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. Recommended LRFD guidelines for the seismic design of highway bridges. California, 2003.
- Bayraktar, A.; Dumanoglu, A. A.; and Calayir, Y. (1996)**, Asynchronous Dynamic Analysis of Dam-Reservoir-Foundation Systems by the Lagrangian Approach. Computers & Structures 58, no. 5 (1996): 925-935. DOI:10.1016/0045-7949(95)00211-X
- Burdette N.J.; Elnashai, Amr S.; Lupoi, A.; Sextos, A.G. (2008)**, Effect of Asynchronous Earthquake Motion on Complex Bridges I : Methodology and Input Motion. Journal of Bridge Engineering 13, no. 2 (2008): 158-165. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2008\)13:2\(158\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:2(158))
- Burdette N.J.; Elnashai, Amr S.; Lupoi, A.; Sextos, A.G. (2008)**, Effect of Asynchronous Earthquake Motion on Complex Bridges. II- Results and Implications on Assessment. Journal of Bridge Engineering 13, no. 2 (2008): 166-172. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2008\)13:2\(166\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:2(166))
- Burdette N.J.; Elnashai, Amr S.; Lupoi, A.; Sextos, A.G. (2006)**, The Effect of Asynchronous Earthquake Motion on Complex Bridges. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois: Mid-America Earthquake Center, 2006, 28. <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/8935/Report06-03.pdf?sequence=2>
- Cacciola, Pierfrancesco; Deodatis, George (2011)**, A Method for Generating Fully Non-Stationary and Spectrum-Compatible Ground Motion Vector Processes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 31, no. 3 (2011): 351-360. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.09.003>
- Caltrans Seismic (1999)**, Soil-foundation-structure interaction. En: Bridge Engineering Handbook, 2 ed. California, 1999.
- Chopra, Anil K.(2012)**, Dinámica de estructuras. Cuarta edición. Naucalpan de Juárez: Pearson, 2014.
- Comité Europeo de Normalización (2012)**, Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismoresistentes. Parte 2: Puentes. Madrid, España: AENOR, 2012.
- Deodatis, G. (1996)**, Simulation of Ergodic Multivariate Stochastic Processes. Journal of Engineering Mechanics 122, no. 8 (1996): 778-787. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1996\)122:8\(778\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1996)122:8(778))
- Deodatis, George. (1996)**, Non Stationary Stochastic Vector Processes- Seismic Ground Motion Applications. Probabilistic Engineering Mechanics 11, no. 3 (1996): 149-167. DOI:10.1016/0266-8920(96)00007-0
- Der Kiureghian, Armen; Neuenhofer, Ansgar. (1992)**, Response Spectrum Method for Multi-Support Seismic Excitations. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 21, no. 8 (1992): 713-740. DOI: 10.1002/eqe.4290210805
- Dumanogluid, A. A.; Soyluk, K.(2003)**, A Stochastic Analysis of Long Span Structures Subjected to Spatially Varying Ground Motions Including the Site-Response Effect. Engineering Structures 25, no. 10 (2003): 1301-1310. [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00080-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00080-4)
- Feng, Maria Q.; Kim, Sang-Hoon (2003)**, Fragility Analysis of Bridges Under Ground Motion with Spatial Variation. International Journal of Non-Linear Mechanics 38, no. 5 (2003): 705-721. [http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7462\(01\)00128-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7462(01)00128-7)
- Fernandez Sola, Luciano; Sánchez García, Raúl; Suárez López, Martha (2013)**, Respuesta Dinámica de Puentes Simples Sometidos a Excitación Multisoporte Debida a la Topografía. Edited by Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. Boca del Río Veracruz: XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 2013.
- Ghobarah, A., Aziz, T. S.; El-Attar, M. (1996)**, Response of Transmission Lines to Multiple Support Excitation. Engineering Structures 18, no. 12 (1996): 936-946. DOI:10.1016/S0141-0296(96)00020-X
- Hao, Hong. (1997)**, Torsional Response of Building Structures to Spatial Random Ground Excitations. Engineering Structures 19, no. 2 (1997): 105-112. DOI:10.1016/S0141-0296(96)00029-6
- Harichandran, R.; Hawwari, A. Sweidan, B. (1996)**, Response of Long-Span Bridges to Spatially Varying Ground Motion. Journal of Structural Engineering 122, no. 5 (1996): 476-484. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:5\(476\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:5(476))
- Harichandran, R.; Vanmarcke, E. (1986)**, Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time. Journal of Engineering Mechanics 112, no. 2 (1986): 154-174. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1986\)112:2\(154\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1986)112:2(154))
- Japan Road Association. (2000)**, Design Specifications of Highway Bridges, Part V. Japan, Tokyo: Seismic Design, Tokyo Japan Society of Civil Engineers, 2000.
- Kaiming, Bi; Hao, Hong; Ren Wei-Xin. (2013)**, Seismic Response of a Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge to Spatially Varying Ground Motions Including Local Site Effect. Advances in Structural Engineering 16, no. 10 (2013): 1799. DOI: 10.1260/1369-4332.16.10.1799
- Karakostas, Christos; Sextos, Anastasios; Lekidis, Vassilios; Papadopoulos, Savvas (2011)**, Investigation of the Dynamic Response of the Evripos Cable-Stayed Bridge in Greece, Under Asynchronous Ground Motion Records. Corfu, Greece: 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2011. http://congress.cimne.com/eccomas/proceedings/compdyn2011/compdyn2011_full/486.pdf
- Karmakar, Debasis; Ray-Chaudhuri, Samit; Shinozuka, Masanobu. (2012)**, Seismic Response Evaluation of Retrofitted Vincent Thomas Bridge Under Spatially Variable Ground Motions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 42 (2012): 119-127. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.06.008>
- Kassawara, R.; Sandell, L. (2006)**, Spatial Coherency Models for Soil-Structure Interaction. Final Report, U. S. Department of Energy, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 2006. <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000000001014101>
- Kleoniki Fontara, Ioanna; Titirla, Magdalini; Wuttke, Frank; Athanatopoulou, Asimina; Manolis, George; Sextos, Anastasios. (2015)**, Multiple



Support Excitation of a Bridge Based on Bem Analysis of the Subsoil-Structure-Interaction Phenomenon. Edited by 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Crete Island, Greece, 2015. <http://www.bristol.ac.uk/engineering/people/anastasios-sextos/pub/55866507>

- Konakli, Katerina; Der Kiureghian, Armen. (2012)**, Simulation of Spatially Varying Ground Motions Including Incoherence, Wave-Passage and Differential Site-Response Effects. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 41, no. 3 (2012): 495-513. DOI: 10.1002/eqe.1141
- Konakli, Katerina; Der Kiureghian, Armen. (2011)**, Stochastic Dynamic Analysis of Bridges Subjected to Spatially Varying Ground Motions. Berkeley, California: PEER, 2011. http://peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2011/webPEER-2011-105-Konakli.pdf
- Lou, L.; Zerva, A. (2005)**, Effects of Spatially Variable Ground Motions on the Seismic Response of a Skewed, Multi-Span, RC Highway Bridge. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25, no. 7 (2005): 729-740. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.016>
- Luco, J. E.; Wong, H. L. (1986)**, Response of a Rigid Foundation to a Spatially Random Ground Motion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 14, no. 6 (1986): 891-908. DOI: 10.1002/eqe.4290140606
- Mehanny, S. S. F.; Ramadan, O. M. O.; Elhowary, H. A. (2014)**, Assessment of Bridge Vulnerability Due to Seismic Excitations Considering Wave Passage Effects. *Engineering Structures* 70, no. 1 (2014): 197-207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.010>
- Mezouer, Nourredine; Sihadi, Kamel; Afra, Hamid. (2010)**, Importance of Spatial Variability of Seismic Ground Motion Effects on Long Beams Response. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology* 1, no. 1 (2010): 1-13. <http://www.academicjournals.org/journal/JCECT/article-full-text-pdf/44675822575>
- Nazmy A. S., Konidaris E. G. (1994)**, Nonlinear Seismic Behavior of Steel Deck-Type Arch Bridges. Illinois, Chicago: US National Conference on Earthquake Engineering.
- Nuti, Camilo; Vanzi, Ivo. (2005)**, Influence of Earthquake Spatial Variability on Differential Soil Displacements and SDF System Response. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 34 (2005): 1353-1374. DOI: 10.1002/eqe.483
- Price E.; Thomas, E.; Marc O. (1998)**, Effects of Spatially Varying Ground Motions on Short Bridges. *Journal of Structural Engineering* 124, no. 8: 948-955. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:8\(948\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:8(948))
- Ramadam, O. M. O.; Mehanny, S. S. F.; Elhowary, H. A. (2015)**, Seismic Vulnerability of Box Girder Continuous Bridges Under Spatially Variable Ground Motions. *Bulletin of Earthquake Engineering* 13, no. 6 (2015): 1727-1748. DOI: 10.1007/s10518-014-9683-0
- Ramadam, O.; Novak, M. (1993)**, Simulation of Spatially Incoherent Random Ground Motions. *Journal of Engineering Mechanics* 119, no. 5 (1993): 997-1016. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1993\)119:5\(997\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1993)119:5(997))
- Saxena, Vinita; Deodatis, George; Shinozuka, Masanobu. (2000)**, Effect of Spatial Variation of Earthquake Ground Motion on the Nonlinear Dynamic Response of Highway Bridges. 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2000. <http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/2227.pdf>
- Sextos, G. (2009)**, Anastasios, and Andreas J. Kappos. Evaluation of Seismic Response of Bridges Under Asynchronous Excitation and Comparisons with Eurocode 8-2 Provisions. *Bulletin of Earthquake Engineering* 7, no. 2 (2009): 519-545. DOI: 10.1007/s10518-008-9090-5
- Sextos, Anastasios, Kappos, Andreas J.; Mergos, Panayiotis (2004)**, Effect of Soil-Structure Interaction and Spatial Variability of Ground Motion on Irregular Bridges- the Case of The Krystallopigi Bridge. Vancouver, B.C., Canada: 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004. http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_2298.pdf
- Sextos, Anastasios; Karakostas, Christos; Lekidis, Vassilios; Papadopoulos, Savvas. (2015)**, Multiple Support Seismic Excitation of the Evripos Bridge Based on Free-Field and on-Structure Recordings. *Structure and Infrastructure Engineering* 11, no. 11 (2015): 1510-1523. <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2014.977302>
- Sgambi, L.; Garavaglia, E.; Basso, N.; Bontempi, F. (2014)**, Monte Carlo Simulation for Seismic Analysis of a Long Span Suspension Bridge. *Engineering Structures* 78 (2014): 100-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.08.051>
- Snaebjornsson, J.; Sigbjornsson, R. (2008)**, The Spatial Variability of Ground Motion and its Effects on Multi-Supported Structures. Beijing, China: The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008. http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_06-0079.PDF
- Soyluk, K. (2004)**, Comparison of Random Vibration Methods for Multi-Support Seismic Excitation Analysis of Long-Span Bridges. *Engineering Structures* 26, no. 11 (2004): 1573-1583. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.05.016>
- Soyluk, K.; Dumanoglu, A. A. (2000)**, Comparison of Asynchronous and Stochastic Dynamic Responses of a Cable-Stayed Bridge. *Engineering Structures* 22, no. 5 (2000): 435-445. [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00126-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00126-6)
- Soyluk, K.; Dumanoglu, A. A. (2004)**, Spatial Variability Effects of Ground Motions on Cable-Stayed Bridges. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, no. 3 (2004): 241-250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2003.11.005>
- Soyluk, Kurtulus; Sicacik, Eda Avanoğlu (2012)**, Soil-Structure Interaction Analysis of Cable-Stayed Bridges for Spatially Varying Ground Motion Components. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 35 (2012): 80-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.11.003>
- Tecchio, G.; Grendene, M.; Modena, C. (2012)**, Pounding Effects in Simply Supported Bridges Accounting for Spatial Variability of Groundmotion: a Case Study. *Advances in Civil Engineering* 2012 (2012): 10. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/267584>
- Valdebenito, Galo E.; Aparicio, Ángel C. (2005)**, Comportamiento Sísmico de Puentes Atirantados y Disipación de Energía Adicional: Un Estado del Conocimiento, Edited by A. H. Barbat. Barcelona: Monografías de Ingeniería Sísmica, 2005. <http://hdl.handle.net/2117/28373>
- Wang, H.; Harada, T.; Nonaka, T.; Nakamura, M. (2008)**, Spatial Variability of Near Field Ground Motions and its Design Implication of Long Extended Lifeline Structures Nearby a Fault. Beijing, China: The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008. http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_02-0025.PDF
- Wang, J.; Carr, A.; Cooke, N.; Moss, P. (2003)**, Wave-Passage Effect on the Seismic Response of Long Bridges. Christchurch, New Zealand: 2003 Pacific conference on earthquake engineering, 2003. <http://www.nzsee.org.nz/db/2003/View/Paper050s.pdf>
- Wang, Junjie; Hu, Shide; Wei, Xiao (1999)**, Effects of Engineering Geological Condition on Response of Suspension Bridges. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 18, no. 4 (1999): 297-304. [http://dx.doi.org/10.1016/S0267-7261\(99\)00002-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0267-7261(99)00002-0)
- Zhang, Y. H.; Li, Q.S.; Lin, J. H.; Williams, F. W. (2009)**, Random Vibration Analysis of Long-Span Structures Subjected to Spatially Varying Ground Motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29, no. 4 (2009): 620-629. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.06.007>

