

**COMPORTAMIENTO DE PUENTES BAJO EXCITACIÓN SÍSMICA
ASÍNCRONA: ESTADO DEL ARTE**

**JOHN ESTEBAN ARDILA GONZÁLEZ
FRANK GIOVANNI MEJIA PEDRAZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

**COMPORTAMIENTO DE PUENTES BAJO EXCITACIÓN SÍSMICA
ASÍNCRONA: ESTADO DEL ARTE**

**JOHN ESTEBAN ARDILA GONZÁLEZ
FRANK GIOVANNI MEJIA PEDRAZA**

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Civil**

**Director
JOSÉ MIGUEL BENJUMEA ROYERO
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos principalmente a Dios, a nuestro director de proyecto, el Ing. MCs. José Miguel Benjumea Royero por su paciencia y dedicación durante el desarrollo de este proyecto, a nuestros padres, por brindarnos su apoyo y en general a todas las personas que de alguna manera aportaron para que este proyecto concluyera con éxito.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
1 ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE LA EXCITACIÓN SÍSMICA ASÍNCRONA EN PUENTES.....	14
2 RESPUESTA DE PUENTES BAJO EXCITACIÓN SÍSMICA ASÍNCRONA.....	20
2.1 PUENTES CON MÚLTIPLES APOYOS.....	20
2.1.1 De tablero continuo.....	20
2.1.2 De tablero por tramos simplemente apoyados.....	21
2.2 PUENTES ARCO.....	24
2.3 PUENTES DE LUCES CORTAS.....	24
2.4 PUENTES DE GRANDES LUCES.....	25
2.4.1 Colgantes.....	25
2.4.2 Atirantados.....	26
3 NORMATIVAS Y CÓDIGOS.....	29
4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	31
CONCLUSIONES.....	32
BIBLIOGRAFÍA.....	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación del ángulo de ataque θ del terremoto respecto del eje del puente en planta.....	15
Figura 2. Onda sísmica artificial.....	15
Figura 3. Algoritmo-Método de Monte Carlo aplicado al análisis estocástico.....	17
Figura 4. Función de densidad espectral para tres tipos de suelo.....	19
Figura 5. Modelo no lineal para columnas.....	20
Figura 6. Puente de Santa Clara.....	22
Figura 7. Vista en planta y en altura.....	22
Figura 8. Modelo en 3D, comparación puente curvo y puente recto.....	23
Figura 9. Modelo de 3 puentes en arco de gran claro.....	24
Figura 10. Puente Vincent Thomas, California.....	26
Figura 11. Puente atirantado sometido a movimiento asíncrono.....	27
Figura 12. Puente Evripos, Grecia.....	28

RESUMEN

TÍTULO:

COMPORTAMIENTO DE PUENTES BAJO EXCITACIÓN SÍSMICA ASÍNCRONA: ESTADO DEL ARTE*

AUTORES:

**John Esteban Ardila González
Frank Giovanni Mejía Pedraza****

PALABRAS CLAVES:

Asíncrono, puentes, estocástico, coherencia, diseño sísmico.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este trabajo es mostrar un panorama del estado del conocimiento que actualmente se tiene sobre el comportamiento de puentes cuando son sometidos a un movimiento sísmico asíncrono, es decir, cuando el movimiento sísmico es diferente en cada uno de los apoyos de la estructura, señalando 3 factores en particular que los autores consideran tienen mayor incidencia en la generación de dicho movimiento y las características estructurales (longitud, alto de pilas, rigidez, forma, etc.) que afectan considerablemente las respuestas de los puentes. Además se presentan métodos matemáticos y de análisis que diversos autores han empleado para representar y modelar este fenómeno y, adicionalmente se resaltan algunas normativas internacionales como el Eurocódigo 8 y la Norma de Construcción Sismo-resistente: Puentes (NCSP) que incluyen al movimiento sísmico asíncrono en el análisis de puentes al momento del diseño sísmico, señalando la importancia que tiene el hacer este análisis ya que de esta forma se representa de una forma más realista el comportamiento de un puente, y en muchas otras normas no se tiene en cuenta este fenómeno y el diseño sísmico de un puente se aleja de la realidad. Concluyendo que bajo este fenómeno el comportamiento de los puentes es particular, es decir, que cada uno se comporta de una manera diferente sin importar su tipología. Por último, se sugieren futuras líneas de investigación que permitan ampliar el conocimiento de este fenómeno y el efecto que produce en las respuestas de los puentes.

*Proyecto de grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director José Miguel Benjumea Royero.

ABSTRACT

TITLE:

BEHAVIOR OF THE BRIDGES UNDER ASYNCHRONOUS SEISMIC EXCITATION: STATE OF ART*

AUTHORS:

**John Esteban Ardila González
Frank Giovanni Mejía Pedraza****

KEYWORDS:

Asynchronous, bridges, stochastic, coherency, seismic design.

DESCRIPTION:

The aim of this paper is to show an overview of the state of knowledge currently has on the behavior of bridges when subjected to a seismic asynchronous, that is to say, when the earthquake is different in each of the supports of the structure, noting three factors in particular that the authors believe have the greatest impact on the generation of the movement and structural characteristics (length, height of stacks, stiffness, shape, etc..) significantly affecting the responses of the bridges. Also present mathematical and analytical methods that various researchers have used to represent and model this phenomenon and additionally highlights some international standards such as Eurocode 8 and Rule Earthquake-resistant Construction: Bridges (NCSP) that include asynchronous earthquake bridges in the analysis of seismic design at the time, pointing out the importance of doing this analysis because in this way represents a more realistic behavior of a bridge, and many other standards do not take into account this phenomenon and the seismic design of a bridge away from reality. Concluded that the behavior under this phenomenon is particularly bridges, that is to say, each behave differently regardless of their type. Finally, we suggest future research that will expand the knowledge of this phenomenon and the effect it has on the responses of the bridges.

*Proyecto de grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director José Miguel Benjumea Royero.

INTRODUCCIÓN

La excitación sísmica asíncrona o también llamada variabilidad espacial, es un fenómeno que ocurre cuando el movimiento sísmico es diferente en cada uno de los apoyos de las estructuras.

A pesar de que este fenómeno se relaciona generalmente con los puentes, diversos estudios demuestran que también puede afectar edificios [1], presas [2], oleoductos [3], líneas de transmisión eléctrica [4] y centrales nucleares [5]. No obstante, el interés en este estudio del estado del conocimiento está enfocado únicamente en puentes.

El fenómeno de excitación sísmica asíncrona es generado por factores tales como patrones de origen, trayectoria, efectos de sitio, entre otros, que generalmente no pueden ser descritos de forma determinística [6], sin embargo, para simplificar un poco más el análisis y estudio del movimiento asincrónico producido por el sismo, es muy común encontrar los siguientes factores: i) efecto de onda pasajera (*wave passage effect*), ii) la incoherencia (*incoherence effect*) y iii) el efecto de sitio (*local site effect*) [7]. A los tres factores se les conoce como patrones de asincronismo [8]. El primer factor hace mención a los diferentes tiempos de llegada de la onda a los apoyos del puente, resultando una excitación progresiva en la estructura. El segundo factor se debe a la refracción y reflexión de las ondas sísmicas debido a su paso por el medio, alterando su forma de llegada a los apoyos. Y el tercer factor hace referencia a los diferentes tipos de suelos en los que se apoya el puente [9][10][11][12][13].

Los primeros estudios en la temática aparecieron hace 4 décadas aunque únicamente se tenía en cuenta el efecto de onda pasajera [14]. Debido a la falla de puentes como el Gavin Canyon en 1994 y algunos viaductos de la ciudad de Kobe en 1995, a los cuales se atribuye su colapso por un movimiento diferencial a

nivel de la cimentación, se generó la necesidad de conocer los efectos del movimiento sísmico asíncrono [7].

Los avances tecnológicos en computación permiten realizar modelos y métodos que representan de una forma “más realista” el comportamiento de los puentes bajo un sismo, teniendo en cuenta los patrones de asincronismo, obteniendo diseños sísmicamente más seguros.

Para abordar el estudio del comportamiento de puentes bajo excitación sísmica asíncrona, se comenzará con el capítulo 2, en el cual se hace una breve descripción de los análisis y modelamiento de la excitación sísmica asíncrona en puentes. En el capítulo 3, se procederá a analizar la respuesta de puentes según su tipología cuando se someten a movimiento asíncrono. Luego, en el capítulo 4, se destacan algunas de las normativas que recomiendan tener en cuenta el movimiento asíncrono en el diseño de puentes. Para finalizar, en los capítulos 5 y 6 se sugieren futuras líneas de investigación y se formulan conclusiones, respectivamente.

1 ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE LA EXCITACIÓN SÍSMICA ASÍNCRONA EN PUENTES

Generalmente, en el diseño sísmico de puentes se realizan análisis dinámicos clásicos en los cuales las velocidades de onda son infinitas, es decir, que el sismo llega a cada uno de los apoyos de la estructura al mismo tiempo y el suelo se toma de un único tipo para todos los apoyos cuando el movimiento sísmico se asume uniforme. Sin embargo, las velocidades de onda sísmica son finitas y el tipo de suelo influye en la onda residual que llega desde la roca madre hasta cada uno de los apoyos de la estructura. Si se tienen en cuenta dichas características el análisis pasa a ser un análisis dinámico asíncrono [2][15].

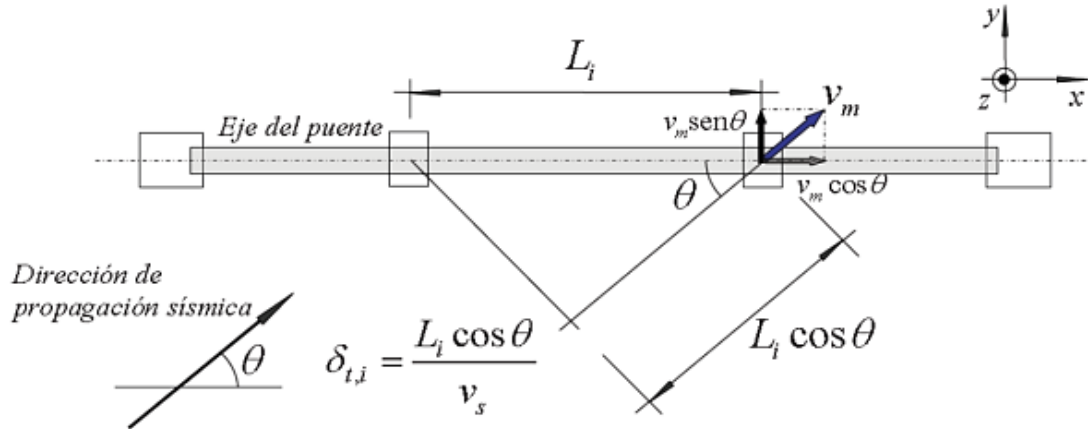
El movimiento uniforme producido por sismos genera en el puente esfuerzos inerciales. Ahora bien, si el movimiento es diferente para cada apoyo a nivel de la cimentación, aparecen esfuerzos pseudo-estáticos que se suman a los inerciales [15][16].

Existen diversos métodos para obtener la componente pseudo-estática que produce el terremoto en el puente, los cuales, en forma general, se clasifican en:

i) Métodos estáticos; basados en la imposición de desplazamientos a nivel de la cimentación.

Priestley [18] propone un método que incluye el ángulo de ataque (θ) que forma la trayectoria de propagación del terremoto con el eje del puente, en la definición de los desplazamientos impuestos, ver **Figura 1**. El método no indica el signo de los desplazamientos, por lo que se supone que todos se aplican en la misma dirección.

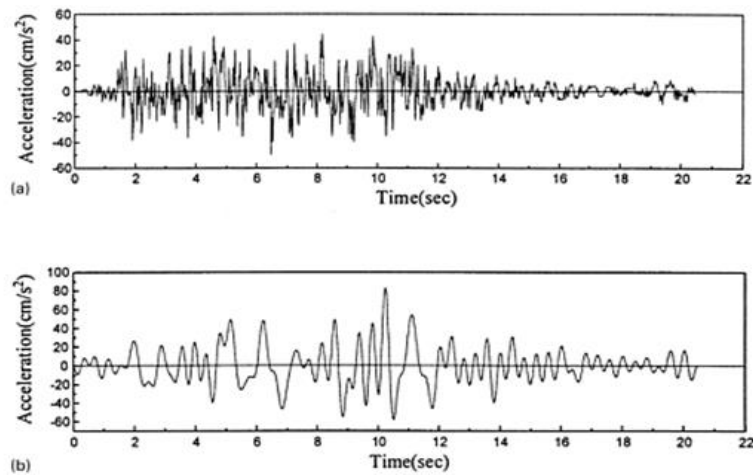
Figura 1. Representación del ángulo de ataque θ del terremoto respecto del eje del puente en planta.



Fuente: [17]

ii) Métodos dinámicos; basados en la modificación bien sea del espectro de aceleraciones o en el análisis del dominio de tiempo por medio de acelerogramas asíncronos y vibración aleatoria. La **Figura 2** muestra cómo puede afectarse el acelerograma para cada uno de los apoyos de un puente, si se tienen en cuenta los patrones de asincronismo.

Figura 2. Onda sísmica artificial (a) Apoyo 1 (b) Apoyo 2.



Fuente: [19]

Los métodos dinámicos, por ser numéricamente más elaborados, son de gran interés para los investigadores de la excitación sísmica asíncrona en puentes debido a que los métodos estáticos se alejan de la física real del problema [17]. Para obtener la representación rigurosa del movimiento telúrico a emplear en los métodos dinámicos, se emplea un enfoque probabilístico.

Ya que el cálculo de la respuesta estructural es una tarea difícil, en donde se involucran fenómenos en los cuales hay incertidumbre y fuertes no-linealidades, el método de Monte Carlo (método estadístico no determinístico) aparece como la herramienta más adecuada para realizar el análisis; para el caso de excitación sísmica asíncrona, en [6], se propuso una metodología basada en la representación espectral para la generación de procesos de vectores de movimiento de tierra no estacionarios y compatibles con el espectro de diseño prescrito en la normativa local donde se esté aplicando.

En [20], presentan un algoritmo matricial para aplicar el método Monte Carlo, ver **Figura 3**, con énfasis en parámetros descriptivos que identifican los patrones de asincronismo, de esta manera se aplica un análisis estocástico.

Un análisis estocástico incluye cada uno de los patrones de asincronismo dentro de la matriz de densidad cruzada de la estructura. Cada autor tiene una forma propia de incluir la excitación sísmica asíncrona en el análisis dinámico de un puente. Por ejemplo, en [9] utilizan la siguiente función:

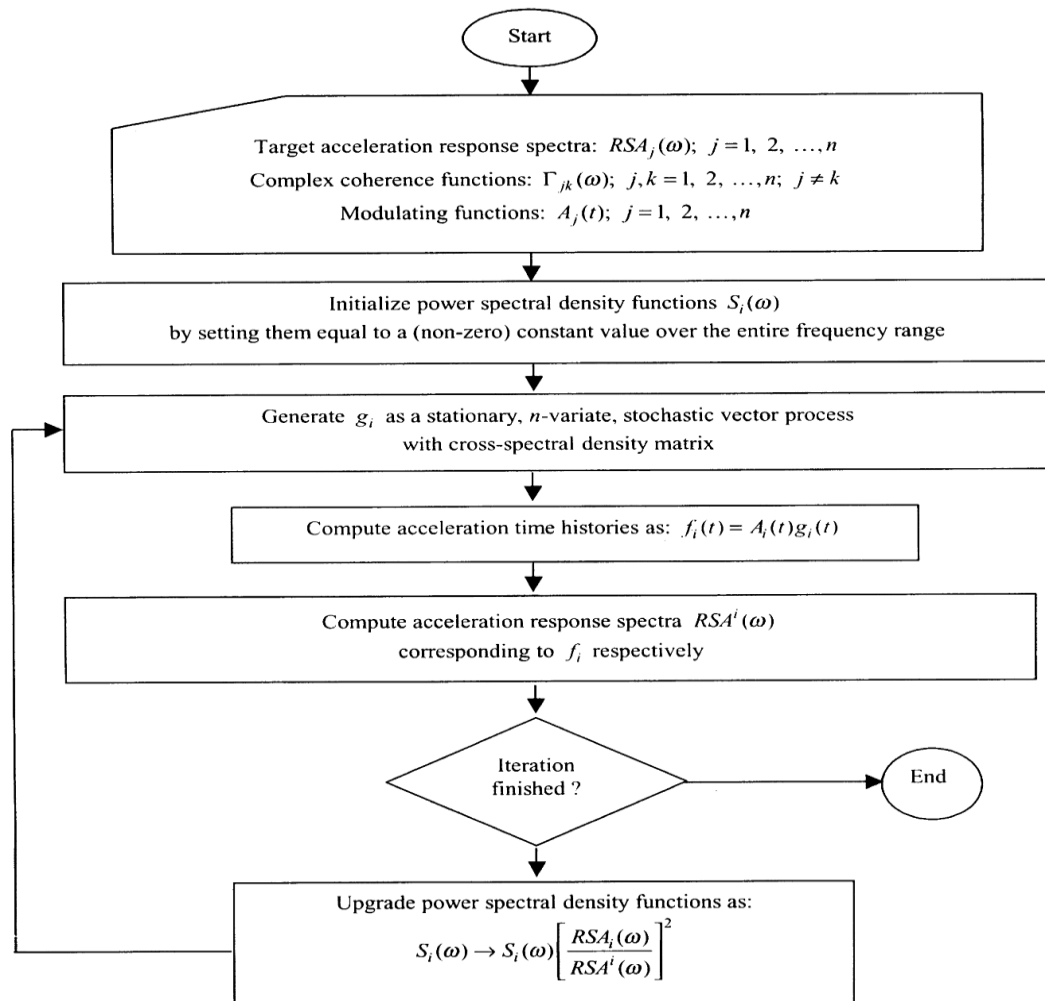
$$\gamma_{kl}(\omega, x_k) = e^{A+B} \quad (1)$$

Donde γ : Función de coherencia y

$$A = -\left(\frac{\alpha\omega x_{kl}}{\beta}\right)^2; \quad B = -i\omega\left(\frac{x'_k}{c_k} - \frac{x'_l}{c_l}\right)$$

A , representa la incoherencia producida por las refracciones y reflexiones de la onda sísmica y B , agrupa el efecto de la onda pasajera y el efecto local de sitio de cada apoyo del puente. En esta ecuación, es posible asumir que el análisis sea no estacionario, es decir, los parámetros estadísticos son independientes del tiempo para el análisis estocástico y de esta manera se podría ahorrar tiempo de cálculos y los resultados serán satisfactorios [21].

Figura 3. Algoritmo-Método de Monte Carlo aplicado al análisis estocástico.



Fuente: [20]

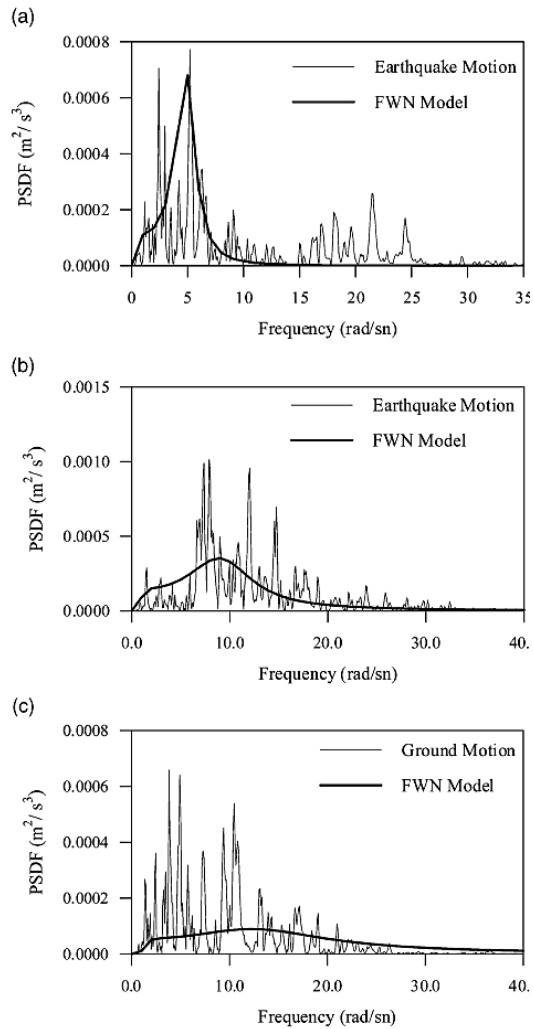
Adicionalmente, en [2] y [9] se menciona que para obtener resultados óptimos del análisis sísmico asíncrono, es necesario hacer un filtrado del sismo que consiste en obtener la aceleración en superficie a partir de la aceleración originada en la roca madre mediante la ecuación de densidad espectral (2), siendo rigurosos con los efectos locales de sitio pues según [16], la geología del terreno, es decir, el tipo de suelo de apoyo, es importante. La **Figura 4** muestra como es afectada la función de densidad espectral de una estructura en función del suelo sobre el cual se apoya.

$$S_o(\omega) = S_o \cdot f(\omega, \omega_f, \xi_f) \cdot g(\omega, \omega_g, \xi_g) \quad (2)$$

Donde, S_o depende de la intensidad del sismo, ω indica frecuencias angulares y ξ coeficientes de amortiguación que dependen del tipo de suelo sobre el cual se apoya el puente.

A la hora del análisis numérico, en [15], se hace énfasis en que los puentes de grandes luces y aquellos puentes de gran extensión, no son estructuras homogéneas como los edificios y las presas. Por lo tanto el número de modos aceptable para obtener buenos resultados es muy importante para el análisis, incluso en [22] se observó que los modos más altos fueron excitados por la excitación sísmica asíncrona.

Figura 4. Función de densidad espectral para tres tipos de suelo (a) Blandos; (b) Medios; (c) Firmes.



Fuente: [16]

2 RESPUESTA DE PUENTES BAJO EXCITACIÓN SÍSMICA ASÍNCRONA

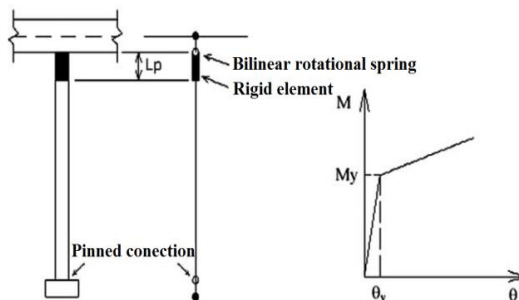
Los daños producidos en un puente por la excitación sísmica asíncrona se pueden presentar en cualquier tipología. La gravedad del daño depende de las propiedades dinámicas de cada estructura [23] y de las características de la señal sísmica [24]. Por lo tanto, se presenta las respuestas de puentes clasificadas según su tipología.

2.1 PUENTES CON MÚLTIPLES APOYOS

2.1.1 De tablero continuo

En los puentes con múltiples apoyos de tablero continuo es necesario realizar un análisis no lineal, pues es importante tener en cuenta la demanda de ductilidad en los puntos donde se apoya el tablero (apoyos, ver **Figura 5**). En [20] y [26] para el análisis usaron un puente con 12 vanos de 43m cada uno y pilas de 12m de altura, se encontró que la demanda de ductilidad aumenta cuando el puente se somete a un movimiento no uniforme. Con el fin de reducir la respuesta dinámica del puente bajo sismos no uniformes, [25] propone el uso de amortiguadores viscosos con comportamiento no lineal como la manera más práctica.

Figura 5. Modelo no lineal para columnas.



Fuente: [27]

Los puentes con múltiples apoyos de gran extensión (puente de Santa Clara, ver **Figura 6**) se ven mayormente afectados por el efecto de onda pasajera, mientras que en puentes con luces de longitudes menores a los 300 m presentan respuestas más desfavorables bajo el efecto local de suelo y pérdida de coherencia de la onda [26].

En contraste, la irregularidad en altura, es decir pilas de diferentes longitudes, no afecta la respuesta del puente cuando se somete a un movimiento asíncrono, según [28], donde utilizaron un puente de 9 vanos con una longitud total de 344m. En cuanto a los patrones de asincronismo se recomienda introducirlos en el análisis por separado y en conjunto, generando 4 casos de estudio (solo efecto de onda pasajera, solo efecto de incoherencia, solo efecto local de sitio y por último incluyendo los 3 patrones de asincronismo), para determinar la influencia e importancia de cada uno en la respuesta del puente, según [26].

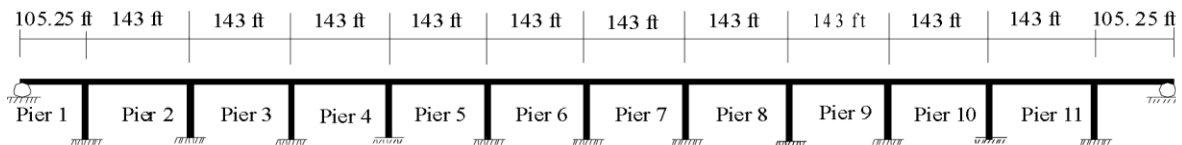
2.1.2 De tablero por tramos simplemente apoyados

Cuando los puentes con múltiples apoyos y con tablero por tramos simplemente apoyados se someten a una excitación sísmica asíncrona, las fuerzas de golpeteo que se generan entre cada segmento y las reacciones en las pilas del puente (cortante y momento flector) aumentan considerablemente comparadas con un movimiento uniforme.

En [9] emplearon un prototipo de 9 vanos cada uno con 30m de longitud y pilas de 8m de altura, verificaron las fuerzas para diferentes espaciamientos entre tramos, desde 0.01 m hasta 0.3 m, los análisis realizados en los diferentes casos examinados, mostraron que las propiedades del movimiento asíncrono pueden cambiar drásticamente la respuesta estructural tanto en términos de fuerzas de reacción en las bases de las pilas y las fuerzas de golpeteo entre segmentos adyacentes, por lo tanto si la magnitud de las fuerzas de impacto son bastante

grandes, es de esperarse como consecuencia un daño considerable para el área local de los tableros del puente. Sin embargo, en el estudio se menciona que, la evaluación de este daño no puede dejar de tener en cuenta una serie de causas, tales como: propiedades del concreto, duración de las fuerzas de golpeteo, frecuencia de las colisiones.

Figura 6. Puente de Santa Clara.

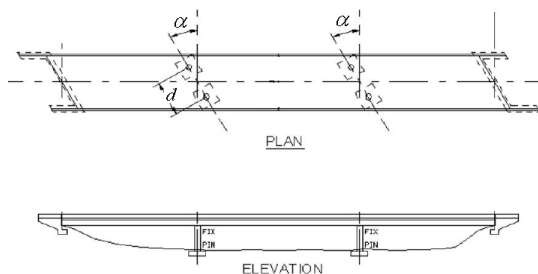


Fuente: [26]

En [29] realizaron un modelo mediante elementos finitos, incluyendo la excitación sísmica asíncrona en el análisis dinámico (puente Fener, Italia), para analizar el efecto de golpeteo y concluyeron que las fuerzas que producen este fenómeno están influenciadas por el nivel de correlación de los movimientos del terreno en los soportes de la estructura, ya que aumentan rápidamente con la pérdida de coherencia de las entradas sísmicas.

En cuanto a las fuerzas de reacción, los resultados numéricos mostraron que cuando la brecha sísmica es grande, pero todavía se produce colisión, los valores podrían aumentar hasta dos veces más que los obtenidos por el análisis uniforme.

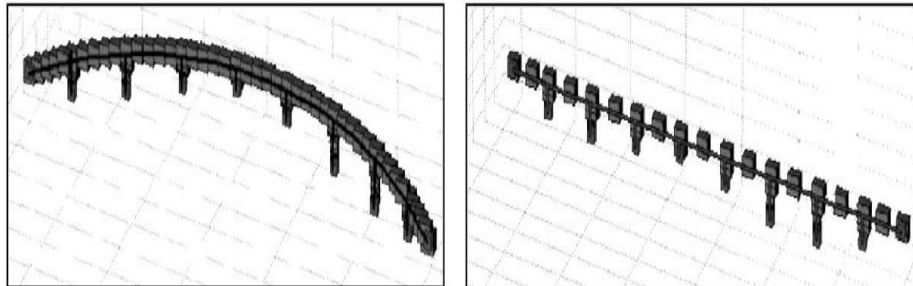
Figura 7. Vista en planta y en altura, puente esviado.



Fuente: [27]

La irregularidad geométrica en planta del puente también es un factor importante, pues en puentes esviados, como el de la **Figura 7**, el efecto de golpeteo es subestimado por un análisis dinámico clásico, incluso en puentes de pocos tramos y luces cortas, por lo tanto la excitación sísmica asíncrona es importante para el diseño sismo resistente de este tipo de puentes irregulares en planta según [27].

Figura 8. Modelo en 3D, comparación puente curvo y puente recto.



Fuente: [7]

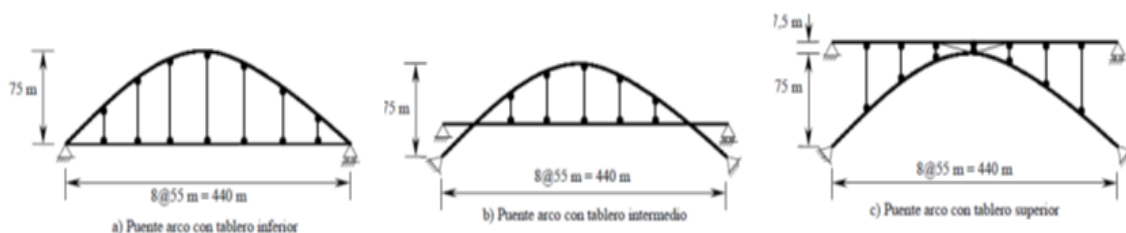
En [8], se analizó el puente curvo de Krystallopigi en Grecia. Los autores concluyeron que el ángulo de incidencia de la onda sísmica no es muy importante en la deflexión vertical, mientras que en los momentos flectores si produce valores considerables, en algunos tramos favorables y en otros muy desfavorables siempre siendo el eje perpendicular a la cuerda del puente, el más crítico. Sin embargo, no se tiene un efecto general en los puentes con esta tipología, debido a la incertidumbre de su comportamiento, pues, según [30], donde se analizaron dos puentes equivalentes en longitud (344 m, ver **Figura 8**) pero diferente configuración en planta (recto y curvo), se observó que la curvatura es una característica importante a tener en cuenta, pues ésta se comporta como un arco transversalmente, es decir resiste esfuerzos de compresión, mientras que el puente recto resiste flexión transversalmente reduciendo así los desplazamientos transversales, siendo mayores los desplazamientos para el arco.

2.2 PUENTES ARCO

Álvarez y Aparicio [31], realizaron una revisión literaria del comportamiento de puentes en arco, en el cual señalaron la excitación sísmica asíncrona como un efecto generador de esfuerzos y deformaciones importantes en este tipo de puentes. Los autores detectaron que la longitud del claro principal y la poca flexibilidad del tablero aumentan la respuesta del puente cuando se ve sometido a excitación sísmica asíncrona, afectando considerablemente el arco principal y los riñones del arco, teniendo en cuenta los patrones de asincronismo por separado y en conjunto. Por lo tanto, se recomienda hacer un análisis dinámico asíncrono completo para el diseño sísmo resistente de este tipo de puente ya que un análisis sísmico uniforme subestima esfuerzos cortantes y desplazamientos que se presentan en el caso no uniforme, siendo este el caso más desfavorable [32][33].

Según [31], la configuración del tablero (inferior, intermedio o superior, (ver **Figura 9**) no influye en la respuesta, como tampoco el tipo de material de los elementos estructurales.

Figura 9. Modelo de 3 puentes en arco de gran claro.



Fuente: [31].

2.3 PUENTES DE LUCES CORTAS

Los puentes cortos de uno o dos vanos, han sido de interés para ciertos investigadores, entre los cuales se destacan las investigaciones realizadas por

Zerva A. [34], Thomas Price y Marc Eberhard[35], Nourredine M., Kamel S. y Hamid A. [36]. En general, los autores justifican hacer análisis dinámico asíncrono incluso a este tipo de estructuras, pues los resultados muestran que las vigas continuas de dos o más luces con longitudes variables tienen un comportamiento muy complejo. En algunos casos los esfuerzos pseudo-estáticos aumentan y se reducen los inerciales o viceversa, esto se debe a que al incluir la incoherencia en un movimiento telúrico, influyen factores como el sistema estructural y las características dinámicas propias de la estructura (frecuencia, rigidez, entre otros).

2.4 PUENTES DE GRANDES LUCES

2.4.1 Colgantes

Este tipo de puentes son estructuras complejas y su respuesta depende en gran medida de los tres patrones de asincronismo, por esto es muy difícil identificar cuál afecta con mayor gravedad. Por lo tanto, se recomienda que para obtener un análisis sísmico realista de puentes de grandes luces se deben incluir todos los patrones de asincronismo en conjunto, según [37].

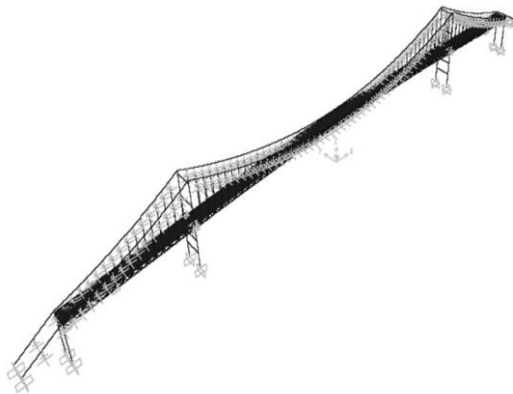
En [38], realizaron un análisis del puente Vincent Thomas, ver **Figura 10**, se tuvieron en cuenta 3 casos: en el primero y segundo se realizó un análisis dinámico clásico, considerando que el puente se apoyaba sobre suelo firme y arcilloso, respectivamente y por último se realizó un análisis dinámico asíncrono, apoyando la estructura en suelo combinado (firme y arcilloso). Se pudo observar que el asincronismo no es el peor de los casos para la respuesta, pues el segundo caso presentó mayores fuerzas internas (fuerza axial, cortante, momentos flectores y torsión) en comparación a los casos 1 y 3.

Un caso de excitación múltiple en los apoyos puede provocar respuestas más bajas en el puente que en el caso de la excitación uniforme cuando todos los

soportes se encuentran en el suelo a una profundidad uniforme. Las condiciones del suelo, la topografía del sitio y los lugares de apoyo del puente, son factores importantes para una evaluación más realista de los movimientos sísmicos que excitan el puente, según [39] y [40].

En [41], se señala que a medida que se disminuye la velocidad de onda, los efectos pseudo-estáticos aumentan siendo así más crítico el movimiento asíncrono en comparación con un movimiento uniforme. Adicionalmente en [42], se recomienda que en el análisis de puentes colgantes se incluya el sismo en las tres direcciones (vertical, transversal y longitudinal), debido a la flexibilidad de las torres.

Figura 10. Puente Vincent Thomas, California.



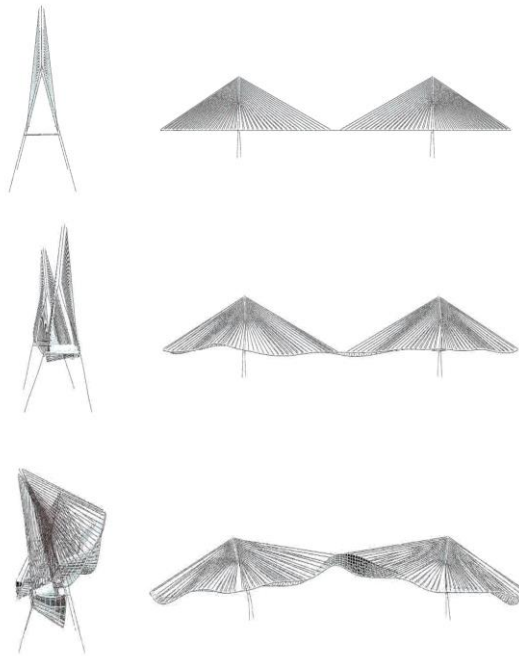
Fuente: [38]

2.4.2 Atirantados

Los patrones de asincronismo y la interacción suelo-estructura, tienen efectos muy importantes en el comportamiento dinámico de puentes atirantados, según [43]. En donde, también se observa que los mayores esfuerzos se presentan longitudinalmente debido a que las pilas, tirantes y el tablero, al trabajar como

conjunto, generan fuerzas internas importantes entre sí, mientras que en el sentido transversal, las pilas tienen mayor libertad para desplazarse y los esfuerzos son muy pequeños.

Figura 11. Puente atirantado sometido a movimiento asíncrono.



Fuente: [44]

A partir de los resultados obtenidos en [17], se evidencia que entre más rígido sea el tablero, entre más larga la luz principal y entre más blando sea el suelo de cimentación (velocidades bajas, generan desfases temporales altos), los efectos del movimiento asíncrono son mayores (ver **Figura 11**). A medida que la luz del puente se hace más grande, el tablero pierde rigidez, lo cual le quita capacidad de redistribuir esfuerzos a las pilas del puente, dejando que las pilas vibren independientemente y esto no afecta al puente.

Esto lleva a pensar que puede ocurrir que en algunos casos este efecto produzca respuestas benéficas, como en [46], donde se modeló el puente Evripos de Grecia

y para este caso en particular la excitación sísmica asíncrona ha generado un efecto favorable, disminuyendo los momentos flectores en la base de las pilas y los desplazamientos el tablero, **Figura 12**. A pesar de esto, en general, en puentes atirantados, las respuestas obtenidas con la excitación sísmica asíncrona son generalmente mayores a las conseguidas por un movimiento uniforme [47].

Figura 12. Puente Evripos, Grecia.



Fuente: [45]

3 **NORMATIVAS Y CÓDIGOS**

Dentro de las normativas y códigos de diseño sismo resistente en los que se incluye el análisis dinámico asíncrono para puentes se destacan el EC8 (EUROCÓDIGO8) [48] y la NCSP (Norma de Construcción Sismo-resistente: Puentes) [49]. Las condiciones que se deben cumplir para realizar el análisis son:

i) El EC8, recomienda hacer análisis para puentes de tablero continuo cuando se satisfaga una de las siguientes condiciones:

1. Propiedades del suelo variables a lo largo del puente, de forma que a los distintos apoyos del tablero les corresponde más de un tipo de suelo.

2. Las propiedades del suelo son aproximadamente uniformes a lo largo del puente, pero la longitud del tablero continuo $L_{lim} \geq L_g/1.5$, L_g está definida según el tipo de roca donde se encuentra la cimentación, así:

$L_g = 600m$, para terrenos rocosos tipo A (Suelo firme).

$L_g = 300m$, para terrenos blandos tipo D (Suelo blando).

ii) La NCSP, recomienda análisis para puentes con luces mayores o iguales a los 600 metros.

El NYC-DOT (New York City Department of Transportation) [50], provee condiciones similares a las del EC8 de 1998, el cual solo tenía en cuenta la longitud ($L_{lim} \geq 0.4 * L_g$), para realizar análisis asíncrono.

Una de las falencias en ambas normativas, es el método empleado para el análisis asíncrono, pues emplean métodos estáticos; el EC8 no tiene en cuenta las velocidades de propagación de la onda para considerar dichos desplazamientos, mientras que la NCSP y el método propuesto por Priestley [18] si consideran las velocidades de la onda pasajera. Sin embargo, este método no es adecuado para un análisis dinámico asíncrono, pues se alejan de la física real del fenómeno asíncrono y queda del lado de la inseguridad usar este tipo de método [17].

4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La excitación sísmica asíncrona es un tema que se torna cada vez más y más interesante debido a la gran incertidumbre en los factores que la afectan, por lo tanto es interesante determinar qué otros factores podrían incluirse al análisis dinámico asíncrono para hacerlo más real, pues se encontró en [32] que aparte de los 3 patrones de asincronismo ya definidos, se menciona un cuarto patrón llamado efecto de atenuación, definido como la disipación de energía que sufre la onda sísmica al propagarse por el suelo, sin embargo dicho patrón aun no es considerado en el análisis dinámico asíncrono.

Dentro de los análisis realizados a diversas tipologías de puentes, no se han incluido algunas como los puentes extradados, por lo tanto se justifica realizar análisis a otros tipos de puentes, con diferentes tipos de materiales, cambiando la configuración de los elementos estructurales (por ejemplo, la configuración de los cables y diferentes tipos de pilas en un puente atirantado) mostrando las desventajas y ventajas de uno respecto al otro. Esto permite tener una idea más certera de los arreglos estructurales, que se comportan mejor bajo excitación sísmica asíncrona.

En cuanto al método de análisis estocástico que requiere de acelerogramas sintéticos, sería de gran ayuda tener una idea de la cantidad necesaria de acelerogramas que se deben emplear para tener una perspectiva más completa de la respuesta del puente a distintos escenarios sísmicos.

CONCLUSIONES

En aras de contribuir a comprender mejor la interacción de las variables que influyen en el comportamiento de puentes, se ha tratado de mostrar un panorama del estado del conocimiento sobre la respuesta sísmica de puentes bajo excitación sísmica asíncrona, llegando finalmente a las siguientes conclusiones:

i)El fenómeno de excitación sísmica asíncrona es generado por factores tales como patrones de origen, trayectoria, efectos de sitio, entre otros, se identificaron 3, denominados patrones de asincronismo, el efecto de onda pasajera, el efecto local de sitio y el efecto de pérdida de coherencia.

ii)Los métodos dinámicos estocásticos caracterizan la excitación sísmica asíncrona de una forma más realista que los métodos estáticos, debido a su componente probabilística no determinística, permitiendo incluir los tres patrones de asincronismo.

iii)La respuesta del puente sometido a un movimiento asíncrono, es particular, por lo tanto, no se puede generalizar, ya que ésta no solo depende de la conformación estructural, sino del sitio donde se apoya el puente.

iv)Las normativas estudiadas, recomiendan tener en cuenta la excitación sísmica asíncrona bajo condiciones poco elaboradas, quedando así del lado de la inseguridad.

v)Debido a la incertidumbre de los factores de entrada que utilizan para modelar el movimiento asíncrono en puentes, se sugiere verificar si existen otros patrones de asincronismo que puedan generar un mayor efecto sobre el puente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Hao, Torsional Response Of Building Structures To Spatial Random Ground Excitations, *Engineering Structures*, Vol. 19, Nº 2, Pp. 105-112, 1997.
- [2] A. A. D. A. Y. C. A. Bayraktar, Asynchronous Dynamic Analysis Of Dam-Reservoir-Foundation Systems By The Lagrangian Approach, *Computers & Structures*, Vol. 58, Nº 5, Pp. 925-935, 1996.
- [3] H. Wang, T. Harada, T. Nonaka Y M. Nakamura, Spatial Variability Of Near Field Ground Motions And Its Desing Implication Of Long Extended Lifeline Structure Nearby A Fault, De *The 14th World Conference On Earthquake Engineering* , Beijing , 2008.
- [4] T. S. A. A. M. E.-A. A. Ghobarah, Response Of Transmission Lines To Multiple Support Excitation, *Engineering Structures*, Vol. 18, Nº 12, Pp. 936-946, 1996.
- [5] N. A. Abrahamson, Hard-Rock Coherency Functions Based On The Pinyon Flat Array Data, Electric Power Research Institute, Palo Alto, 2007.
- [6] P. Cacciola Y G. Deodatis, A Method For Generating Fully Non-Stationary And Spectrum Compatible Ground Motion Vector Processes, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, Vol. 31, P. 351–360, 2011.
- [7] N. J. Burdette, A. S. E. F.Asce, A. Lupoi Y A. G. Sextos, Effect Of Asynchronous Earthquake Motion On Complex Bridges. I: Methodology And Input Motion, *Journal Of Bridge Engineering*, Vol. 13, P. 166–172, 2008.
- [8] A. Sextos, A. J. Kappos Y P. Mergos, Effect Of Soil-Structure Interaction And Spatial Variability Of Ground Motion On Irregular Bridges: The Case Of The Krystallopigi Bridge, De *13th World Conference On Earthquake Engineering*, Vancouver , 2004.

- [9] G. Zanardo, H. Hao Y C. Modena, Seismic Response Of Multi-Span Simply Supported Bridges To A Spatially Varying Earthquake Ground Motion, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 31, P. 1325–1345, 2002.
- [10] A. Dumanoglu Y K. Soyluk, A Stochastic Analysis Of Long Span Structures Subjected To Spatially Varying Ground Motions Including The Site-Response Effect, *Engineering Structures*, Vol. 25, P. 1301–1310, 2003.
- [11] K. Soyluk Y A. A. Dumanoglu, Spatial Variability Effects Of Ground Motions On Cable-Stayed Bridge, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering* , Vol. 24, Pp. 241-250, 2004.
- [12] J. T. Snaebjornsson Y R. Sigbjornsson, The Spatial Variability Of Ground Motion And Its Effects On Multi-Supported Structures, De *The 14th World Conference On Earthquake Engineering* , Beijing , 2008.
- [13] K. Konakli Y A. D. Kiureghian, *Stochastic Dynamic Analysis Of Bridges Subjected To Spatially Varying Ground Motions*, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2011.
- [14] J. E. G. A. A. J. S. J. L. Bogdanoff, The Effect Of Ground Transmission Time On The Response Of Long Structures, *Bulletin Of The Seismological Society Of America*, Vol. 55, Pp. 627-640, 1965.
- [15] K. Soyluk Y A. Dumanoglu, Comparison Of Asynchronous And Stochastic Dynamic Responses Of A Cable-Stayed Bridge, *Elsevier Science* , Vol. 22, Nº 5, P. 435–445, 2000.
- [16] K. Soyluk, Comparison Of Random Vibration Methods For Multi-Support Seismic Excitation Analysis Of Long-Span Bridges, *Engineering Structures*, Vol. 26, P. 1573–1583, 2004.
- [17] A. C. Casado, *Comportamiento Sísmico De Puentes Atirantados*, Madrid, 2008.

- [18] M. J. N. Priestley, F. Seible Y G. M. Calvi, *Seismic Design And Retrofit Of Bridges*, Toronto: John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [19] W. Junjie, H. Shide Y W. Xiao, Effects Of Engineering Geological Condition On Response Of Suspension Bridge, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, Vol. 18, P. 297–304, 1999.
- [20] S. H. Kim Y M. Q. Feng, Fragility Analysis Of Bridges Under Ground Motion With Spatial Variation, *International Journal Of Non-Linear Mechanics*, Vol. 38, P. 705–721, 2003.
- [21] B. Mr., D. K. A. Y W. El., *Stocal-User Information Manual*. Report No. Ucb-Sesm/81-2, Department Of Civil Engineering, University Of California, Berkeley, 1981.
- [22] J. Wang, A. Carr, N. Cooke Y P. Moss, Wave-Passage Effect On The Seismic Response Of Long Bridges, De *Pacific Conference On Earthquake Engineering* , Christchurch, 2003.
- [23] Zerva A., Effect Of Spatial Variability And Propagation Of Seismic Ground Motions On The Response Of Multiply Supported Structures, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 6, P. 212–221, 1991.
- [24] S. E. A. Raheem, T. Hayashikawa Y U. Dorka, Ground Motion Spatial Variability Effects On Seismic Response Control Of Cable-Stayed Bridges, *Earthquake Engineering And Engineering Vibration*, Vol. 10, Pp. 37-49, 2011.
- [25] J. Alvarez, N. Parra Y A. Aparicio, Comportamiento Estructural De Puentes En Arco Sometidos A Movimiento Sísmico De Fuente Cercana, De *Xiii Congreso Nacional De Ingeniería Estructural*, México, 2002.
- [26] V. Saxena, G. Deodatis Y M. Shinozuka, Effect Of Spatial Variation Of Earthquake Ground Motion On The Nonlinear Dynamic Response Of Highway Bridges, De *The 12th Wcee*, 2000.

- [27] L. Lou Y A. Zerva, Effects Of Spatially Variable Ground Motions On The Seismic Response Of A Skewed, Multi-Span, Rc Highway Bridge, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, Vol. 25, P. 729–740, 2005.
- [28] J. Wang, A. Carr, N. Cooke Y P. Moss, Inelastic Responses Of Long Bridges To Asynchronous Seismic Inputs, De *13th World Conference On Earthquake Engineering*, Canada, 2004.
- [29] G. Tecchio, M. Grendene Y C.Modena, Pounding Effects In Simply Supported Bridges Accounting Forspatial Variability Of Groundmotion: A Case Study, *Hindawi Publishing Corporation, Advances In Civil Engineering*, Vol. 2012, P. 10, 2012.
- [30] N. J. Burdette, A. S. Elnashai, A. Lupoi Y A. G. Sextos, The Effect Of Asynchronous Earthquake Motion On Complex Bridges, Mid-America Earthquake Center, Illinois, 2006.
- [31] J. D. J. Á. Sereno Y Á. C. A. Bengoechea, Comportamiento Sísmico De Puentes Arco. Un Panorama Del Estado Del Conocimiento, *Revista De Ingeniería Sísmica*, Vol. 68, Pp. 21-53, 2003.
- [32] M. Šavor, D. Lazarević Y Z. Šavor, Seismic Response Of Concrete Arch Bridges To Multiple-Support Excitation, De *3rd Chinese-Croatian Joint Colloquium, Sustainable Arch Bridges*, Zagreb, 2011.
- [33] J. Álvarez, A. Aparicio, J. Jara Y M. Jara, Seismic Assessment Of A Long-Span Arch Bridge Considering The Variation In Axial Forces Induced By Earthquakes, *Engineering Structures*, Vol. 34, Pp. 69-80, 2012.
- [34] Z. A., Response Of Multi-Span Beams To Spatially Incoherent Seismic Ground Motions, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 19, P. 819–832, 1990.
- [35] H. E. Price Y M. O. Eberhard, Effects Of Spatially Varying Ground Motions On Short Bridges, *Journal Of Structural Engineering*, Vol. 124, Pp. 948-955, 1998.

- [36] N. Mezouer, K. Silhadi Y H. Afra, Importance Of Spatial Variability Of Seismic Ground Motion Effects On Long Beams Response, *Journal Of Civil Engineering And Construction Technology*, Vol. 1, Pp. 1-13, 2010.
- [37] Y.H.Zhang, Q.S.Li, J.H.Lin Y F.W.Williams, Random Vibration Analysis Of Long-Span Structures Subjected To Spatially Varying Ground Motions, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, Vol. 29, Pp. 620-629, 2009.
- [38] D. Karmakar, S. Ray-Chaudhuri Y M. Shinozuka, Seismic Response Evaluation Of Retrofitted Vincent Thomas Bridge Under Spatially Variable Ground Motions, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, Vol. 42, Pp. 119-127, 2012.
- [39] M. Rassem, A. Ghobarah Y A. C. Heidebrecht, Site Effects On The Seismic Response, *Engineering Structures*, Vol. 18, Nº 5, Pp. 363-370, 1996.
- [40] A. A. Dumanoglu Y R. T. Severn, Stochastic Response Of Suspension Bridges To Earthquake Forces, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 19, P. 133–152, 1990.
- [41] S. Adanur, K. Soyluk, A. A. Dumanoğlu Y A. Bayraktar, Asynchronous And Antisynchronous Effects Of Ground Motion On The Stochastic Response Of Suspension Bridges, *Springer Proceedings In Physics*, Vol. 111, Pp. 1-6, 2007.
- [42] A. A. Dumanoglu Y R. T. Severn, Seismic Response Of Modern Suspension Bridges To Asynchronous Longitudinal And Lateral Ground Motion, *Structural Engineering Group*, Vol. 87, Pp. 73-86, 1989.
- [43] K. Soyluk Y E. A. Sicacik, Soil–Structure Interaction Analysis Of Cable-Stayed Bridges For Spatially Varying Ground Motion Components, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, Vol. 35, Pp. 80-90, 2012.
- [44] C. Casado, Grupo De Mecánica Computacional, [En Línea]. Available: Http://Www.Mecanica.Upm.Es/~Alfredo/Asincrono_1.Avi. [Último Acceso: 10 Octubre 2012].

- [45] M. Virlogeux, Recent Evolution Of Cable-Stayed Bridges, *Engineering Structures*, Vol. 21, P. 737–755, 1999.
- [46] C. Karakostas, A. Sextos, V. Lekidis Y S. Papadopoulos, Investigation Of The Dynamic Response Of The Evripos Cable-Stayed Bridge In Greece, Under Asynchronous Ground Motion Records, De *3rd Eccomas Thematic Conference On Computational Methods In Structural Dynamics And Earthquake Engineering*, Corfu, 2011.
- [47] A. D. K. Soyluka, Spatial Variability Effects Of Ground Motions On Cable-Stayed Bridges, *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, Vol. 24, Pp. 241-250, 2004.
- [48] C. E. D. N. (Cen), Eurocódigo 8: Design Of Structures For Earthquake Resistance. Part 2: Bridges, Aenor, 2012.
- [49] M. D. F. (. D. España), Norma De Construcción Sismorresistente: Puentes (Ncsp-07), España: Centro De Publicaciones Secretaria General Técnica, 2007.
- [50] N. Y. C. D. O. T. (Nycdot), Seismic Criteria Guidelines, New York, 1998.