



Compendio de metodologías sobre efectos sísmicos para diseño de puentes atirantados, colgantes y en arco

Compendium of methodologies about seismic effects for the design of cable-stayed, suspension and arch bridges

JAIME W. BLAS ¹, RODRIGO A. SALAZAR ¹, FRANKLIN E. VEGA ¹ y ANTONIO E. VELÁSQUEZ ²

RESUMEN

Este compendio presenta una serie de metodologías pertinentes a investigaciones relacionadas a la evaluación de los efectos sísmicos en diversos tipos de puentes en base a sus propiedades mecánicas, configuraciones estructurales y distribuciones geométricas. El objetivo fue analizar las metodologías sobre efectos sísmicos en puentes a partir de las investigaciones seleccionadas y determinar las diferencias entre ellas. Se exponen y discuten detalles sobre el comportamiento sísmico de tipos de puente específicos incluyendo puentes en arco, atirantados y colgantes mediante metodologías específicas. Además, se revisan y comparan los resultados de estudios relevantes en el campo de la ingeniería sísmica de puentes. Se concluye que estos estudios recientes cubren diversos aspectos avanzados, desde la evaluación de vulnerabilidad sísmica hasta la aplicación de metodologías histeréticas en puentes atirantados, y recientes criterios de evaluación como las curvas de fragilidad y las mejoras de métodos de diseño para puentes colgantes, además de determinarse cuatro principales metodologías utilizadas en el análisis de los efectos sísmicos en puentes. En conjunto, estas investigaciones contribuyen al conocimiento y la práctica de la ingeniería estructural y sísmica en puentes, ofreciendo información valiosa para fortalecer la seguridad de estas estructuras en regiones propensas a terremotos.

¹Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú

²Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Aporte Santiaguino de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite: **Compartir-copiar** y **redistribuir** el material en cualquier medio o formato, **Adaptar-remezclar**, **transformar** y **construir** a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

Palabras clave: puentes; arco; atirantados; colgantes; sismos.

ABSTRACT

This compendium presents a series of methodologies relevant to investigations related to the evaluation of seismic effects in various types of bridges based on their mechanical properties, structural configurations and geometric distributions. The objective was to analyze the methodologies on seismic effects in bridges from the selected investigations. Details on the seismic behavior of specific bridge types including arch, cable-stayed and suspension bridges are presented and discussed using specific methodologies. In addition, the results of relevant studies in the field of earthquake engineering of bridges are reviewed and compared. It is concluded that these recent studies cover several advanced aspects, from seismic vulnerability assessment to the application of hysteretic methodologies in cable-stayed bridges, and new evaluation criteria such as fragility curves and improvements of design methods for suspension bridges, in addition to determining four main methodologies used in the analysis of seismic effects in bridges. Taken together, this research elements contribute to the knowledge and practice of structural and seismic engineering in bridges, providing valuable information to strengthen the safety of these structures in earthquake-prone regions.

Keywords: bridges; arch; cable-stayed; suspension; earthquake.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se evalúan y discuten las metodologías más prevalentes identificadas en la evaluación y análisis de efectos sísmicos en puentes en arco, colgantes y atirantados, tanto a nivel nacional como internacional. El objetivo general contempló analizar metodologías de efectos sísmicos para el diseño de puentes de tipo atirantado, colgante y en arco, mientras que, entre los objetivos específicos, se consideró analizar metodologías de efectos sísmicos a nivel nacional, a nivel internacional para el diseño de puentes de tipo atirantado, colgante y en arco y finalmente, determinar las diferencias entre metodologías sobre efectos sísmicos a nivel nacional e internacional para dicho diseño. Estas metodologías se basan en diferentes parámetros, como la linealidad o no-linealidad de las deformaciones consideradas o el tipo de análisis dinámico

para resolver las ecuaciones diferenciales del movimiento de puentes de estos tipos (Weng & Fuxing, 2023). Mediante la utilización de análisis y procedimientos de sintetización, se evalúan y discuten las piezas de información extraídas de las tesis y revistas académicas consideradas y de esta manera obtener las propiedades de las metodologías consideradas y develar las diferencias existentes entre cada uno. Las metodologías parten del hecho básico de que los terremotos son fenómenos naturales que provocan vibraciones en la Tierra (Bin et al., 2022).

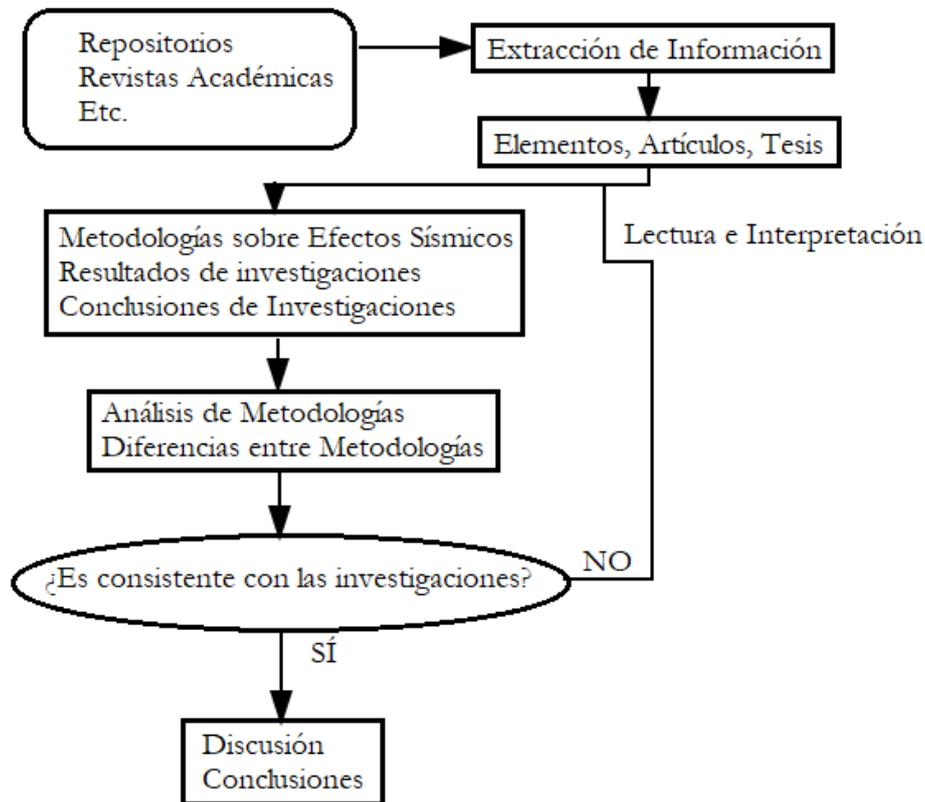
Las ondas sísmicas pueden afectar áreas lejanas en minutos (Yong et al., 2022). El comportamiento sísmico de los puentes varía según su diseño (Chenchen et al., 2023). Puentes bien equilibrados y diseñados son más fáciles de proteger contra terremotos (Yong et al., 2022), pero estructuras no estándares pueden ser más vulnerables y pueden necesitar análisis detallados (Cheng-Qi et al., 2022). Por ejemplo, el Puente de la Bahía de San Francisco-Oakland sufrió daños en el terremoto de Loma Prieta en 1989 (Chen & Duan, 2014). Puentes colgantes y atirantados con grandes vanos también pueden sufrir daños. El puente Higashi-Kobe tuvo un cable roto en el terremoto de Kobe en 1995 (Chen & Duan, 2014). De esta manera, cada metodología busca determinar la respuesta del puente ante cualquier evento sísmico y sentar las bases del posterior diseño a realizarse.

MATERIALES Y MÉTODOS

El enfoque de esta investigación en particular es cualitativo y de tipo explicativo, pues el objetivo es el análisis de las metodologías consideradas para los ámbitos a nivel nacional e internacional, además de la correspondiente determinación de las diferencias. Las técnicas e instrumentación incluyen el análisis y sintetización de información, generación de diagramas y gráficos de explicación de metodologías, determinación de diferencias y evaluación de similitudes y diferencias entre metodologías; también se incluye documentación técnica, artículos de revistas internacionales y tesis pertinentes para el tema de investigación, debidamente verificadas por su validez. La muestra estuvo compuesta por ocho investigaciones, tres a nivel nacional y cinco a nivel internacional, mientras que la población estuvo conformada por el cuerpo de investigaciones referentes a metodologías sobre evaluación o determinación de efectos sísmicos en puentes atirantados, colgantes o de tipo en arco. Las metodologías determinadas se compararon y se determinaron las diferencias existentes. Se emplearon tablas, diagramas y evaluaciones, surgidas en base al flujo de generación de conclusiones y recomendaciones tal como indica la Figura 1.

Figura 1

Flujograma considerado para la determinación de diferencias y discusión de metodologías sobre efectos sísmicos en puentes



Nota. Las fuentes incluyen solo trabajos aprobados y autorizados para su publicación.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Los efectos sísmicos en puentes son considerados mediante cuatro tipos de análisis basados en las teorías mecánico-elásticas, elasto-plásticas y físico-dinámicas existentes. Estos tipos son el análisis estático lineal, el análisis estático no-lineal/*pushover* (empuje lateral), el análisis dinámico modal-espectral y el análisis dinámico de tiempo-historia no-lineal. El análisis a nivel nacional está usualmente basado en criterios modales y sobre todo estáticos no-lineales, los cuales emplean los conceptos de espectros de capacidad y espectros de demanda (Tacas & Olarte, 2018).

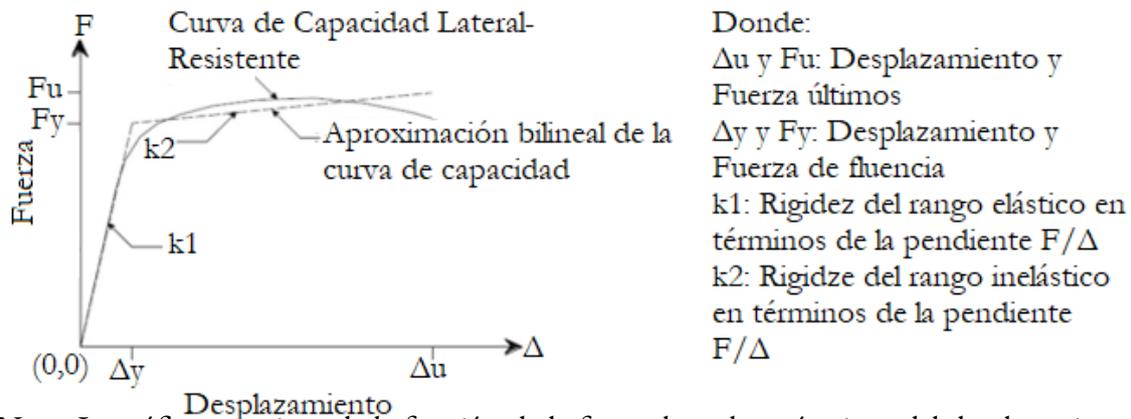
Capacidad Lateral - Resistente

Para este concepto se debe emplear el análisis estático no-lineal/*pushover* (empuje lateral), es decir se somete a cargas laterales crecientes monótonamente, lo que se trata de hacer es construir

una curva de capacidad lateral - resistente de la estructura, en función al desplazamiento lateral, teniendo en cuenta las características inelásticas esfuerzo - deformación (Tacas & Olarte, 2018). Estos conceptos se exponen en la Figura 2, donde se muestra un diagrama de fuerza lateral en función del desplazamiento, lo cual corresponde a una curva de capacidad lateral-resistente.

Figura 2

Fuerza lateral en función del desplazamiento para la gráfica de la curva de capacidad lateral-resistente



Nota. La gráfica cartesiana de la función de la fuerza lateral en términos del desplazamiento es denominado como la curva de capacidad. Adaptado de Vulnerabilidad Sísmica del Puente Primavera (p.37) por Tacas & Olarte (2018), Universidad Nacional de Ingeniería.

Espectro de Capacidad y Espectro de Demanda

Un espectro de capacidad es la representación de la curva de capacidad, como la mostrada en la figura 2, modificada por términos relacionados a las aceleraciones por sismo, da lugar a un espectro de capacidad, el cuál es una representación que toma en cuenta los efectos sísmicos (Tacas & Olarte, 2018). La conversión se realiza con los factores de las ecuaciones (1) y (2) (Tacas & Olarte, 2018):

$$S_a = \frac{V}{M_T \alpha} \quad (1)$$

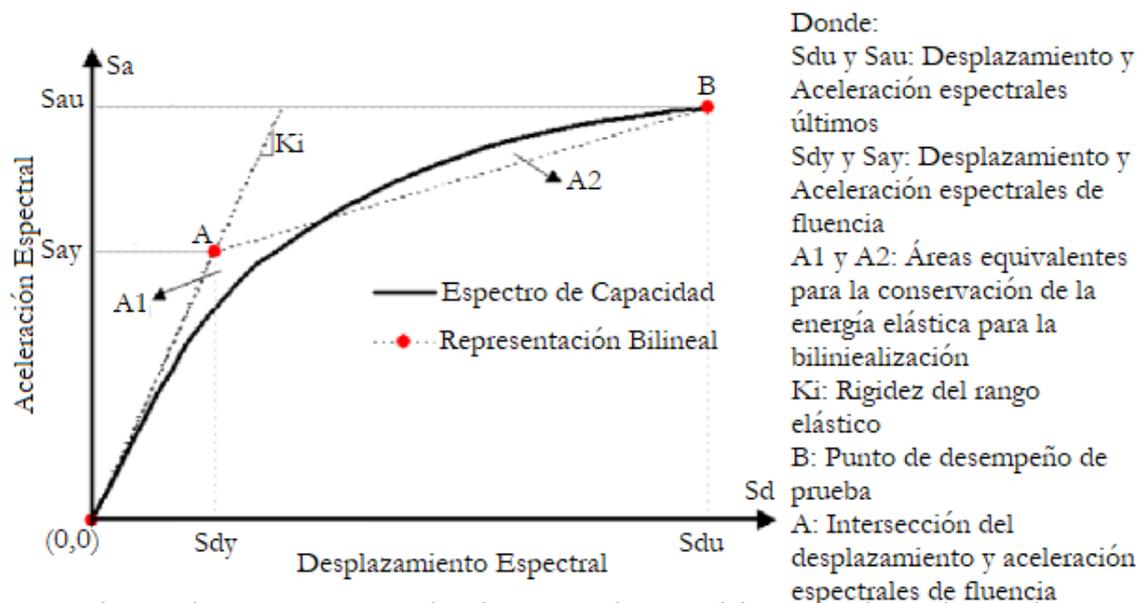
$$S_d = \frac{\Delta_{TABLERO}}{\gamma_m} \quad (2)$$

Donde S_a es el Espectro de aceleración lateral del puente, S_d es el Espectro de desplazamiento del componente a analizar del puente, V es la Fuerza cortante lateral, $\Delta_{TABLERO}$ es el Desplazamiento del tablero (o de otro componente a analizar dependiendo del caso), $M_T \alpha$ es la Masa del

puente multiplicada por el coeficiente de participación modal del modo fundamental y γ_m es el Factor de participación modal, De esta manera, se obtiene el espectro de capacidad del puente tal como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Espectro de capacidad de un puente



Nota. El procedimiento inicia con la selección preliminar del punto B basándose en la norma ATC-96 para la primera iteración. Adaptado de "Vulnerabilidad Sísmica del Puente Primavera" (p. 73) por Tacas & Olarte (2018), Universidad Nacional de Ingeniería.

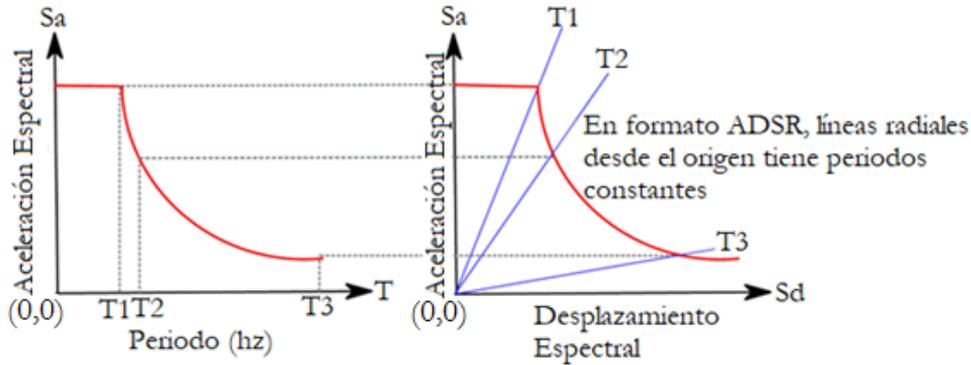
La forma de obtener este espectro de demanda en general es similar a la expuesta en la norma para edificaciones E.030 y la forma del espectro de la Figura 4 evidencia esta similitud.

Estimación de Desempeño

El desempeño sísmico depende de la intersección de las gráficas del espectro de capacidad modelado de manera bilineal y el espectro de demanda (Gamarrá & Mamani, 2022). El procedimiento básico consiste en clasificar las áreas debajo de la curva de capacidad en niveles de servicio tal como en la Figura 6 y en base a ello, generar la intersección de los espectros para determinar el punto de desempeño, el cual es la intersección entre un modelo bilineal del espectro capacidad, determinado como en la Figura 5, y el espectro de demanda, obteniéndose un cruce como el de la Figura 7 (Zambrano & Mosqueira, 2023).

Figura 4

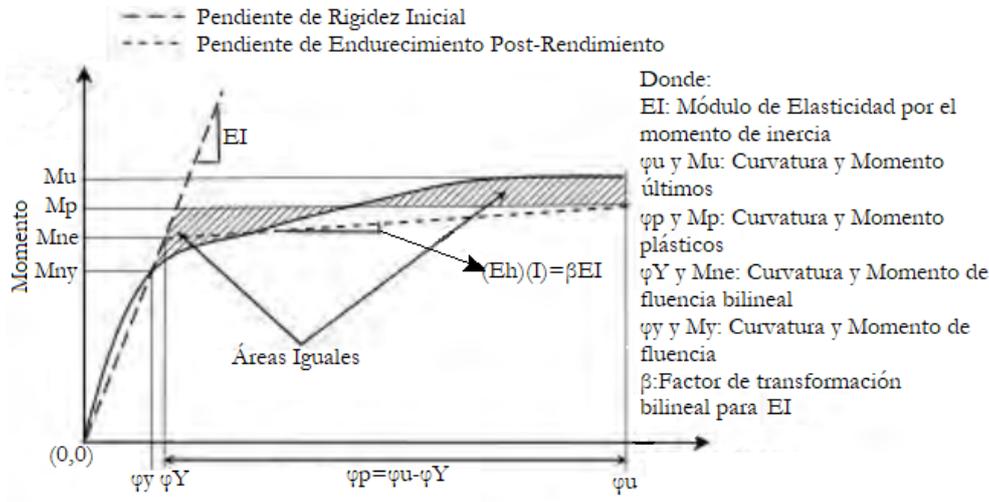
Espectros de demanda contruidos a partir de espectros elásticos



Nota. A la izquierda se muestra el espectro de demanda elástico (obtenido de manera similar a lo expuesto en la norma E.030) y a la derecha el espectro de demanda propiamente dicho. ADSR es un término en inglés que significa Espectro de Respuesta de Desplazamiento-Aceleración. Los periodos T1, T2 y T3 corresponden a periodos de muestra. Adaptado de Vulnerabilidad Sísmica del Puente Primavera (p.71) por [Tacas & Olarte \(2018\)](#), Universidad Nacional de Ingeniería.

Figura 5

Criterio Bilineal para diagramas de momento curvatura, aplicable a espectros de capacidad



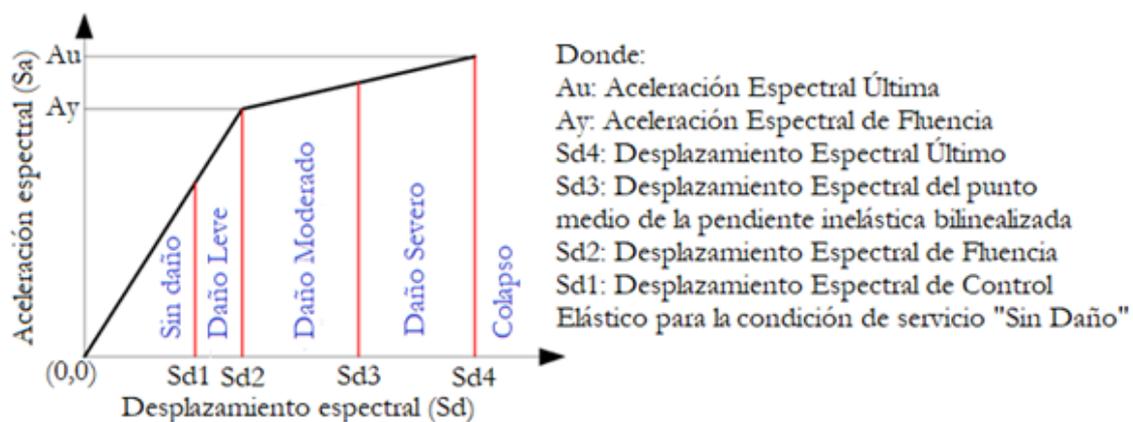
Nota. La gráfica está basada en la normativa PEEERC-2007, en este caso se aplica a un diagrama de momento-curvatura, sin embargo, la manera de aplicación a un diagrama de capacidad lateral de fuerza-deformación es idéntica. Adaptado de Comparación del desempeño sísmico del puente Quilca sin sistemas de protección sísmica y aplicando sistemas de aislamiento y disipación de energía (p. 10) por [Huerta, C., & Asmat \(2022\)](#), Pontificia Universidad Católica del Perú.

Dependiendo de dónde se ubique el punto de desempeño, se podrá definir el nivel de servicio

del puente (sin daños, daño leve, daño moderado, etc.). Los criterios de clasificación dependen de la norma utilizada y el nivel de servicio objetivo dependerá de la importancia del puente. Las metodologías internacionales sobre efectos sísmicos para el diseño de puentes poseen dos componentes fundamentales, el método de modelamiento y el tipo de análisis estructurales. El método de modelamiento está estandarizado en base a elementos finitos, el cual es el método más popular y preferido por las investigaciones. El tipo de análisis estructural más común, sin embargo, es el análisis modal espectral, aunque se pueden definir tres tipos importantes de análisis adicionales, el análisis estático, el análisis estático no-lineal y el análisis tiempo-historia no-lineal.

Figura 6

Clasificación bajo la curva del espectro de capacidad

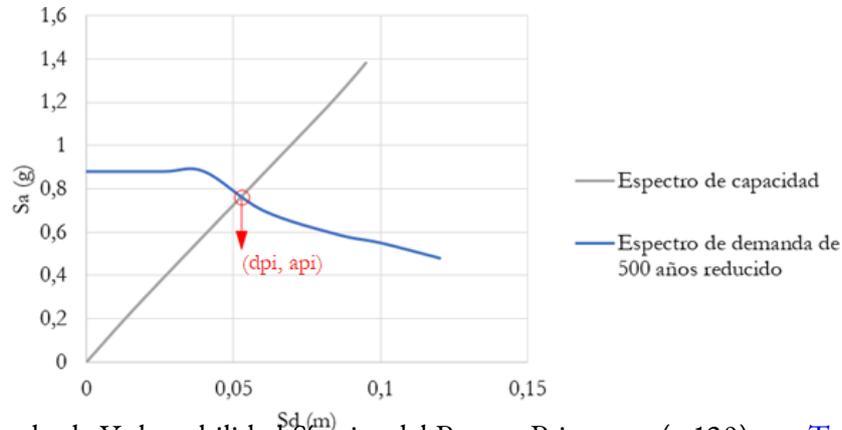


Nota. El espectro de capacidad en este caso nace de una bilinealización previa. Adaptado de Vulnerabilidad Sísmica del Puente Primavera (p.79) por [Tacas & Olarte \(2018\)](#), Universidad Nacional de Ingeniería.

Las metodologías internacionales sobre efectos sísmicos para el diseño de puentes poseen dos componentes fundamentales, el método de modelamiento y el tipo de análisis estructurales. El método de modelamiento está estandarizado en base a elementos finitos, el cual es el método más popular y preferido por las investigaciones. El tipo de análisis estructural más común, sin embargo, es el análisis modal espectral.

Figura 7

Punto de desempeño a nivel de primera iteración para un espectro de demanda de 500 años reducido



Nota. Adaptado de Vulnerabilidad Sismica del Puente Primavera (p.120) por Tacas & Olarte (2018), Universidad Nacional de Ingeniería.

Análisis Estático Lineal

Este análisis considera únicamente cargas vivas y muertas en los puentes para poder determinar sus correspondientes respuestas estáticas lineales (Chen & Duan, 2014). Este análisis es fundamental a pesar de no tomar en cuenta efectos sísmicos de por sí, debido a que, en realidad, este análisis es usualmente equivalente a la primera iteración de un análisis tiempo-historia y por ello es bastante útil para definir las condiciones iniciales de los puentes (Chen & Duan, 2014).

Análisis Estático No-Lineal/*Pushover* (Empuje lateral)

Este análisis es equivalente al análisis realizado para la curva de capacidad lateral-resistente en la figura 2, teniéndose una fuerza expresada en función del desplazamiento o también se puede expresar como un momento en función de una curvatura (Perea et al., 2017), además de ser la base para la generación de espectros de capacidad, mediante las expresiones de la Figura 3.

Análisis Tiempo-Historia No-Lineal

Este análisis está basado en métodos numéricos para obtener la solución de las correspondientes ecuaciones diferenciales para el movimiento del puente (Chen & Duan, 2014). Es el análisis más ventajoso puesto que puede tomar en cuenta variaciones de las propiedades estructurales de los puentes en el tiempo tal como muestra la figura 8 (Chen & Duan, 2014). Sin embargo, también es el análisis más costoso computacionalmente.

Análisis Modal Espectral

Este análisis está basado en la ecuación diferencial del movimiento del puente (Chen & Duan, 2014) y la matemática se expresa mediante las ecuaciones 3 (ecuación del movimiento vibratorio de un puente), 4 (ecuación (3) multiplicada por la matriz modal transpuesta), 5 (Ecuación para el modo n), 6 (ecuación (5) multiplicada por la inversa de la matriz de masa modal M_n^*), 7 (Solución para el modo n) y 8 (Respuesta total del sistema). Las ecuaciones (9) y (10) muestran componentes en función de la matriz de modos de vibración y que son representativas para características importantes del sistema vibratorio (Chen & Duan, 2014). El desplazamiento se expresa primero en términos de los modos de vibración naturales, luego se le multiplica por la matriz modal natural transformada (Chen & Duan, 2014). El objetivo es expresar la ecuación diferencial de cada modo como una ecuación de un solo grado de libertad. El desplazamiento total se obtiene por combinación de la respuesta de todos los modos de vibración.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{B\}\ddot{u}_g \quad (3)$$

$$[M^*]\{\ddot{Y}\} + [C^*]\{\dot{Y}\} + [K^*]\{Y\} = -[\Phi]^T\{M\}\{B\}\ddot{u}_g \quad (4)$$

$$M_n^*\ddot{Y}_n + 2\xi_n\omega_n M_n^*\dot{Y}_n + \omega_n^2 M_n^*Y_n = L_n\ddot{u}_g \quad (5)$$

$$\ddot{Y}_n + 2\xi_n\omega_n\dot{Y}_n + \omega_n^2 Y_n = \left(\frac{L_n}{M_n^*}\right)\ddot{u}_g \quad (6)$$

$$u_n(t) = \phi_n Y_n(t) \quad (7)$$

$$u(t) = \sum \phi_n Y_n(t) \quad (8)$$

$$M_n^* = \{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\} \quad (9)$$

$$L_n = -\{\phi_n\}^T [M] [B] \quad (10)$$

Donde: M : Matriz de masas de cada coordenada global, C : Matriz de amortiguamientos de cada coordenada global, K : Matriz de rigideces de cada coordenada global, u : Vector de desplazamientos de cada coordenada global en función del tiempo, \dot{u} : Vector de velocidades de cada coordenada global en función del tiempo, \ddot{u} : Vector de aceleraciones de cada coordenada global

en función del tiempo, \ddot{u}_g : Vector de aceleración del suelo en función del tiempo, B : Matriz de modificación de masa en función del sismo, M^* , C^* y K^* : Matrices M , C y K multiplicadas por la traspuesta de la matriz modal respectivamente; ϕ : Matriz de modos de vibración o modal, Y : Vector u multiplicado por la traspuesta de la matriz modal, M^*n : Subelemento $n \times n$ de la matriz M^* L_n : Factor de participación modal del modo n , Y_n : Desplazamiento en función del tiempo del modo n .

Método de Curvas de Fragilidad

Este método fue desarrollado con el fin de mostrar cómo el concepto de curva de fragilidad puede ser útil al momento de evaluar la serviciabilidad de un puente (Xiangong et al. ,2022), tal como en la Figura 9. Para las curvas de fragilidad, se selecciona primero un número apropiado de registros de aceleración del suelo para determinar el parámetro de intensidad de movimiento del suelo (IM) (Xiangong et al. ,2022). Se realiza un análisis tiempo-historia no-lineal del modelo dinámico del puente para obtener la respuesta sísmica de la estructura (Xiangong et al. ,2022). Se realiza en base del cálculo de los parámetros μ y σ tal como se muestra en las ecuaciones (11) y (12). Luego, se utilizan para definir las probabilidades correspondientes en la ecuación (13).

$$\mu = a[\ln(S_a)]^2 + b\ln(S_a) + c \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\ln(D_i) - \mu]^2}{N - 2}} \quad (12)$$

$$P_f = P\left[\frac{S_d}{S_c} \geq 1\right] = 1 - \Phi\left[\frac{\ln(1) - \mu}{\sigma}\right] = \Phi\left[\frac{\mu}{\sigma}\right] \quad (13)$$

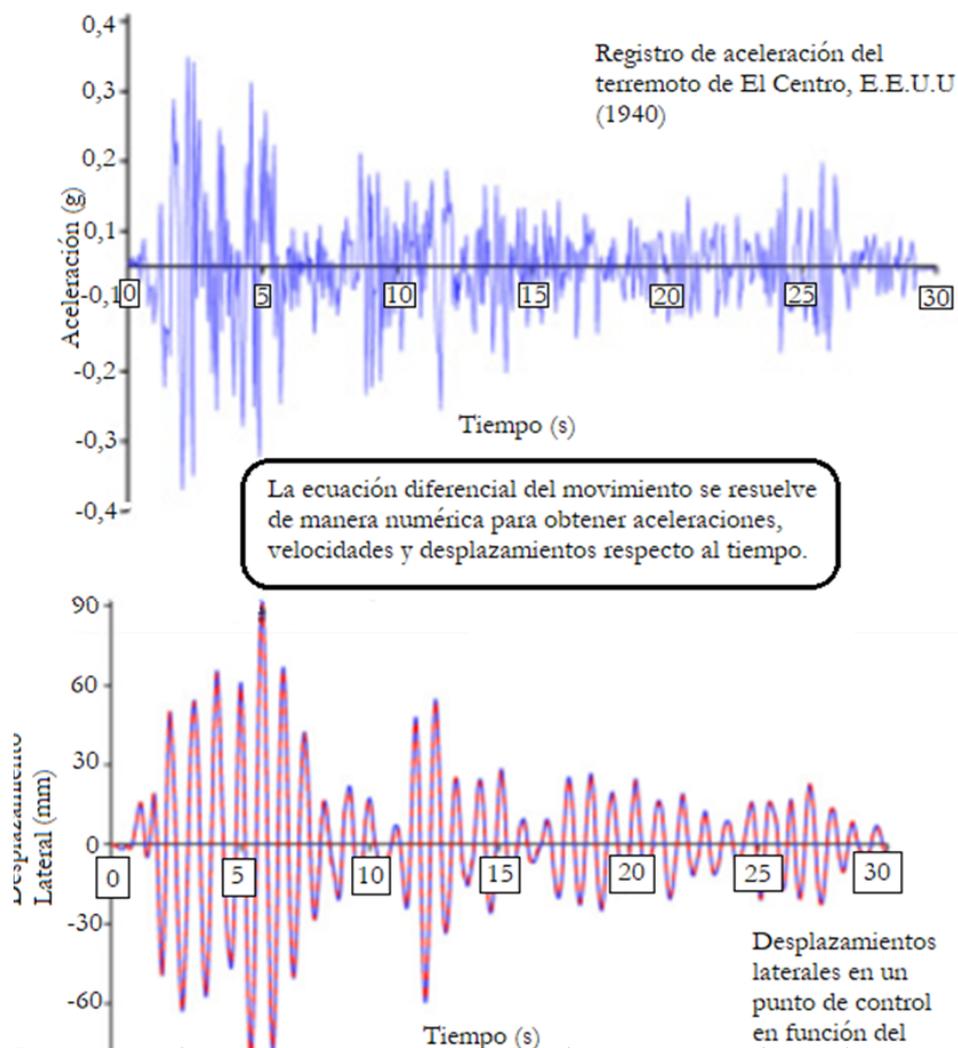
Donde: μ : Promedio de Regresión, σ : Desviación estándar, S_a : Aceleración espectral, D_i : Desplazamiento pico de demanda para el terremoto i , N : Número de registros de aceleración, S_c : Capacidad estructural, S_d : Capacidad de demanda, a , b y c : Coeficientes de Regresión, Φ : Función estadística phi para μ y σ , P_f : Probabilidad de excedencia para S_d sobre S_c

Los resultados numéricos de cada estudio se muestran en las tablas correspondientes para cada tipo de investigación y puente en la tabla 1 para las nacionales y la Tabla 1 para las internacionales, mientras que en la Tabla 3 se exponen resultados numéricos sobre las coordenadas de los puntos de desempeño para distintos periodos de retorno A nivel nacional, los estudios se centran principalmente en el análisis estático no-lineal *push over*, incorporando un análisis modal

para abordar los efectos sísmicos. La investigación de [Gamarra & Mamani \(2022\)](#) destaca de manera similar que las investigaciones a nivel internacional al ser la primera a nivel nacional que aplica un análisis modal (espectral) exhaustivo y un análisis tiempo - historia no - lineal. Por otro lado, los modelos bilineales en estas investigaciones seleccionadas revelan que un desplazamiento espectral entre 0,02 y 0,06 es indicativo del inicio de un estado de "daño leve" para periodos de retorno comunes.

Figura 8

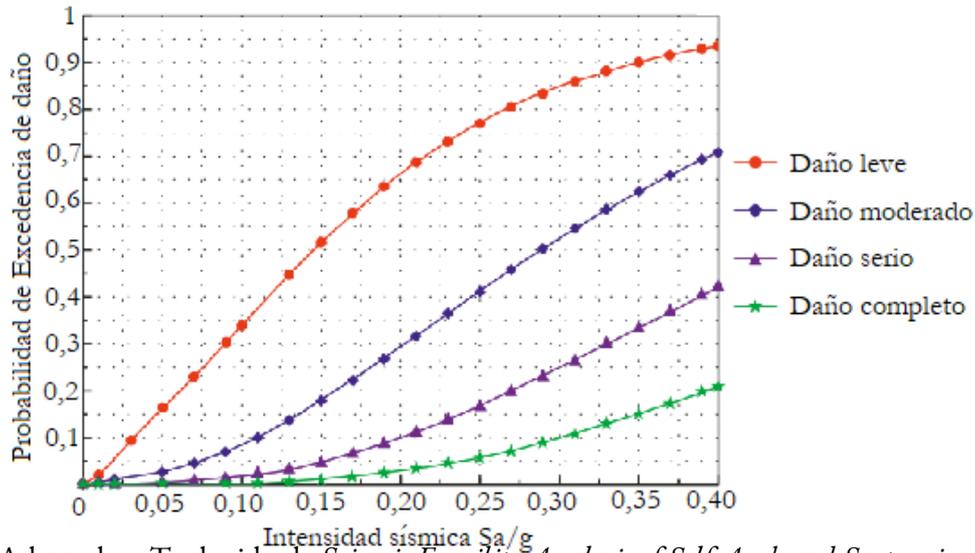
Base matemática del análisis tiempo-historia no-lineal



Nota. Las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez en este método pueden estar expresados en función del tiempo, no limitándose a matrices constantes en el tiempo. Adaptado y Traducido de *Bridge Engineering Handbook - Seismic*, por [Chen & Duan \(2014\)](#), CRC PRESS.

Figura 9

Método de curvas de fragilidad



Nota. Adaptado y Traducido de *Seismic Fragility Analysis of Self-Anchored Suspension Bridge Considering Damping Effect* (p.6) por Zhou et al. (2022), Advances in Civil Engineering.

Tabla 1

Metodologías nacionales y principales avances basados en los estudios referenciados

| | Estudio 1 | | Estudio 2 | | Estudio 3 | |
|-----------------------|---|-------|---|------------------------|---|-------|
| Autores | Tacas y Olarte (2018) | | Gamarra y Mamani (2022) | | Chávez et al. (2022) | |
| Modelamiento | Idealizado con Software | | Elementos Finitos | | Idealizado con Software | |
| Análisis Considerados | Estático Lineal/ <i>Pushover</i> Modal-Espectral | No- y | Estático Modal-Espectral Tiempo-Historia | No-Lineal, y No-Lineal | Estático Lineal/ <i>Pushover</i> Modal-Espectral | No- y |
| Principal Avance | Criterio propio y nacional para clasificación bajo el espectro de capacidad | | Aplicación nacional de metodologías avanzadas internacionales | | Demostración de criterios de clasificación para establecer el estado de vulnerabilidad de un puente | |

Tabla 2

Metodologías internacionales y principales avances basados en los estudios referenciados

| | Estudio 1 | Estudio 2 | Estudio 3 | Estudio 4 | Estudio 5 |
|------------------|---|---|---|---|--|
| Autores | Zite et al. (2023) | Zhou et al. (2022) | Chenchen et al. (2023) | Chen y Duan (2014) | Campos y Martínez (2020) |
| Modelamiento | Elementos Finitos | Elementos Finitos | Elementos Finitos e Idealización | Elementos Finitos | Elementos Finitos |
| Tipo de puente | En Arco Colgante | Colgante | Atirantados y Colgantes | Atirantado | |
| Análisis | M-E | M-E | M-E | Estático Lineal, Estático T-H NL | M-E, Estático NL |
| Considerados | | | | | |
| Principal Avance | Demostración de acoplamiento de vibraciones en puente en arco con nuevo criterio gráfico de representación de fuerzas | Desarrollo del criterio de curvas de fragilidad para el diseño de puentes colgantes | Modelamiento de parámetros asimétricos para la determinación de modos de vibración en puentes colgantes | Criterios sísmicos analíticos de diseño y análisis en puentes colgantes y atirantados | Demostración de ventajas de distribución en abanico sobre distribución en arpa para un puente atirantado |

Nota. M-E: Modal- Espectral; NL: No-lineal; T-H: Tiempo-Historia

A nivel internacional, el estudio de [Zite et al. \(2022\)](#) construye un nuevo criterio de representación tridimensional de fuerzas internas en distintos puntos del arco, obteniéndose un valor máximo de hasta 6MN para una consideración triaxial sísmica en base a registros de aceleración del terremoto del centro, notándose cómo el desarrollo de este tipo de modelos con elementos finitos puede dar lugar a resultados precisos e importantes para puentes en arco. La investigación de [Zhou et al. \(2022\)](#) propone el uso de curvas de fragilidad en vez de espectros de capacidad para medir la serviciabilidad de un puente, considerando la variación de la probabilidad de superar cuatro tipos de daño en base a aceleraciones de entre 0,00 y 0,50. De este estudio, se puede destacar la demostración de la gran sensibilidad que tienen los estribos y la cuerda principal de un puente colgante mediante el criterio de las curvas de fragilidad, pues existen probabilidad considerables de hasta 10 % de tener daños leves solo con un incremento de 0,10 en la aceleración espectral.

El estudio de [Chenchen et al. \(2023\)](#) demuestra cómo el efecto de los tensores en los extremos de las torres que cumplen una función de anclaje se evidencia en el aumento de la estabilidad de solo el cable principal y las torres del puente colgante analizado. Si bien existe este incremento de estabilidad, en especial para ángulos de tensores de anclaje con valores de seno menores a 0,40, también es evidente que dichos ángulos no tienen un efecto medible en la estabilidad del tablero. La investigación de [Campos y Martínez \(2020\)](#) logró evidenciar que una distribución en abanico con doble pila para un puente atirantado de 420m de longitud de luz es el más ventajoso en términos de estabilidad y resistencia a solicitaciones que someten al puente a rangos inelásticos, llegándose a incluso un desplazamiento espectral de 1,6 en el eje X y de 0,95 en el eje Y al momento del colapso.

Tabla 3

Resumen de resultados a nivel nacional para puntos de desempeño

| | Estudio 1 | | | Estudio 2 | | | Estudio 3 | | |
|---|---|---------|---------|---|--------|--------|---|-------|-------|
| Autores | Tacas y Olarte (2018) | | | Zambrano y Mosqueira (2022) | | | Chávez et al. (2022) | | |
| Tipo de puente | Arco | | | Arco | | | Arco | | |
| Periodo de Retorno (años) | 500 | 1000 | 1500 | 500 | 1000 | 2500 | 475 | 1000 | 2475 |
| X punto de desempeño (Sd en m) | 0,04868 | 0,06071 | 0,07066 | 0,078 | 0,0847 | 0,1064 | 0,067 | 0,097 | 0,136 |
| Y punto de desempeño (Sa, por 9.806 cm/s ²) | 0,754 | 0,90429 | 1,02839 | 0,76 | 0,793 | 0,845 | 0,271 | 0,296 | 0,295 |
| Observación | Existe una menor capacidad de aceleración espectral que el estudio de Zambrano y Mosqueira (2022) para el periodo de retorno de 500 años, pero se tiene una mayor capacidad para el de 1500 en comparación con dicho estudio. | | | Se observa que el puente no entra a un estado de fluencia hasta los 2500 años de periodo de retorno | | | Se observa fluencia en el puente, además, se evidencia un aumento incrementado del desplazamiento espectral para cada periodo de retorno. | | |

Nota. Sd denota el desplazamiento espectral y Sa denota la aceleración espectral en la gráfica del espectro de capacidad.

El rango observado puede ser indicativo de alguna propiedad común que tengan los puentes en el Perú, lo cual puede ser útil para la elaboración técnica de normas adaptadas a la realidad

nacional. Además, el aporte del estudio de [Tacas & Olarte \(2018\)](#) con un nuevo criterio nacional de clasificación bajo el espectro de capacidad se presenta como un aporte significativo, al mismo tiempo que se muestra la tendencia del inicio del estado de daño leve a partir de un desplazamiento espectral de 0,02. Por otro lado, el estudio de [Chávez et al. \(2022\)](#) realiza un aporte importante al demostrar la aplicación completa del análisis estático no-lineal con un análisis modal para considerar efectos sísmicos al tomar en cuenta múltiples propiedades que son relevantes y comunes en el análisis a nivel nacional. Si bien los estudios de [Chávez et al. \(2022\)](#) y [Tacas & Olarte \(2018\)](#) no consideran *análisis tiempo historia no-lineal como el estudio de [Gamarra y Mamani \(2022\)](#), sí obtienen resultados evidentes, como espectros de desplazamiento de entre 0,04 y 0,011 y espectros de aceleración de entre 0,75 y 1,03.

El estudio de [Chen & Duan \(2014\)](#) evidencia la precisión que otorga el incrementar la complejidad de un análisis, mediante en este caso el uso de un análisis histerético para un elemento de acoplamiento por corte en un puente atirantado. El elemento de acoplamiento de corte muestra unos esfuerzos de corte máximos de hasta 551MPa, lo cual está debajo del esfuerzo admisible de estos tipos de aceros, incluyéndose 720MPa y otros valores.

Existen así, unas diferencias notables entre las metodologías usadas, tanto a nivel nacional como internacional. Las metodologías internacionales se caracterizan por considerar mucho más los análisis estáticos no-lineales con análisis modales para considerar efectos sísmicos, ocurriendo introducciones del análisis tiempo-historia no-lineal únicamente desde el estudio de [Gamarra & Mamani \(2022\)](#). Las principales diferencias ocurren al momento de determinar qué elemento analizar, debido a la alta especialización de estas investigaciones. Además, se consideran análisis más complejos como el análisis histerético del estudio de [Chen & Duan \(2014\)](#) o análisis más novedosos y criterios estadísticos como el análisis por curvas de fragilidad del estudio de [Zhou et al. \(2022\)](#), lo cual en algunos casos puede limitar la generalidad de aplicación de las metodologías.

CONCLUSIONES

Se analizaron metodologías de efectos sísmicos a nivel nacional para el diseño de puentes, evidenciando una gran preferencia por el método de análisis estático no-lineal modificado a partir de un análisis modal para tomar en cuenta efectos sísmicos. Se obtuvo que, mediante estos métodos, se detectaron espectros de desplazamiento de entre 0,04 y 0,011 y espectros de aceleración de entre 0,75 y 1,03 para puentes en arco, mientras que se evidenció el inicio del uso del análisis tiempo-historia no-lineal, además de proponerse un criterio nuevo de clasificación bajo el

espectro de capacidad de un puente.

Se analizaron metodologías de efectos sísmicos a nivel internacional para el diseño de puentes, evidenciando una preferencia por metodologías más complejas y altamente especializadas a temas específicos. La preferencia por los modelos con elementos finitos y los análisis tiempo-historia no-lineal y modal-espectral es clara en base a resultados como esfuerzos de 551MPa a partir de análisis histeréticos, desplazamientos espectrales de hasta 1,6 en puentes atirantados, fuerzas internas de hasta 6MN en puentes en arco e incrementos de probabilidades de excedencia de daños de hasta el 10 % para incrementos de aceleraciones espectrales de 0,10. Se determinaron diferencias entre las metodologías, como el caso de la relación entre la complejidad de la metodología y el nivel de aplicación, siendo las internacionales más complejas que las nacionales. En términos de generalidad, se observó que las investigaciones nacionales son más generales que las internacionales, lo cual les da un mayor ámbito de aplicación, pues solo se utilizan análisis estáticos no-lineales con análisis modales para implementar efectos sísmicos, mientras que las investigaciones internacionales incrementan la complejidad mediante la adición de análisis histeréticos o análisis estadísticos como en el análisis mediante curvas de fragilidad, además de la consideración de espectros de capacidad extendidos (más allá del colapso de la primera plasticidad).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bin, Y.; Hexin, F.; Rui, G.; Gaoxiang, Z., & Haoran, X. (2022). Seismic response law of suspension bridge-track system of high-speed railway. *Advances in Mechanical Engineering*, 14(7). <https://doi.org/10.1177/16878132221112494>
- Campos, A., & Martínez, A. (2020). Estudio del comportamiento a sollicitaciones sísmicas en puentes atirantados [Maestría, Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/handle/11441/100769>
- Chávez, W. Maluquish, R., & Pezo, P. (2022). Vulnerabilidad estructural del puente Huaura ante sollicitaciones sísmicas, ubicado en el distrito de Huaura ? Lima. [Universidad Nacional de Barranca]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNAB_5c68e288aa01b4dd41a72f727aa1535c
- Chen, W. F., & Duan, L. (2014). *Bridge Engineering Handbook- Seismic Design*. CRC Press. <https://www.routledge.com/Bridge-Engineering-Handbook-Seismic-Design/Chen-Duan/p/book/9781439852187>

- Chenchen, J.; Yangxun, O.; Weiyu, T.; Shengjun, H.; Rui, L.; Yuhao, J., & Bin, S.(2023). Improved Shape-Finding Method and Parametric Study for Designing Asymmetric Suspension Bridges in Mountainous Terrain. *Advances in Civil Engineering*, 2023, 14. <https://doi.org/10.1155/2023/7508814>
- Cheng-Qi, X.; Zhi-Wen, Z., & Jin, J. (2022). Response Surface-Based Finite Element Model Updating of Steel Box-Girder Bridges with Concrete Composite Decks. *Advances in Civil Engineering*, 2022.<https://doi.org/10.1155/2022/4298933>
- Gamarra, R., & Mamani, E. (2022). Determinación del Campo de Desplazamientos y Fuerzas Internas mediante análisis lineal y no lineal del puente arco de acero estructural Enrique P. Mejía, Sicuani, Canchis, Cusco?Perú [Universidad Andina del Cusco]. <https://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/5005>
- Huerta, C., & Asmat, C. (2022). Comparación del desempeño sísmico del puente Quilca sin sistemas de protección sísmica y aplicando sistemas de aislamiento y disipación de energía. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RPUC_8373277fb94ac23eb8fd3d71351754ee
- Perea, C.; Aleala, J.; Yepes, V.; Gonzales-Vidosaa, F., & Hospitaler, A. (2017). Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*, 39(2008), 676-688.
- Tacas, K., & Olarte, J. (2018). Vulnerabilidad Sísmica del Puente Primavera [Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/13758>
- Weng, F., & Fuxing, L. (2023). Mechanical Analysis of Junction Pier of Fuzhou-Xiamen High-Speed Railway Rigid-Frame Bridge. *Advances in Civil Engineering*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/7563415>
- Xiangong, Z.; Lei, C.; Heng, H.; Xiaobo, Z.; Hanhao, Z., & Zhiqing, Z. (2022). Seismic Fragility Analysis of Self-Anchored Suspension Bridge Considering Damping Effect. *Advances in Civil Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6980221>
- Yong, Z.; Xueqin, L., & Yutong, Z. (2022). Investigation on Seismic Response of Long-Span Special Steel Truss Cable-Stayed Bridge. *Advances in Civil Engineering*, 2022.<https://doi.org/10.1155/2022/2262289>

Zambrano, O., & Mosqueira, M. (2023). Vulnerabilidad Sísmica del Puente Malcas-Condebamba-Cajabamba-Cajamarca [Universidad Nacional de Cajamarca]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNC_7b0b6ae3b0c039e6b91055406b929d28

Zhou, X.; Cao, L.; Han, H.; Zheng, X.; Zhang, H., & Zhang, Z. (2022). Seismic Fragility Analysis of Self-Anchored Suspension Bridge Considering Damping Effect. *Advances in Civil Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6980221>

Zite, L.; Genhui, W.; Jiang, F.; Weihong, W.; Yue, J., & Xiaozhong, L. (2022). Seismic Response Analysis of Multidimensional and Multiangle Long-Span Top-Supported CFST Arch Bridge. *Advances in Civil Engineering*, 2022. <https://www.hindawi.com/journals/ace/2022/6807916/>

Fecha de recepción: 23/07/23

Fecha de aceptación: 13/12/23

Correspondencia

Blas Cano Jaime Walter

wblasc@unasam.edu.pe