

Evaluación de la variación de las posiciones óptimas de instrumentación en un puente peatonal atirantado bajo diferentes condiciones geotécnicas

Evaluation of the variation of optimal sensor placement in a pedestrian Cable-Stayed bridge under different geotechnical conditions

Wilson Hernandez ^a, Cristian Gómez ^b, Fabio Tavera ^c, Alejandro Arango ^d, Edgar De Los Santos ^e, Alvaro Viviescas ^f

^a Master en ingeniería Civil. MIDASoft. Ingeniero Civil. ahernandez@midasoft.com

^b Especialista – ingeniero Geólogo. MIDASoft. Ingeniero Civil. cgomez@midasoft.com

^c Master en ingeniería Civil. MIDASoft. Ingeniero Civil. ftavera@midasoft.com

^d MBA. MIDASoft. Ingeniero Civil. aarango@midasoft.com

^e Ingeniero Civil. MIDASoft. Líder técnico. e.santos@midasoft.com

^f Ph.D. Universidad Industrial de Santander. Profesor titular. alvivija@uis.edu.co

RESUMEN

Se desarrolló una investigación numérico experimental para evaluar la variación de las posiciones óptimas de instrumentación bajo diferentes condiciones geotécnicas. Se realizaron pruebas AVT para identificar las propiedades dinámicas de un puente atirantado peatonal, con los datos dinámicos identificados se ejecutó un conjunto de simulaciones para determinar la variación de las posiciones de instrumentación para los modos identificados ante diferentes tipos de terreno. Los resultados mostraron que las posiciones varían en gran medida en función de las condiciones de borde, aunque se identificaron puntos recurrentes para las diferentes configuraciones geotécnicas.

ABSTRACT

A numerical-experimental investigation was conducted to evaluate the variation of optimal sensor placement under different geotechnical conditions. AVT tests were performed to identify the dynamic properties of a pedestrian cable-stayed bridge. Using the identified dynamic data, a set of simulations was executed to determine the variation in sensor placement for the identified modes under different soil types. The results showed that the sensor positions vary significantly depending on the boundary conditions, although recurrent points were identified for the different geotechnical configurations.

PALABRAS CLAVE: Óptima ubicación de sensores, Interacción suelo estructura, vibración ambiental.

KEYWORDS: Optimal sensor placement, soil-structure interaction, ambient vibration.

1. Introducción

El monitoreo de la salud estructural de puentes basado en vibraciones requiere, como primer paso, la calibración de un modelo numérico que permita evaluar y contrastar el comportamiento

dinámico de la estructura a lo largo de las distintas etapas del monitoreo. Para este fin, se instalan acelerómetros en posiciones previamente determinadas con el objetivo de

identificar las propiedades dinámicas del puente. La ubicación de estos sensores y las condiciones de borde, que reflejan las características geotécnicas del terreno, tienen un impacto directo en la calibración del modelo numérico inicial, que sirve como línea base para la instrumentación.

Una de las principales limitaciones en la ejecución de pruebas dinámicas es la cantidad de acelerómetros disponibles. Sin embargo, una ubicación estratégica de los sensores permite obtener propiedades dinámicas confiables con el menor número de instrumentos posibles. Algoritmos de optimización, como Effective Independence (EI), determinan las ubicaciones donde los sensores proporcionan la mayor cantidad de información sobre los modos de vibración de interés. Esta técnica fue desarrollada por [1] y requiere como datos de entrada la cantidad de sensores disponibles y las formas modales de interés. Diversos estudios, como los realizados por [2], [3] y [4] han demostrado las ventajas de identificar las posiciones óptimas de los sensores (OSP) en puentes.

La interacción suelo estructura (ISE) influye de manera significativa en las características dinámicas de las estructuras, por lo que debe considerarse para lograr modelos numéricos más robustos [5]. Dado que el tipo de terreno en el que se construye la estructura puede modificar su comportamiento dinámico, es crucial analizar este factor. Por ejemplo, el viaducto Chiaravalle, en Italia, con una longitud total de 875 m, fue estudiado por [6] para evaluar la importancia de la ISE y la respuesta del sitio en el comportamiento dinámico de puentes continuos de concreto. Este puente está cimentado en un terreno con una velocidad mínima de onda de corte (V_s) de 230 m/s, compuesto por limos arenosos y arcillosos. El estudio identificó que la respuesta del sitio puede jugar un rol clave en la interpretación de los resultados y debe ser considerada con detalle.

En esta investigación, se llevó a cabo un estudio numérico-experimental para evaluar la variación de las posiciones óptimas de instrumentación (OSP) bajo diferentes condiciones geotécnicas. Se realizaron pruebas de vibración ambiental (AVT) en un puente peatonal atirantado, donde se lograron identificar seis formas modales utilizando las técnicas de identificación estocástica de subespacio (SSI) y descomposición en el dominio de frecuencia mejorada (EFDD).

Para el desarrollo del modelo numérico, se consideraron cuatro condiciones de contorno: base fija, uso de resortes lineales para representar un suelo de baja resistencia, condiciones reales del terreno de construcción y, por último, una simulación de alta resistencia del terreno. El modelo numérico fue calibrado tanto para la condición de contorno de base fija como para la resistencia real del terreno, utilizando los valores reportados en las pruebas AVT. Dado que las frecuencias identificadas en las pruebas dinámicas dependen de la fuente de excitación, se realizaron simulaciones numéricas con carga antrópica para las cuatro condiciones de borde, con el fin de identificar la variación de las formas modales y las posiciones OSP en función de las condiciones de borde modeladas.

2. Caso de estudio

El puente peatonal atirantado en concreto está construido en Floridablanca, Colombia de longitud total de 94.7 m, distribución de luces de 14 + 80.7 m, ancho de tablero de 4.8 m y altura de mástil de 46.4 m; es soportado por 6 pares de cables más 4 cables de retenida, la resistencia del concreto es 42 MPa, el mástil se apoya en dado de cimentación de 2 m de espesor, soportado por 12 pilotes de 2 m de diámetro y profundidad de 20 m mostrado en la Figura 1.

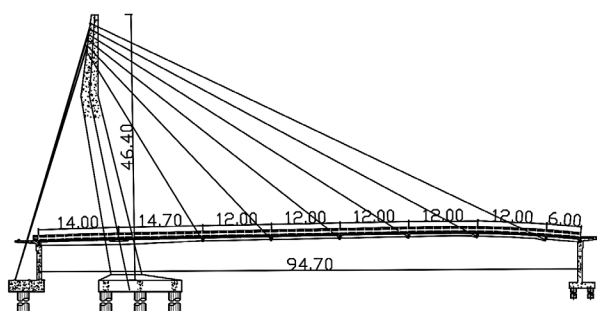


Figura 1. Puente peatonal atirantado

2.1 Parámetros geotécnicos

El perfil del terreno para la zona del puente está compuesto por un sistema multicapa con niveles de suelos transportados de origen aluvio-torrencial de texturas areno-arcillosas y areno-limosas y valores promedio de golpeo del ensayo SPT entre 16 golpes/pie a 57 golpes/pie.

En la Tabla 1 se resume el perfil del terreno para la zona del puente, las unidades de suelo identificadas, su profundidad, y los parámetros de resistencia y rigidez.

Tabla 1. Perfil del terreno y parámetros de resistencia y rigidez

Suelo	Prof (m)	Nspt	γ (ton/m ³)	ϕ' (°)	E (ton/m ²)	ν
1	0.0 - 3.0	44	1.84	42	44000	0.3
2	3.0 - 9.0	57	1.85	35	55000	0.3
3	9.0 - 11.0	16	1.84	27	17000	0.3
2	>11.0	57	1.85	35	55000	0.3

Se han calculado los módulos de balasto vertical (k_v) y horizontal (k_h) según las recomendaciones de [7] para un pilote aislado. El módulo k_h se ha estimado en suelos arenosos considerando la variación de la rigidez con la profundidad, la dependencia respecto al diámetro del pilote y el parámetro n_h , determinado en función del ángulo de fricción del suelo, de acuerdo con la metodología de [8] para suelos arenosos por encima del nivel freático. En la Tabla 2 se presentan los valores obtenidos de n_h para el cálculo de k_h a lo largo de la profundidad del pilote.

Tabla 2. Valores de n_h para los suelos arenosos de la zona de estudio

	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
n_h (ton/m ³)	8589	3945	276

Para la modelación numérica del puente se han considerado dos escenarios adicionales de las condiciones actuales del terreno. En el primer escenario se asume un terreno homogéneo con los parámetros del suelo 1, representativo de un terreno rígido, mientras que en el segundo se utiliza un terreno homogéneo con los parámetros del suelo 3, que denota un terreno blando. Con base en estas condiciones, se han recalculado los módulos de balasto vertical (k_v) y horizontal (k_h) para ambos escenarios, como se observa en la Figura 2 y Figura 3.

En relación con los valores recalculados de k_h , se observa que los dos escenarios adicionales establecen un límite inferior y superior respecto a los valores obtenidos para el terreno actual. No obstante, para k_v , el escenario de terreno rígido con los parámetros del suelo 1 no sigue esta misma tendencia. Esto se debe principalmente al cálculo de la carga de hundimiento utilizada para determinar k_v , la cual considera, entre otros factores, el número de golpes del ensayo SPT. En este caso, dicho valor de golpeo es ligeramente menor que el correspondiente al suelo 2, el cual presenta un espesor predominante a lo largo de todo el perfil del terreno actual.

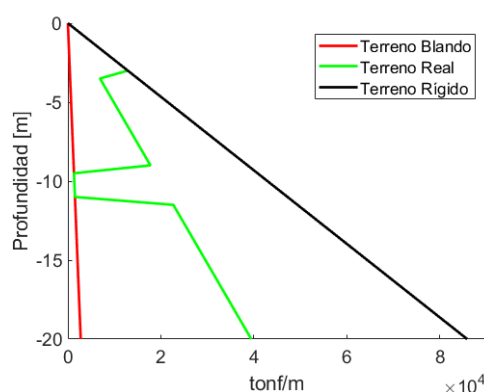


Figura 2. Variación de k_h en profundidad para los tres tipos de terreno

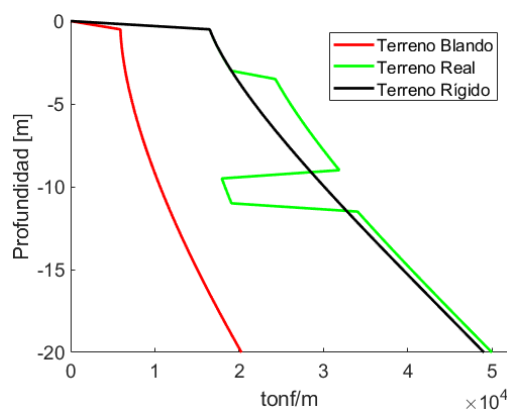


Figura 3. Variación de kv en profundidad para los tres tipos de terreno

3. Prueba AVT

Una prueba AVT se ejecutó usando tres acelerómetros triaxiales Obsidian Kinematics ubicados en las vigas externas del tablero. Dos sensores móviles se desplazaron a la par; la Figura 4 muestra la posición de los sensores donde el triángulo rojo es el sensor de referencia y los recuadros verde y azul son los móviles. Se registraron datos en cada ubicación por 15 minutos con frecuencia de muestreo de 200 Hz.

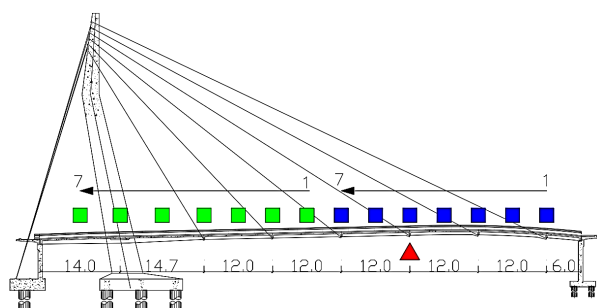


Figura 4. Ubicación esquemática de acelerómetros en puente atirantado

3.1 Identificación de propiedades dinámicas

El software ARTeMIS© junto con los métodos EFDD y SSI se usaron para identificar las propiedades dinámicas experimentales. Se configuró el procesamiento de datos para los siguientes parámetros: ventana de hanning con traslapeo al 66%, 1024 datos de 0 a 0 Hz nivel de rechazo MAC (Modal Assurance Criterion [9]) para EFDD al 0.9. Se identificaron 6 frecuencias

naturales (Tabla 3) representadas en los picos más prominentes del espectro de potencia en frecuencia (Figura 5) donde la frecuencia con mayor contenido de energía es 1.504 Hz seguido de 0.96 Hz que corresponden a las formas modales mostradas en las Figura 7 y Figura 8.

Tabla 3. Valore de frecuencia de AVT

Modo	Frecuencia [Hz]		Amortiguamiento [%]	
	EFDD	SSI	EFDD	SSI
1	0.959	0.959	0.867	0.668
2	1.504	1.506	0.87	0.679
3	3.351	3.348	0.782	0.779
4	3.949	3.949	0.985	0.957
5	5.065	5.065	0.895	0.891
6	6.766	6.754	1.503	1.508

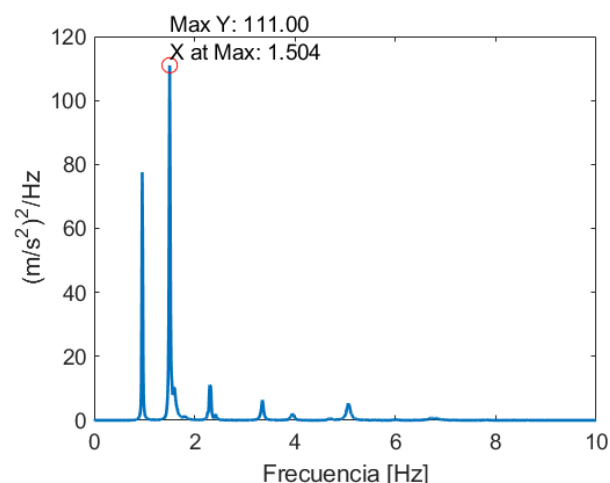


Figura 5. Espectro potencia en frecuencia para AVT

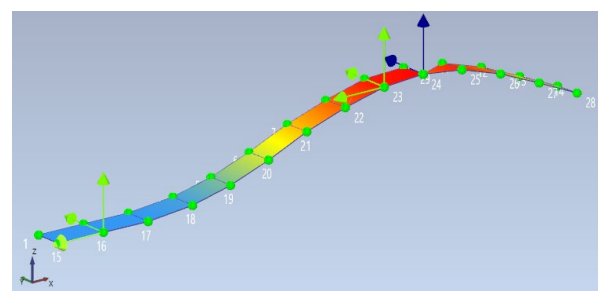


Figura 6. Frecuencia 0.959 Hz

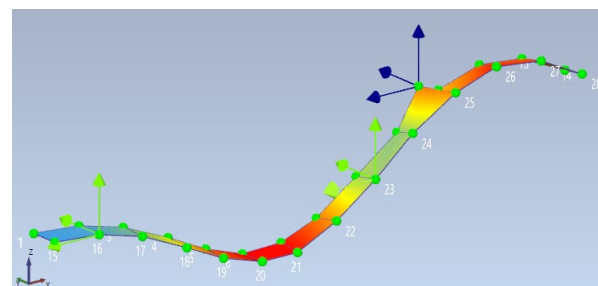


Figura 7. Frecuencia 1.504 Hz

4. Modelo numérico del puente

En el software midas Civil© se desarrolló el modelo del puente para las 4 condiciones de borde planteadas: base fija, resortes lineales para suelo de resistencia baja, suelo que representa las condiciones del terreno real de la estructura (abreviado en el texto como suelo real), resistencia alta. Elementos Tipo BEAM se usaron para modelar elementos del tablero y columna y tipo TRUSS para modelar los cables, en total 781 elementos se usaron para el modelo de base fija; para los modelos que incluyen la cimentación 2874 elementos fueron empleados como se muestra en la Figura 8. El módulo de elasticidad inicial del concreto se tomó como 30772 MPa. El eje X es representada por la dirección longitudinal del tablero, en sentido transversal por el eje Y, y sentido vertical por el eje Z.

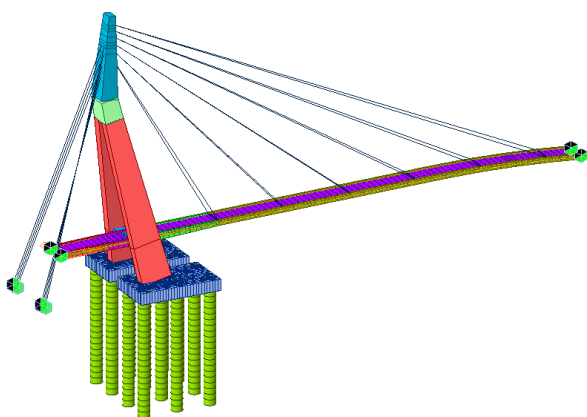


Figura 8. Vista isométrica de puente atirantado creado en midas Civil

Según las condiciones de terreno mencionadas en la sección 2.1, se asignaron resortes lineales en dirección horizontal y vertical para los tres tipos de suelo considerados, uno de ellos representando un suelo blando, el suelo real y un suelo de resistencia alta como se indica en las Figura 2 y Figura 3.

4.1 Calibración de modelo numérico del puente

En el ajuste del modelo numérico pueden intervenir múltiples parámetros que logren la mayor aproximación a los datos de las pruebas AVT, parámetros como módulo de elasticidad, geometría de la sección transversal, inercia efectiva, condiciones de borde podrían intervenir activamente en la calibración del modelo numérico, por tanto, infinitas soluciones de ajuste podrían ser efectivas. Se realizó el ajuste de los parámetros dinámicos con la modificación del módulo de elasticidad (E) hasta 20% del valor inicial. El valor de E asignado se muestra en la Tabla 4 donde el valor de E mayor representa un concreto de casi 63 MPa.

Tabla 4. Módulo de elasticidad para calibración de modelo numérico

Iteración	incremento	E [tonf/m2]
0	0	3137900
1	5%	3294795
2	10%	3451690
3	15%	3608585
4	20%	3765480

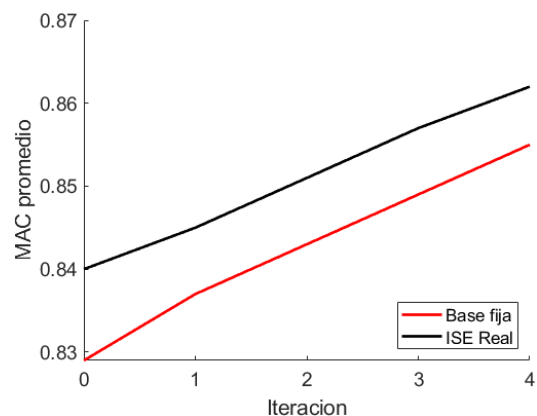


Figura 9. Ajuste de índice MAC para aumento de E

El ajuste de las formas modales se validó con el índice MAC, calculando la correlación entre las formas modales experimentales Vs numéricas; con el aumento del módulo de elasticidad, la correlación de modos incrementa hasta 3.12% y 2.62% para análisis con base fija e ISE respectivamente, el ajuste modal es 1.33% mayor con ISE que con base fija como se

muestra en la Figura 9. Las frecuencias ajustadas de los modelos numéricos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Frecuencias de modelos numéricos ajustados

AVT		FEM			Dirección modo
EFD D	SSI	Base fija	ISE	% participación masa	
0.96	0.96	0.95	0.94	11.8	3-z
1.50	1.51	1.66	1.66	1.9	12-x
3.35	3.35	3.17	3.16	4.4	6-x
3.95	3.95	4.08	4.07	0.8	9-Rz
5.07	5.07	4.30	4.29	1.5	8-Z
6.77	6.75	7.50	5.68	1.3	13-x

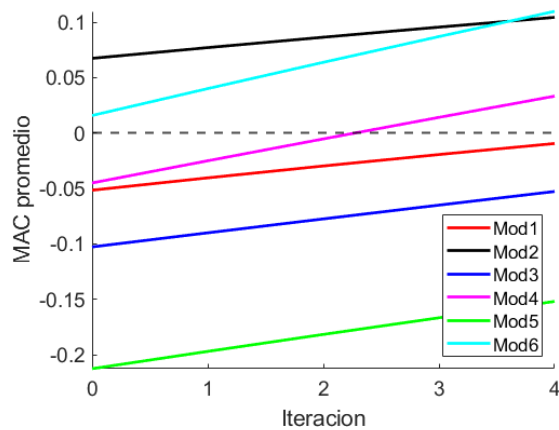


Figura 10. % error de frecuencia por iteración en modelo de base fija

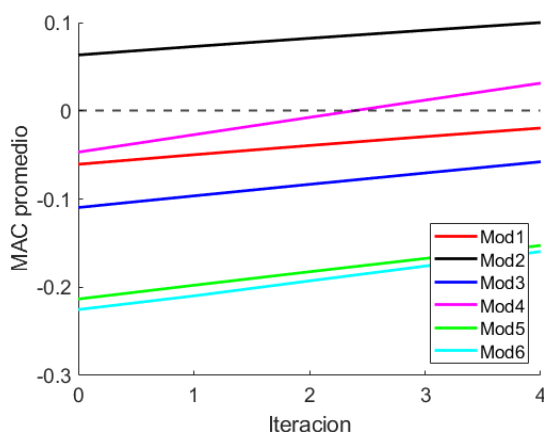


Figura 11. % error de frecuencia por iteración en modelo con ISE (resortes lineales)

La variación de las frecuencias naturales de los modelos en cada iteración se muestra en las figuras Figura 10 y Figura 11, donde los modos

de frecuencias altas tienen menor diferencia en el modelo que incluye ISE con resortes lineales. Para el caso del modo 6, este es altamente sensible a las condiciones de borde asumidas en tanto que el valor de frecuencia entre ambos modelos difiere en 31%. Para el caso del modo principal vertical (3-z) identificado en las pruebas AVT, el aumento del módulo de elasticidad reduce la diferencia en los valores de frecuencia.

4.2 Simulaciones de vibración forzada con carga antrópica

Para analizar la incidencia de las condiciones de borde en los modos posiblemente identificados en pruebas dinámicas se ejecutaron simulaciones de carga ante el paso de peatones sobre el tablero del puente. Para las cuatro condiciones de borde planteadas se ejecutó un análisis Tiempo historia lineal para el paso de 10 personas de 80 kilogramos circulando a una velocidad de 5 km/h [10], [11]. El patrón de carga empleado fue propuesto por Bachmann [12], [13] y se muestra en la Figura 12. Se configuró el caso de análisis con duración de 200 s, frecuencia de muestreo de 200 Hz.

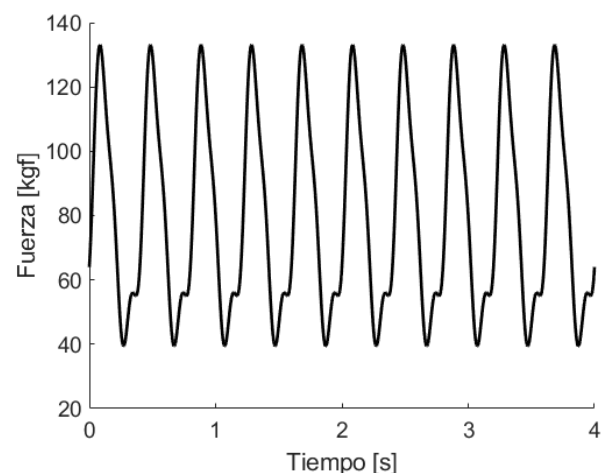


Figura 12. Función de fuerza del humano al caminar en dirección vertical

4.2.1. Procesamiento de señales de las simulaciones de vibración forzada

Replicando la distribución de puntos de instrumentación de la prueba AVT (Figura 4) y movimiento de sensores se extrajeron los

registros de aceleración de los nodos correspondientes de los 4 modelos numéricos (base fija, ISE suelo real, ISE suelo blando, ISE suelo rígido). Los espectros de potencia en frecuencia se muestran en la Figura 13.

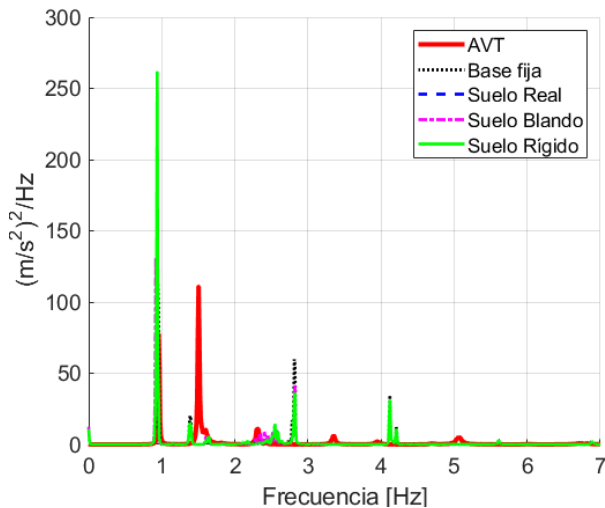


Figura 13. Espectro de potencia en frecuencia para simulaciones tiempo historia

Se identifica una marcada diferencia en la distribución de picos por frecuencia en donde el modo 3-Z es principalmente excitado en las simulaciones numéricas respecto la prueba AVT donde el modo 12-X tiene mayor contenido energético que el modo 3-Z. Adicional a esto, tanto en las simulaciones numéricas como en la prueba AVT, los modos de frecuencias mayores a 2 Hz tienen menor magnitud del pico respecto los modos 3-Z y 12-X. Con respecto al modo de mayor amplitud de espectro de potencia en frecuencia (3-Z), el cambio en la condición de borde genera una modificación en la magnitud del pico en frecuencia siendo inferior para el caso de base fija y ligeramente menor para el suelo blando.

Cinco frecuencias naturales se identificaron plenamente en las cuatro simulaciones de carga, estas corresponden a las frecuencias: 0.936 Hz Modo 3-Z, 1.64 Hz Modo 12-X, 2.82 Hz Modo 6-X, 4.21 Hz Modo 8-Z, 5.61 Hz Modo 13-X, el modo 9-RZ (Figura 5) no fue identificado.

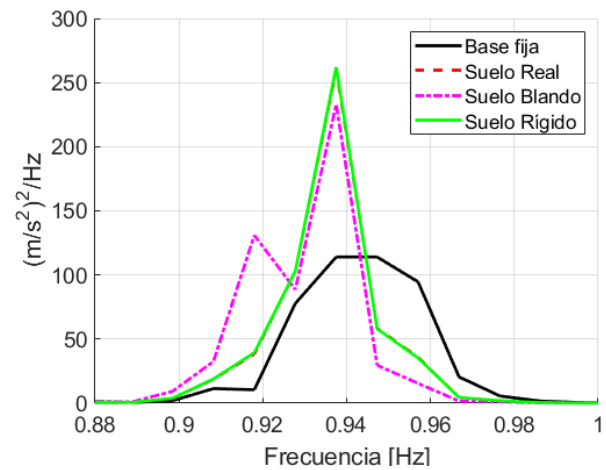


Figura 14. Detalle de magnitud de pico en modo 3-Z

5. Análisis de óptima ubicación de sensores

Para las formas modales identificadas en la prueba AVT junto con las encontradas en las simulaciones numéricas se estimaron las posiciones OSP empleando el método EI implementado en el algoritmo desarrollado por [14]. La Figura 15 muestra la distribución de sensores a lo largo del tablero donde se muestran 21 posibles ubicaciones de sensor para las formas modales obtenidas del modelo de ISE para suelo real.

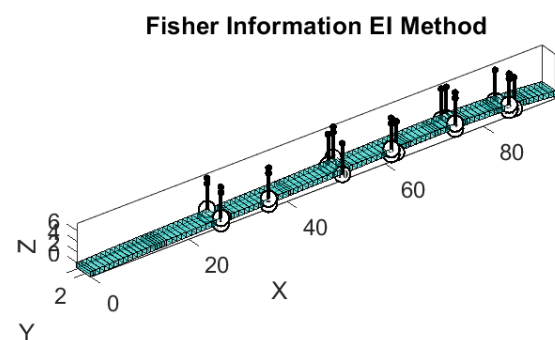


Figura 15. Detalle de magnitud de pico en modo 3-Z

Las ubicaciones OSP para los 8 casos analizados se presentan en la Figura 16 donde se muestra el perfil del tablero del puente y las ubicaciones de los sensores usadas en la prueba AVT. Se analizó la concentración de puntos OSP para los 8 casos estudiados encontrando que en las zonas de anclaje (recuadro verde) de

los cables se tiene mayor concentración de puntos OSP.

6. Conclusiones

Se identificaron las posiciones óptimas de instrumentación (OSP) para 8 casos de análisis en los que se modificaron las condiciones de borde del modelo para distintos comportamientos del terreno. Las condiciones del terreno influyen significativamente en la respuesta modal de la estructura ante cargas dinámicas, como se muestra en la Figura 14, donde se observa una considerable variación en la magnitud del pico para un mismo modo. Al comparar los resultados dinámicos de los modelos numéricos, se encontró que el mejor ajuste modal se obtiene al considerar la interacción suelo-estructura mediante resortes lineales.

En este tipo de puente atirantado, y para los modos identificables, las posiciones OSP tienden a concentrarse en las zonas de anclaje de los cables. Además, la consideración de las condiciones de borde mediante resortes lineales para simular el comportamiento del terreno genera puntos OSP distintos a los obtenidos con un modelo de base fija. Por lo tanto, es crucial prestar especial atención a la condición de borde asumida para determinar las posiciones de instrumentación más adecuadas. Ante los diferentes cambios de condiciones de terreno, las zonas de anclaje de cables tienden a ser posiciones OSP consistentes antes las modificaciones por lo que usar estos puntos de instrumentación da ventaja en la identificación acertada de parámetros dinámicos ante la ausencia de una previa estimación de puntos OSP.

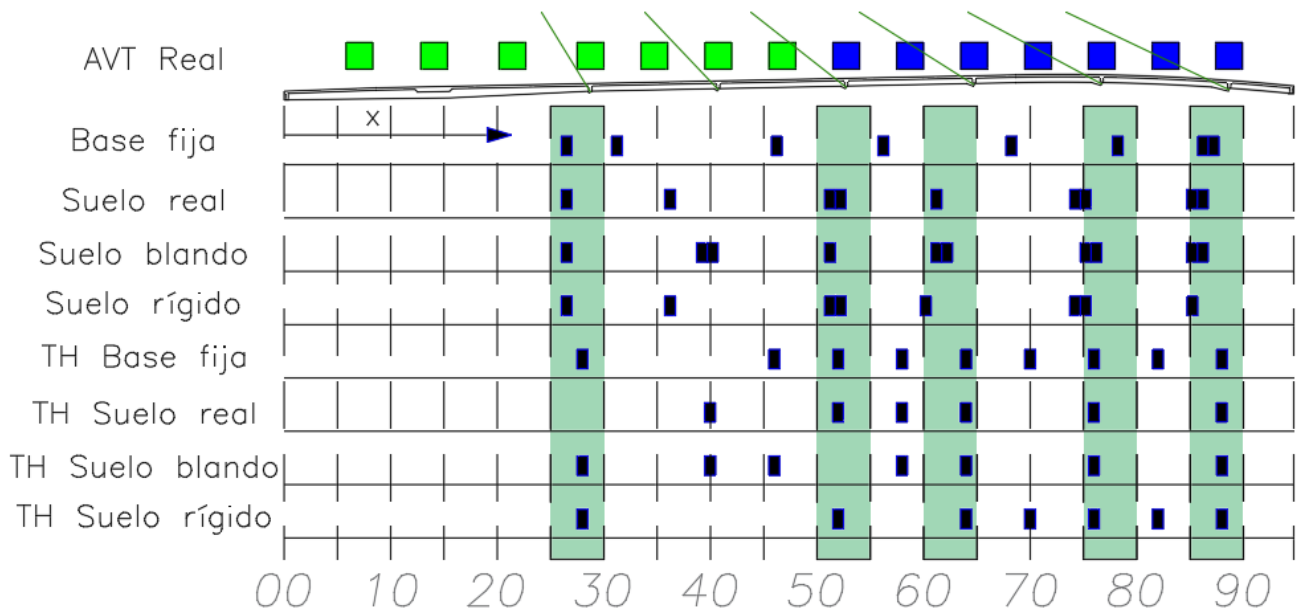


Figura 16. Ubicación esquemática de puntos OSP para casos analizados

Referencias

- [1] D. C. Kammer, "Sensor Placement for On Orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structures," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 14, no. 2, pp. 251–259, 1991, doi: <https://doi.org/10.2514/3.20635>.
- [2] W. Hernandez, A. Viviescas Jaimes, and C. A. Riveros Jerez, "Modal identification of a box girder bridge constructed by successive cantilevers using ambient and forced vibration test at optimally selected locations," in *Concrete structures: New Trends for Eco-efficiency and Performance*, J. V. and A. S. L. E. Júlio, Ed., Lisbon: Federação

- International de Béton(FIB), 2021, pp. 2057–2066.
- [3] R. Castro-Triguero, E. Garcia-Macias, E. S. Flores, M. I. Friswell, and R. Gallego, “Multi-scale model updating of a timber footbridge using experimental vibration data,” *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, vol. 34, no. 3, pp. 754–780, 2017, doi: 10.1108/EC-09-2015-0284.
- [4] C. Riveros, E. García, and J. Rivero Jerez, “A comparative study of sensor placement techniques for structural damage detection,” *Revista ELA*, no. 20, pp. 23–37, 2013, doi: 10.14508/reia.2013.10.20.23-37.
- [5] A. Shabani, M. Feyzabadi, and M. Kioumars, “Model updating of a masonry tower based on operational modal analysis: The role of soil-structure interaction,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00957.
- [6] F. Gara, M. Regni, D. Roia, S. Carbonari, and F. Dezi, “Evidence of coupled soil-structure interaction and site response in continuous viaducts from ambient vibration tests,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 120, no. October 2018, pp. 408–422, 2019, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.02.005.
- [7] Ministerio de Fomento, “Código Técnico de la Edificación (CTE) - Capítulo F.2.7: Estimación de movimientos horizontales.” Accessed: Mar. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/>
- [8] W. M. Isenhowe, S.-T. Wang, and L. G. Vasquez, “LPILE v2019,” Mar. 2020, ENSOFT inc.
- [9] J. D. Cryer, J. S. Bendat, and A. G. Piersol, *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*, 4th ed., vol. 82, no. 400. New Jersey: Wiley, 2010. doi: 10.2307/2289430.
- [10] R. Pamies Vila, J. M. Font Llagunes, and J. Kövecses, “Análisis dinámico del impacto pie-suelo en el correr,” *Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, pp. 1–8, 2014, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2117/26079>
- [11] O. Caballero-Garatachea, A. G. Ayala-Milián, G. Juárez-Luna, and M. A. Escamilla-García, “Procedimiento analítico para el cálculo de respuestas impulsivas en sistemas de piso ante el caminar humano,” *Dyna (Medellin)*, vol. 91, no. 232, pp. 86–94, May 2024, doi: 10.15446/dyna.v91n232.111377.
- [12] H. Bachmann, *Vibrations in structures Induced by man and machines*. Zürich: IABSE, 1987.
- [13] W. Xie, J. Zhang, H. Liang, Z. Zhang, Y. Lu, and P. Wei, “Analysis of human-induced vibration response in elevated waiting hall of Beijing Fengtai High-Speed Railway Station,” *Structures*, vol. 58, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.105348.
- [14] C. R. Farrar, M. Todd, E. Flynn, and D. Harvey, “SHMTTools Software,” 2010, Los Alamos National Laboratory, New Mexico: 0.3.1. [Online]. Available: <https://www.lanl.gov/projects/national-security-education-center/engineering/software/shm-data-sets-and-software.php>