

Indicadores Clave de Desempeño Estructural para la Regulación y Expedición de Permisos de Carga Divisible: Contribución a las Buenas Prácticas de Gestión de Infraestructura para el Desarrollo Económico

Herman Román ⁽¹⁾, Johannio Marulanda ⁽²⁾, Mauricio Marín ⁽³⁾, Eliu Pineda ⁽⁴⁾, Claudia Quintero ⁽⁵⁾,

¹ CEO, Tenken Engineering, Bogotá D.C., Colombia, gerencia@tenken.com.co

² Profesor Titular, Grupo de Investigación G-7, Universidad del Valle, Cali, Colombia, johannio.marulanda@correounivalle.edu.co

³ Ingeniero de Proyectos, Tenken Engineering, Bogotá D.C., Colombia, monitoreo@tenken.com.co

⁴ Coordinador de innovación, Tenken Engineering, Bogotá D.C., Colombia, innovacion@tenken.com.co

⁵ CFO, Tenken Engineering, Bogotá D.C., Colombia, cquintero@tenken.com.co

Resumen

Este trabajo presenta un estudio técnico efectuado por Tenken Engineering en el que se realizó el análisis de impacto, la verificación de la capacidad de carga y la evaluación del estado estructural de seis puentes de 20, 26, 29, 36, 42 y 20 m de luz, mediante pruebas de carga estática y dinámica en tiempo real, con la implementación de Indicadores Clave de Desempeño Estructural –KPI–, que resuelve las dificultades en la realización de pruebas de campo, la elaboración de los estudios técnicos y la gestión de mantenimiento predictivo de los puentes, para la regulación y expedición de permisos de tránsito de los Vehículos Combinados de Carga -VCC- en las vías nacionales colombianas.

Introducción

De acuerdo con el Ministerio de Transporte de Colombia (2021), el transporte de carga por carretera tiene una participación superior al 90% sobre el total de la mercancía transportada en el país, de manera que resulta de gran importancia para el Estado y la industria la participación de Vehículos Combinados de Carga -VCC-, con capacidad de transportar entre 40% y 120% más carga y entre 100% y 400% más volumen que un vehículo convencional en un solo viaje. De acuerdo con la ANDI (2014) y la OCDE (2010), el beneficio de los VCC es que reducen: (i) el costo logístico del modo carretero en 21 %, (ii) el impacto ambiental en 27 %, (iii) la congestión en operaciones de carga dedicadas en 46 %, y (iv) el impacto sobre la infraestructura de transporte; adicionalmente, permiten reducir en 40% el consumo de combustible, las emisiones de dióxido de carbono y los costos de mano de obra por unidad de carga transportada, y mejorar la competitividad de las industrias productoras, más aún cuando el Estado ha desarrollado inversiones en materia de infraestructura que permiten brindar al sector

mayores posibilidades en materia de nuevas tecnologías [1].

Por lo anterior, el Ministerio de Transporte de Colombia, mediante la Resolución 20213040062005, estableció los lineamientos mínimos para los permisos de tránsito de los VCC [2], sin embargo, se han presentado dificultades en la elaboración de los estudios técnicos de puentes, en especial en la contratación de consultorías especializadas y con experiencia en la realización de los siguientes procedimientos: (i) **Verificación de capacidad de carga**, (ii) **Análisis de impacto** sobre la infraestructura que causan las configuraciones de los VCC, específicamente la identificación del factor por el cual se debe incrementar la carga estática y amplificarla debido a efectos dinámicos, (iii) **Verificación del estado estructural** de los puentes por tipología, rangos de luz, camión de diseño, año de construcción, teniendo en cuenta que circulen VCC en combinación con otras tipologías de vehículos de carga, de manera simultánea por la estructura a diversas velocidades y distancias entre los mismos o incluso detenerse, acumularse o frenar sobre los puentes, y (iv) **Calificación del estado de**

los puentes. En caso de que se determine la necesidad de intervenciones o reforzamientos, el peticionario del permiso podrá ejecutarlos, asumiendo el costo de los mismos, previa autorización de la entidad que tenga a cargo la administración de la vía y/o estructura.

Con base en los lineamientos de la Resolución 20213040062005 se desarrolló un estudio técnico en seis puentes simplemente apoyados de concreto postensado de 20, 26, 29, 36, 42 y 20 m sometidos a VCC agrícolas tipo C3-S2-R3-R3-R3-R3, C3-S1-R2-R2-R2-R2 y C3-S2-R4-R4 con capacidad de transporte de entre 92 y 115 toneladas y hasta 400% más volumen que un vehículo convencional en un solo viaje. El estudio dio como resultado que un puente requiere estudios de reforzamiento para aumentar su capacidad de carga y vida útil, cinco puentes requieren mantenimiento en su carpeta de rodadura, reparación de juntas o revisión de los apoyos, y tres puentes requieren reparación de la rodadura y/o reemplazo de la losa de aproximación.

En general, los resultados del estudio muestran que las técnicas de monitoreo de salud estructural son esenciales para la ejecución de pruebas a escala natural en puentes en servicio, la gestión de mantenimiento predictivo de la infraestructura vial y la regulación de carga divisible con VCC.

Protocolo

En la (iv) **Calificación del estado** de los puentes para determinar la necesidad de intervenciones o reforzamientos, en periodos máximos de 2 años, se definieron cuatro niveles de alerta e Indicadores clave de desempeño estructural -KPI- en (i) **Verificación de capacidad de carga**, (ii) **Análisis de impacto** y (iii) **Verificación del estado estructural**. Para realizar la gestión de mantenimiento predictivo, según la curva de falla potencial (P-F) mostrada en la Figura 1, y garantizar la operatividad y funcionalidad de la vía en diversos niveles de diseño, los niveles de alerta fueron: sin daño, daño leve, daño severo y cerca al

colapso, y los KPI se definieron en el 50% de la zona de daño leve.

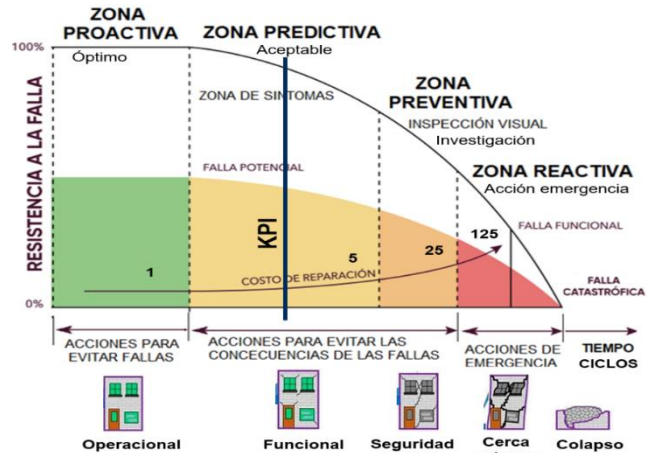


Fig 1. Curva de falla potencial (P-F) [3].

Se realizó la (i) **Verificación de la capacidad de carga** de cada puente mediante el método de las deflexiones remanentes. Cada estructura fue cargada durante dos minutos para evaluar el Índice de Estabilidad, el cual debe ser menor al 10%, y la deflexión máxima, la cual debe ser menor a $L/2000$. Posteriormente, se retiró la carga para evaluar el Índice de Permanencia, el cual debe ser menor al 15% por dos minutos con el puente sin carga [4]. Además, se evaluó el Índice de Repetitividad y el Índice de Desviación de Linealidad, al repetir el mismo ciclo de carga y comparar el comportamiento de las deflexiones entre ambos ciclos. Se definió un KPI para determinar rápidamente la capacidad de carga del puente, con la relación carga-deflexión, como se muestra en la Figura 2.

Para construir la relación carga-deformación del puente fue necesario registrar la deflexión de la estructura durante una prueba de carga estática y así realizar la (i) **Verificación de la capacidad de carga** de cada puente. Durante dos minutos se aplicó una carga estática ubicando un camión en el centro del vano, se esperó dos minutos para que se recuperara la estructura y luego se aplicó la misma carga durante otros dos minutos. Este

procedimiento se repitió utilizando más camiones, representando mayor carga, y durante toda la prueba se registró la respuesta de la estructura. En la Figura 3 se muestra una de las pruebas.

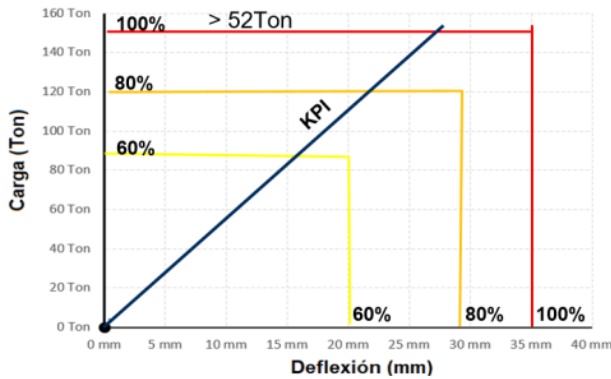


Fig. 2. KPI para la (i) Verificación de la capacidad de carga.



Fig. 3. Prueba para la (i) Verificación de la capacidad de carga.

En el caso de los puentes A y E, de 20 y 42 m, respectivamente, se usaron dos camiones C3 con peso de prueba de 80 ton. Para los puentes B, C y D, de 26, 29 y 36 metros, respectivamente, se usaron dos camiones C3S3 con peso de prueba de 105 ton. Para el puente F de 20 m se implementaron tres camiones C3, con peso de prueba de 100 ton.

Para el (ii) *Análisis de impacto* y la (iii) *Verificación del estado estructural* de los puentes se utilizaron los mismos camiones de la prueba de carga estática, dos camiones cruzando cada uno por un carril al mismo tiempo a 10, 20, 30, 40, 50 y 60

km/h. En el caso del puente C, el procedimiento solo se realizó a 10, 20 y 30 km/h, debido a las condiciones de la estructura.

De acuerdo con el CCP-14 [5] y la norma AASHTO [6], la amplificación por carga dinámica es un incremento que se aplica a la carga estática para tener en cuenta el impacto de los vehículos en movimiento. Estos efectos pueden atribuirse a efectos del ensamblaje de la rueda ante las discontinuidades de la superficie de tráfico y a la respuesta dinámica del puente como un todo ante los vehículos en movimiento.

Utilizando la señal original y la señal filtrada de los desplazamientos (deflexiones), registrados durante las pruebas de carga dinámicas, se calcula la amplificación por carga dinámica, para el (ii) *Análisis de impacto*, como la razón entre el mayor desplazamiento medido en la señal que contiene el efecto total debido a la carga aplicada, es decir, la señal original, y el mayor desplazamiento medido por la señal que contiene solamente el efecto estático debido a la carga aplicada, es decir, la señal filtrada.

En la Figura 4 se define el KPI para el (ii) *Análisis de impacto*. Cuando se alcanza el valor de diseño (p. ej. 30%), este factor de impacto presentaría un nivel de alerta rojo. Para este caso, el KPI se definió para un factor de impacto de 21%.

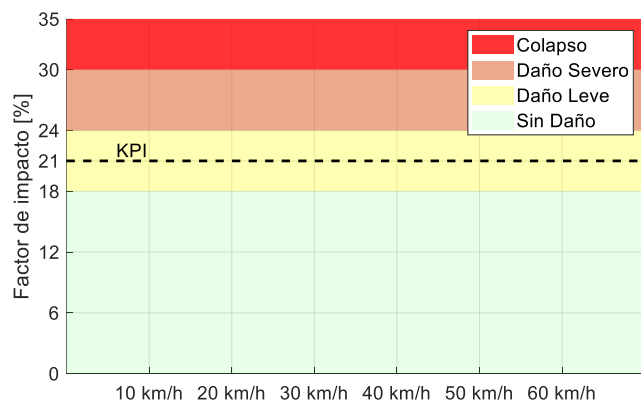


Fig. 4. KPI para (ii) Análisis de impacto.

Finalmente, el nivel de intensidad de vibración es un parámetro usado para la clasificación de daño en estructuras flexibles y, por ende, para la *(iii) Verificación del estado estructural* del puente. Dicho parámetro relaciona estados de daño con la frecuencia de la estructura y los máximos absolutos de aceleración registrada. Se utilizaron niveles relacionados a los de la carta de Beards [7], como se muestra en la Figura 5, ilustrando niveles de alerta roja, naranja, amarilla y sin alerta, para niveles de colapso, daños severos, daños leves y sin daños, respectivamente.

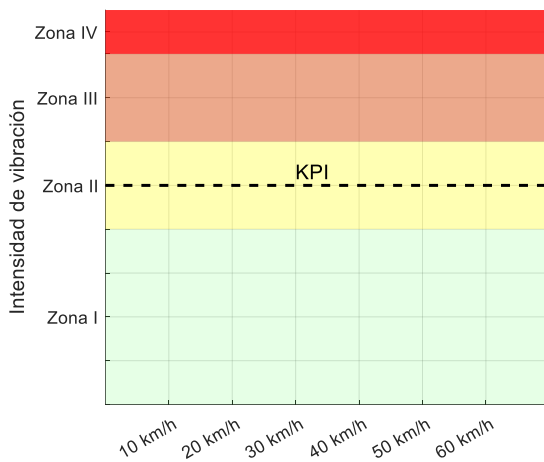


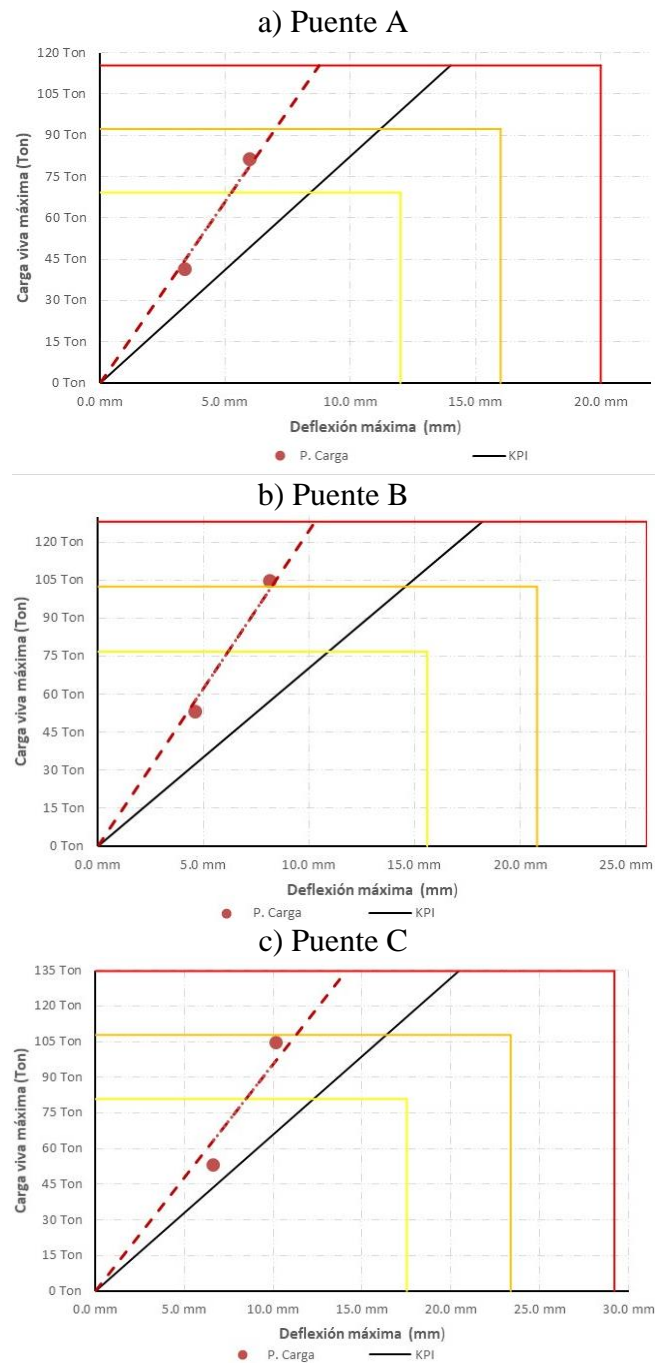
Fig 5. KPI para la (iii) Verificación del estado estructural.

Resultados

Para cada puente se tomaron registros de vibración y deflexión durante las pruebas de carga estáticas y dinámicas, usando tres acelerómetros MEM triaxiales con rango de aceleración $\pm 2g$, rango de frecuencia DC-250 Hz y nivel de ruido de $22.5 \mu g/\sqrt{Hz}$ y tres sensores de desplazamiento laser con resolución de 0.10 mm y frecuencia de muestreo de 20 Hz. Todos los sensores se ubicaron en el centro de la luz.

La (i) Verificación de la capacidad de carga se presenta en la Figura 6. Esta es producto de relacionar el peso de los camiones usados en la prueba de carga estática en cada puente con los desplazamientos máximos registrados. Para el puente C la carga máxima fue 77 toneladas y el

desplazamiento registrado fue 13 mm, revelando una capacidad de carga muy próxima al KPI (ver Figura 6(c)). Los demás puentes presentaron una capacidad de carga aceptable.



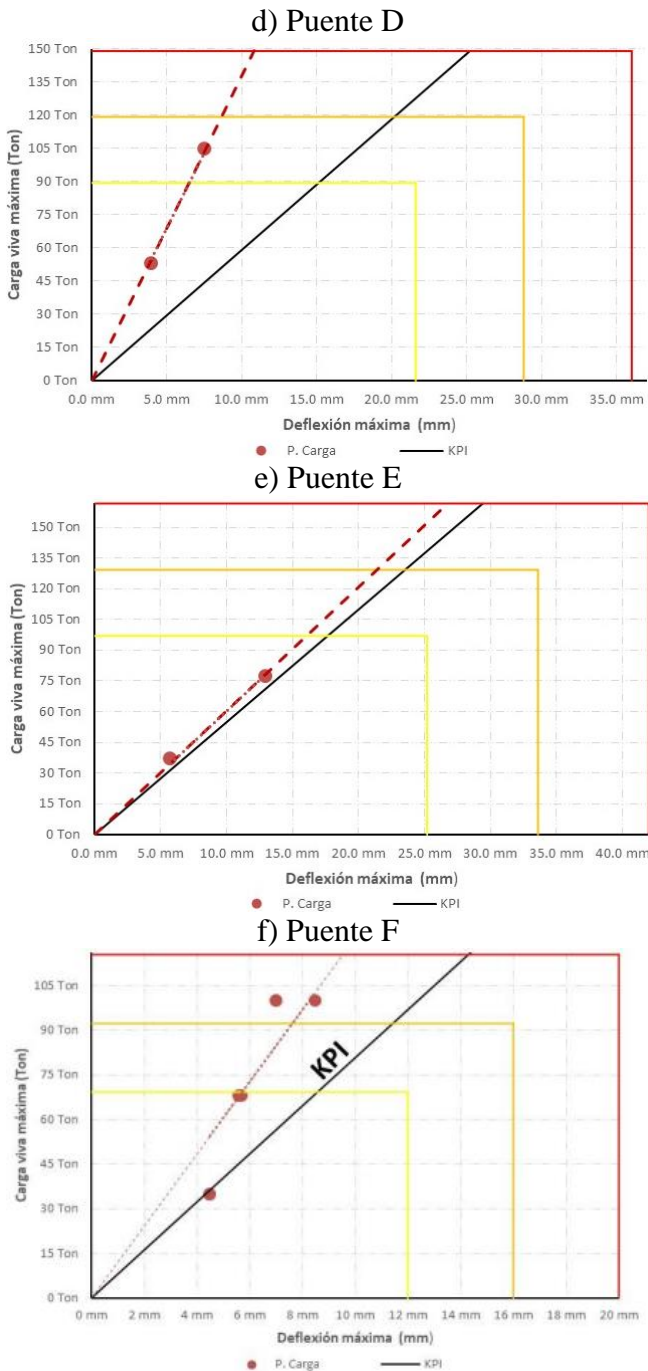


Fig 6. Resultados de la (i) *Verificación de la capacidad de carga*.

Los factores de impacto resumidos en la Figura 7 corresponden a los máximos factores presentados en cada puente para cada velocidad desarrollada durante las pruebas de carga dinámica. El (ii)

Análisis de impacto indica que los puentes C, D y E presentaron factores de impacto por encima del KPI, incluso alcanzando niveles de alerta roja, como es el caso del puente C.

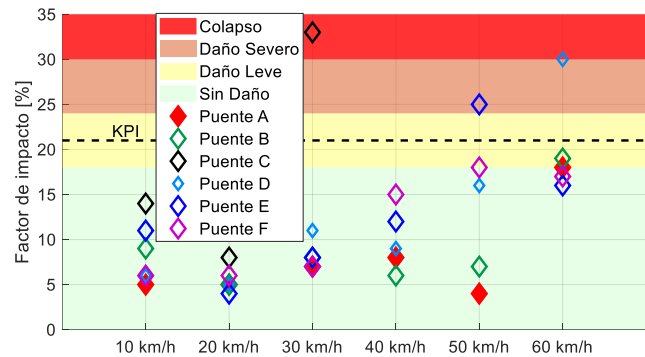


Fig 7. Resultados del (ii) *Análisis de impacto*.

Los registros de vibración fueron procesados para identificar las frecuencias operacionales y evaluar cada puente. La Figura 8 sintetiza la (ii) *Verificación del estado estructural* para todos los puentes, seleccionando la mayor intensidad de vibración en cada prueba de carga a cada velocidad desarrollada por los vehículos. Se puede notar que cinco puentes incursionan en la zona de daño leve, de los cuales dos puentes llegan hasta daño severo. Asimismo, los puentes C, D y E están por encima del KPI, indicando que deben tomarse medidas proactivas de mantenimiento para evitar daños significativos en el futuro próximo.

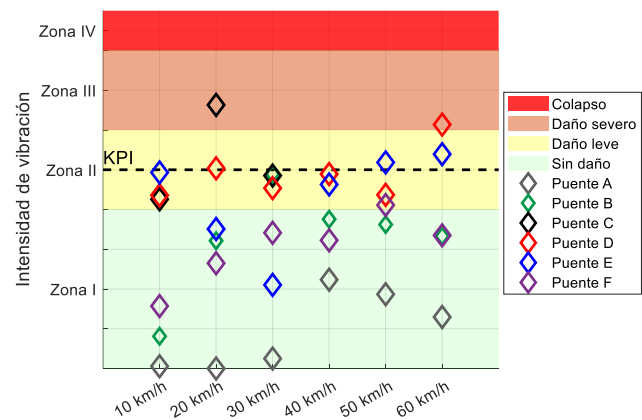


Fig 8. Evaluación de intensidades de vibración para todos los puentes.



Discusión

La (iv) *Calificación del estado* de los puentes sugiere que el puente E, de 42 m, requiere estudios de reforzamiento para aumentar su capacidad de carga y vida útil, con registros de carga-deflexión próximos al KPI y con probabilidad de daño leve, como lo muestran las Figuras 6 y 8, respectivamente. Los puentes A, B, C, D y E requieren mantenimiento en su carpeta de rodadura, reparación de juntas o revisión de los apoyos, con factores de impacto que superan el KPI y con probabilidad de daño leve a severo, como lo muestran las Figuras 7 y 8, respectivamente, cuando los vehículos de carga transitan a velocidad media y alta. Los puentes C, D y E requieren reparación de la rodadura y/o reemplazo de la losa de aproximación, con registros de intensidad de vibración que superan el KPI y con probabilidad de daño leve a severo, cuando los vehículos de carga transitan a velocidad media y alta, como lo indica la Figura 8.

Conclusiones

El protocolo propuesto fue implementado con éxito en los seis puentes mencionados, recolectando información experimental confiable y analizándola mediante indicadores presentados por la literatura científica como herramientas coherentes para la evaluación estructural.

Los diferentes criterios de evaluación (capacidad de carga, factor de impacto e intensidad de vibración) son concordantes entre sí, ya que para las diferentes evaluaciones en un mismo puente se presentaron niveles de alerta iguales o muy similares, haciendo factible el uso del concepto de KPI para la calificación de la estructura.

La integración de técnicas de monitoreo de salud estructural con el concepto de KPI permitió identificar a tiempo el deterioro de los puentes evaluados y proponer medidas proactivas para evitar que su deterioro aumente y se presenten problemas mayores.

El protocolo presentado en este documento, junto con su ejecución en campo, permite responder a la Resolución 20213040062005 y determinar permisos de tránsito de los VCC por los principales corredores del país.

Bibliografía

[1] Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), "Política para la Modernización para el Sector Transporte Automotor de Carga", Documento CONPES 3963. Bogotá D.C., Colombia. 28 de junio de 2019.

[2] Ministerio de Transporte, Mintransporte, "Anexo 1 Configuraciones Vehiculares, Pesos y Longitudes", Resolución Número 20213040062005. Bogotá D.C., Colombia. 21 de diciembre de 2021.

[3] Dynamox, "Guía Completa del Mantenimiento Predictivo". Recuperado el 17 de enero del 2025 de: <https://dynamox.net/es/blog/guia-completa-del-mantenimiento-predictivo>.

[4] American Concrete Institute, "Code Requirements for Load Testing of Existing Concrete Structures (ACI 437.2-13) and Commentary", ACI 437.2-13, 2013.

[5] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), "Norma Colombiana de Diseño de Puentes, CCP 14", Sección 3, 2014.

[6] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), The Manual for Bridge Evaluation, 3rd ed. Washington, D.C.: AASHTO, 2018.

[7] Wenzel, H., Veit-Egerer, R, Lin T. y Stoger M. Industrial Safety and Life Cycle Engineering: Technologies/Standards/Applications. VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, 2014.



8º CONGRESO MUNDIAL
DE MANTENIMIENTO Y
GESTIÓN DE ACTIVOS



21 · 22 · 23
MAYO · 2025
Centro de Convenciones
Cartagena de Indias - Colombia



22º Congreso Iberoamericano de Mantenimiento
27º Congreso Internacional de Mantenimiento y Gestión de Activos - CIMGA

Herman Román, M.Sc.

El Ingeniero Román es co-fundador y CEO de la empresa Tenken Engineering. Es reconocido experto en evaluación de infraestructura civil en tiempo real, usando técnicas avanzadas de instrumentación, monitoreo y analítica de datos. El Ingeniero Román ha dirigido la evaluación, a escala natural, de más de 50 puentes en servicio mediante técnicas de instrumentación y monitoreo, implementando el monitoreo de salud estructural y técnicas de mantenimiento proactivo en plantas termoeléctricas, edificios y puentes de carácter nacional.

* Dirección: Calle 126 # 52A 92 Bogotá D.C, Colombia.

* Celular: +57 3014388501

* Correos: gerencia@tenken.com.co

Johannio Marulanda Casas, Ph.D.

El Dr. Marulanda es profesor titular de la Universidad del Valle en Cali, Colombia, miembro del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7), y Director de Innovación y Desarrollo para la empresa Tenken Engineering. Obtuvo su Maestría en Ingeniería Civil en la Universidad del Valle en 2006 y su título de Doctorado en Ingeniería Civil en la University of South Carolina, Columbia, SC, USA, en 2010. Desde el 2020 es miembro del International Association for Bridge Maintenance and Safety (IABMAS). En la Universidad del Valle ha ocupado diversos cargos administrativos y ha desarrollado numerosos proyectos de investigación y contratos de extensión. Sus áreas de investigación incluyen dinámica estructural, dinámica experimental, instrumentación y monitoreo estructural, aislamiento sísmico, entre otros.

* Dirección: Calle 13 #100-00, Edificio E48, Oficina 2021, 760032; Cali, Valle del Cauca, Colombia.

* Celular: 602 3212100

* Correo:

johannio.marulanda@correounivalle.edu.co

Mauricio Marín, Esp.

El Ingeniero Marín es Ingeniero de Proyectos para la empresa Tenken Engineering, estudiante de Maestría en Ingeniería de la Universidad del Valle y miembro del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7). Obtuvo su título de Especialista en Estructuras en la Universidad del Valle, donde ha participado de varios proyectos de investigación y extensión. Desde el 2024 es miembro del International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). Actualmente desarrolla su tesis de maestría en identificación de cargas vehiculares sobre puentes y sus intereses en investigación incluyen instrumentación y monitoreo estructural, ingeniería de puentes, dinámica estructural, entre otros.

* Dirección: Calle 54N #2GN-04, 760050; Cali, Valle del Cauca, Colombia.

* Celular: +57 3184413735

* Correo: mauricio.marin@correounivalle.edu.co

Claudia Lorena Quintero

Magister en Gerencia de Proyectos, co-fundadora y COO de la empresa Tenken Engineering; con más de 15 años de experiencia profesional en planeación, desarrollo, gestión financiera y comercialización de modelos de negocios B2B y B2C. Realiza acompañamiento en los procesos de toma de decisiones de inversión en diversos emprendimientos de alto impacto y el crecimiento exponencial de estos. Apoya activamente procesos de due diligence por más de USD 20 millones

* Dirección: Calle 47 3 A 11 Bogotá D.C, Colombia.

* Celular: +57 3103387637

* Correos: cquintero@tenken.com.co

Eliu Pineda Argel

El ingeniero Eliu es coordinador de innovación para la empresa Tenken Engineering, donde se encarga del desarrollo del sistema IoT y software embebido. Graduado del colegio con reconocimiento al mejor ICFES, obtuvo su



8° CONGRESO MUNDIAL
DE MANTENIMIENTO Y
GESTIÓN DE ACTIVOS



21 · 22 · 23
MAYO · 2025
Centro de Convenciones
Cartagena de Indias · Colombia



22° Congreso Iberoamericano de Mantenimiento

27° Congreso Internacional de Mantenimiento y Gestión de Activos - CIMGA

pregrado en la Universidad del Norte becado, allí participó en proyectos de investigación, fue miembro de la IEEE, representó a la universidad en robótica y para el proyecto de grado “Centro integral para la ciencia y tecnología del Magdalena” obtuvo el reconocimiento al mejor poster. Actualmente se dedica a Tenken Engineering y en sus investigaciones en curso se

encuentra la robótica, sismología, sistemas de posicionamiento de alta precisión e IA entre otros.

* Dirección: Urbanización las Palmas Mz C Casa 10; Calarcá, Quindío, Colombia.

* Celular: +57 3167164222

* Correos: innovación@tenken.com.co