

Monitorización Inteligente de Puentes Hiperestáticos

Del Dato en Tiempo Real a la Optimización Sostenible

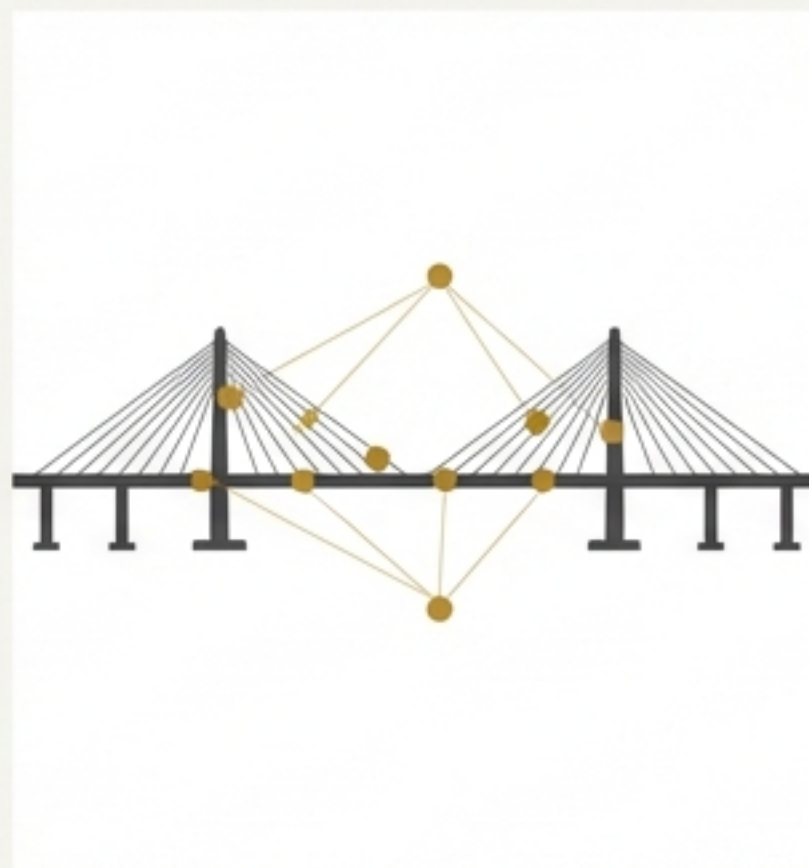


El Desafío: Los Puentes Complejos Exigen una Vigilancia Superior

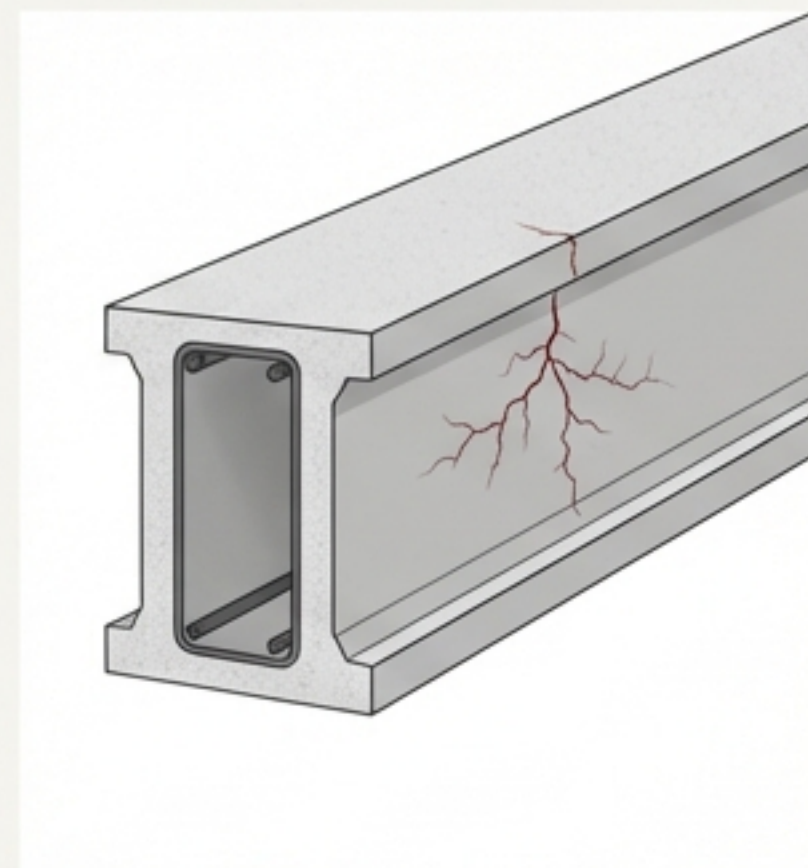
Las grandes estructuras hiperestáticas se enfrentan a tensiones complejas y multifactoriales. Los métodos de monitorización tradicionales son periódicos, indirectos e incapaces de proporcionar una imagen completa en tiempo real de la salud estructural, generando riesgos ocultos.



Inspección Visual: Inexacta para defectos no superficiales como las fisuras por fatiga.



Sensores Puntuales: Información unidimensional y distribuida, insuficiente para captar la deformación completa.



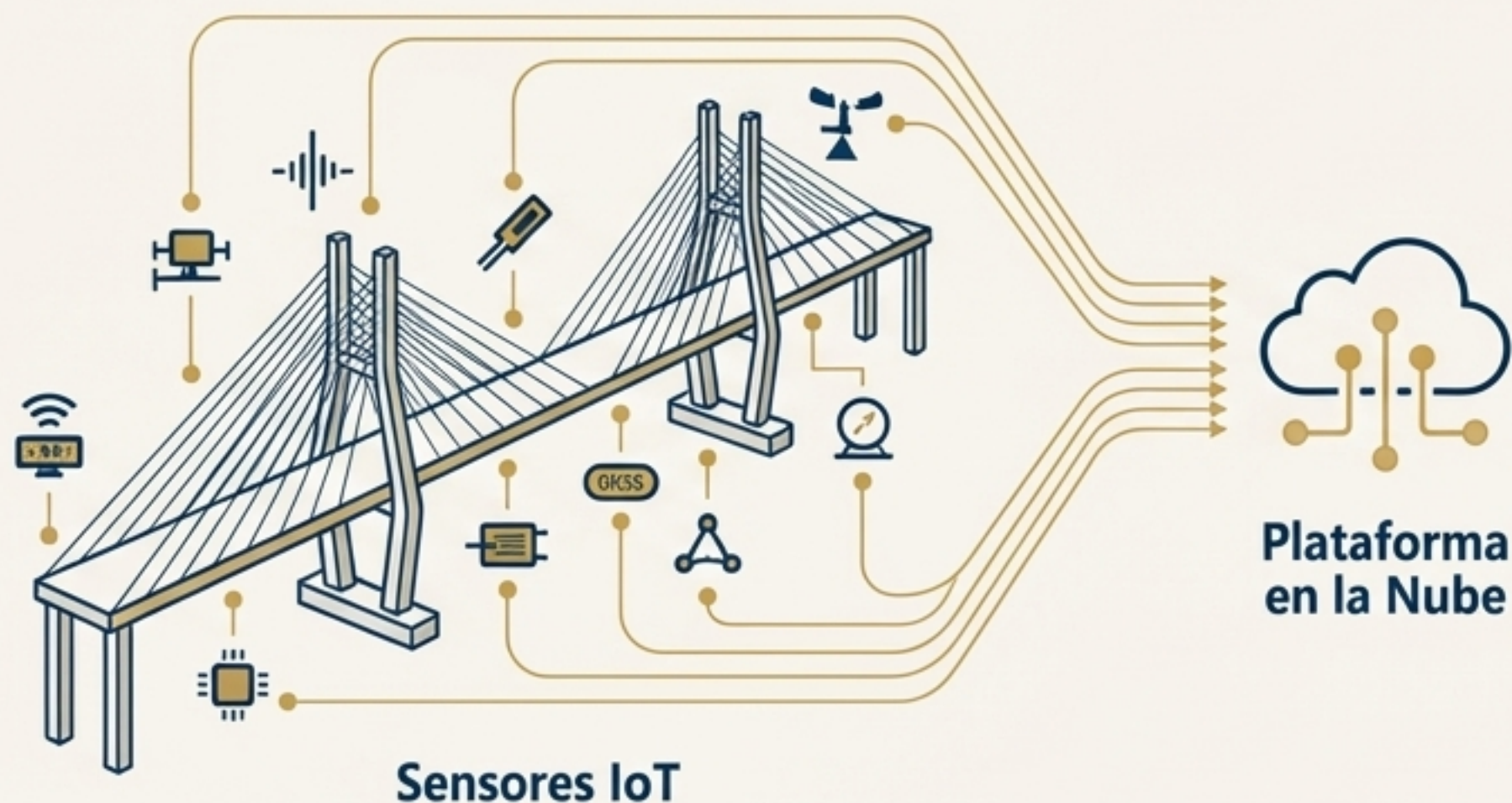
Enfoque Reactivo: Detección tardía de daños que impide la predicción de peligros potenciales.

Factores de Fallo Clave:

- Respuesta dinámica y daño por fatiga bajo cargas múltiples.
- Propagación de microfisuras internas hasta el fallo estructural.

La Solución: Una Plataforma Inteligente que Unifica lo Físico y lo Digital

Desarrollamos un sistema revolucionario que combina datos de sensores IoT en tiempo real, una plataforma de análisis en la nube y un modelo de elementos finitos (FEM) de alta fidelidad para crear un "gemelo digital" dinámico de la estructura.



Enfoque Interdisciplinario

Integra informática, ingeniería de comunicaciones, control de automatización y mecánica de ingeniería.

Componentes Clave

- **Sensores IoT:** Recopilación automática y continua de datos.
- **Plataforma en la Nube:** Procesamiento, análisis y alerta automática.
- **Modelo de Elementos Finitos (FEM):** Acoplamiento con datos reales para verificar robustez.

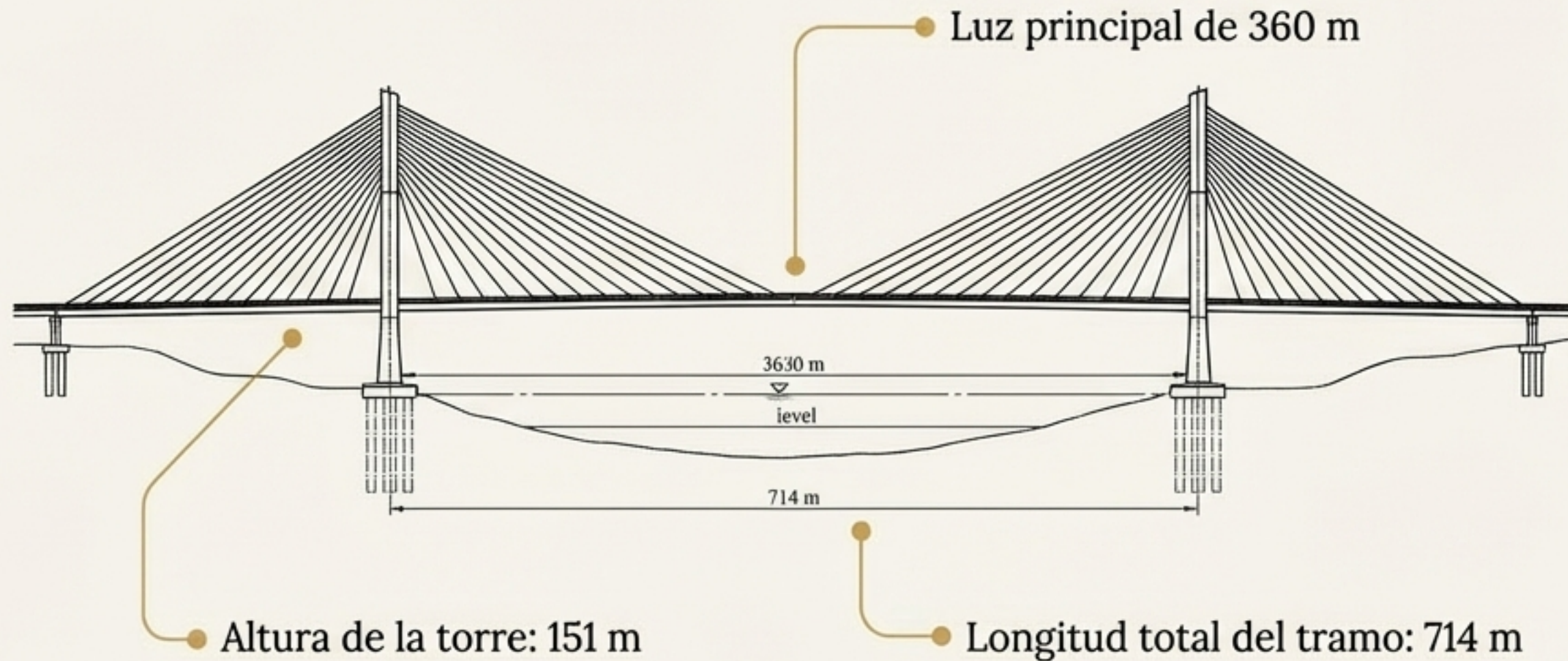


Cambio de Paradigma

De un monitoreo 'basado en puntos e indirecto' a un modo 'espacial, directo y continuo'.

El Laboratorio Real: El Puente LZYB sobre el Río Amarillo

Para validar nuestro sistema, lo implementamos en el LZYB, un importante puente atirantado de hormigón sujeto a un tráfico y cargas ambientales significativas.

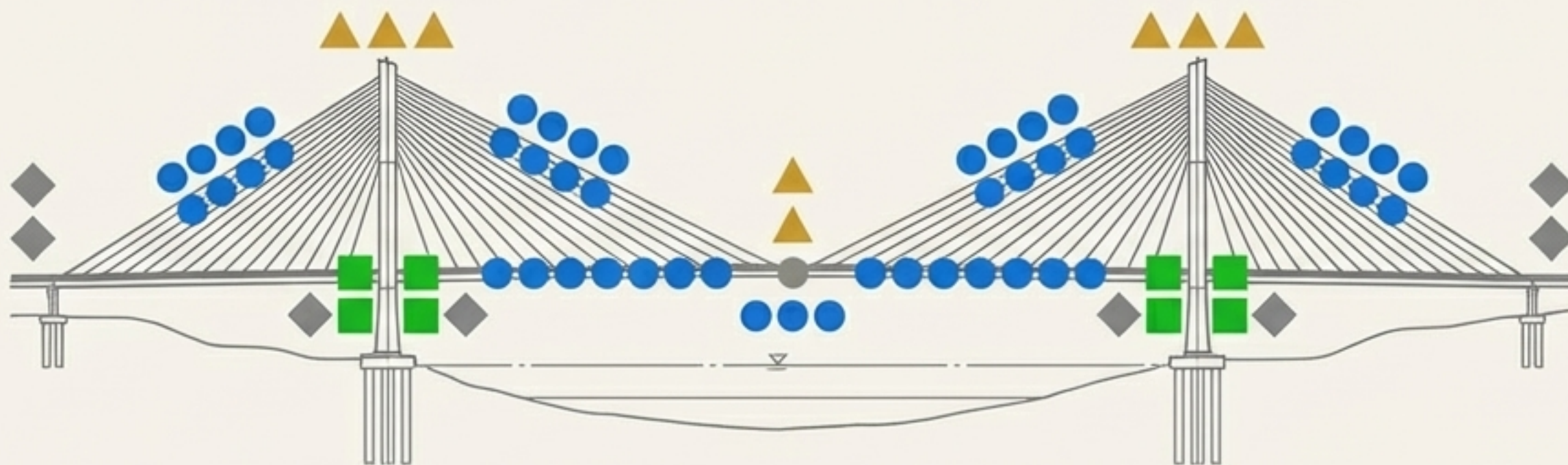


Especificaciones Técnicas

- **Tipo:** Puente atirantado con tablero de viga de hormigón
- **Luz Principal:** 360 metros
- **Torres:** Romboidales de hormigón armado (151 m y 147 m)
- **Tirantes:** Haces de alambres de acero paralelos (longitud máx. 187 m)
- **Diseño de Carga:** Autopista de cuatro carriles, Carga de Vehículos Clase I, velocidad de diseño 80 km/h

Creando un Sistema Nervioso Digital para el Puente

Se instaló estratégicamente una densa red de 374 sensores de 10 tipos diferentes para monitorizar cada aspecto crítico: condiciones ambientales, cargas de tráfico y la respuesta estructural del puente.



LEYENDA DE SENSORES

- | | |
|--|-----------------------------------|
| ● Acelerómetros (Vibración) | ▲ GNSS/Sensores de Desplazamiento |
| ■ Galgas Extensométricas/FBG (Deformación) | ◆ Sensores Ambientales/Carga |

DESGLOSE DEL SISTEMA

- **Monitoreo Ambiental:** Temperatura, humedad, velocidad del viento.
- **Monitoreo de Cargas:** Sistema de pesaje dinámico para el tráfico.
- **Monitoreo de Respuesta Estructural:**
 - **Deformación (Strain):** 72 galgas extensométricas + 82 sensores de fibra óptica (FBG).
 - **Desplazamiento (Displacement):** Sensores de presión, GNSS, inclinómetros.
 - **Vibración:** 31 acelerómetros en la viga principal + 56 en los tirantes.

Escuchando al Puente (Parte 1): Patrones de Carga y Tráfico Real

El sistema capturó datos detallados de tráfico durante cinco meses, revelando un crecimiento mensual significativo y la frecuencia de eventos de sobrecarga y exceso de velocidad extremos, que constituyen las condiciones de carga reales de la estructura.

Volumen de Tráfico Diario



Estadística de Sobrecarga



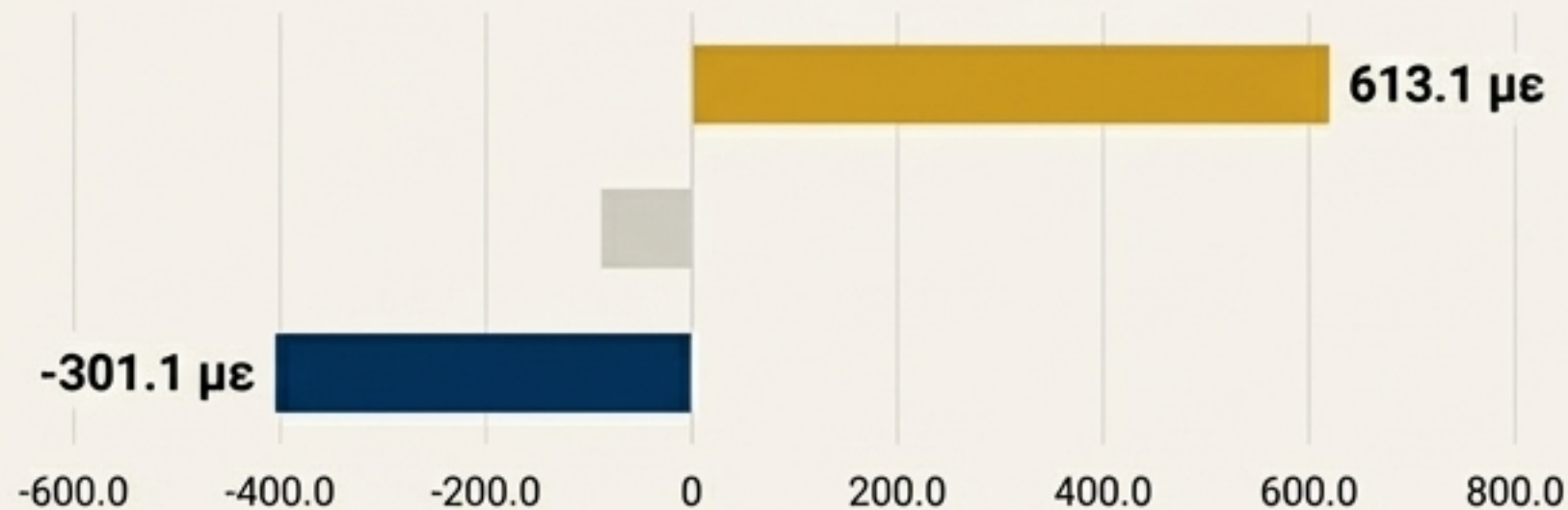
Estadística de Exceso de Velocidad



La Respuesta del Puente (Parte 2): Deformación, Tensión y el Factor Temperatura

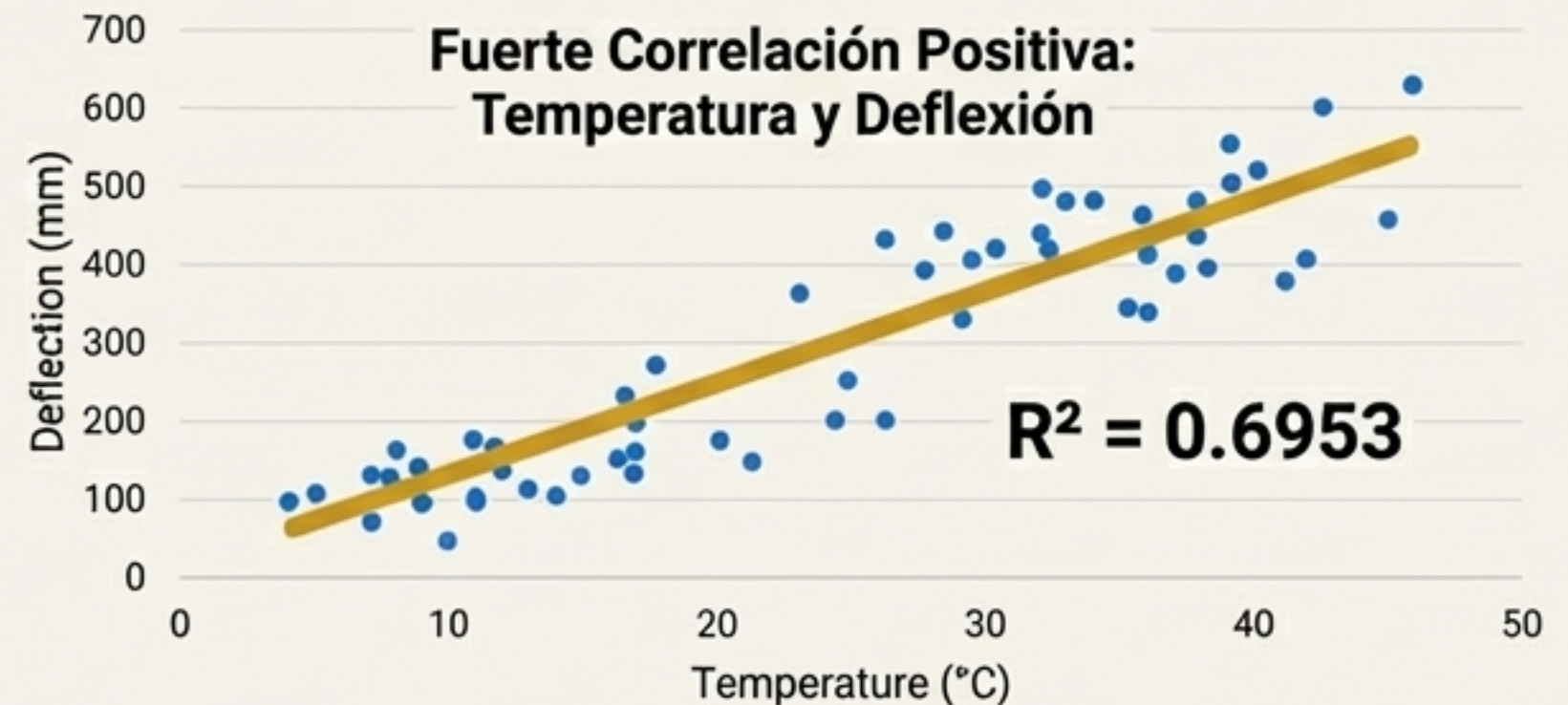
El análisis de los datos de deformación y desplazamiento reveló zonas específicas de alta tensión. Fundamentalmente, se encontró una fuerte correlación entre las fluctuaciones de temperatura y la deflexión estructural, una variable clave que nuestro sistema integrado puede modelar con precisión.

Puntos Críticos de Tensión (Strain)



Valores de deformación concentrados en la parte inferior de las vigas longitudinales.

Correlación Temperatura-Deflexión



Deflexión máxima medida: 628.9 mm
Diferencia de temperatura máxima: 48.5 °C en la viga principal

Construyendo el Gemelo Digital: El Modelo de Elementos Finitos (FEM)

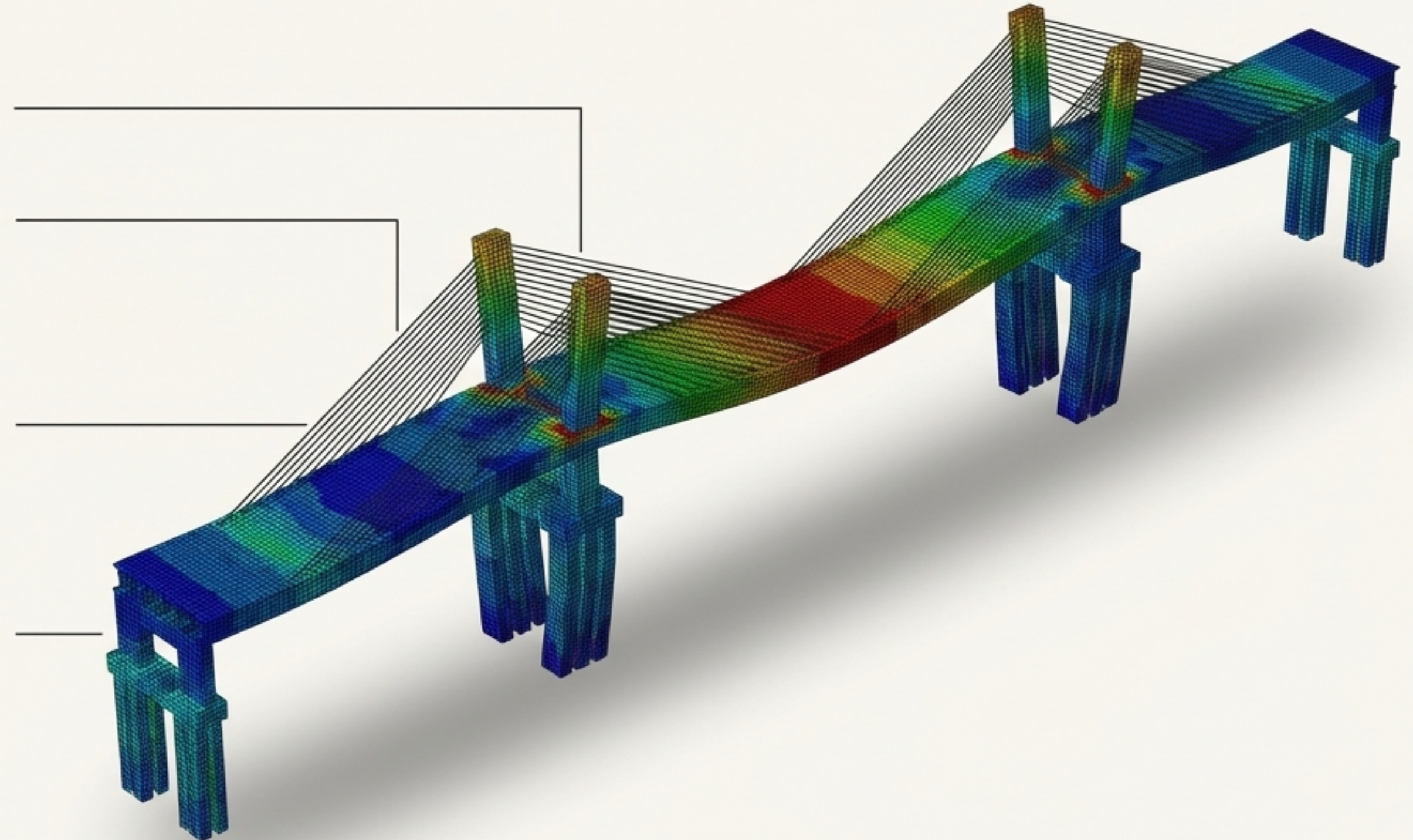
Se creó un modelo 3D de elementos finitos altamente detallado del LZYB, incorporando todas sus propiedades geométricas y materiales. Este modelo sirve como la contraparte basada en la física para los datos de los sensores del mundo real.

Software: **Abaqus/CAE 2021**

Materiales: **Hormigón C30 y C50**, acero para tirantes, modelados con precisión.

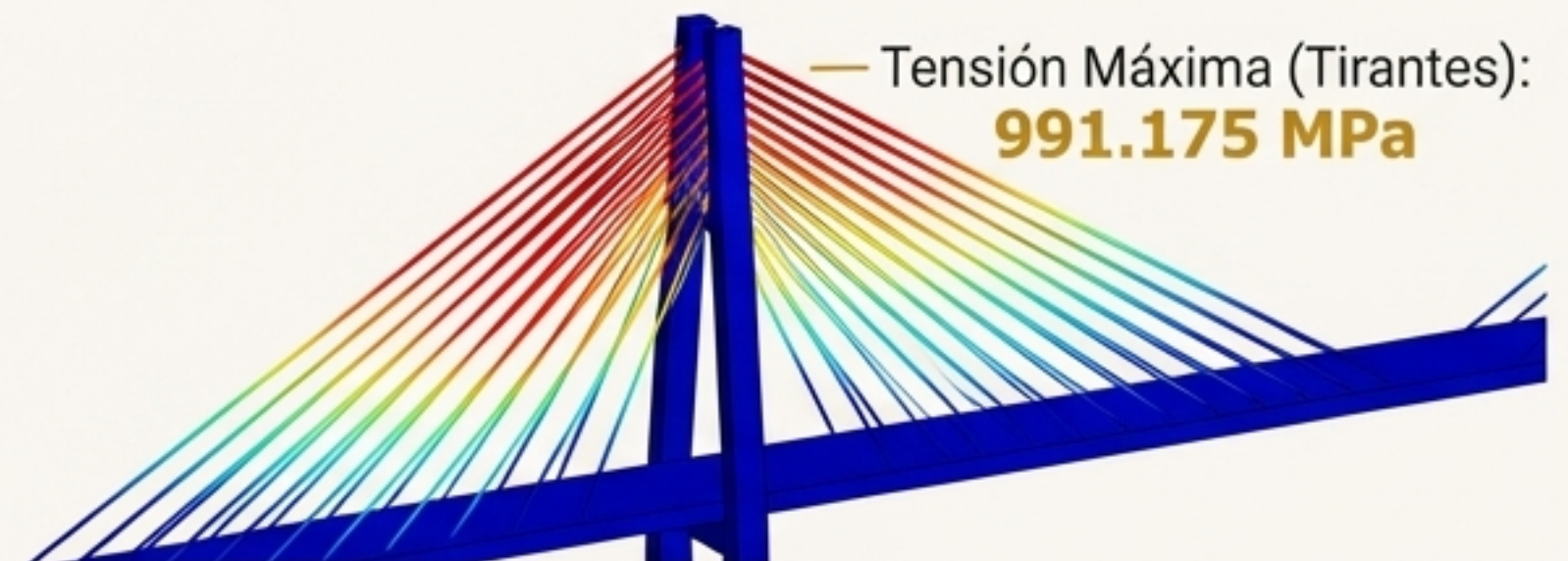
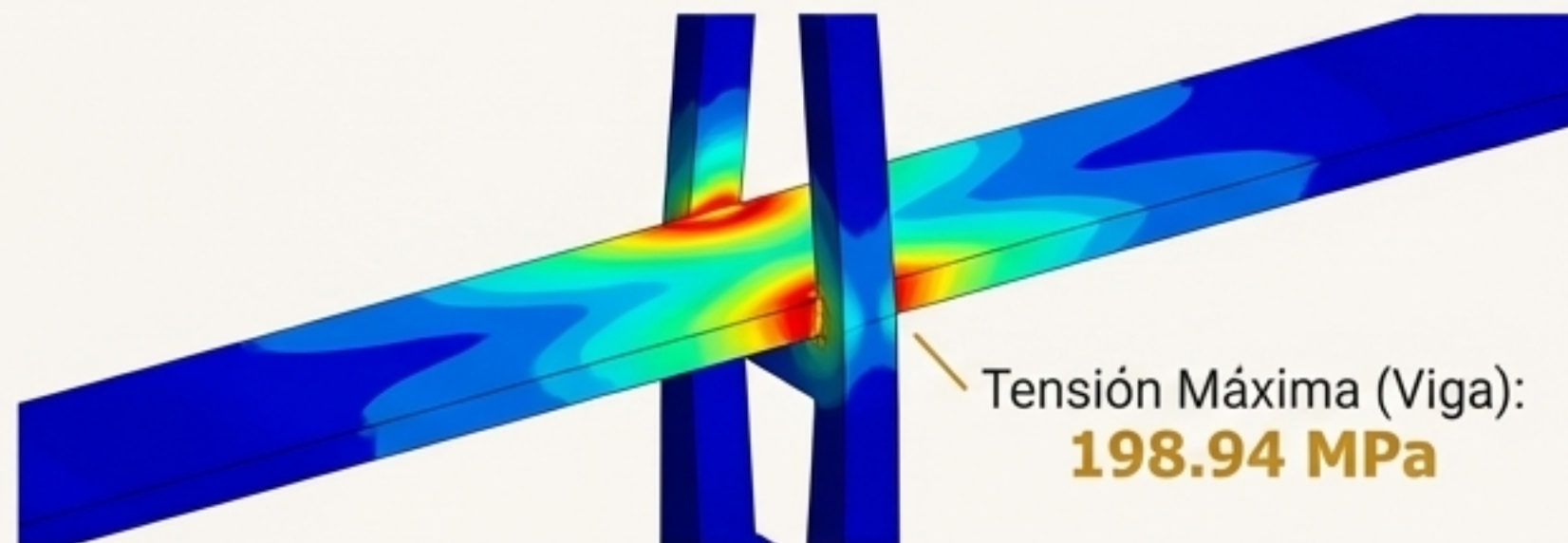
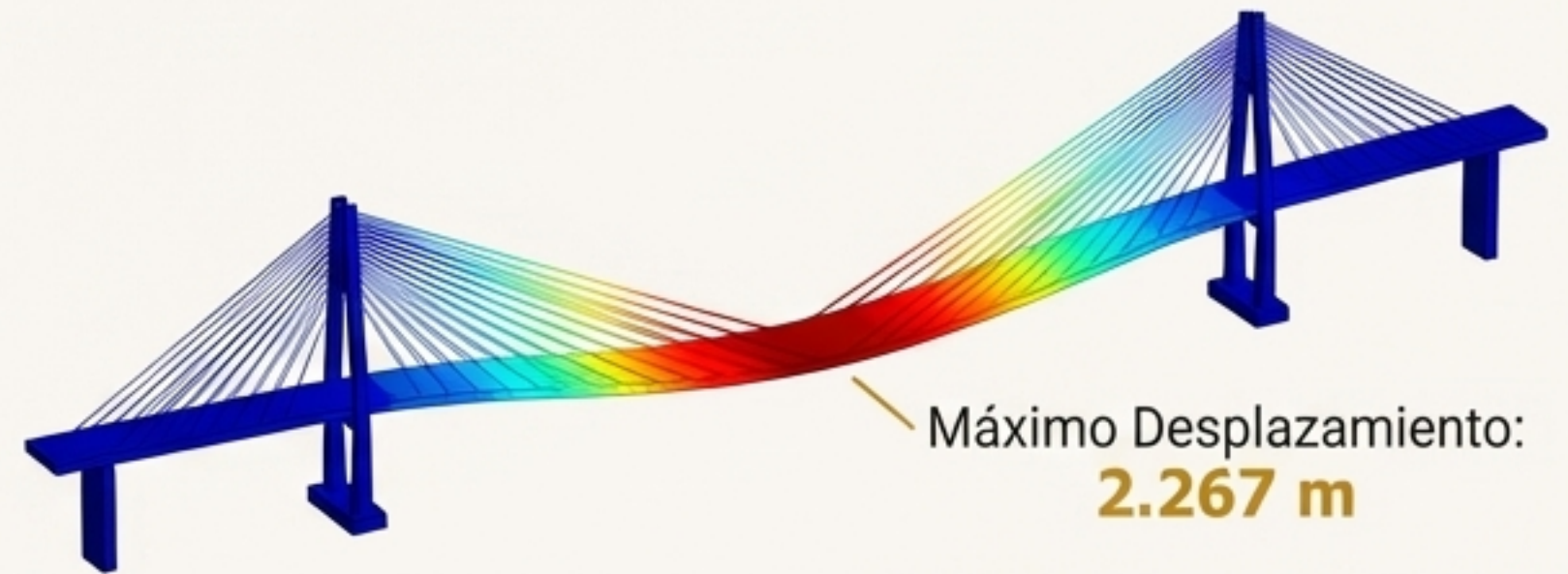
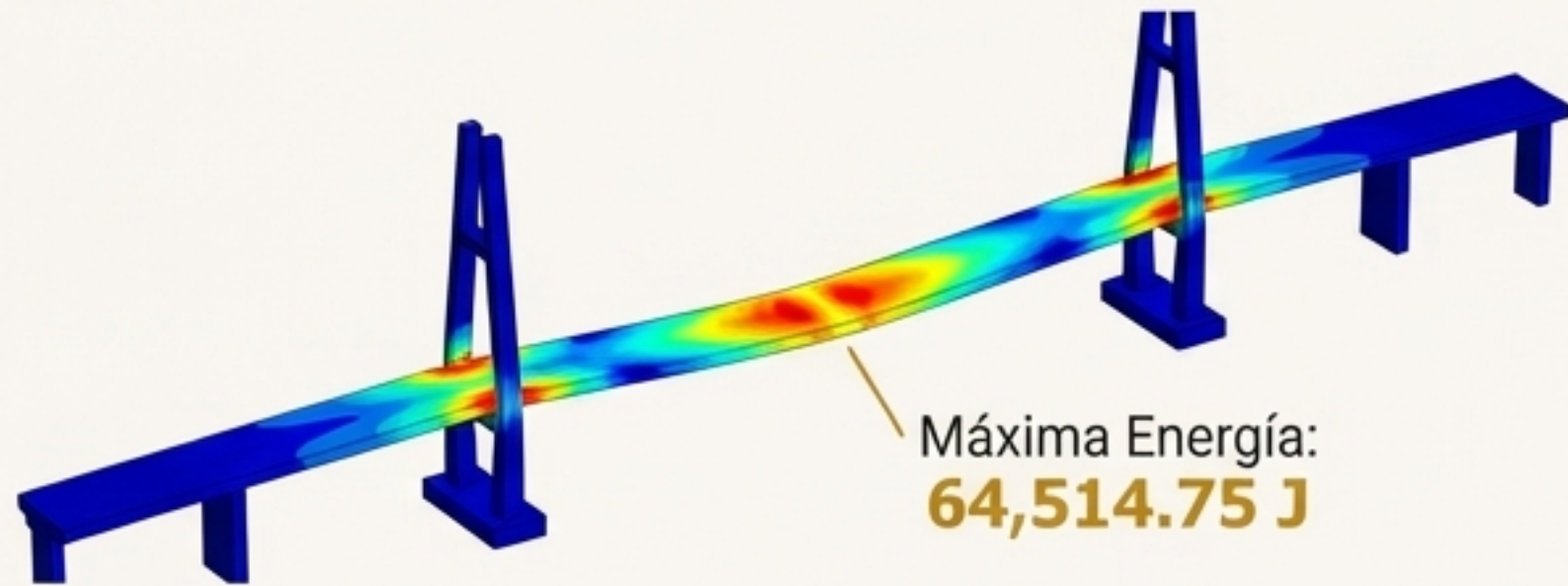
Malla (Mesh): **200,355 elementos** para garantizar la máxima precisión del análisis.

Cargas Aplicadas: Cargas de diseño según el código JTGD60-2015 (peso propio, cargas de carril, etc.).



La Simulación Revela los Puntos Críticos de Esfuerzo y Deformación

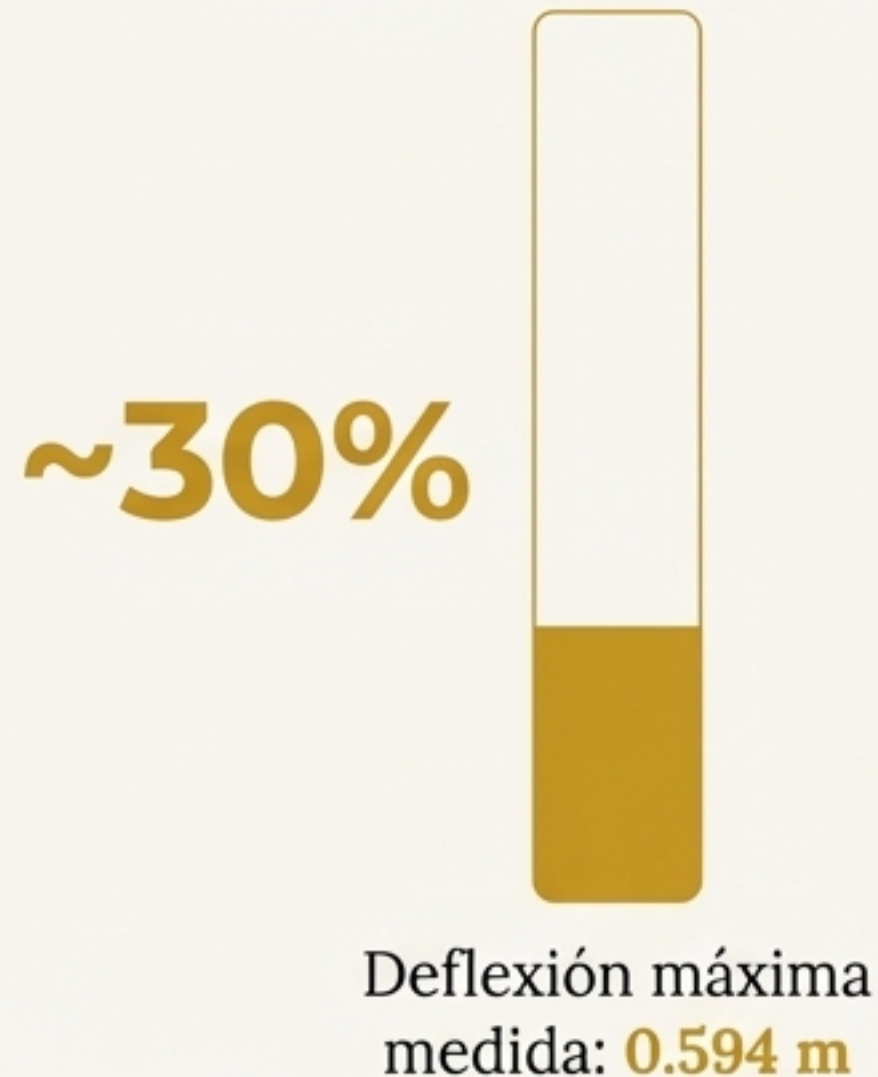
La simulación bajo cargas de diseño identificó las áreas de máxima energía de deformación, tensión y desplazamiento, concentradas principalmente en la losa de fondo de la viga principal y en los tirantes más largos cerca de la cima de las torres.



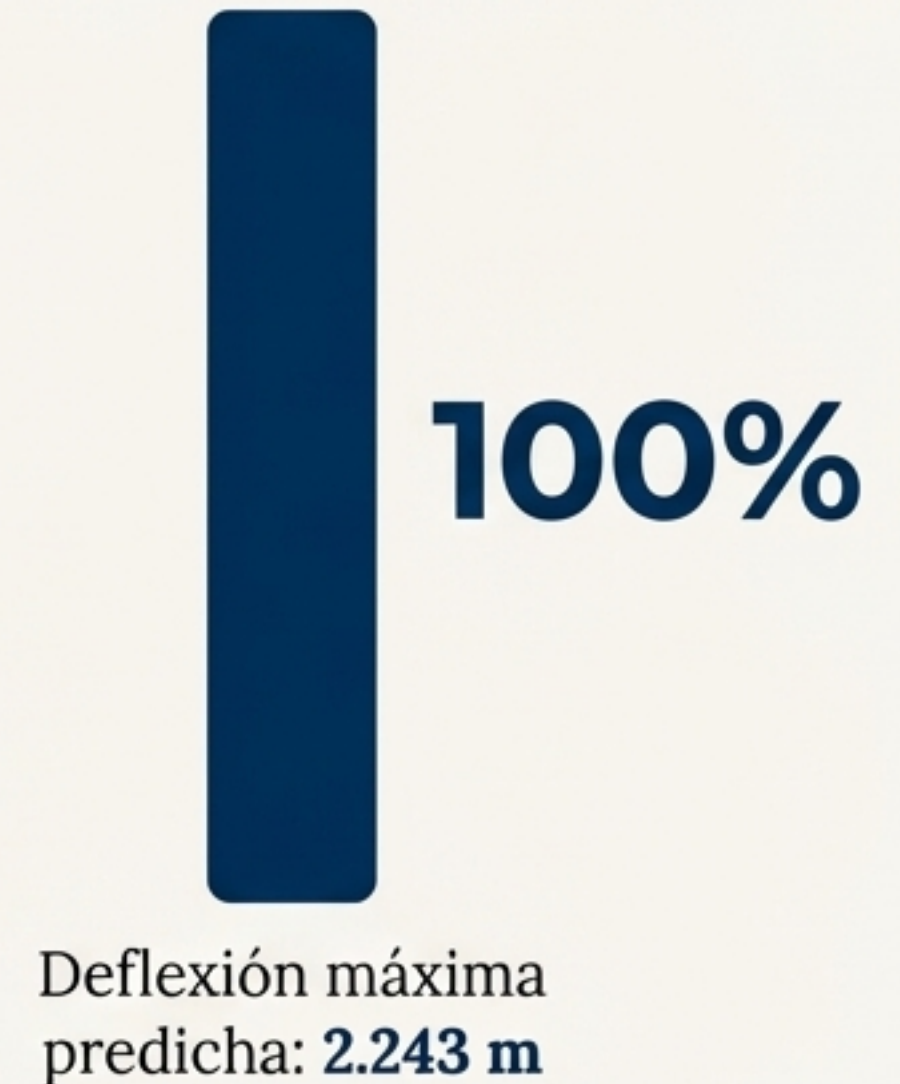
El Descubrimiento Clave: El Puente es Más Robusto de lo Previsto

Al comparar los datos de monitoreo del mundo real con la simulación FEM, surgió un hecho crucial: las tensiones y deflexiones reales bajo cargas operativas intensas representaron solo entre el 26.5% y el 33.9% de los valores máximos predichos por el diseño.

Datos Reales (Operación)



Predicción de Diseño (FEM)

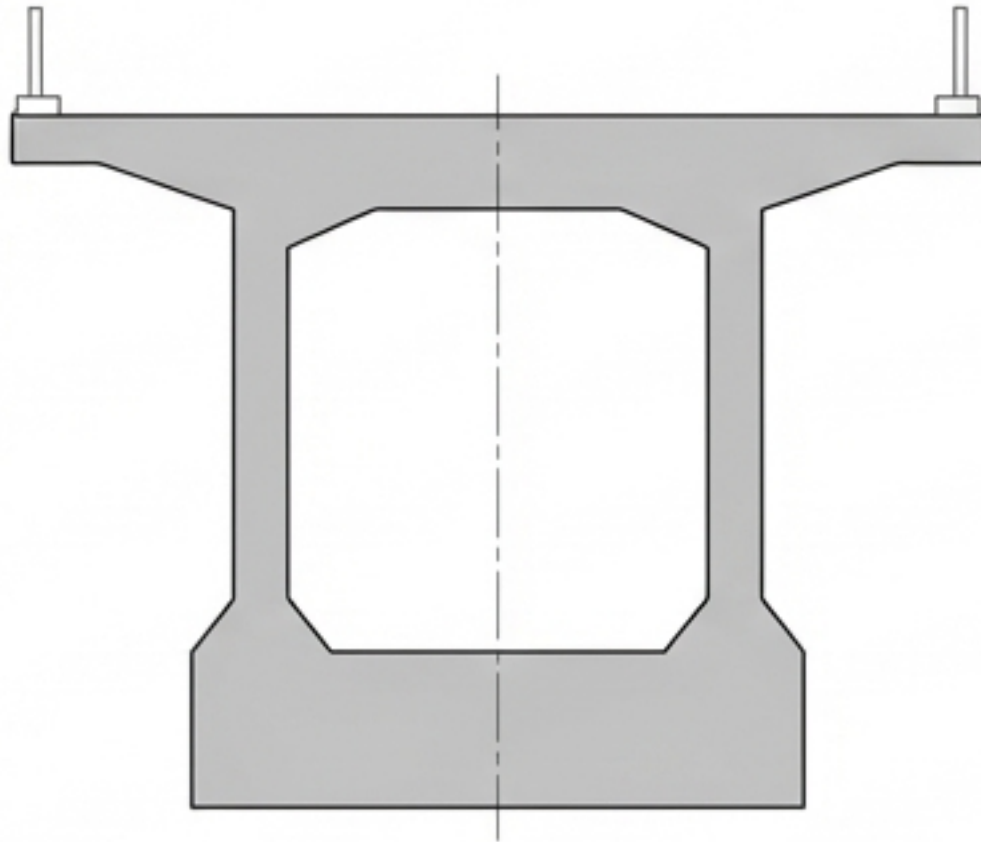


**El diseño es
excesivamente
conservador.**

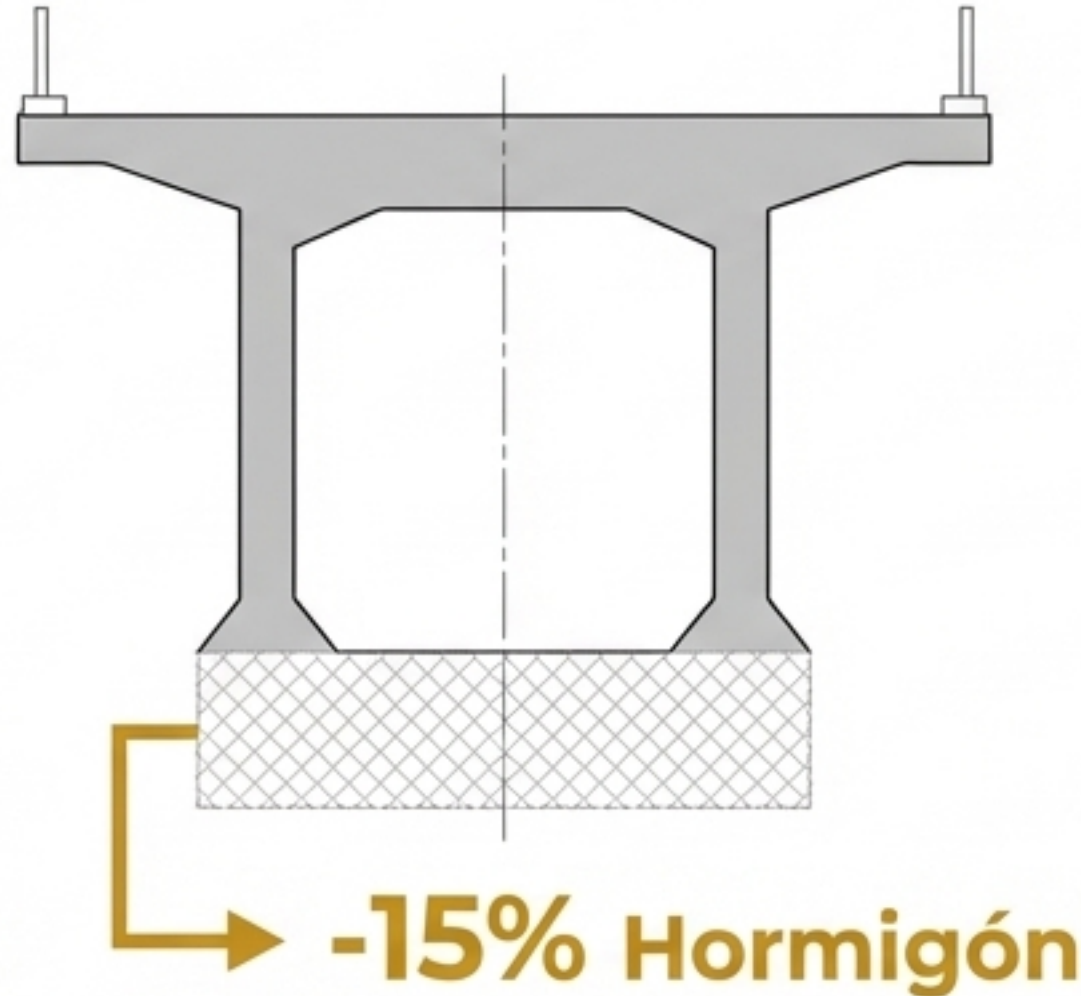
La Oportunidad: ¿Podemos Diseñar un Puente Más Inteligente y Eficiente?

Este descubrimiento permite una optimización del diseño basada en datos. Utilizamos el modelo validado para simular una reducción en el volumen de hormigón de la viga principal, específicamente en el espesor de la losa de fondo.

Diseño Original



Diseño Optimizado



Proceso de Optimización

1. **Objetivo:** “Reducir el volumen de hormigón (V) sin comprometer la seguridad.”
2. **Iteraciones:** “Se simularon reducciones progresivas ($0.9V$, $0.85V$) centradas en la losa de fondo.”
3. **Resultado:** “El modelo optimizado al 85% (**reducción del 15%**) cumplió con todos los requisitos de rendimiento de carga del diseño original.”

Los Beneficios: Ahorro Masivo de Costes y Emisiones sin Comprometer la Seguridad

El diseño optimizado, cuya seguridad ha sido verificada por nuestro modelo acoplado, reduce el hormigón de la viga principal en un 15%. Esto se traduce en ahorros masivos en costes e impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida del puente.



-15%

Hormigón en Viga Principal



-2,010 toneladas CO2
en emisiones GWP100a



-2.7 Millones CNY

en coste inicial de material



Seguridad Verificada

cumpliendo requisitos de diseño

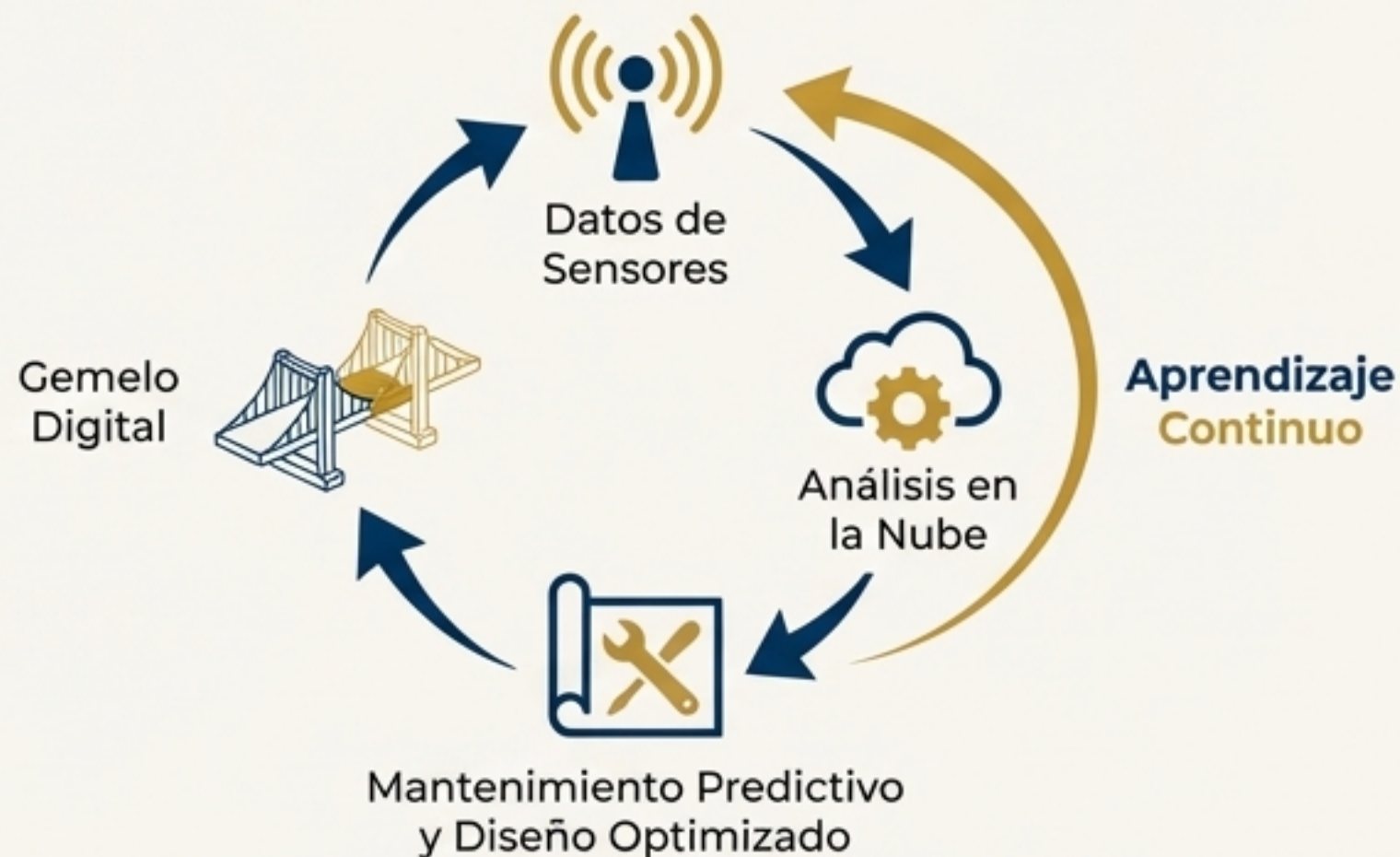
Un Nuevo Paradigma: De la Reacción a la Predicción Inteligente

Este trabajo demuestra un cambio fundamental: de una monitorización “basada en puntos, indirecta y reactiva” a un modelo “espacial, directo y predictivo”. Este enfoque inteligente garantiza la seguridad al tiempo que desbloquea una eficiencia sin precedentes en el diseño y el mantenimiento.

ANTES: Modelo Reactivo



AHORA: Modelo Predictivo



Conclusiones Clave y Contribuciones

- 1 Se desarrolló una **plataforma innovadora IoT+Cloud+FEM** para la monitorización continua y automatizada de la salud estructural (SHM).
- 2 Se **validó el sistema en un puente de clase mundial**, demostrando su precisión para capturar cargas reales y respuestas estructurales complejas.
- 3 Se reveló un **conservadurismo de diseño significativo**, identificando una gran oportunidad de optimización basada en datos reales de operación.
- 4 Se cuantificaron los sustanciales **beneficios económicos (ahorro de 2.7M CNY)** y **ambientales (reducción de 2,010t de CO₂)** de este enfoque.
- 5 Se propuso un **nuevo paradigma para el mantenimiento** de infraestructuras: pasar de un enfoque **reactivo** a uno **predictivo y optimizado**.

Autores y Contacto

Autores Principales

Zhiwu Zhou

Zhifeng Zhao

Julián Alcalá

Víctor Yepes

Afiliaciones

Hunan University of Science and Engineering, China

Guizhou University of Engineering Science, China

Institute of Concrete Science and Technology (ICITECH), Universitat Politècnica de València, Spain

Contacto

Correo electrónico: zhizh1@huse.edu.cn (Z. Zhou)

Agradecimientos y Financiación

Agradecimiento a: Grant [PID2023-150003OB-100](#), Xiang Ke University Doctoral Research Project [2023] No. 75, y Natural Science Foundation of Hunan Province, No. 2025JJ50288.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



湖南工程大學

Hunan University of Science and Engineering



Escanear para acceder
al artículo completo.