

# e-BrIM

MAYO 2026



## SUMARIO

- DISEÑO DEL PUENTE DEL DANUBIO EN MOHÁCS, HUNGRÍA** página 9  
*Gábor Pál, diseñador principal de puentes, fundador de SPECIÁLTERV*  
*Mihály Szabados, ingeniero jefe de estructuras de acero*  
*Norbert Mészáros, Ingeniero Estructural; SPECIÁLTERV*
- CONSTRUCCIÓN DE PUENTES DE CARRETERA: DEL DISEÑO A LA REALIDAD  
EXPERIENCIA PRÁCTICA DE AFRY CZ** página 25  
*Ing. Lukáš Zemek, Ing. Tomáš Kubín; Ing. Ondřej Klimeš, Ing. Martin Neradílek,*  
*Ing. Pavel Vlasák; AFRY CZ*
- FATIGA EN ESTRUCTURAS DE ACERO: EL NUEVO EUROCÓDIGO EN 1993-1-9:2025  
PARA PUENTES Y ESTRUCTURAS DE ACERO** página 37  
*Prof. Filippo Berto, profesor de Mecánica de Materiales, Universidad La Sapienza de Roma*  
*MSc. Ing. Alessandro Catanzano, CTO de Santo Engineering, Padua, Italia*
- CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA DE UN PUENTE DE CARRETERA:  
INTEGRACIÓN DIGITAL DEL DISEÑO, LA FABRICACIÓN Y EL MONTAJE** página 46  
*Gitae Roh, postdoctorado; Changsu Shim, Profesor, Universidad Chung-Ang*  
*Hyunmin Kim, BasisSoft; Daeho Jang, Universidad Cheongju; Corea del Sur*
- ENTREVISTA A HÉCTOR BERNARDO, COO, PONTEM ENGINEERING, ESPAÑA** página 54  
*Antonio Caballero, Magdaléna Sobotková*

**Portada:** Puente del Danubio en Mohács, Hungría

**Contraportada:** Puentes de carretera

**Créditos:** SPECIÁLTERV

**Créditos:** AFRY

REVISTA INTERNACIONAL INTERACTIVA REVISADA  
SOBRE MODELADO DE INFORMACIÓN DE PUENTES

Se publica en [www.e-brim.com](http://www.e-brim.com) en inglés  
y en [www.e-brim.com/es](http://www.e-brim.com/es) en español. Acceso abierto.

Fecha de publicación:  
20 de febrero, 20 de mayo y 20 de octubre.

Número: 02/2026, mayo. Año: V.

Editora jefa: Magdaléna Sobotková, MSc.

Contacto: [magda@e-mosty.cz](mailto:magda@e-mosty.cz)

[Consejo editorial](#)

Editor: BRIDGES ONLINE, s.r.o. (Ltd.)  
Velká Hraštica 112, 262 03 República Checa  
Número de identificación fiscal: CZ02577933

**ISSN:** 3029-8555

©Todos los derechos reservados. Por favor, respete los derechos de autor. Cuando haga referencia a cualquier información contenida en este documento, utilice el título de la revista «e-BrIM», el volumen, el autor y la página.

En caso de duda, póngase en contacto con nosotros. Gracias.

Estimados lectores

En el primer artículo, los autores presentan el diseño del **punto sobre el Danubio en Mohács**, Hungría. El modelado de los arcos y las conexiones de los tirantes en la estructura del tablero se realizó íntegramente con Rhino y Grasshopper. El diseño paramétrico resultó de gran ayuda para modelar con precisión los elementos estructurales curvos y optimizar la distribución de determinados elementos.

El segundo artículo presenta una selección de proyectos que ilustran la aplicación **del diseño paramétrico y el modelado digital en las infraestructuras checas**.

El tercer artículo presenta las reflexiones y consideraciones de los autores sobre la fatiga en estructuras de acero en relación con el nuevo **Eurocódigo sobre fatiga**.

El siguiente artículo expone un **objetivo sistémico**: integrar el diseño, la fabricación y el montaje en un flujo de trabajo unificado y basado en datos. También hace hincapié en la interoperabilidad de la información a lo largo del ciclo de vida, el intercambio fluido de datos entre las partes interesadas y la optimización de los procesos de fabricación

En nuestra **entrevista a Héctor Bernardo**, de Pontem Engineering, hablamos, entre otras cosas, del nuevo Boletín de la fib, un documento de buenas prácticas titulado «BIM en la construcción», del uso del BIM en el sector de los puentes y de las tecnologías emergentes, incluida la IA.

Me gustaría dar las gracias a **todas las personas y empresas** que han colaborado en este número y me han ayudado a elaborarlo; muchas gracias a los miembros del **Consejo Editorial** y a **Borja Balbastre Camarena, Carla Ody Julian y David Herrero Mediavilla** por su ayuda con las revisiones lingüísticas.

También nos gustaría dar las gracias a **nuestros socios por su apoyo**.

En nombre de los organizadores, nos gustaría invitarles a las siguientes conferencias:

- Conferencia Internacional **SISMICA S&G 2026** sobre Ingeniería Estructural y Geotécnica, que se celebrará en línea del 18 al 20 de junio de 2026. La conferencia será bilingüe (inglés/español).
- 13.<sup>a</sup> Conferencia Internacional sobre Mantenimiento, Seguridad y Gestión de Puentes, **IABMAS**, que se celebrará del 7 al 9 de julio de 2026 en Orlando, Florida, EE. UU.
- Conferencia Mundial de Ingeniería de Puentes 2026 (WBE), centrada en las tecnologías innovadoras para puentes y la construcción acelerada de puentes, que tendrá lugar los días 1 y 2 de diciembre de 2026 en Miami, Florida, EE. UU. Para obtener más información, póngase en contacto con el presidente de la conferencia, el **Dr. Atorod Azizinamini**.

El próximo número de e-BrIM, tanto en inglés como en español, se publicará el 20 de octubre.

Aceptamos artículos para la revista e-BrIM, tanto en inglés como en español. Póngase en contacto conmigo en [magda@e-mosty.cz](mailto:magda@e-mosty.cz). Puede encontrar **las instrucciones para autores** en nuestros sitios web, [www.e-brim.com](http://www.e-brim.com) y [www.e-brim.com/es](http://www.e-brim.com/es).

Magdaléna Sobotková, MSc.

Chief Editor



# e-BrIM



SUBSCRIBIRSE

La revista **e-BrIM** es una publicación internacional, interactiva, revisada por expertos independientes sobre modelado de información de puentes.

Se publica en [www.e-brim.com](http://www.e-brim.com) en inglés y en [www.e-brim.com/es](http://www.e-brim.com/es) en español, y se puede leer de forma gratuita (acceso abierto), con posibilidad de suscribirse.

Generalmente, se publica tres veces al año: el 20 de febrero, el 20 de mayo y el 20 de octubre.

Las revistas permanecen disponibles **en línea en nuestro sitio web** en formato PDF.

La revista ofrece **artículos originales** sobre **tecnología digital aplicada a puentes**, desde la planificación inicial hasta la operación y el mantenimiento, **innovaciones teóricas y prácticas, estudios de casos** y muchos otros contenidos internacionales.

Su formato electrónico permite publicar fotos, vídeos, planos, modelos 3D, enlaces y otros contenidos en alta calidad.

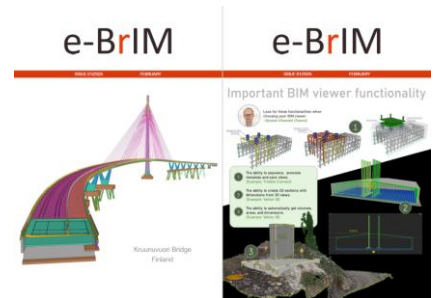
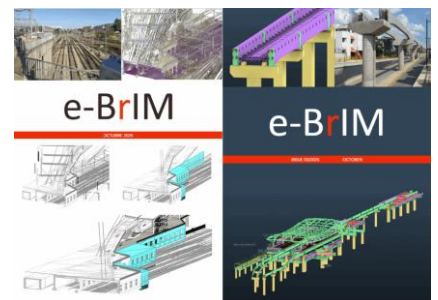
Nuestro objetivo es incluir toda la información **importante y técnica**, compartir la **teoría y la práctica, conocimientos y experiencia** y, al mismo tiempo, mostrar la elegancia y la belleza de las estructuras.

Nos complace ofrecer apoyo mediático a conferencias relevantes sobre BIM y puentes, así como a actividades educativas, proyectos benéficos, publicaciones, etc.

Nuestro **Consejo Editorial** está compuesto por especialistas en BIM y puentes e ingenieros del ámbito académico, de la investigación y empresarial, así como de la industria de los puentes.

La revista está dirigida principalmente a ingenieros especializados en puentes, diseñadores, promotores, contratistas, especialistas en BIM, docentes universitarios, estudiantes o simplemente cualquier persona apasionada por los puentes.

## NUESTRAS ÚLTIMAS EDICIONES



NUESTROS SOCIOS



COOPERAMOS CON



# e-mosty



SUBSCRIBIRSE

NUESTRAS ÚLTIMAS EDICIONES  
(EN INGLÉS)

La revista **e-mosty** (“e-puentes”) es una publicación internacional, interactiva, revisada por expertos independientes sobre puentes.

Se publica en [www.e-mosty.cz](http://www.e-mosty.cz) y se puede leer de forma gratuita (acceso abierto), con posibilidad de suscribirse.

Se publica trimestralmente: el 20 de marzo, el 20 de junio, el 20 de septiembre y el 20 de diciembre.

Las revistas permanecen disponibles **en línea en nuestro sitio web** en formato PDF.

La revista ofrece **artículos originales sobre puentes e ingenieros de puentes** y muchos otros contenidos internacionales.

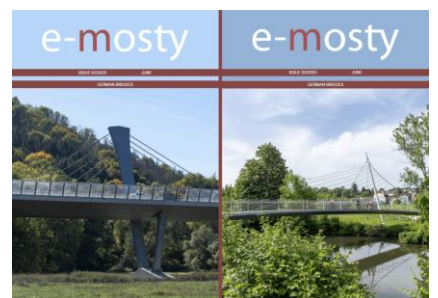
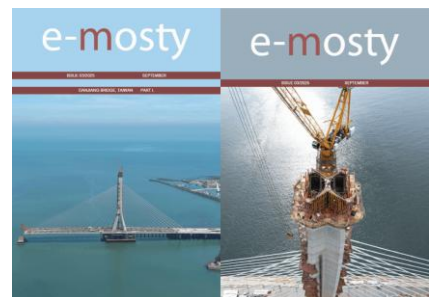
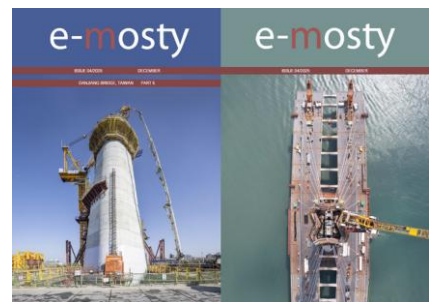
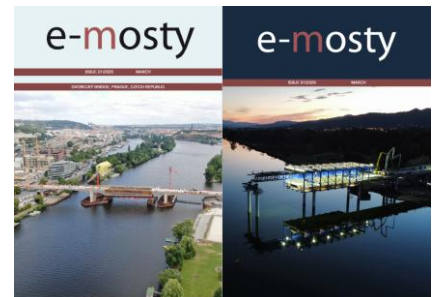
Su formato electrónico permite publicar fotos, vídeos, planos, modelos 3D, enlaces y otros contenidos en alta calidad.

Nuestro objetivo es incluir toda la información **importante y técnica** y, al mismo tiempo, mostrar la elegancia y la belleza de las estructuras.

Nos complace ofrecer apoyo mediático a importantes conferencias de puentes, actividades educativas, proyectos benéficos, libros, etc.

Nuestro **Consejo Editorial** está compuesto por ingenieros de puentes y expertos principalmente del Reino Unido, Estados Unidos y Australia.

La revista está dirigida principalmente a ingenieros especializados en puentes, diseñadores, promotores, contratistas, especialistas en BIM, docentes universitarios, estudiantes o simplemente cualquier persona apasionada por los puentes.



e-mosty

NUESTROS SOCIOS



COOPERAMOS CON





DIPLOMADO ESPECIALIZADO

# Diseño y Construcción de Puentes de Hormigón Armado y Presforzado

- Aplicación de normativas internacionales: AASHTO, ASCE, ACI. Documentos técnicos PCI y FHWA.
- Diseño detallado de tableros, vigas presforzadas, cabezales y pilas.
- Análisis y verificación del presfuerzo: tensiones en etapas constructivas, transferencia, flechas y contraflechas.
- Diseño sismorresistente considerando métodos basados en fuerza y en desplazamiento.
- Diseño de cimentaciones y estribos de puentes.
- Incorporación de fenómenos de Interacción Suelo-Estructura (ISE) en el diseño de puentes.
- Diseño de sistemas de aislamiento sísmico y control de fenómenos de vibración y resonancia.
- Control de procesos de fabricación, construcción y montaje.



# DISEÑO DEL PUENTE DEL DANUBIO EN MOHÁCS, HUNGRÍA

*Gábor Pál, diseñador principal de puentes, fundador de SPECIÁLTERV*  
*Mihály Szabados, ingeniero jefe de estructuras de acero*  
*Norbert Mészáros, Ingeniero Estructural*  
*SPECIÁLTERV*



Figura 1: Modelo 3D del Puente del Danubio en Mohács

Fuente: SPECIÁLTERV

## ACERCA DEL PROYECTO

El diseño del puente Mohács sobre el Danubio y la red vial asociada comenzó en 2019. El principal diseñador del proyecto vial, de aproximadamente 30 km de longitud, es SPECIÁLTERV, mientras que el puente sobre el río Danubio es una creación conjunta de SPECIÁLTERV y FŐMTERV.

El nuevo puente sobre el Danubio, con una longitud total de 756 m, se construye como una serie de tres puentes de arco consecutivos. La coordinación completa del diseño del proyecto y el diseño completo de dos estructuras de arco, cada una con vanos de 230 m y 250 m, fueron realizados por SPECIÁLTERV. Los planos de aprobación, ejecución y fabricación para la estructura de 270 m de vano fueron elaborados por FŐMTERV.

Los principios de diseño estructural son idénticos, con mínimas variaciones en la geometría y el sistema estructural de los tres arcos, adaptados a las dimensiones y los requisitos tecnológicos de cada unidad. Durante el proceso de diseño, ambos estudios colaboraron estrechamente y las principales decisiones conceptuales y de detalle se tomaron de forma conjunta.

La tecnología constructiva varía para cada unidad debido a las condiciones del terreno y las circunstancias de montaje. Independientemente de las tecnologías constructivas empleadas, el puente se concibe como un sistema estructural unificado, con diversas subunidades que encajan de forma integrada. La licitación de construcción, basada en los planos de diseño detallados, fue adjudicada a Duna Aszfalt Co.

## CONTEXTO

La región de Mohács, en el sur de Hungría, lleva mucho tiempo esperando la construcción de un puente permanente que conecte de forma continua las dos orillas del Danubio. El proyecto incluye aproximadamente 30 km de carretera, así como 17 estructuras de puentes adicionales.

El diseño del puente del Danubio fue una tarea sumamente compleja: cruza uno de los ríos con mas caudal de Europa y una reserva natural protegida en una llanura aluvial, lo que hizo que una planificación meticulosa fuera esencial. El modelado BIM fue fundamental para garantizar el cumplimiento de todas las normativas y estándares, dando como resultado un hito arquitectónico que se integra armoniosamente en el entorno. El modelado BIM no solo acortó significativamente el proceso de diseño, sino que también proporcionó una plataforma clara y transparente para todas las partes interesadas, asegurando que el resultado final cumpliera con las expectativas tanto de los diseñadores como de los clientes.

La construcción del puente del Danubio comenzó en 2024 con la preparación de las zonas de montaje de la estructura de acero y el hincado de los elementos de la subestructura, que actualmente se encuentra en marcha, junto con la fabricación de las superestructuras de acero.

El montaje in situ comenzó en mayo de 2025 y se prevé que la construcción dure 3 años.

## CONCEPTO

El puente del Danubio consta de tres estructuras de puente con sistemas estructurales idénticos, pero con diferentes longitudes de vano, dispuestas como una serie de tramos simplemente apoyados.

**Sistema estructural:** puente de arco de acero de tipo pasante, simplemente apoyado, con vigas y arcos de refuerzo de sección cajón cerrada y tablero ortotrópico de acero. La estructura está suspendida por un sistema de tirantes de red de doble cara. Las longitudes de los tramos de los tres arcos son de 270 m, 250 m y 230 m, respectivamente. El pilar fluvial se ubica en el lado interior de la curva del río, lo que proporciona una posición hidráulicamente favorable, permitiendo así la correcta alineación del canal de navegación de 180 m de ancho.

Los arcos están inclinados entre sí con un ángulo de 13° respecto a la vertical. La sección transversal del arco tiene 1,6 m de profundidad y 1,6 m de ancho en el centro, aumentando la profundidad uniformemente hacia el tablero hasta alcanzar aproximadamente 3,0 m en el punto más bajo. Los dos arcos están conectados por un sistema de arriostamiento en X que se cruza, lo que confiere un carácter historicista a la estructura del puente, construida cerca del entorno urbano histórico.

↓ *Figura 2: Visualización del Puente del Danubio en Mohács*  
Fuente: *SPECIÁLTERV*



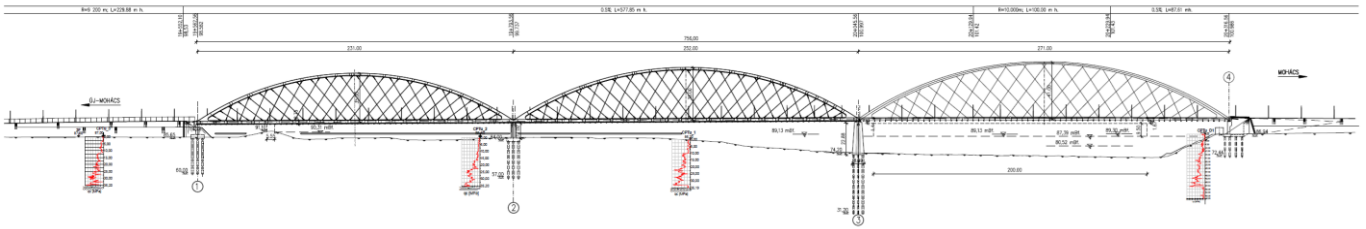


Figura 3: Vista lateral general

Fuente: SPECIÁLTERV

[Haz clic en la imagen para abrirla en mayor resolución](#)

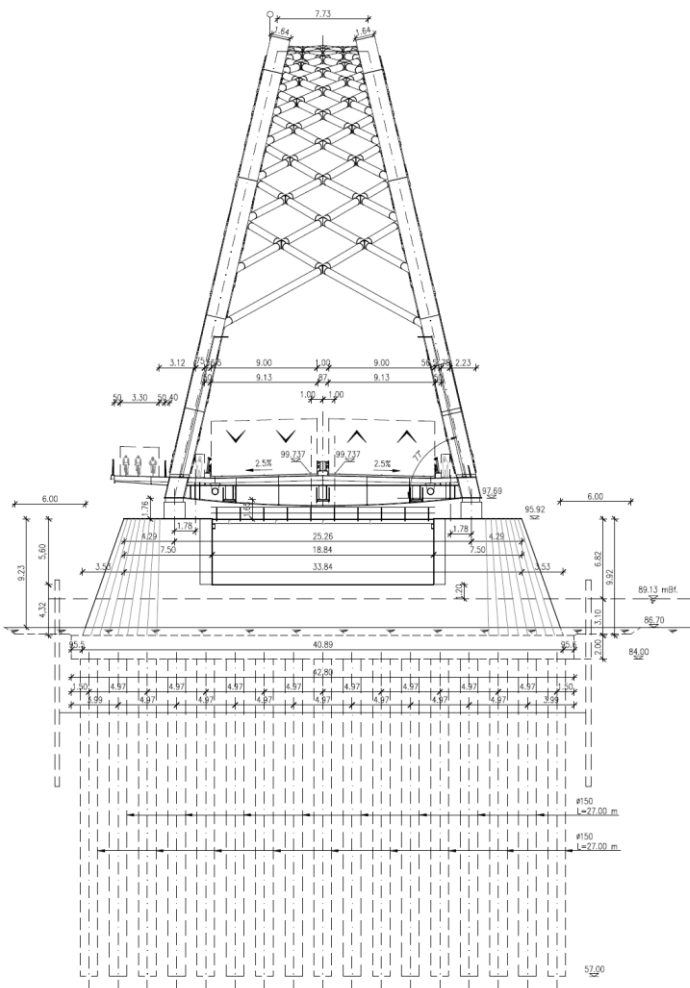


Figura 4: Vista de soporte

Fuente: SPECIÁLTERV

## PUENTE EN NÚMEROS

Longitud:	756 m
Longitud de los arcos:	230.0+250.0+270.0 m
Ancho:	31.56 m
Acero estructural:	15 000 toneladas

Los elementos estructurales esbeltos ofrecen ventajas estéticas. El menor peso estructural beneficia tanto a las subestructuras como a las obras provisionales durante la construcción. La menor superficie pintable reduce significativamente tanto los costes iniciales de protección contra la corrosión como los de mantenimiento a largo plazo.

## DISPOSICIÓN GENERAL

El puente tiene un ancho de 31,56 m y consta de un carril bici de 3,30 m de ancho y dos carriles de circulación para vehículos. La altura estructural de la superestructura de acero es de 2,73 m.

Los arcos de 1,60 m de ancho y las vigas cajón de diferentes dimensiones están conectados por tubos de acero dispuestos en una red, similar al sistema de suspensión. Las vigas de rigidización de los arcos tienen 1,64 m de ancho y 1,80 m de alto, y están conectadas por travesaños abiertos en forma de "I".

El ala inferior de las vigas transversales tiene un perfil curvado hacia abajo.

## PARTICIPANTES DEL PROYECTO

Cliente	Ministerio de Construcción y Transporte
Contratista:	DUNA Aszfalt
Diseñador principal/general	SPECIÁLTERV LTD.
Diseñador de estructuras B1 y B2	SPECIÁLTERV LTD.
Diseñador de la estructura B3	FÓMTERV
Estudios hidrológicos del Danubio y Diseño de monitoreo remoto	Universidad Técnica de Budapest

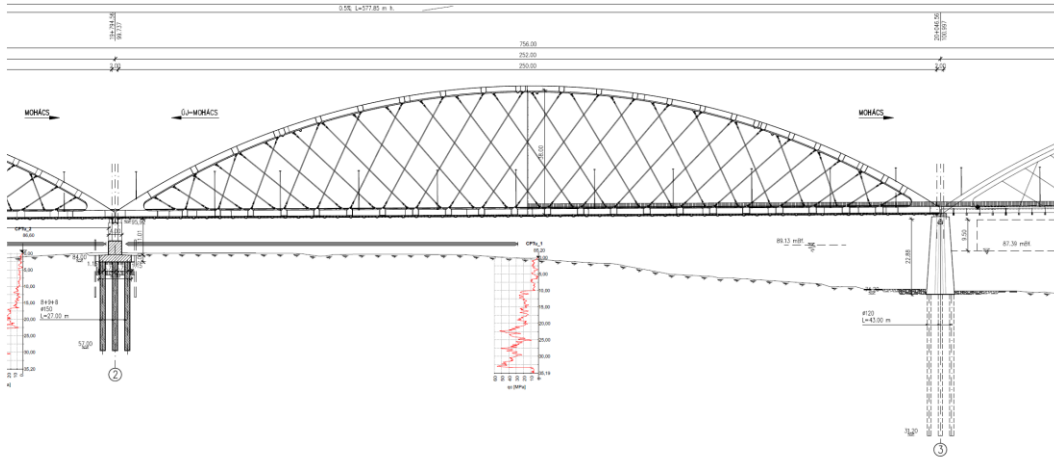


Figura 5: Disposición general del puente B2 - vista lateral Fuente: SPECIÁLTERV

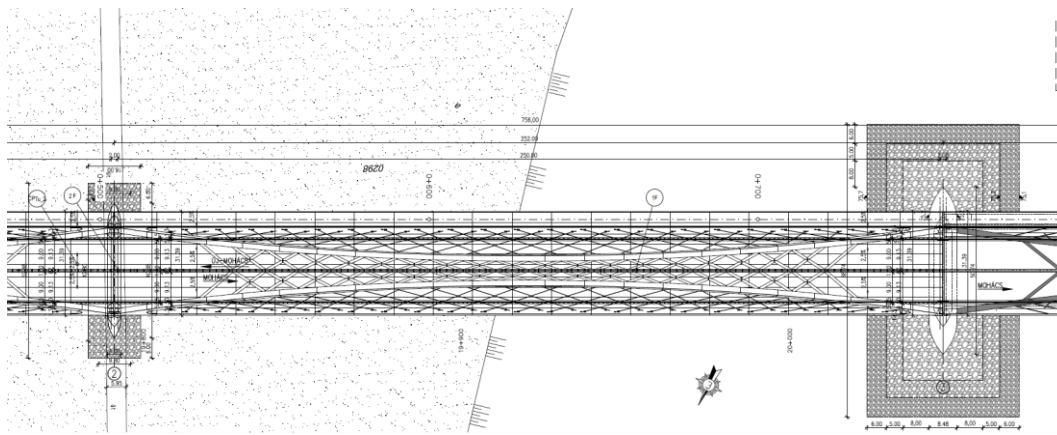


Figura 6: Disposición general del puente B2 - vista superior Fuente: SPECIÁLTERV

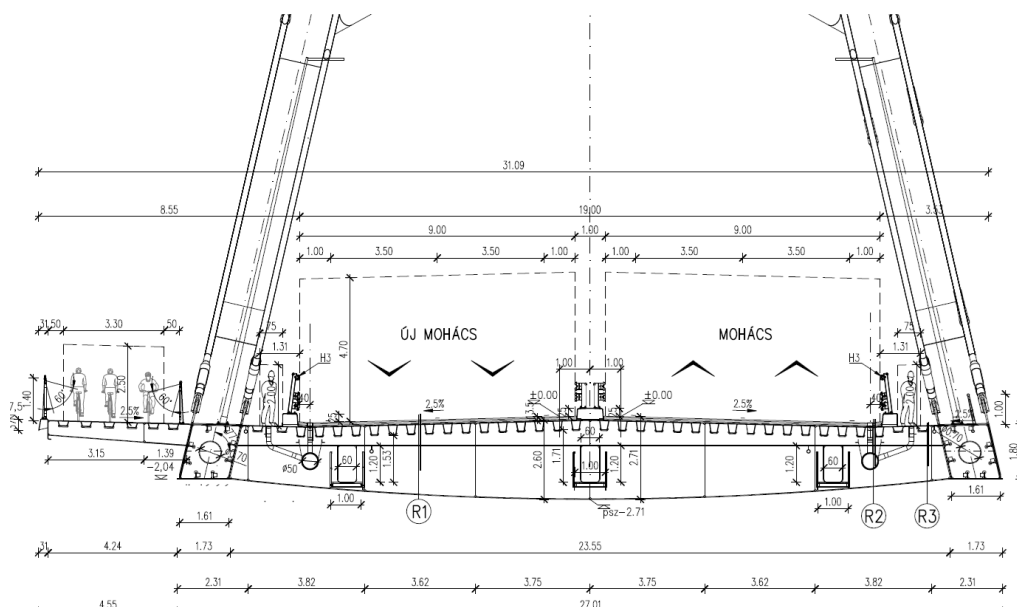


Figura 7: Disposición general del puente B2 - sección transversal Fuente: SPECIÁLTERV

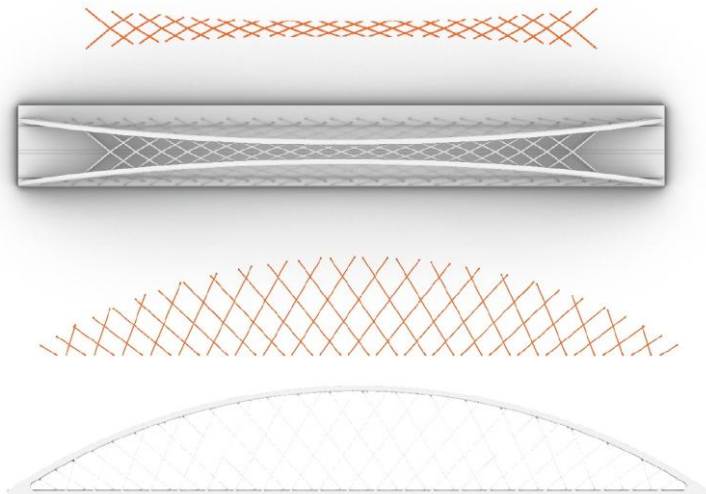
Las vigas de refuerzo son secciones de cajón cerradas, herméticas y no transitables, de 1,80 m de profundidad, diseñadas para impedir la entrada de humedad y oxígeno al interior de la estructura, eliminando así dos de las condiciones esenciales para la corrosión.

Tres pasarelas de mantenimiento discurren bajo la cubierta, eliminando la necesidad de un pórtico de inspección.

## Superestructura de acero

La estructura de acero se ensambla a partir de unidades de fabricación y montaje. Además del tablero ortotrópico "clásico", se incorporan varios miles de toneladas de elementos de sección cajón cerrada como componentes tanto de las vigas de rigidización como de los arcos.

Estas vigas cajón están fabricadas con soldaduras herméticas y una configuración totalmente sellada. Los dos arcos están interconectados por un sistema de arriostramiento en forma de X, que confiere un carácter historicista a la estructura del puente, construida en proximidad al entorno urbano histórico.

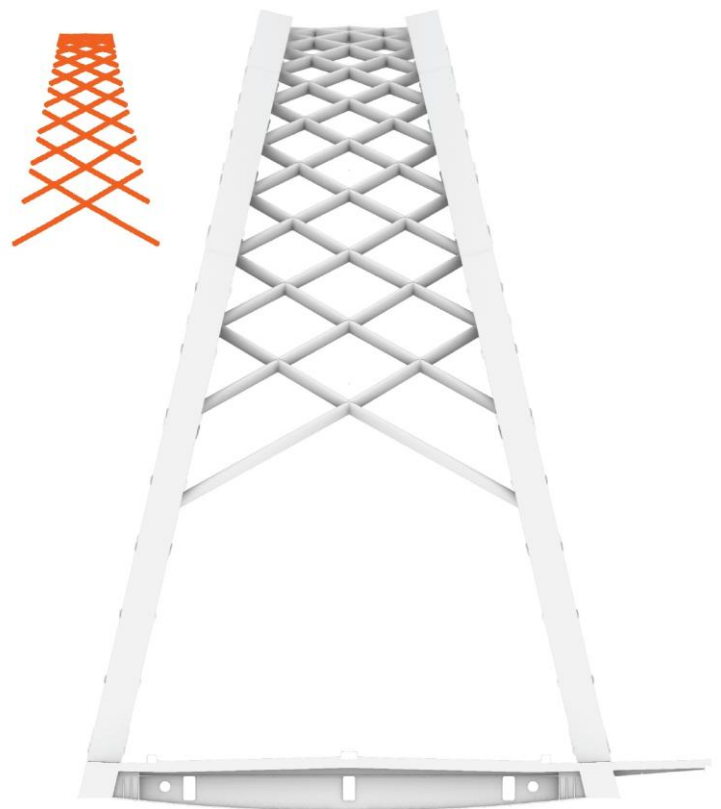


## Travesaños

En el arriostramiento transversal del arco, se adoptó una disposición que reproduce visualmente el patrón de los cables de suspensión, lo que resulta en una apariencia estética y distintiva. Sin embargo, esta configuración supuso un importante desafío de diseño, ya que la escasa inclinación de las conexiones generó considerables fuerzas en los elementos de arriostramiento transversal debido a la compresión axial en los arcos.

## Disposición de cables

La superestructura es un puente de arco de acero con una viga de rigidización suspendida por una red de cables de suspensión, una tipología estructural que se ha adoptado ampliamente en la práctica internacional durante las últimas décadas.



*Figura 8: La configuración del cableado de red y las vigas transversales de la red le dan al puente una apariencia única  
Fuente: SPECIÁLTERV*

Los tirantes inclinados situados en el plano del arco distribuyen eficazmente las cargas vivas concentradas a lo largo del puente.

Como resultado, se reducen los momentos flectores tanto en los arcos como en las vigas de rigidización, lo que permite el uso de secciones transversales más esbeltas.

## DISEÑO PARAMÉTRICO

El modelado de los arcos y las conexiones de suspensión en la estructura de la cubierta se realizó íntegramente con los programas Rhino y Grasshopper. El diseño paramétrico fue de gran ayuda para modelar con precisión los elementos estructurales curvos y optimizar la distribución de ciertos elementos. La integración de Grasshopper y Rhinoceros en el proceso de diseño facilitó tanto el diseño como el modelado.

El diseño de fabricación de las estructuras de arco se desarrolló considerando simultáneamente múltiples criterios. Los requisitos estructurales, geométricos, de fabricación y de montaje se incorporaron al diseño mediante una estrecha colaboración entre diseñadores, fabricantes y contratistas.

Los arcos de los puentes de llanura aluvial siguen principios de diseño idénticos, pero difieren en su geometría. La inclinación es uniformemente de  $13^\circ$  con respecto a la vertical. La estructura del arco es una sección de cajón cerrado con sección transversal rectangular de ancho constante y profundidad variable.

En el plano inclinado, la curvatura de las alas superior e inferior varía debido al aumento de la profundidad estructural desde el centro del vano hacia los apoyos, así como a las diferentes longitudes de vano y alturas de cada puente. Los sistemas de arriostramiento de conexión también presentan ligeras variaciones, adaptándose a las respectivas geometrías de los arcos.

Al definir los parámetros variables (por ejemplo, longitud del tramo, altura del arco, dimensiones de la sección transversal, diámetro del cable, separación entre cables), se puede generar fácilmente un modelo base.

→ Figura 12: Modelo paramétrico y de Tekla de conexiones de colgadores  
Fuente: SPECIÁLTERV



Figura 9: Detalle paramétrico del puente B2 basado en Grasshopper  
Fuente: SPECIÁLTERV

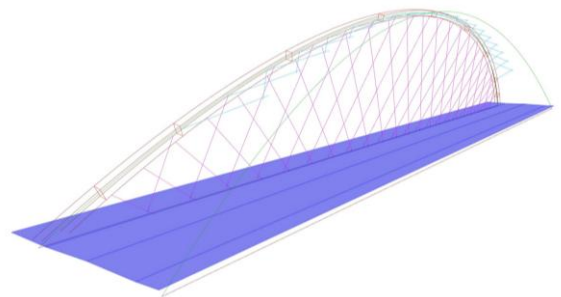


Figura 10: Esqueleto paramétrico del puente B2  
Fuente: SPECIÁLTERV

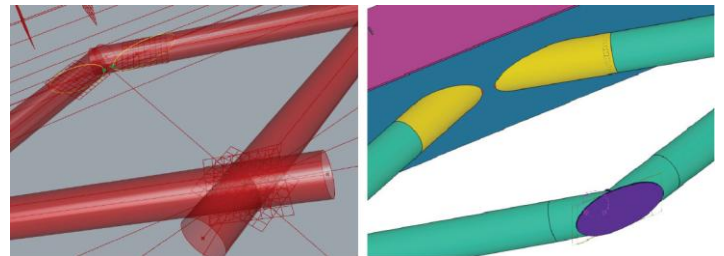
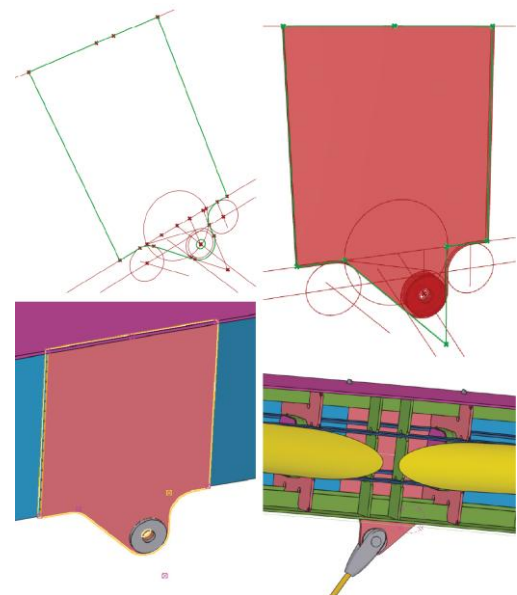


Figura 11: Modelo paramétrico y Tekla del arriostramiento transversal del arco  
Fuente: SPECIÁLTERV





Animación de  
modelos BIM

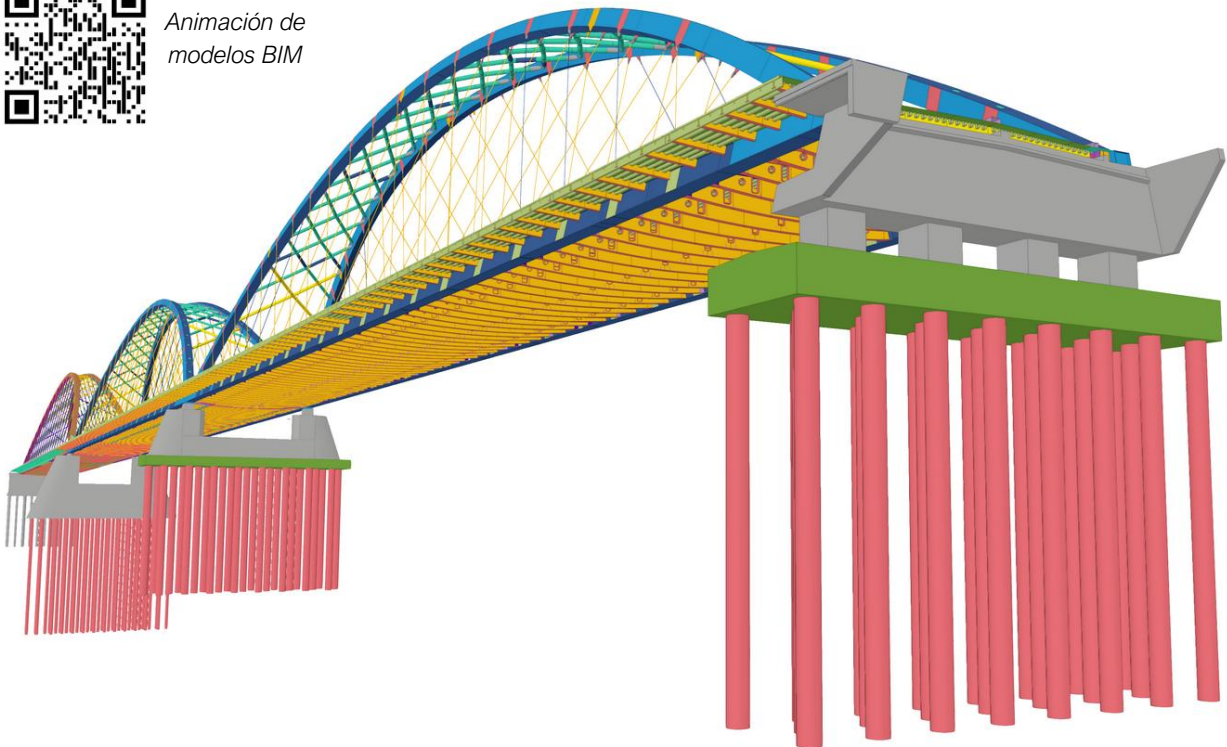


Figura 13: La estructura consta de 3 arcos consecutivos, diseñados completamente con herramientas paramétricas y BIM.  
Fuente: SPECIÁLTERV

Esto permite el desarrollo rápido de geometrías alternativas que reflejen las iteraciones de diseño o los parámetros de otras estructuras de puentes. Sin embargo, un modelo 3D basado en estructuras alámbricas o superficies no es suficiente para la elaboración de planos de fabricación. Los modelos de fabricación detallados se desarrollaron utilizando Tekla Structures. Mediante una interfaz directa entre Grasshopper y Tekla, el modelo estructural de acero se genera algorítmicamente de forma controlada.

## MODELO TEKLA ESPECÍFICO DEL PROYECTO JERARQUÍA

Los modelos para las superestructuras y los elementos estructurales auxiliares de los puentes “B1” y “B2” fueron creados por SPECIÁLTERV, mientras que el modelo para la superestructura del puente “B3” fue preparado por FÓMTERV. La cooperación implicó el intercambio continuo de los modelos e información en desarrollo.

Fue necesario establecer una jerarquía para la estructura de los modelos. Los componentes principales de las superestructuras del puente son la estructura del tablero y el soporte del arco.

Estos elementos estructurales se subdividieron en unidades considerando la tecnología de construcción y fabricación, así como las condiciones estructurales.

El tablero del puente “B1” consta de 13 unidades de ensamblaje, mientras que el puente “B2” consta de 14 unidades de ensamblaje. El soporte del arco de cada puente está dividido en 10 unidades de ensamblaje.

Las unidades de ensamblaje para el soporte del arco y la plataforma también se dividieron en varios subconjuntos (unidades de fabricación). Los aspectos principales para su división fueron el peso neto de las unidades de fabricación y sus dimensiones máximas.

Para organizar los modelos Tekla de la superestructura, fue necesario considerar los requisitos de las tecnologías de fabricación y construcción.

Tanto las unidades de fabricación como las ensambladas en obra requieren múltiples niveles de ensamblaje en el modelo para una rápida extracción de datos.

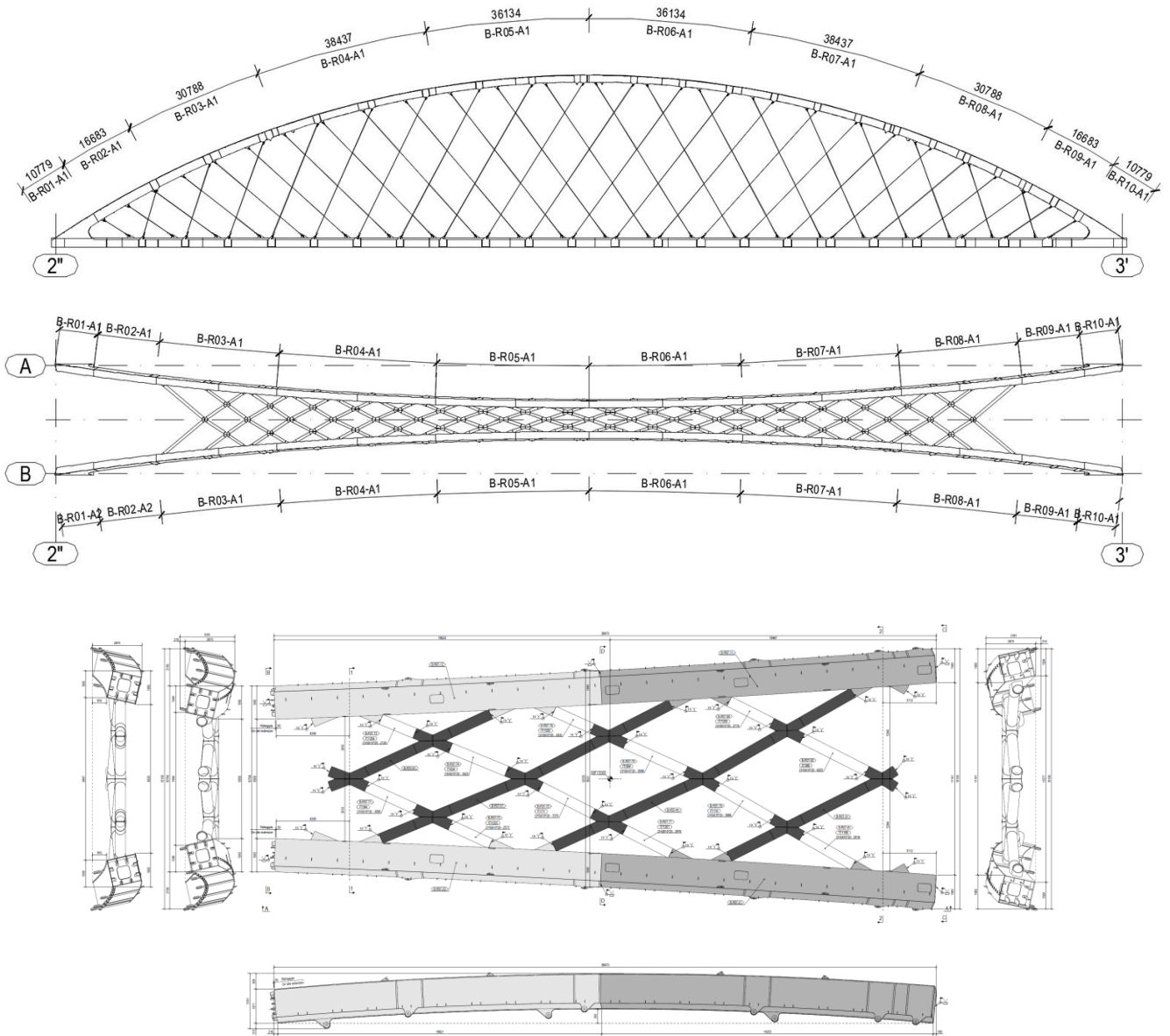


Figura 14: Los arcos estaban organizados en conjuntos de 3 niveles

Fuente: SPECIÁLTERV

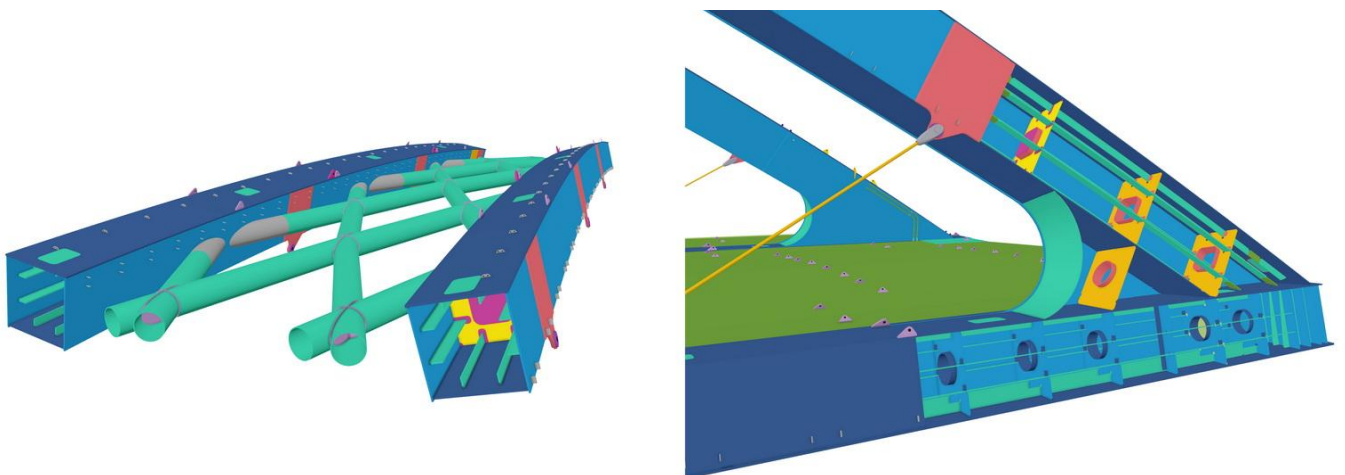


Figura 15: Modelo Tekla de la unidad de fabricación de arcos y la conexión del arco

Fuente: SPECIÁLTERV

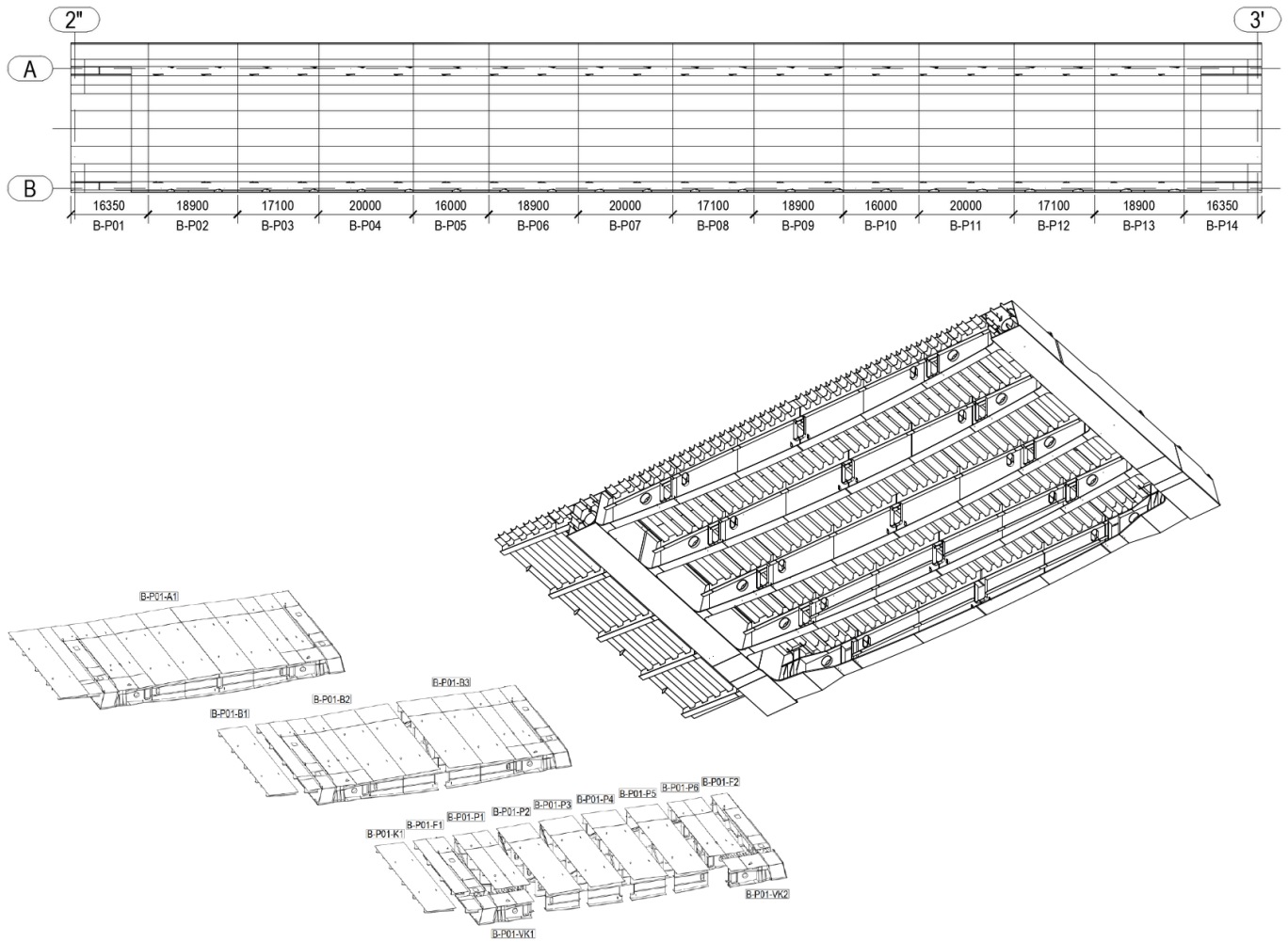


Figura 16: La superestructura se organizó en conjuntos de 3 niveles

Fuente: SPECIÁLTERV

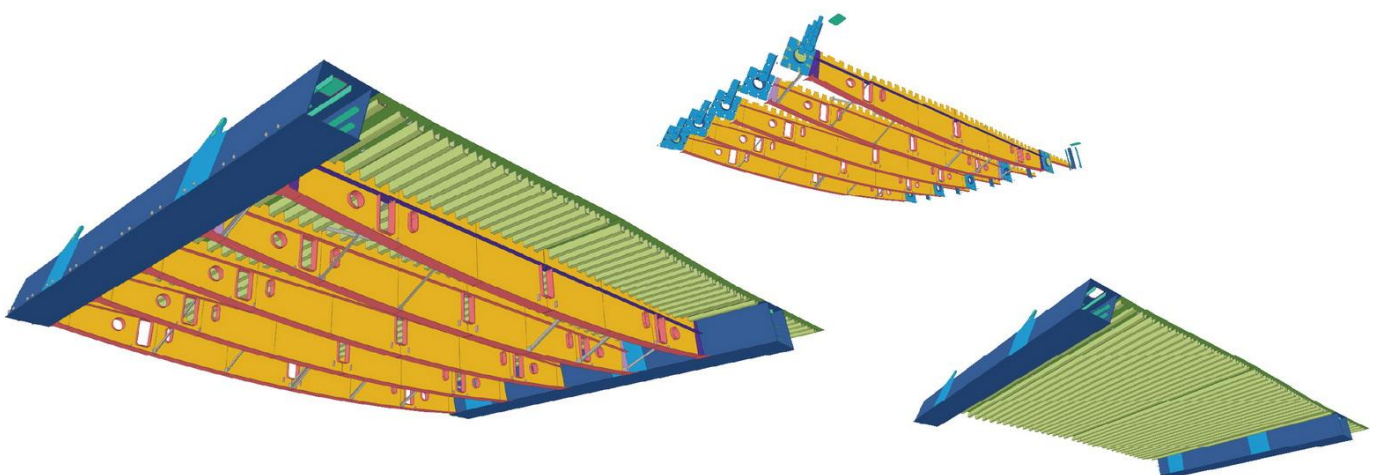


Figura 17: Configuración de la plataforma: después del modelado y la verificación del puente, los componentes personalizados se desarmaron y se organizaron en ensamblajes.

Fuente: SPECIÁLTERV

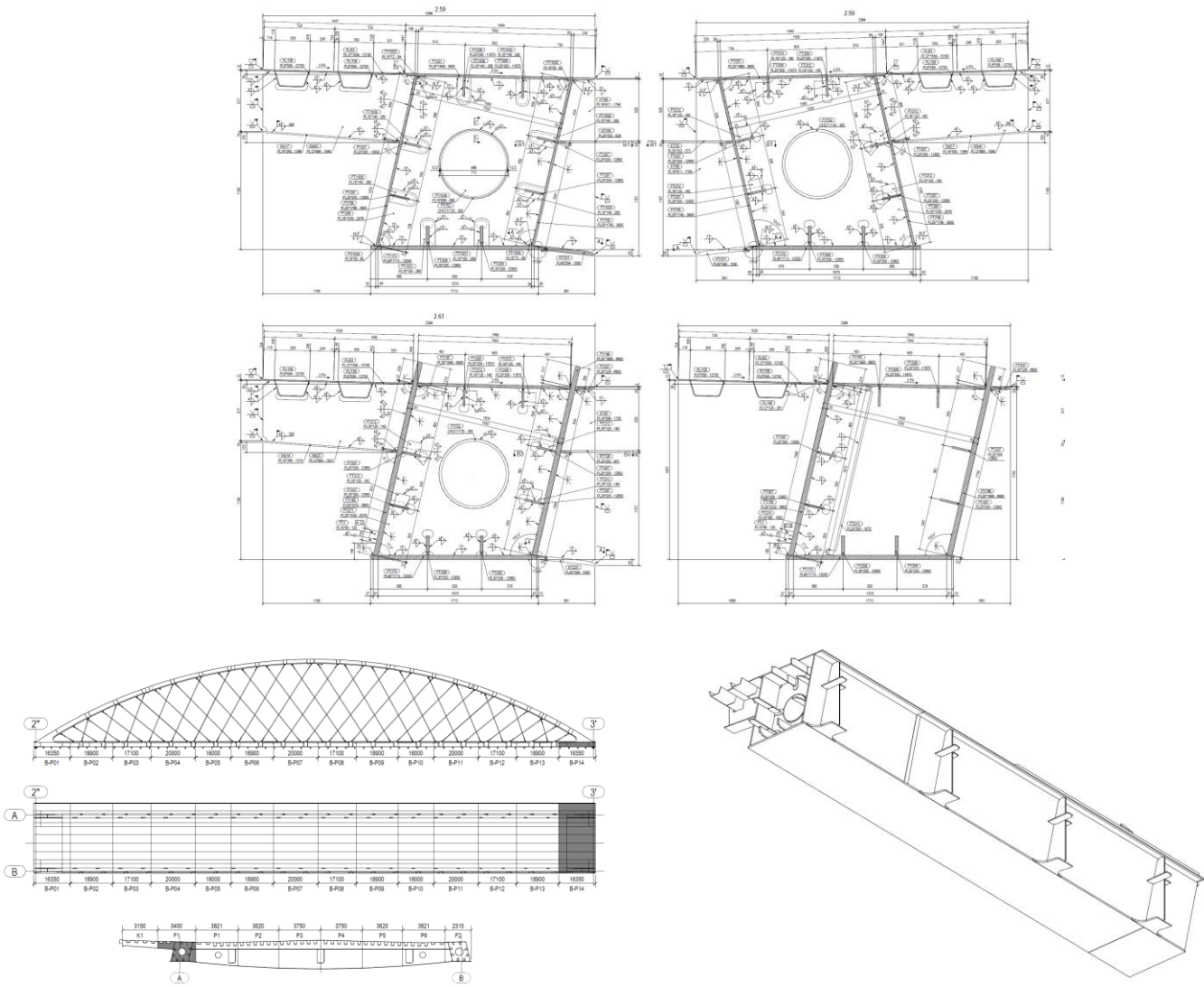


Figura 18: Unidad de ensamblaje n.º 14 - Detalle de la unidad de fabricación de la superestructura n.º P1

Fuente: SPECIÁLTERV



Figura 19: Transporte al lugar de ensamblaje

Fuente: Duna Aszfalt

## PREPARACIÓN DE MODELOS Y PLANES

Durante el modelado de la estructura de la cubierta, se utilizaron dibujos DWG auxiliares como modelos de referencia, y también se aplicaron varios componentes personalizados.

Durante la construcción del modelo del puente, fue necesario establecer límites teóricos claros con respecto a las parametrizaciones (automatizaciones). Se requirió una cuidadosa consideración para determinar qué elementos debían definirse paramétricamente y cuáles debían modelarse individualmente. Para placas complejas y ciertos elementos únicos y poco frecuentes, las transiciones manuales resultaron más efectivas.

También fue necesario prestar mucha atención a que el modelo estuviera estructurado de manera que permitiera clonar fácilmente los planes de fabricación futuros. Los componentes personalizados utilizados durante la construcción del modelo se despiezaron una vez construido para garantizar la estabilidad de los planos.

## USO INTEGRADO DE SOFTWARE EN EL DISEÑO

La verificación entre los ingenieros estructurales y los modeladores BIM se llevó a cabo en Trimble Connect. El modelo Tekla se exportó en tres modos de representación:

- La codificación por colores según los elementos estructurales facilitó la distinción de la estructura portante.
- Se creó un modelo de muestra con un código de color que indica la calidad del acero, para que pudiera filtrarse e identificarse fácilmente en Trimble Connect.
- Se configuró un filtro de representación independiente para ayudar a identificar los espesores de las placas, facilitando así el trabajo de los ingenieros.

Los modos 3D también mejoraron enormemente el proceso de diseño de iluminación, lo que permitió desarrollar un concepto de iluminación realista.

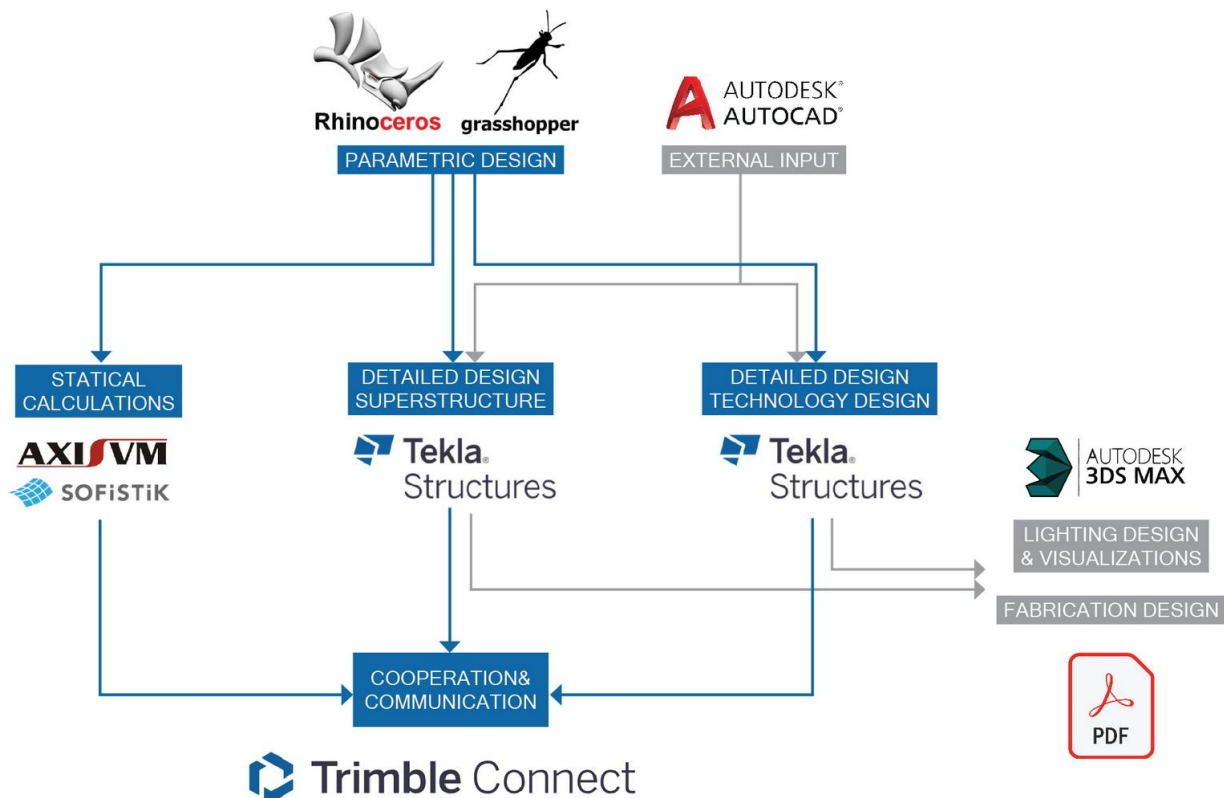


Figura 20: Modelo del proceso de diseño: uso integrado de software.

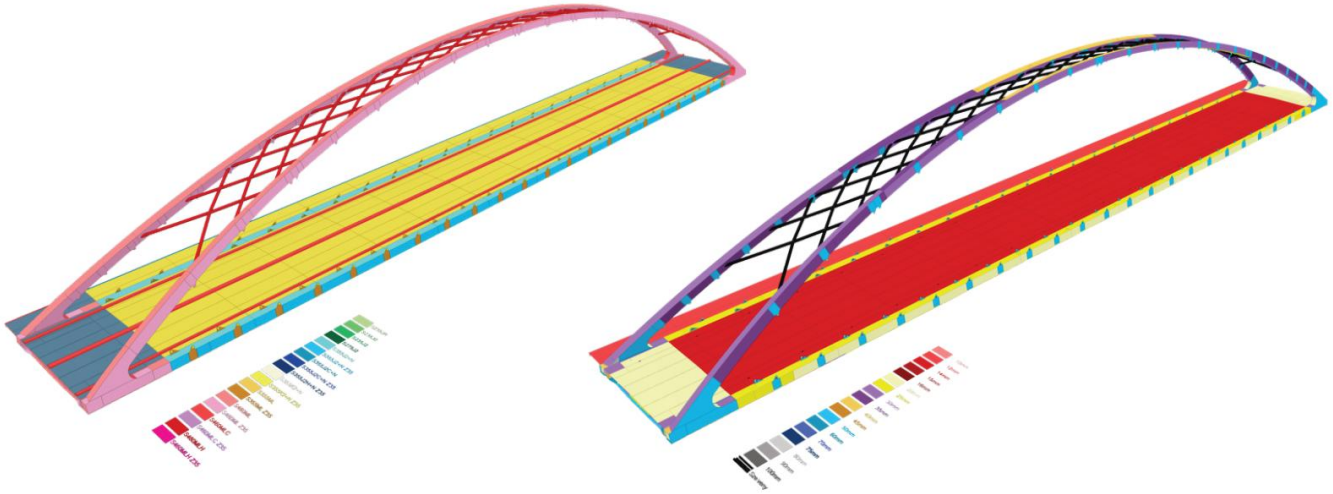


Figura 21: El modelo Tekla se exportó en varios modos de representación para facilitar la comunicación  
Fuente: SPECIÁLTERV

## DISEÑO DETALLADO

Durante el proceso de diseño, también hubo que prestar atención a los componentes secundarios, como el sistema de iluminación, el sistema de monitorización y las tuberías de drenaje y descarga de aguas pluviales.

Uno de los análisis de detección de colisiones reveló que era necesario reubicar un par de columnas de iluminación para evitar interferencias con los cables de suspensión.

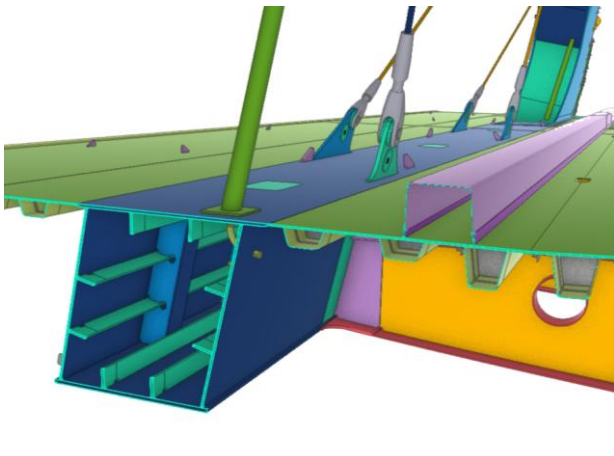


Figura 22: Viga principal - penetración de la columna de rayo



Figura 23: Intersección de vigas transversales

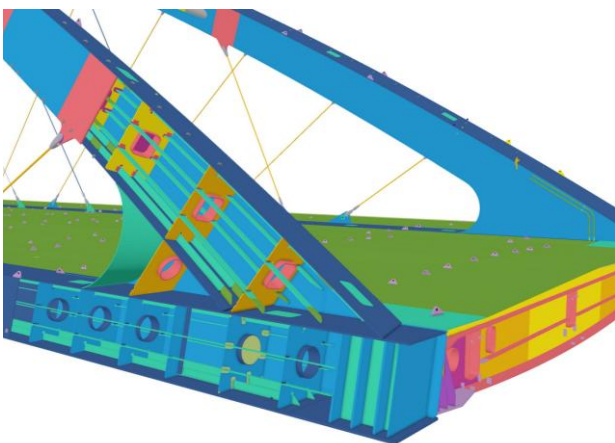


Figura 24: Conexión de arco

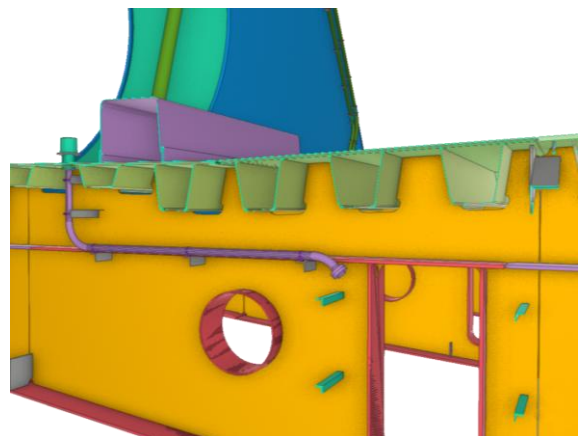


Figura 25: Tubería de lavado Fuente: SPECIÁLTERV

## ESTRUCTURAS AUXILIARES

Las siguientes estructuras auxiliares requirieron modelado en Tekla:

- Punta de lanzamiento: ayuda en la instalación del puente.
- Arriostramientos auxiliares: rigidizan el puente durante la instalación.
- Torres de soporte temporales – diseñadas para el montaje de los arcos
- Plataformas de lanzamiento: ubicadas debajo de los puentes durante la inserción.

Para organizar los modelos, fue necesario establecer una estructura de datos única que definiera con precisión a qué fase pertenece cada sistema estructural, qué prefijos de ensamblaje tienen cada producto, así como los nombres, prefijos de las piezas y otras propiedades de cada una de ellas.

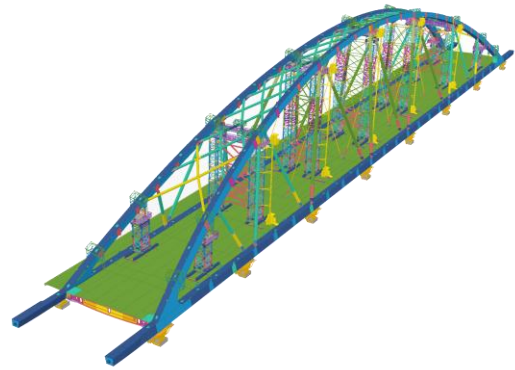


Figura 26: Nariz de lanzamiento Fuente: SPECIÁLTERV

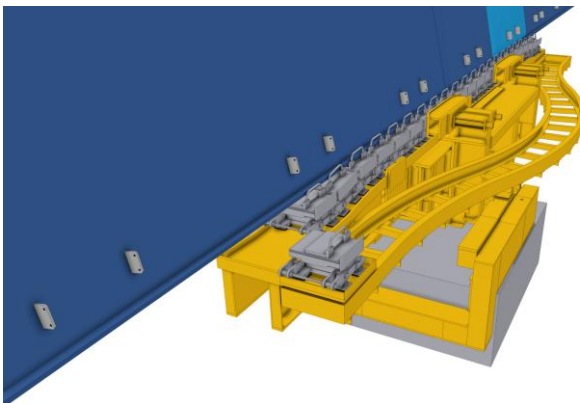


Figura 27: Plataforma de lanzamiento Fuente: SPECIÁLTERV

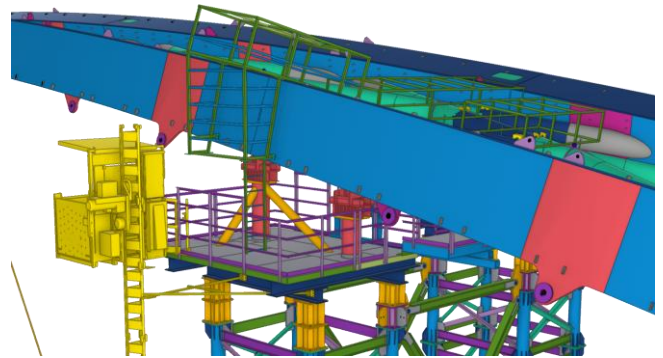


Figura 28: Cabeza de la torre de soporte temporal Fuente: SPECIÁLTERV

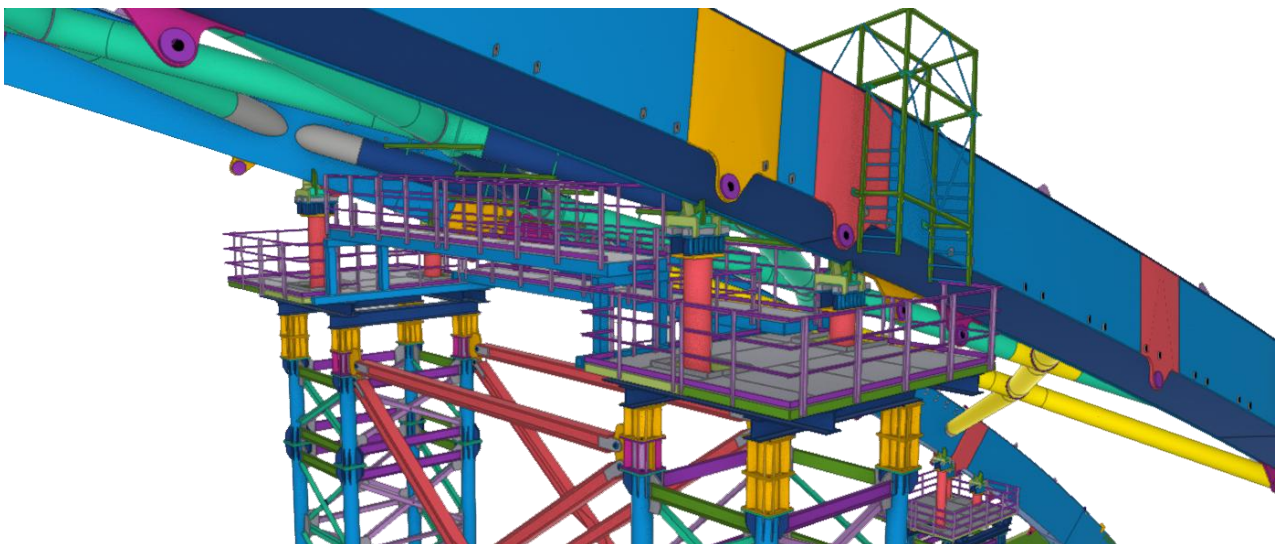
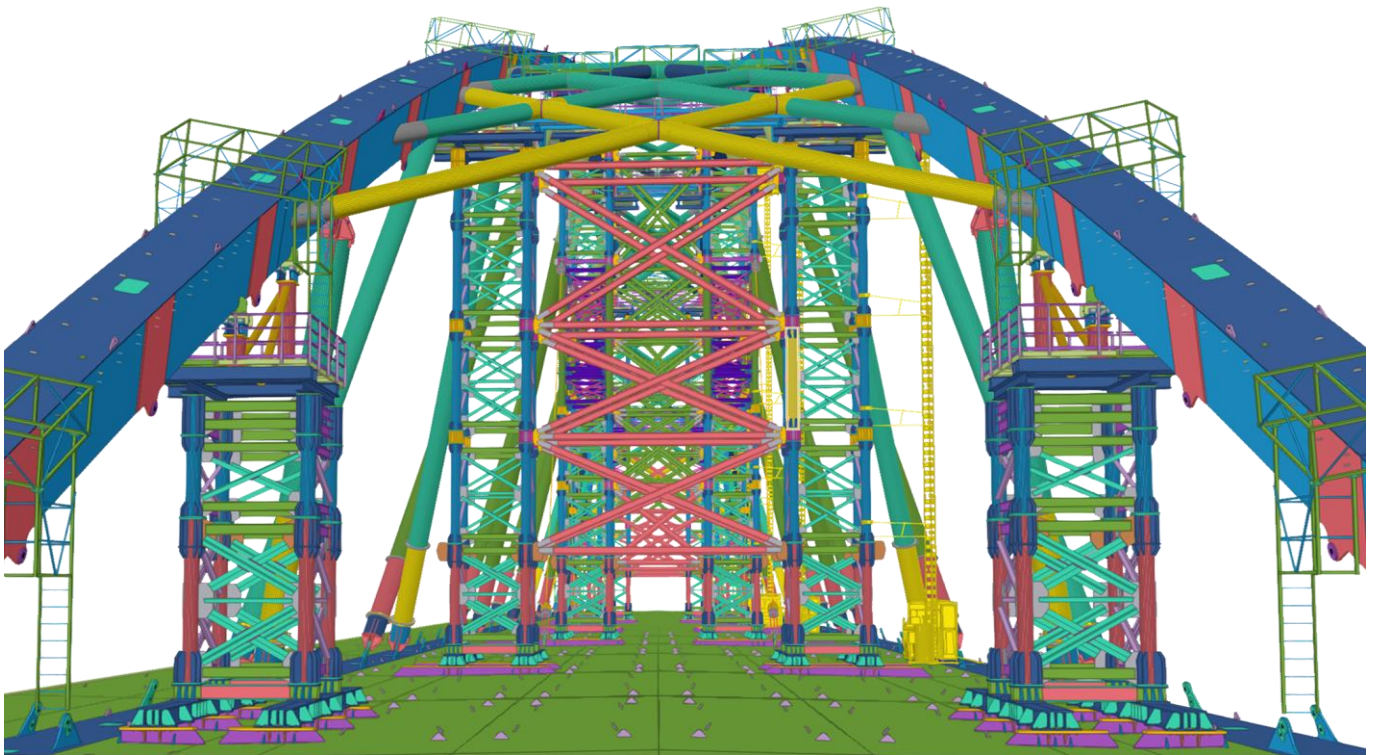
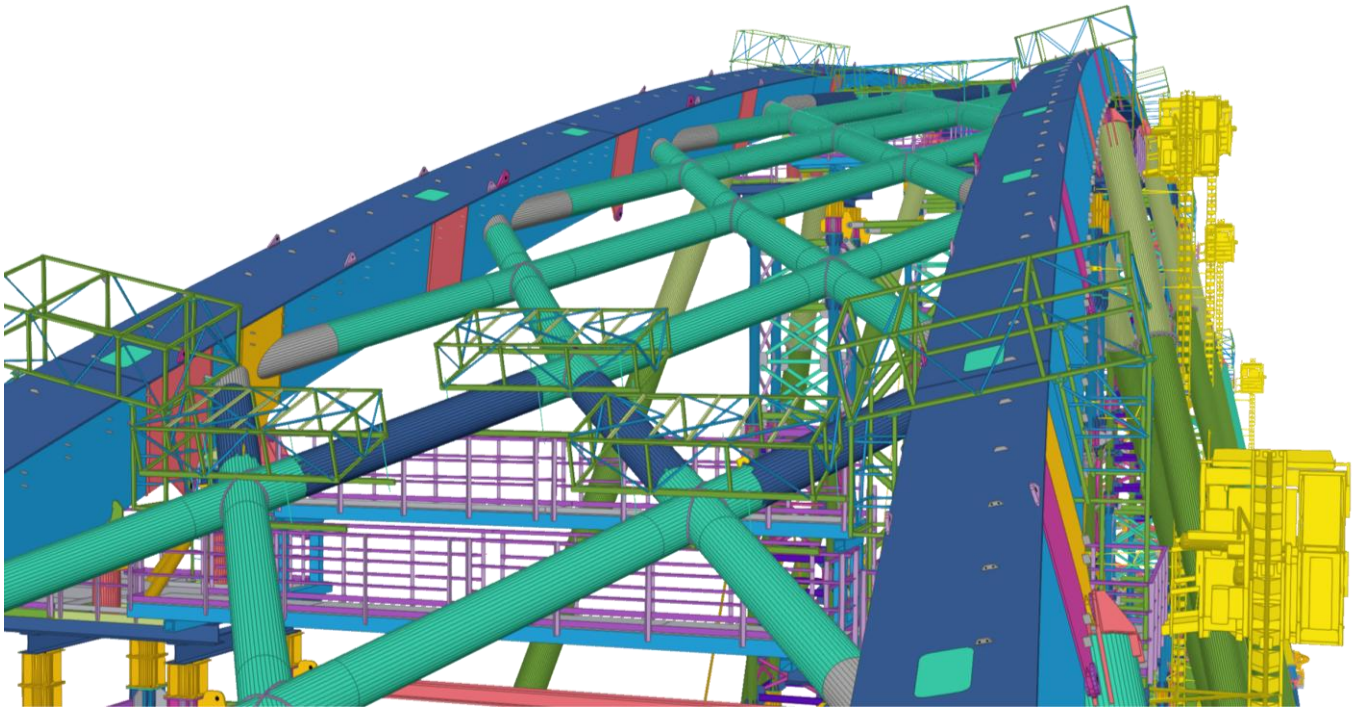


Figura 29: Plataformas de torres de soporte temporales

Fuente: SPECIÁLTERV



Figuras 30 y 31: Torres de soporte temporales

Fuente: SPECIÁLTERV

# e-BrIM

## ILUMINACIÓN DECORATIVA

El puente, de 756 metros de longitud y compuesto por tres tramos, está iluminado en toda su extensión por ambos lados gracias a un sistema de iluminación arquitectónica.

Los arcos son los elementos visuales clave; por lo tanto, se ha puesto especial énfasis en que sean claramente visibles y en resaltar el trazado de la calzada.

La calzada y el arco están iluminados continuamente con luminarias LED lineales (con una longitud total de más de 3 km), que proporcionan luz rasante, mientras que los pilares se iluminan desde la estructura del puente con proyectores de haz ancho dirigidos hacia abajo, creando también un efecto de luz rasante. Los colores de la iluminación son totalmente personalizables, permitiendo visualizar cualquier color mediante un control programable.



Figuras 32 y 33: Esquema de iluminación arquitectónica

Fuente: Lysis



Figura 34: Lugar de montaje de la estructura B3, lado oeste - marzo de 2026 Fuente: Duna Aszfalt



Figura 35: Lugar de montaje de la estructura B1-B2, lado este - marzo de 2026 Fuente: Duna Aszfalt

# CONSTRUCCIÓN DE PUENTES DE CARRETERA: DEL DISEÑO A LA REALIDAD

## EXPERIENCIA PRÁCTICA DE AFRY CZ

Ing. Lukáš Zemek, Ing. Tomáš Kubín; Ing. Ondřej Klimeš,  
Ing. Martin Neradílek, Ing. Pavel Vlasák



AFRY CZ

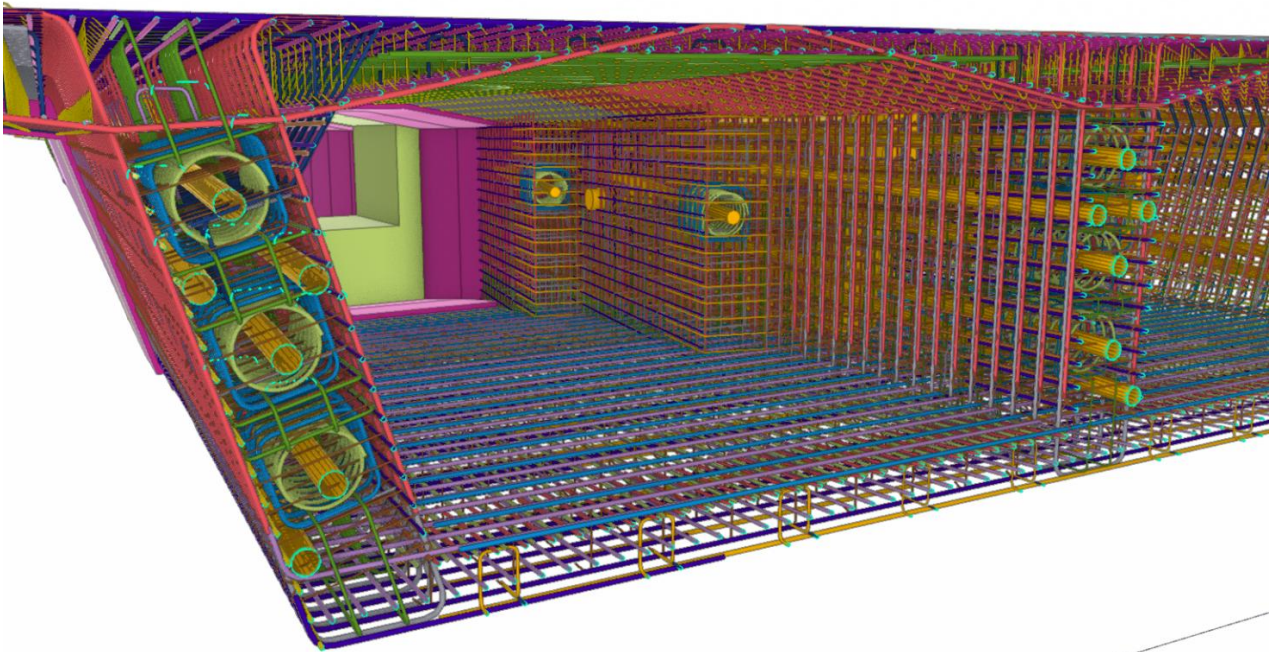


Figura 1: Modelo 3D con armaduras de refuerzo y pretensado en Tekla Structures

### INTRODUCCIÓN

La ingeniería moderna de puentes se basa cada vez más en modelados iterativos y flujos de trabajo digitales avanzados para abordar geometrías complejas, procesos de diseño iterativos y coordinación entre distintas disciplinas.

Las crecientes exigencias de los proyectos de infraestructuras, especialmente en terrenos complejos o bajo estrictas restricciones constructivas, requieren herramientas eficientes que permitan realizar modificaciones rápidas de diseño manteniendo un alto nivel de precisión.

Este artículo presenta varios proyectos seleccionados que demuestran la aplicación del diseño paramétrico y la modelización digital en infraestructuras desarrolladas en la República Checa.

El artículo se centra en cuatro casos de estudio: la circunvalación D0, el puente I/20 Kfely, la autopista I/4 Volyně – Zlešice y la autopista I/3 Červene vršky – U Topolu.

Todos los proyectos comparten un enfoque común basado en la integración de Rhino, Grasshopper

y hojas de cálculo, lo que permite optimizar las iteraciones de diseño estructural, mejorar la coordinación y facilitar la comunicación con las distintas partes implicadas en el proyecto y con la dirección de obra.

## AUTOPISTA D0, TRAMO 511 (CIRCUNVALACIÓN DE PRAGA)

### Descripción general del proyecto

La autopista D0, específicamente la Sección 511, representa uno de los proyectos de infraestructura más relevantes actualmente en ejecución en la República Checa. Conectando Běchovice con la autopista D1, esta sección completa un enlace vital en la circunvalación de Praga (Pražský okruh).

El proyecto está diseñado como una autopista de alta capacidad de seis carriles, que requiere puentes anchos y robustos para cruzar valles ambientalmente sensibles y orografías complejas.

Para cumplir con los altos requisitos técnicos y gestionar la complejidad estructural del proyecto, el proceso de diseño integró ampliamente el diseño paramétrico. Este enfoque computacional fue esencial para coordinar con precisión los tendones de pretensado, la disposición del armado y las geometrías variables en las distintas fases constructivas. En este capítulo se detallan las especificaciones técnicas y las metodologías avanzadas de diseño aplicadas específicamente a dos de las estructuras principales: los puentes n.º 201 y el n.º 204.

### Puente n.º 201: Viaducto sobre el arroyo Říčany (Dubeč)

El puente n.º 201 permite el paso de la autopista de seis carriles sobre el arroyo Říčany y las carreteras de servicio locales cerca del distrito de Dubeč.

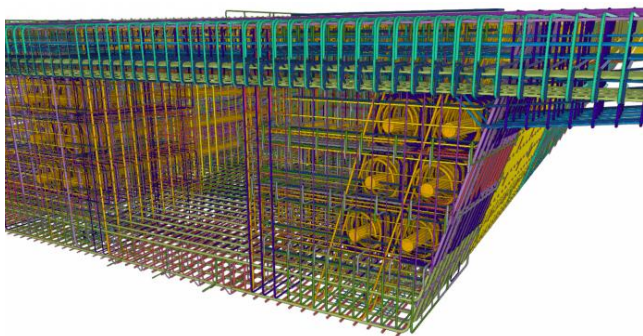


Figura 3: Modelo 3D del talbero armado creado en Tekla Structures

La construcción está siendo ejecutada por la empresa Stavby mostů a.s, bajo la dirección de obra de los ingenieros Pavel Mařík, Milán Svoboda y Martín Vlk.

La estructura está compuesta por dos tableros paralelos monolíticos de hormigón pretensado con sección cajón bicelular. La altura de la viga cajón es de 3,0 m, aumentando a 4,0 m en los pilares n.º 2 y n.º 3 mediante un ensanchamiento parabólico para adaptarse a la gran luz del vano principal. La sección transversal está formada por dos células con voladizos de 2,8 m de anchura. En cuanto a la geometría del tablero, el puente presenta una pendiente transversal del 2,5 % y se sitúa en una curva cóncava con una rasante que pasa del 1,0 % al inicio hasta el 2,7 % al final del puente.

### Parámetros técnicos:

Longitud total:	226.7 m
Ancho del puente:	18,05 m (Puente izquierdo) + 18,05 m (Puente derecho)
Longitud:	50 + 72 + 50 + 40 m
Altura del puente:	8.9 m

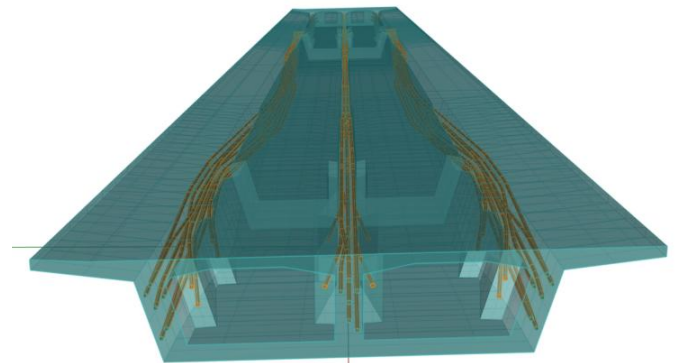
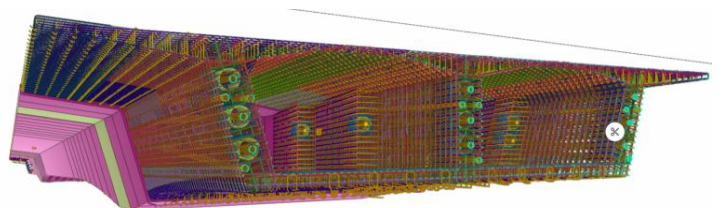


Figura 2: Modelo 3D del tablero con cables de pretensado en Rhino



## Diseño computacional y flujo de trabajo

Para gestionar la secuencia de construcción asimétrica, donde el tablero del puente derecho se ejecuta en tres fases de norte a sur y el izquierdo en cuatro fases en sentido contrario, se parametrizó parcialmente la geometría.

Además, debido a la curva en planta, el tablero izquierdo es 1,7 m más largo que el derecho. Mediante una combinación de Excel, Grasshopper, Rhino y Tekla, el equipo generó un modelo 3D en coordenadas locales trasladado posteriormente a coordenadas globales.

Este flujo de trabajo digital fue esencial para modelar armados complejos en Tekla Structures y optimizar la disposición de los tendones de pretensado para evitar interferencias. Al mismo tiempo, permitió automatizar la exportación de datos mediante hojas de cálculo de Excel para el análisis estructural en Midas Civil.

## Puente n° 204: Viaducto sobre el valle del arroyo Pitkovice (Kuří)

El puente n.º 204 cruza el valle del arroyo Pitkovice, cerca de la localidad de Kuří. La estructura monolítica de hormigón pretensado está siendo ejecutada actualmente por PORR a.s. bajo la dirección de obra de los ingenieros Martin Frič, David Režnar y Marek Hrbáček.

El puente está formado por dos tableros paralelos de 3,0 m de canto constante. La sección transversal consta de un cajón bicelular con voladizos laterales de 3,3 m de ancho. La pendiente transversal del tablero superior es constante al 5 %, con un contrapendiente del 6 % hacia el eje de drenaje.

Toda la estructura se desarrolla sobre una curvatura vertical cóncava que desciende un 0,7 % y posteriormente asciende al 2,4 % hacia el extremo final.

### Parámetros técnicos:

Longitud total:	233.4 m
Ancho del puente:	19,05 m (Puente izquierdo) + 19,05 m (Puente derecho)
Longitud:	38 + 47 + 50 + 47 + 38 m
Altura del puente:	12.0 m

## Optimización y rediseño del pretensado:

La documentación original de la licitación proponía una secuencia de construcción vano a vano con continuidad de voladizos hacia el tramo siguiente. El sistema de pretensado se diseñó inicialmente con seis tendones de 22 cordones (acero Y1860S7, 15,7 mm) ubicados en cada alma.

Durante la fase de diseño de detalle, el contratista solicitó una modificación del esquema de pretensado para eliminar los tendones continuos que atraviesan las juntas de construcción o, alternativamente, permitir su instalación solo después de ejecutar las vainas de la fase siguiente.

Este requisito dio lugar a un rediseño completo del sistema de pretensado, basado en dos tipos principales de tendones:

- **Tendones acoplados:** Dos unidades por alma, que se acoplan en cada junta de construcción.
- **Tendones continuos superpuestos:** Estos se anclan en las vigas transversales del pilar antes de la junta de construcción y continúan a través de la junta para anclarse dos tramos más adelante. Estos tendones no están acoplados y su anclaje en los diafragmas permite colocar primero las vainas y posteriormente instalar los cordones.

En cada diafragma de pila se anclan dos de estos tendones continuos. Debido a su desarrollo sobre dos vanos, los tendones se solapan, garantizando un mínimo de seis tendones en cualquier sección del alma y aumentando hasta ocho en las zonas críticas entre el diafragma y la junta de construcción adyacente.

## Modelado iterativo y flujo de trabajo

El diseño final requirió la verificación de 66 tendones por tablero, garantizando la ausencia de interferencias y proporcionando datos de replanteo precisos.

La complejidad geométrica fue significativa, ya que los tendones no mantenían una alineación vertical constante y se entrecruzaban en distintos puntos. Para gestionar esta situación, se desarrolló un método optimizado para la definición geométrica de los tendones en MS Excel basado en polígono tangente 3D (coordenadas locales x, y, z) complementados con radios de curvatura en los vértices.

## DEFINITION OF GEOMETRY

A1-P					
X lokal	X	Y	Z	R	
-0,800	0,200	0,400	1,500	0	
1,960	2,960	0,170	1,303	30	
10,400	11,400	0,170	0,700	20	
-14,000	25,371	0,170	0,700	20	
-12,000	27,371	0,170	0,902	8	
-9,000	30,371	0,400	1,204	8	
-0,700	38,671	0,400	2,040	8	
0,950	40,321	0,400	2,040	8	
9,000	48,371	0,400	0,650	0	

TO GH+RHINO

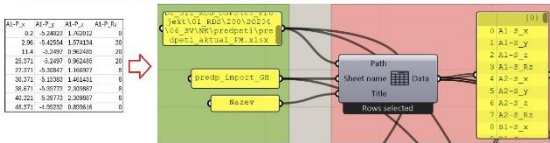
TO MIDAS CIVIL

A1-P_x	A1-P_y	A1-P_z	A1-P_Rz	
0.2	-5.24023	1.762012		0
2.96	-5.42554	1.574134		30
11.4	-5.2497	0.962485		20
25.371	-5.2497	0.962485		20
27.371	-5.30847	1.166927		8
30.371	-5.15383	1.461451		8
38.671	-5.39773	2.309887		8
40.321	-5.39773	2.309887		8
48.371	-4.99232	0.899616		0

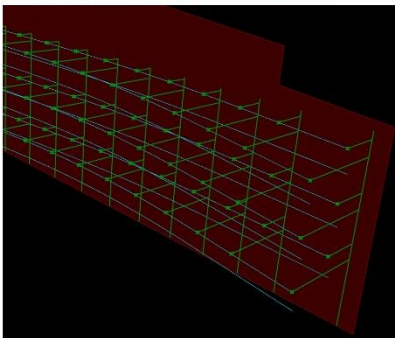
NAME=A1-P,22 lan-plast,1to27,0,0,ROUND,3D
K1U,USER,0,0,YES,1,0,0
ELEMENT,END-I,1,I-J
0,YES,-5.225,-3
0.2,-0.026432,1.7620116,NO,0,0,0
2.96,-0.2052961,1.57413394785714,NO,0,0,30
11.4,-0.0294627666666666,0.962485138333333,NO,0,0,20
25.371,-0.0294627666666666,0.962485138333333,NO,0,0,20
27.371,0,-0.0882346964912281,1.16692749422306,NO,0,0,8
30.371,0.0599715087719298,1.46145082305764,NO,0,0,8
38.671,-0.183932,2.3098866,NO,0,0,8
40.321,-0.183932,2.3098866,NO,0,0,8
48.371,0.221484666666667,0.899615766666667,NO,0,0,0

Figura 4: Definición de la geometría desde el polígono tangente 3D a otros programas

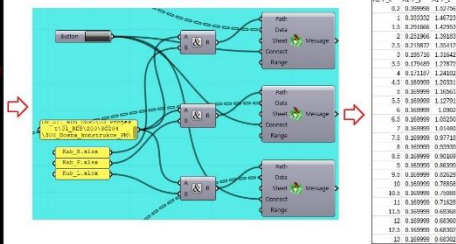
## IMPORT OF CABLE GEOMETRY FROM EXCEL TO GH



## CABLE AXES WITH AUXILIARY EXTENSION LINES



## EXPORT OF SETOUT IN GH



## EXPORT

A1-P_x	A1-P_y	A1-P_z	A1-P_Rz
0.2	-5.24023	1.762012	
2.96	-5.42554	1.574134	
11.4	-5.2497	0.962485	
25.371	-5.2497	0.962485	
27.371	-5.30847	1.166927	
30.371	-5.15383	1.461451	
38.671	-5.39773	2.309887	
40.321	-5.39773	2.309887	
48.371	-4.99232	0.899616	

## FINAL SETOUT

Vytváření předpínacích kabelů v pravé stěně PM (koncovka -P)																				
Id	Vol. od	Vol. do	Vol. od	Vol. do	Y	Z	Y	Z	Y	Z	Y	Z	Y	Z	Y	Z	Y	Z	Y	Z
Id	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
800	1.000	11.000	0.000	11.000	11.4	0.170	11.4	0.170	11.4	0.170	11.4	0.170	11.4	0.170	11.4	0.170	11.4	0.170	11.4	0.170
801	1.000	8.000	0.800	311.1467	270.1467	131.1467	131.1467	131.1467	131.1467	131.1467	131.1467	131.1467	131.1467	131.1467	131.1467	131.1467	131.1467	131.1467	131.1467	131.1467
802	1.000	6.500	0.500	282.1467	242.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467
803	1.000	1.000	0.000	282.1467	242.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467	102.1467
804	1.000	1.500	0.500	271.1154	231.1154	91.1154	91.1154	91.1154	91.1154	91.1154	91.1154	91.1154	91.1154	91.1154	91.1154	91.1154	91.1154	91.1154	91.1154	91.1154
805	1.000	2.000	0.500	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154	131.1154
806	1.000	2.500	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
807	1.000	3.000	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
808	1.000	3.500	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
809	1.000	4.000	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
810	1.000	4.500	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
811	1.000	5.000	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
812	1.000	5.500	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
813	1.000	6.000	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
814	1.000	6.500	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
815	1.000	7.000	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
816	1.000	7.500	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
817	1.000	8.000	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
818	1.000	8.500	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
819	1.000	9.000	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
820	1.000	9.500	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
821	1.000	10.000	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
822	1.000	10.500	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
823	1.000	11.000	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
824	1.000	11.500	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
825	1.000	12.000	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154
826	1.000	12.500	0.500	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154	170.1154

Figura 5: Flujo de trabajo en MS Excel, Rhino y Grasshopper para el pretensado de tendones

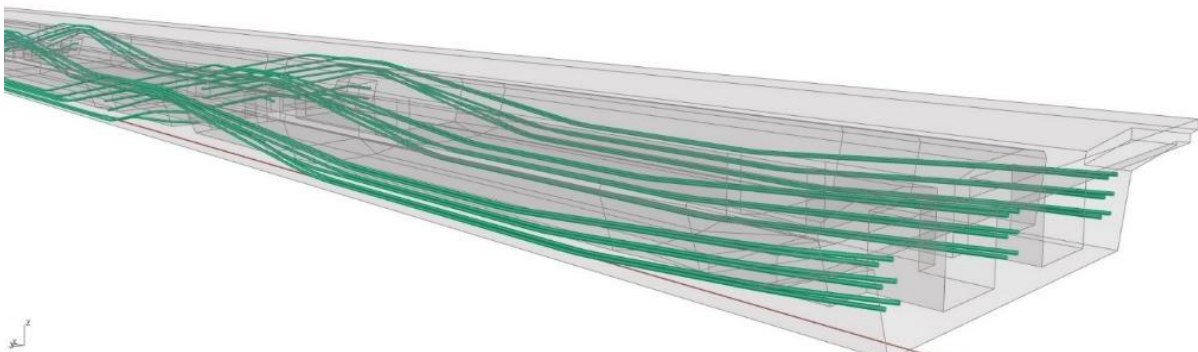


Figura 6: Tablero con tendones de pretensado

Estas coordenadas relativas de los tendones se utilizaban en Midas Civil y posteriormente se transformaban en Grasshopper a coordenadas absolutas para su utilización en Tekla.

El sistema de coordenadas de entrada se definió de la siguiente manera:

- Longitudinal (x): Distancia desde el borde del tablero.
- Vertical (z): Altura desde el encofrado inferior hasta el eje de la vaina.
- Transversal (y): Distancia perpendicular desde el eje de la vaina hasta la cara exterior del alma o el eje central del puente en el caso de las almas interiores.

Cualquier modificación geométrica en Excel actualizaba automáticamente los resultados para su rápida importación a Midas Civil para el análisis estructural y a Grasshopper + Rhino para la visualización 3D y la detección de interferencias mediante planos de corte transversal. Este proceso iterativo se repitió aproximadamente durante 40 veces para optimizar tanto la solución constructiva propuesta por el contratista como el comportamiento estructural del modelo analítico. La fase final permitió sincronizar en cuestión de minutos el modelo de cálculo, el modelo BIM y los datos topográficos, reduciendo drásticamente el riesgo de errores humanos.

## RECONSTRUCCIÓN DEL PUENTE N° 20-005 KFEY EN LA CARRETERA I/20

### Descripción general del proyecto

La reconstrucción del puente n.º 20-005 cerca de la localidad de Kfely constituye una actuación clave dentro de la carretera I/20, uno de los principales corredores de conexión entre Karlovy Vary y Plzeň.



Figura 7: Vista lateral del puente terminado n.º 20-005

Debido al deficiente estado técnico de la estructura original, se proyectó un nuevo puente de dimensiones similares. La solución estructural adoptada consiste en vigas prefabricadas de hormigón pretensado que trabajan de forma mixta con una losa superior monolítica de hormigón armado. La obra está siendo ejecutada por MI Roads a.s., bajo la dirección de obra de Ing. Zdeněk Nevosad y Miroslav Hrubý, mientras que los elementos prefabricados son suministrados por KŠ PREFA s.r.o.

### **Parámetros técnicos:**

Longitud total:	75.6 m
Ancho del puente:	13.3 m
Longitud:	20 + 23 + 20 m
Altura del puente:	4.8 m

### **Características estructurales y geométricas**

El puente cruza el río Teplá con un esviaje significativo de 60°. El tablero está formado por siete vigas prefabricadas tipo KSP en doble T con almas aligeradas, dispuestas en cada uno de los tres vanos. Las vigas se fabrican con hormigón C50/60, mientras que la losa superior monolítica utiliza hormigón C35/45.

La geometría de las vigas se adapta a la sección transversal de la carretera: el ala superior tiene una anchura de 1700 mm en las cinco vigas interiores y de 1300 mm en los dos exteriores, siguiendo además la pendiente transversal en forma de tejado del 2,5 % de la calzada. El canto de las vigas es de 1100 mm, complementada con una losa monolítica de 220 mm de espesor. En cada apoyo, las vigas se empotran en traviesas monolíticas apoyadas sobre pares de aparatos de apoyo.



Figura 8: Vigas prefabricadas durante la fase de construcción

La subestructura es de hormigón armado y se apoya sobre pilotes. Para garantizar un rendimiento hidráulico óptimo durante las crecidas del río Teplá, los pilares cuentan con tajamares semicirculares, un elemento de diseño inspirado en el puente original. El perfil longitudinal del puente es constante, con una pendiente del 0,4 %.

Las vigas están pretensadas, con dos tipos específicos de tendones integrados en cada unidad:

- **Tendones primarios:** Un cable de 12 cordones anclado en los extremos de las vigas. Estos tendones fueron tesados en planta de prefabricados hasta una tensión de 1200 MPa en los vanos 1 y 3, y de 1400 MPa en el vano central.
- **Tendones de continuidad:** cable de 15 cordones que recorre toda la longitud del puente atravesando las tres vigas consecutivas de cada alineación. Estos tendones, anclados en las vigas extremas, fueron tesados hasta 1400 MPa para garantizar la continuidad estructural del sistema multicelular.

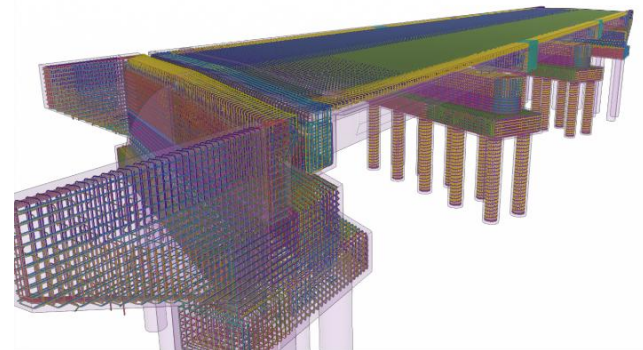
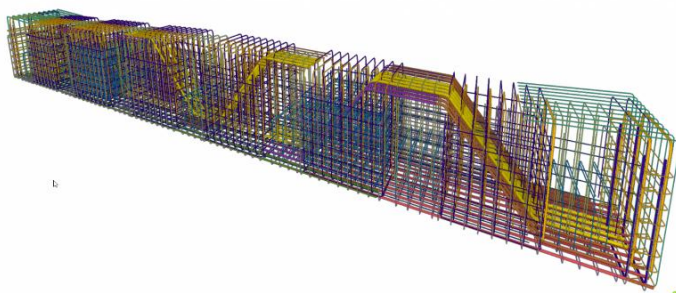
## Flujo de trabajo de modelado 3D

El puente completo se modeló en el entorno Rhino-Grasshopper. Este modelo 3D se utilizó posteriormente para generar el modelo de armaduras en Tekla Structures. Aunque para la ejecución de la obra se generaron planos convencionales 2D de armado, se compartió con el

equipo de obra un modelo 3D completo y detallado de la estructura y sus armaduras a través de la plataforma Trimble Connect.

La utilización del modelado 3D fue especialmente importante debido a la elevada complejidad geométrica de las traviesas monolíticas. Estos elementos, que alojan los extremos embebidos de las vigas prefabricadas, presentan una geometría especialmente compleja, agravada además por el esviaje de 60° del puente. Esto obligó a utilizar formas de armado más complejas y generó un número considerablemente mayor de interferencias entre armaduras y vigas prefabricadas. El enfoque paramétrico proporcionó dos ventajas principales:

- **Precisión en el diseño:** Permitió optimizar la disposición de las armaduras y detectar y resolver todas las posibles interferencias durante la fase de diseño.
- **Claridad estructural:** Compartir el modelo 3D agilizó la comprensión espacial de las armaduras, facilitando la interpretación de toda la estructura por parte del contratista.



↑ Figura 9: Modelo 3D armado del puente de Kfely

← Figura 10: Vista axonométrica del modelo 3D donde se muestra el armado de la viga transversal

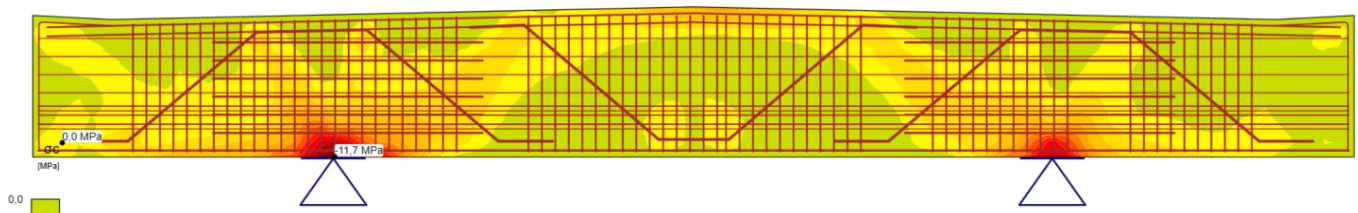


Figura 11: Análisis FEM de la viga transversal en Idea Statica Detail

## Análisis y verificación estructural

El análisis estructural global se realizó mediante Midas Civil, mientras que las comprobaciones detalladas de elementos singulares se llevaron a cabo en IDEA StatiCa, utilizando el módulo Detail y el método Continuous Stress Field para el análisis complejo de las traviesas. Para el análisis de los estribos se desarrolló un modelo local específico en Midas FEA NX, aprovechando una conexión directa con Grasshopper para garantizar un flujo continuo de datos entre la geometría y el análisis mediante elementos finitos.

## CARRETERA I/4 TRAMO VOLYNĚ – ZLEŠICE

### Descripción general del proyecto

El proyecto contempla la variante de la carretera I/4 entre Volyně y Zlešice. El tramo, de aproximadamente 7 km de longitud, incluye la circunvalación de la localidad de Volyně y una variante alrededor de la colina de Bretaň. El trazado discurre por un terreno accidentado, de carácter montañoso, lo que hizo necesaria la construcción de un elevado número de estructuras. El proyecto incluye ocho puentes en el tronco principal y cinco estructuras de paso superior, entre ellas dos ecoductos, dos pasos superiores y una falsa trinchera cubierta. Durante esta fase, el principal objetivo fue la coordinación espacial de la planta y la rasante, incluyendo el diseño preliminar de las estructuras de puente. Debido a la compleja topografía, el trazado sufrió múltiples iteraciones, lo que motivó la implementación de un flujo de trabajo paramétrico basado en Rhino y Grasshopper.

### Especificaciones técnicas de las estructuras

#### Puente nº 201: Viaducto sobre la vía férrea y rotonda (km 4.060)

Este puente cruza la línea férrea n.º 198 (Strakonice – Volary), una vía privada, tres carreteras distintas y una balsa de retención. La sección del tablero consiste en una viga doble T de 2,2 m de canto con pendiente transversal constante. La rasante longitudinal presenta pendientes ascendentes entre el 4 % y el 5 %.

Longitud total: 232.9 m  
Ancho del puente: 12,75 m (9,5 m de calzada + aceras de mantenimiento + barreras acústicas)

Longitud: 28 + 4 × 40 + 28 m

#### Puente nº 204: Viaducto sobre la vía férrea y el río Volyňka (km 5.240)

Esta estructura salva la vía férrea, el río Volyňka y sus llanuras aluviales, así como una carretera local. El tablero también está formado por una sección doble T, con un canto de 2,3 m. La rasante longitudinal desciende desde el 4,8 % hasta el 0,9 %, mientras que la altura del puente varía entre 7 y 18 m.

Longitud total: 421.8 m  
Ancho del puente: de 12,6 m a 15,35 m en los cuatro vanos finales para incorporar un carril de incorporación  
Longitud: 36 + 8 × 42 + 32 m

#### Puente nº 220: Travesía cubierta sobre la carretera I/4 (km 4.530)

Se trata de un puente de hormigón armado construido mediante el método Cut & Cover, ubicado en una pendiente pronunciada entre Volyně y un destacado mirador local. La estructura se diseñó como un marco cerrado de hormigón armado, cubriendo una profunda excavación en la ladera para preservar el paisaje y mantener la conectividad del entorno.

Ancho del puente: 97,6 m  
Longitud: 11,5 m  
Altura de sobrellenado: 1,0 a 4,5 m

### Optimización paramétrica y comunicación con las partes implicadas

El equipo de diseño utilizó plantillas desarrolladas específicamente para secciones estándar, como losas y vigas en T simples y dobles. Esto permitió generar rápidamente modelos 3D de las principales estructuras y responder con flexibilidad a los cambios de trazado.

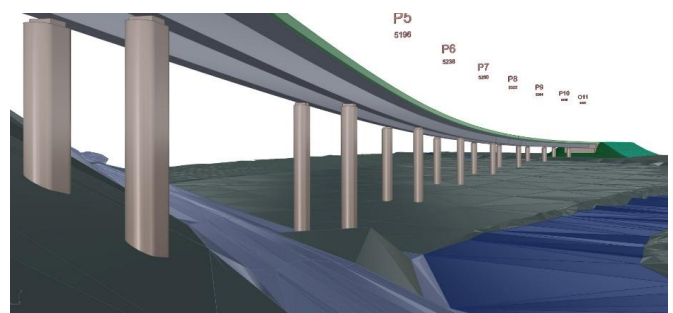


Figura 12: Modelo 3D del puente nº 204 en Rhino



Figura 13: Comparación de configuraciones de pilares - Puente n° 201

Uno de los principales beneficios del modelado 3D fue la posibilidad de generar rápidamente visualizaciones técnicas para el cliente y el resto de los agentes implicados en el proyecto. La topografía y las superficies viarias existentes se importaron a Rhino mediante archivos .xml proporcionados por el diseñador de carreteras.

En el caso del puente n.º 201, por ejemplo, el cliente solicitó una comparación entre dos soluciones diferentes de pilas. La primera variante estaba formada por dos fustes independientes, mientras que la segunda utilizaba una única pila con un capitel ensanchado capaz de soportar ambos tableros. (véase la figura 13).

De forma similar, en el puente n.º 220, ejecutado con el método Cut & Cover, los modelos 3D resultaron fundamentales para definir la posición y anchura óptimas de la estructura respecto a las fuertes pendientes próximas al puente.

## CARRETERA I/3 TRAMO ČERVENÉ VRŠKY – U TOPOLU

### Descripción general del proyecto

El proyecto "I/3 Červené Vršky – U Topolu" aborda los problemas críticos de capacidad en uno de los corredores de tráfico más importantes de la República Checa, que conecta Praga con Bohemia del Sur y Austria (E55). La configuración actual de dos carriles cerca de la ciudad de Benešov ha sido durante mucho tiempo un importante cuello de botella, donde la alta densidad de tráfico suele provocar graves atascos y una elevada tasa de accidentes de tráfico causados por maniobras de adelantamiento arriesgadas.

El objetivo principal de esta ampliación de capacidad es implementar una configuración de 2+1 carriles, que proporciona carriles de adelantamiento alternos en cada sentido. Esta

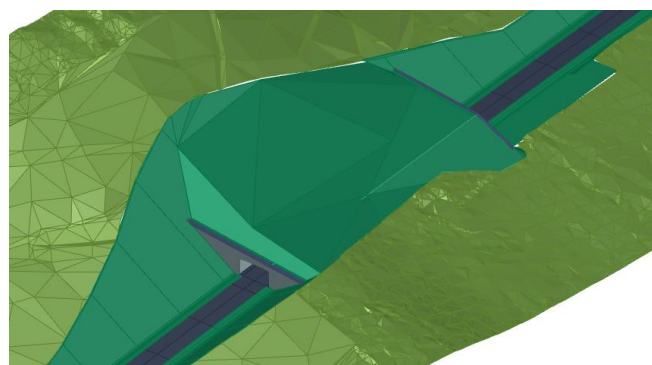


Figura 14: Modelo 3D con el terreno final – Puente n° 220

solución mejora significativamente el flujo de tráfico y la seguridad al permitir el adelantamiento seguro de vehículos lentos sin que estos invadan el carril contrario. El proyecto contempla la ampliación del terraplén de la carretera y la construcción o reconstrucción completa de cinco puentes, incluido el Puente n° 203, todo ello bajo condiciones de ejecución complejas y manteniendo el tráfico en servicio durante las obras.

### Parámetros técnicos del puente n° 203:

El puente salva una pasarela peatonal y soporta la carretera I/3. La estructura se ha diseñado como un marco cerrado prefabricado de hormigón armado, de un solo vano. Se trata de una estructura perpendicular, enterrada bajo terraplén, con gálibo vertical libre y cimentación superficial.

Longitud total:	33,5 m
Ancho del puente:	21,3 m
Longitud:	4,35 m
Altura del puente:	3,96 m

El puente se diseñó como parte de un proyecto técnico más amplio que abarcaba cinco estructuras de puentes, todas desarrolladas con un enfoque en la construcción por fases bajo tráfico real.

Una característica técnica única del SO 203 es la integración de una barrera acústica de 7,0 m de altura, anclada directamente a la cornisa del puente sobre un muro de contención alargado de hormigón armado. La integridad estructural y las limitaciones espaciales de esta enorme barrera requirieron una coordinación precisa con el refuerzo del muro de contención y la geometría general del puente.

## Modelado 3D y fases de construcción

El diseño del puente n.º 203 resultó especialmente complejo debido a la necesidad de mantener el tráfico de la carretera I/3 durante la ejecución, mediante una construcción por mitades longitudinales.

La aplicación del modelado 3D fue esencial para varias tareas críticas:

- **Coordinación del apuntalamiento:** Se diseñó un muro de contención anclado para el proyecto, cuyo reanclaje se realizó entre la Fase 1 (la mitad izquierda del puente original permanece en funcionamiento, mientras que la mitad derecha se reemplaza por una nueva estructura) y la Fase 2 (el tráfico se desvía sobre la nueva mitad derecha del puente; la mitad izquierda original se demuele y se reemplaza por una nueva estructura). Las posiciones precisas de los anclajes y las vigas se verificaron con respecto a la estructura del puente en el modelo 3D para evitar cualquier conflicto espacial.
- **Detección de interferencias:** Se utilizó el modelo Rhinoceros para coordinar y resolver posibles colisiones con las infraestructuras y servicios públicos circundantes en las inmediaciones del puente, incluyendo un depósito de retención de aguas, sistemas de alcantarillado y rutas de cables subterráneos reubicadas, que se importaron a Rhino como sólidos desde Autocad y posteriormente transformados al sistema de coordenadas del proyecto.
- **Planificación visual de la secuencia constructiva:** Basándose en las distintas fases del modelado, se generó un vídeo detallado del proceso de construcción directamente desde Rhinoceros, que sirvió como herramienta fundamental tanto para el equipo de diseño como para el contratista, permitiéndoles visualizar las complejas fases de ejecución.

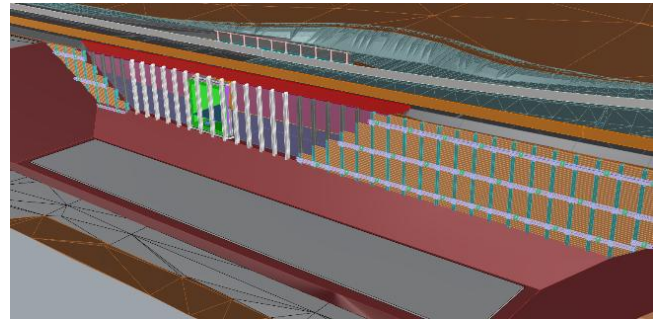


Figura 15: Muro de contención con anclajes en Rhinoceros

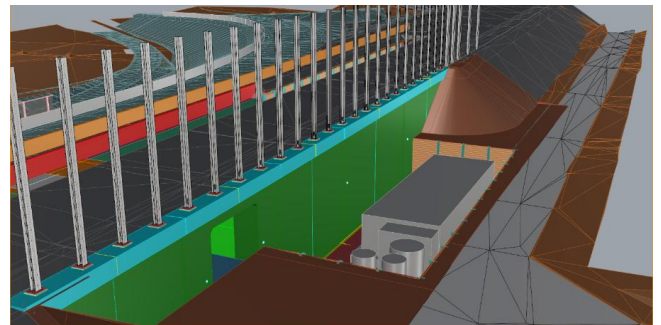


Figura 16: Puente y depósito de retención de aguas en el modelo 3D global

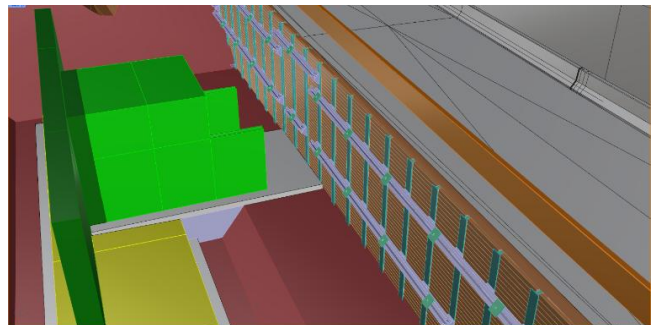


Figura 17: Planificación de secuencias constructivas visuales

## BRIM Y VDC EN EL DEPARTAMENTO DE PUENTES DE PRAGA

En el equipo de ingeniería de puentes de Lukáš Zemek, siempre hemos priorizado la comunicación transparente a través de CDE Trimble Connect, formatos abiertos como \*.IFC y \*.LandXML y la integración de BIM y GIS en Vektor.io. Este enfoque se alinea con las últimas tendencias en Diseño y Construcción Virtual (VDC).

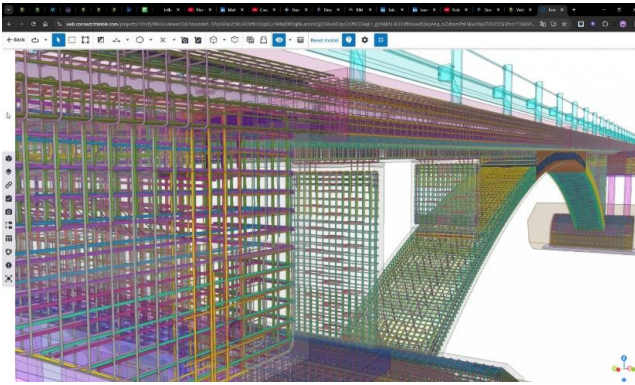


Figura 18: Modelo del puente arco armado en la autopista D3 en Trimble Connect CDE

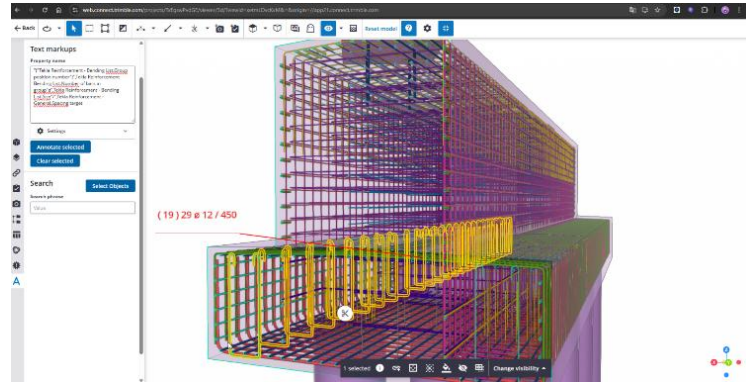


Figura 19: Extensión de usuario Trimble Connect CDE para el diseño de armaduras 3D

## Modelado de armaduras 3D: No infravalorar más el armado digital

En el contexto checo, aún persiste la idea obsoleta de que el modelado de armaduras en 3D es un trabajo adicional que no aporta valor al proyecto. Sin embargo, la realidad de la ingeniería de puentes moderna demuestra lo contrario.

La geometría compleja de las estructuras, las secciones variables y la elevada densidad de armaduras convierten los planos 2D tradicionales en un auténtico rompecabezas, donde el riesgo de interferencias entre barras o problemas de constructibilidad es muy elevado.

A nivel internacional, el modelado 3D de armaduras se está consolidando como una herramienta esencial para reducir errores y problemas durante la construcción.

Solo un modelo en el que cada elemento se define como un objeto digital con parámetros propios permite una coordinación real y garantiza que la estructura sea viable desde el punto de vista constructivo.

## El puente digital entre la oficina y la obra: visualización 3D de armaduras encofrados

Un modelo digital (BIM/VDC) no se limita a su visualización en el monitor del diseñador. Su mayor beneficio se obtiene directamente en obra, donde sirve como documentación ilustrativa en tiempo real.

Compartir modelos de encofrado (forma) y armaduras a través de un Entorno Común de Datos (CDE) en el formato abierto \*.IFC permite a los encargados y ferrallistas comprender incluso los detalles más complejos sin tener que estudiar minuciosamente planos 2D en papel.

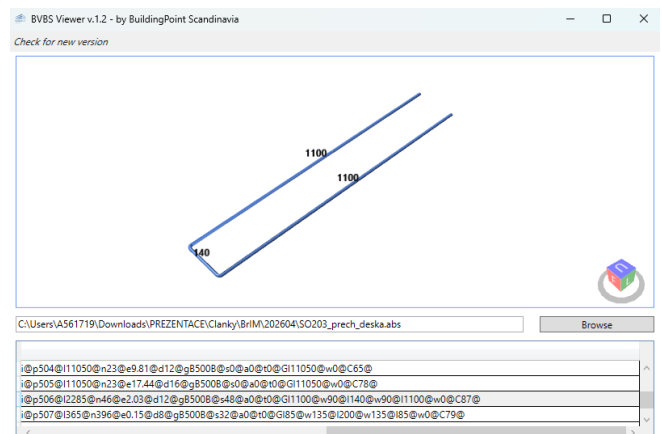
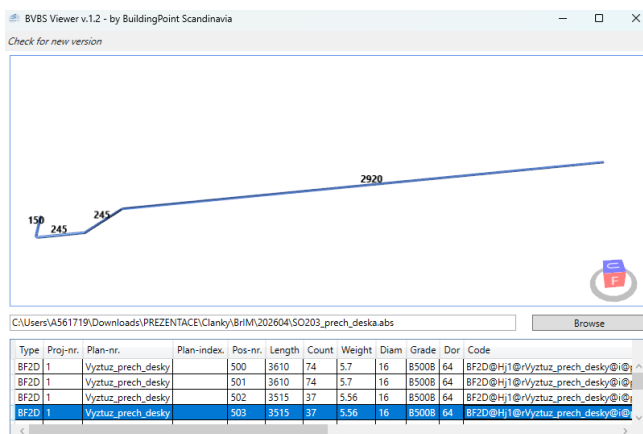


Figura 20: Comprobación de resultados en formato \*.abs en BVBS Viewer

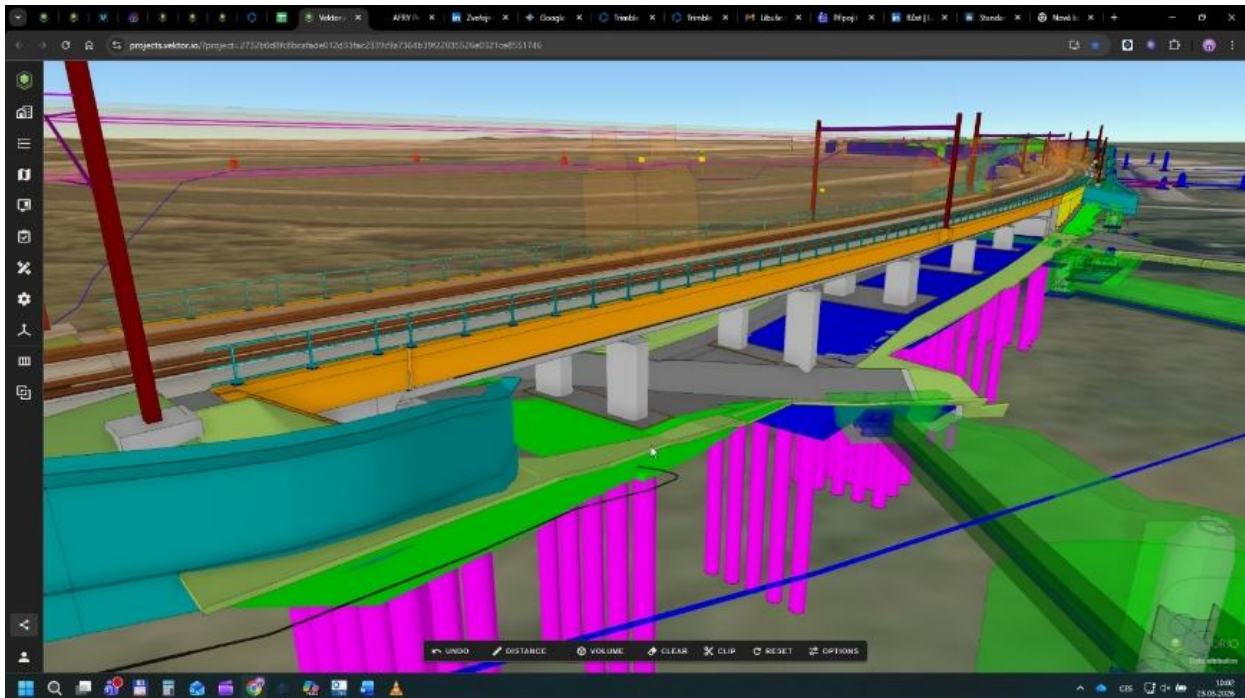


Figura 21: Puente ferroviario nº 132001 en el contexto de otras disciplinas en el software Vektor.io

El uso potencial de las tecnologías de realidad aumentada lleva esta claridad visual a un nuevo nivel. El armado digital 3D se puede proyectar directamente sobre el encofrado, lo que acelera significativamente las inspecciones.

Actualmente, la mayoría de los dispositivos modernos pueden realizar replanteos directamente a partir de modelos en formato abierto \*.IFC.

### Del modelo de armado a la máquina dobladora: Automatización de la producción mediante el estándar BVBS

La verdadera eficacia del VDC se mide por la fluidez con la que los datos circulan a lo largo de todo el ciclo constructivo. Para vincular directamente el modelo de armaduras 3D con producción, utilizamos el estándar abierto BVBS.

Esto permite exportar los datos de cada barra a un formato de texto (normalmente con la extensión \*.abs) que las máquinas dobladoras automatizadas modernas pueden leer, independientemente del fabricante. Esto garantiza la continuidad digital y elimina los errores derivados de la transcripción manual de los planos de barras. El software moderno que utilizamos (como Tekla Structures) lo hace posible.

La continuidad digital garantiza que lo diseñado y aprobado en el modelo sea exactamente lo que se fabrica y entrega en obra, un estándar hacia el que debería avanzar la ingeniería civil checa dentro de su proceso de digitalización.

### BIM en el contexto GIS: El proyecto completo siempre disponible, desde mapas hasta CAD y BIM, pasando por nubes de puntos.

Un puente nunca existe de forma aislada, sino dentro de un entorno territorial concreto. Sin embargo, la mayoría de los CDE actuales no permiten una integración real entre BIM y GIS.

Contamos con la experiencia necesaria para integrar modelos BIM directamente en datos GIS. De esta forma, en una sola ventana del navegador, puede combinar un modelo IFC detallado de un puente con datos cartográficos, servicios GIS WMS, planos CAD, ortofotos, imágenes de 360°, fotogrametría 3D o nubes de puntos obtenidas mediante escaneo láser.

Gracias a la optimización, estos datos completos ahora son accesibles no solo en ordenadores de alto rendimiento, sino también en tabletas y teléfonos móviles directamente en la obra.

El modelo federado se convierte así en una fuente de información universal que todos los participantes del proyecto tienen siempre a su alcance, ya sea para abordar cuestiones de derechos de propiedad o para conocer el progreso del vertido de hormigón.

El modelo de coordinación general del software Vektor.io integra datos CAD/BIM/GIS y nubes de puntos en una única vista en un navegador web.

## CONCLUSIÓN

Los estudios de caso de la circunvalación D0, el puente I/20 Kfely, la I/4 Volyně – Zlešice y la I/3 Červene vršky – U Topolu demuestran un cambio significativo en la ingeniería de puentes hacia metodologías de diseño computacional y paramétrico. En estos diversos proyectos, que abarcan desde viaductos de autopistas de alta capacidad hasta complejas reconstrucciones prefabricadas, se han identificado varios beneficios clave de estos flujos de trabajo digitales:

- **Precisión en geometrías complejas:** Para los puentes de vigas cajón de la circunvalación D0 y el puente Kfely, el modelado 3D resultó indispensable para resolver las interferencias de armado y pretensado en secciones con gran esviaje o variaciones de canto, cuya coordinación mediante métodos en 2D tradicionales habría sido prácticamente imposible.
- **Eficiencia en procesos iterativos:** El enfoque utilizado en el diseño conceptual de puentes en la carretera I/4 y en el diseño de tendones de pretensado de puentes de vigas cajón en la circunvalación D0 permitió a los equipos de diseño procesar docenas de iteraciones en respuesta a los requisitos del contratista o a los cambios de alineación. Esta flexibilidad garantizó que los diseños finales fueran estructuralmente óptimos y económicamente viables.
- **Mejor coordinación entre agentes:** La posibilidad de compartir modelos 3D detallados mediante plataformas como Trimble Connect o generar comparativas rápidas entre distintas soluciones de pilas mejoró significativamente la comunicación con el cliente y con la dirección de obra.

- **Integración de análisis y documentación:** Al establecer vínculos directos entre Grasshopper, Rhino y software de cálculo analítico como Midas Civil o IDEA StatiCa, se minimizó el riesgo de errores humanos en la transferencia de datos, lo que garantizó que la geometría física siempre coincidiera con el cálculo estructural.

En conclusión, aunque estas soluciones avanzadas basadas en modelado 3D y diseño paramétrico requieren una inversión inicial mayor en el desarrollo de modelos, dicha inversión queda claramente justificada por el aumento de velocidad, precisión y fiabilidad que aportan al diseño y construcción de infraestructuras complejas de puentes.

Los diseños y flujos de trabajo, desarrollados en estrecha relación con el proceso constructivo, fueron elaborados mediante la colaboración de un equipo multidisciplinar liderado por **Lukáš Zemek**.

Las soluciones técnicas conceptuales fueron desarrolladas por **Tomáš Kubín** y **Pavel Popp**, con un importante apoyo en el ámbito digital por parte de **Ondřej Nekl** y **Adam Kyp**.

Las verificaciones estructurales en software especializado fueron realizadas por **Ondřej Klimeš** y **Martin Neradílek**, mientras que los modelos 3D de armaduras fueron desarrollados por **Radka Jelínková** y **Jitka Mikolášková**, quien además se encargó de las mediciones y presupuestos.

Hana Klimešová fue responsable de la coordinación general del equipo y de la integración de nuevas incorporaciones, entre ellas **Alžběta Strenáčiková**.

# FATIGA EN ESTRUCTURAS DE ACERO: EL NUEVO EUROCÓDIGO EN 1993-1-9:2025 PARA PUENTES Y ESTRUCTURAS DE ACERO

*Prof. Filippo Berto, profesor de Mecánica de Materiales, Universidad La Sapienza de Roma, Italia*

*MSc. Ing. Alessandro Catanzano, CTO de Santo Engineering, Padua, Italia*

## INTRODUCCIÓN

La publicación del nuevo Eurocódigo sobre fatiga ofrece la oportunidad de revisar un problema de seguridad cuya insidiosa naturaleza reside en la idea de que sus efectos son tan a largo plazo que parecen irrelevantes para nosotros.

Sin embargo, el mismo conocimiento y técnicas utilizadas para abordar la fatiga policíclica también se aplican a la fatiga oligocíclica causada por ciclos plásticos, actividad sísmica, fluctuaciones frecuentes del viento o temperatura, así como por esquemas estáticos internos o externos inadecuados. Por ello, tras haber abandonado prematuramente las prácticas tradicionales de los expertos en favor de las promesas computacionales, es necesario orientar a la nueva generación de ingenieros hacia un mantenimiento oportuno, preciso y rentable, especialmente en puentes de acero, basado en la ciencia pero sin caer en posturas excesivamente dogmáticas.

## UN ÁMBITO ESTRUCTURAL QUE TAL VEZ YA NO SEA UN NICHU

En el amplio y complejo mundo de la ingeniería civil, la fatiga ha sido históricamente un tema de nicho dentro de un campo ya de por sí especializado: el diseño de estructuras de acero.

Si se considera que el primer libro publicado sobre el tema a nivel mundial data de 1924 [1], centrado principalmente en la mecánica —su ámbito natural— y no en puentes o estructuras civiles, resulta evidente por qué tuvimos que esperar a que el tema adquiriera relevancia.

Solo después de que los puentes construidos tras la Segunda Guerra Mundial empezaran a ser cuestionados, los administradores europeos comprendieron la urgencia del problema. Esta cuestión afecta principalmente a las estructuras existentes, es una tarea compleja estimar su vida útil remanente, de igual modo que en los puentes que están aún por construir.

A medida que crece el interés, aumenta también la investigación, los cursos y las publicaciones, no solo en el ámbito académico, sino también en los sectores profesional, asociativo y empresarial. Por ello, la publicación del nuevo Eurocódigo EN1993-1-9:2025, un documento oficial destinado a servir de referencia en la materia en Europa y, prácticamente, en todo el mundo, constituye un momento significativo para revisar la situación actual.

## LA EVOLUCIÓN DE LA NORMA EN 1993-1-9 RESPECTO A LA VERSIÓN DE 2005

Sin pretender repasar los últimos veinte años de normativa oficial sobre fatiga en diversos campos de aplicación del acero, como la mecánica, la industria offshore, la naval, la aeronáutica, los parques de atracciones y los puentes de acero, que ya han sido ampliamente tratados. Es importante señalar que la nueva versión del Eurocódigo sobre fatiga está dirigida a un proyectista con conocimientos sólidos sobre la materia, cuando no a un experto, e incluye más de cien páginas adicionales respecto a la edición anterior. A esto se suman las importantes nuevas referencias incluidas en la norma EN1993-1-

14:2025, relativas a la simulación y modelización computacional, que contienen información adicional relevante.

Para precisar en qué se han invertido estas energías, es evidente que, contribuyendo al valioso trabajo del IIW [2] [3], se han realizado esfuerzos para aclarar conceptos y terminologías que han sido objeto de intensos debates entre los propios especialistas [4]. La principal, la irrupción de los elementos finitos en la mesa de cálculo de todos los proyectistas. La nueva versión, de hecho, aborda la importante transición del modelo de "viga" (beam), que lo ocultaba y simplificaba todo, al modelo de "lámina" (shell) o incluso "sólido" (solid).

En lugar de la precisión y certeza prometidas, estos modelos introdujeron no solo el problema de dónde leer la tensión nominal en la modelización, una vez estandarizada la propia modelización, sino también el desafío de la interpretación, que está intrínsecamente ligada al modelado en los diferentes métodos. La tensión elástica, necesaria para la infraestructura del método, se acopla con los coeficientes de concentración de tensiones geométrico-metalúrgicos  $kt/kf$ , expresados mediante las diferentes curvas de resistencia, que constituyen el verdadero punto crucial para determinar la vida útil de servicio.

## METAPROBLEMAS DE LOS INGENIEROS DE PUENTES DE ACERO EN RELACIÓN CON LA FATIGA

Cuando las cargas variables provocan fluctuaciones de tensión o cuando las propias estructuras se mueven o tienen partes móviles, la fatiga se convierte en un campo que debe analizarse. Particularmente, en términos de controles de seguridad o incluso en el diseño completo de la estructura o de sus componentes más costosos, como juntas, nodos y conexiones realizadas mediante soldaduras, pernos, pasadores y elementos de contacto. Estos requieren múltiples etapas de fabricación, lo que puede provocar un aumento significativo en los costos de producción si no se gestionan adecuadamente.

Por ejemplo, existe la creencia errónea de que la penetración total de una soldadura proporciona la misma capacidad que el metal base, eximiéndola así del cálculo. Si bien esto puede ser cierto en

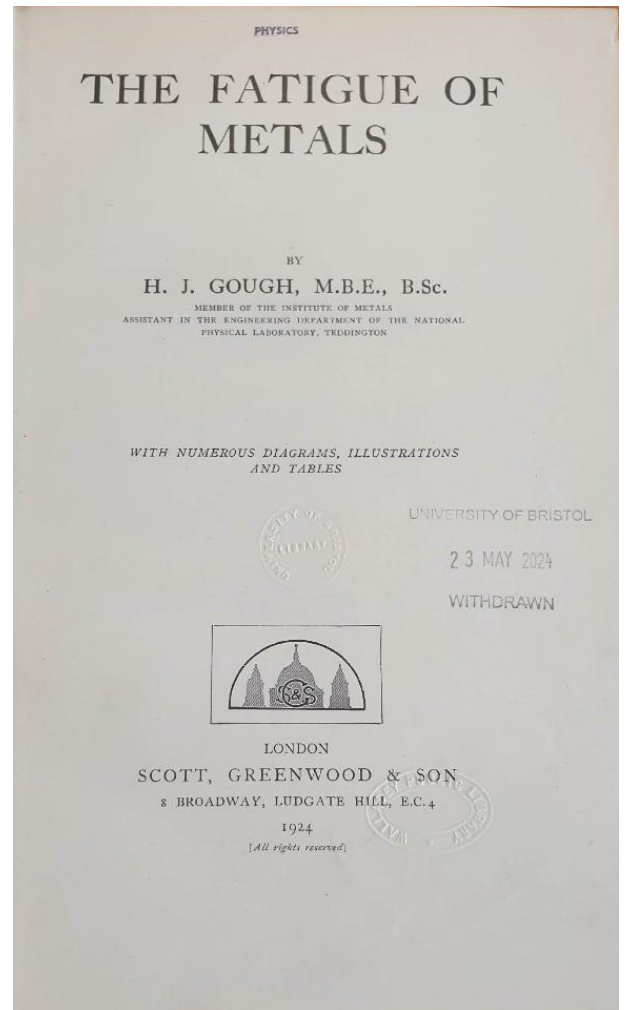


Figura 1: Aunque existen muchas referencias fundamentales previas, el libro de Gough es la primera publicación con una perspectiva amplia para profesionales sobre la fatiga de los metales. (Walter Schutz, IABG D-85521 Ottobrunn, Alemania)

términos de resistencia, es falso para la fatiga: la durabilidad de una junta a tope NDT con este tipo de soldadura es aproximadamente  $(2,25)^3 = 11,39$  veces menor, suponiendo constantes todos los demás factores.

Cuando anteriormente se hizo referencia a otros ámbitos del uso del acero, el objetivo era destacar los problemas adicionales que el mundo de los puentes de acero comparte con algunos de esos sectores de la construcción metálica. El primero de estos problemas es que los puentes de acero son siempre prototipos únicos, fabricados artesanalmente, que no pueden ensayarse estadísticamente a pruebas de fatiga en el laboratorio, como sí ocurre en mecánica con muchas piezas idénticas.

Esto no solo se debe al número de ensayos que requeriría el método empírico-estadístico, sino también a que la estructura no se reutiliza. Puesto que una sola muestra no puede ensayarse a fatiga, el diseño a fatiga de gabinete —definido como un modelo global que determina los detalles mediante proyecto y cálculo— sigue siendo el único enfoque viable.

El segundo problema radica en que los puentes de acero son significativamente mayores que los componentes mecánicos, pese a que el problema se produce alrededor de una entalla de tres décimas de milímetro, que puede aparecer en cualquier punto y bajo una tensión espectral.

En consecuencia, en la práctica, aún quedan muchas comprobaciones de fatiga por realizar, y la combinación de nuevas técnicas y métodos de modelado computacional tiende a aumentar la complejidad del problema en lugar de resolverlo, como ya se mencionó.

El tercer problema es que, en el mundo posmoderno actual, persiste la creencia de que con el software adecuado, independientemente de dónde se adquiriera, un ingeniero de puentes de acero puede empezar a trabajar repentinamente en estructuras complejas utilizando los mismos recursos teóricos, procedimentales, económicos y temporales previstos para proyectos anteriores, lo cual no es cierto en absoluto.

## LA NUEVA NORMA EN 1993-1-9:2025

Dado que, por las razones mencionadas anteriormente, la mecánica de fractura es en gran medida inaplicable en el diseño de puentes de acero, tanto desde el punto de vista didáctico como en su aplicación práctica. El conjunto de definiciones proporcionadas en el párrafo 3 de la norma es muy importante, especialmente la definición de “factor de concentración de tensiones” –  $k_f$ .

Todo el sistema de verificación depende de este factor. Probablemente con el objetivo de simplificar, se ha definido como la “parte computable del coeficiente de concentración de tensiones”. Sin volver a mencionar  $k_t$  ni el vínculo teórico detallado [5] entre los dos coeficientes. Sin embargo, la definición de  $k_t$ , el coeficiente teórico de concentración de tensiones es crucial para comprender qué se puede modelizar directamente con FEM y qué no, y por qué es necesario cambiar de técnica cuando  $k_t$  alcanza un valor crítico, transformándose en  $k_f$ .

Esto marca la transición desde un criterio puntual, que permite una lectura de tensión simple, a un criterio de campo, donde la lectura debería ser una integral sobre un intervalo o volumen, con importantes implicaciones procedimentales que aún no se reflejan en la norma ni en la edición 2024 del IIW [14].

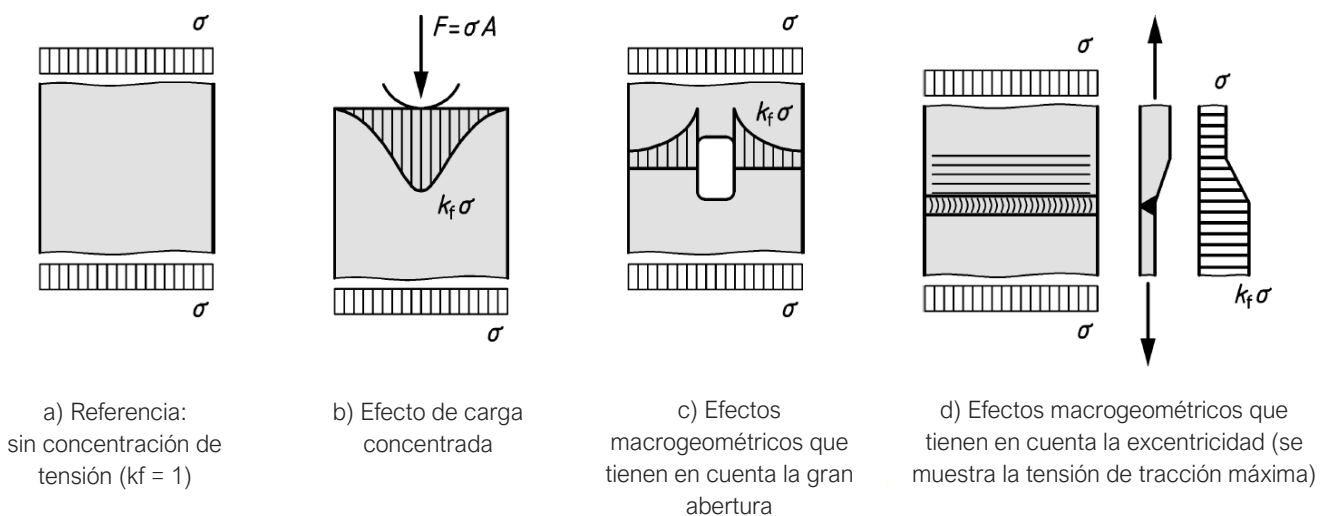


Figura 2: Ejemplos de la parte computable de  $K_f$ ,  $K_t$ , para chapa metálica sin entalladuras, a partir de la carga concentrada de una rueda, alrededor de un orificio grande, a partir del cambio de espesor (la excentricidad se calculará por separado) (Figura 3.1 de EN 1993-1-9:2025)

En consecuencia, la parte no computable se asigna a la entalla que se muestra en las tablas 10.1–10.12, las cuales se han actualizado no solo en su presentación visual, ahora más clara y precisa, sino también con importantes mejoras que especifican mejor la posición de lectura de la tensión, el tipo de detalle, las notas de validez y si se requieren verificaciones.

El esfuerzo exhaustivo por revisar críticamente la literatura existente [6] y los trabajos de comunicación realizados no están presentes en ninguna legislación anterior.

Sin embargo, siguiendo esta lógica, también habría sido útil expresar  $k_f$  como una relación respecto a la chapa metálica con bordes laminados ( $\Delta\sigma_c = 180$  MPa para 2 millones de ciclos,  $k_f = 1,0$ ): por ejemplo, para una soldadura de penetración completa CJP, una soldadura a tope con un ángulo mayor de  $110^\circ$  (tabla 10.4 – 3,  $\Delta\sigma_c = 80$  MPa para 2 millones de ciclos) tendría un  $k_f$  de  $180/80 = 2,25$ , comparado directamente con el de la soldadura rebajada o rectificada (tabla 10.4 – 1,  $\Delta\sigma_c = 112$  MPa para 2 millones de ciclos), que produce un  $k_f$  de  $180/112 = 1,61$ , subrayando el efecto metalúrgico duradero de la penetración completa, una vez que el efecto geométrico de la entalla ha sido eliminado mediante un costoso rectificado o esmerilado completo.

En el ámbito de la tensión nominal, que ya se había perfeccionado en la versión de 2005 mediante la "tensión nominal modificada", surgen ahora dos problemas inmediatos: la forma de la tensión

a través del espesor (si es puramente tensión de membrana, puramente tensión de flexión o una mezcla gradual de ambas) y el rápido incremento hacia valores altamente variables a medida que cambian las condiciones de contorno cerca del cordón de la soldadura. La figura 3.2 de la norma resume estas dos cuestiones.

El efecto de la flexión, calculado a una distancia determinada (es decir, nominal), antes de que la geometría de la soldadura altere la distribución de tensiones, resulta beneficioso. En consecuencia, tomar la tensión compuesta máxima es un enfoque conservador al pasar de una tensión puramente de membrana a una tensión puramente de flexión. Este efecto se estima de forma muy aproximada, como se muestra en [7], [8] y [9], pero se mide con alta precisión en [10], ya que no es despreciable (hasta 3 veces de prolongación de la vida útil). La tensión de ensayo que figura en las Tablas 10.1 a 10.12, ya mencionada, representa la tensión de membrana, salvo que se indique lo contrario.

Alternativamente, deben emplearse métodos específicos, particularmente el punto caliente polinómico fijo y la tensión de entalla efectiva con un radio ficticio, presentados en los Anexos B y C, respectivamente, en formatos estandarizados. Su potencial para una amplia aplicación en grandes estructuras plantea una serie de desafíos de modelización que se ilustran claramente en la norma EN 1993-1-14 y pueden verse fácilmente en las Figuras 8.5 y 8.9 de dicha norma. De hecho, si bien el conocimiento de estos métodos es vital para la investigación académica o para

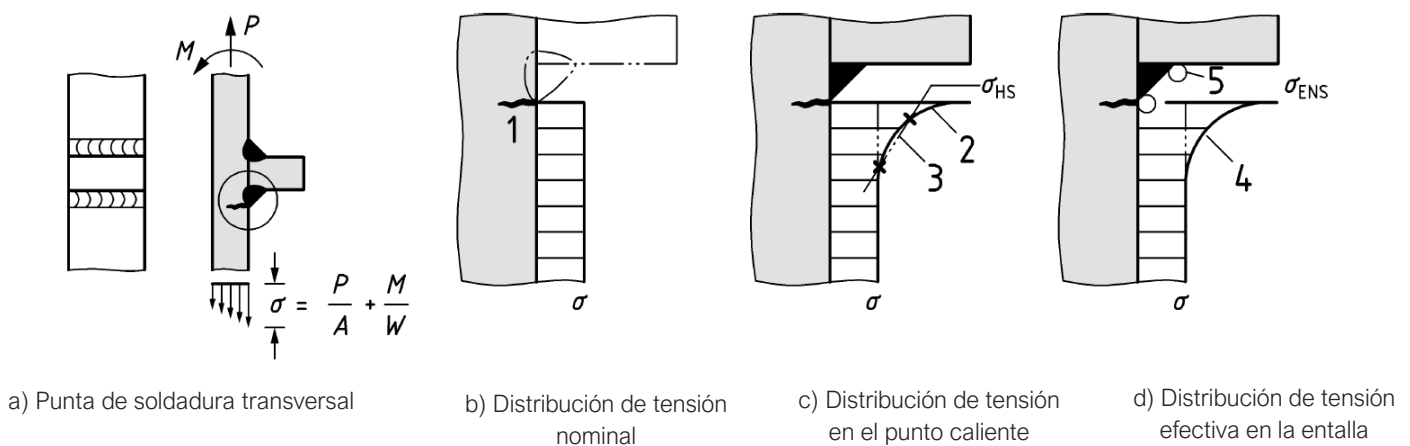


Figura 3: La tensión variable en el espesor cambia de la nominal al punto caliente y a la entalla efectiva, dependiendo del método de cálculo utilizado. (Figura 3.2 de EN 1993-1-9:2025)

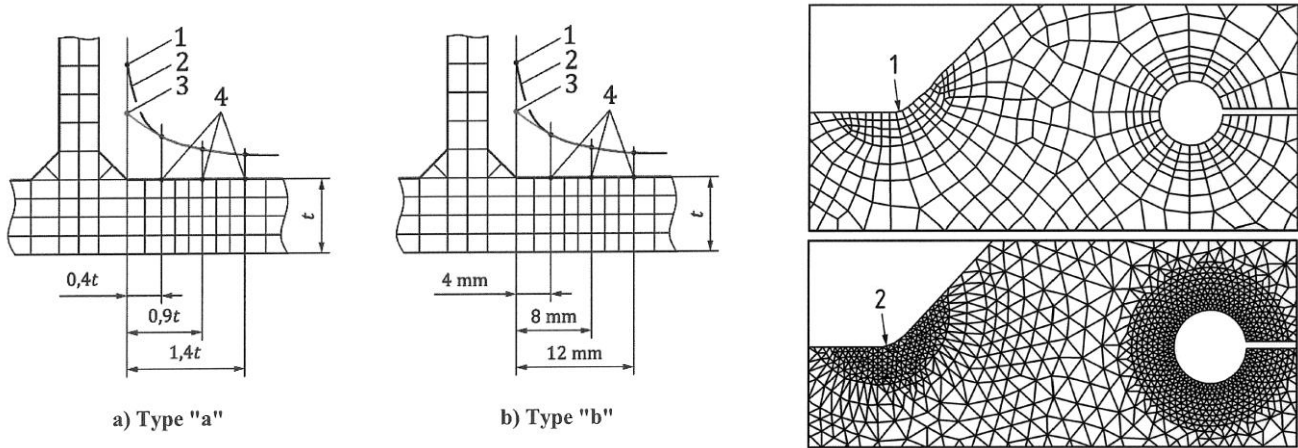


Figura 4: Modelado para el método del punto caliente y el método de entalla efectiva con un radio ficticio de 1 mm, tamaños de malla  $<0,25$  mm y  $<0,15$  mm respectivamente. (Figuras 8.5 y 8.9 de EN 1993-1-14:2025)

finés de ECA (Evaluación Crítica de Ingeniería), su uso generalizado por parte de principiantes puede generar importantes problemas operativos y de costos.

La norma se centra acertadamente en aspectos operativos importantes que siempre dan lugar a malentendidos o arbitrariedades, por ejemplo, en lo relativo al cálculo nominal de las tensiones en la garganta de la soldadura para momentos fuera del plano. Pero también en la definición de espectros y cualquier  $\lambda$ factor de equivalencia de daños. Puesto que la guía operativa de la versión de 2005 era menos detallada.

Aunque las curvas de resistencia permanecen esencialmente inalteradas, (salvo recalibraciones basadas en trabajos estadísticos rigurosamente realizados en lo relativo a las uniones soldadas de tubos cuadrados y circulares), junto con los métodos locales introducidos debe considerar la teoría de Efthymiou (Tabla 10.8 y Tablas D.1 y D.2 en el Apéndice D). Se remonta a estudios de la década de 1980; aborda el efecto de flexión en complejos nodales precalculados derivados únicamente de la tensión axial de un modelo de barras.

Por un lado, existe una limitación significativa a situaciones planas y no tridimensionales, que son típicas de este tipo de estructura. Pero a la luz de los métodos locales introducidos—con mallas de aproximadamente una décima de milímetro—el coeficiente  $k_1$  representa un pasado venerable, que debe ser visto con respeto, pero que no se ajusta completamente al conocimiento científico actual.

Los efectos del pretensado en los pernos y los efectos beneficiosos de los tratamientos mecánicos, entre otros. Ya han sido incluidos en otras normativas y sometidos a exhaustivas pruebas de campo, se resumen ahora por fin en el nuevo Eurocódigo.

## ELASTICIDAD, PLASTICIDAD Y FRAGILIDAD

En el punto (2) del párrafo 1, el “Alcance” de EN 1993-1-9:2025 menciona que la citada “mecánica de fractura” y el “método de deformación en entalla” mencionados anteriormente ni están cubiertos ni excluidos.

La primera, parte fundamental de los métodos avanzados de investigación durante años, puede consultarse fácilmente de los muchos organismos reguladores existentes [2][3][8]. El segundo, el “método de deformación en entalla”, que ha sido ampliamente revisado en la literatura durante décadas y está incluido en otras normas importantes [11], es muy próximo al ámbito de los puentes de acero. Puede especificar los requisitos de elasticidad del párrafo 9.1 para cargas variables en el contexto de FEM. Abordando completamente esos picos de tensión debidos a  $k_f$ , mediante un rápido cálculo plástico de la entalla en forma de energía. Deriva, con procedimientos cerrados, los ciclos admisibles de fatiga oligocíclica, como efecto explícito de la fragilidad resultante de la acumulación plástica. Actualmente, este hecho está solo está parcialmente, pero no completamente, incorporado en la norma EN1993-1-10:2005 para ingenieros civiles.

Sin embargo, en la Norma, en lugar de procedimientos numéricos detallados, solo se incluye una breve nota a pie de página que advierte sobre los peligros de los ciclos plásticos. En este punto se requiere necesariamente un esfuerzo, dadas las importantes repercusiones en el contexto de las fluctuaciones por ciclos térmicos que actúan sobre esquemas estáticos interna o externamente hiperestáticos.

Estas fluctuaciones no siempre son fáciles de identificar en estructuras de acero modernas y no convencionales. Evaluadas únicamente, mediante modelización computacional, o por fluctuaciones frecuentes del viento, sobre geometrías aerodinámicamente excéntricas. Presentan altos valores de  $k_f$  y características complejas.

Esto es fundamental, sobre todo, para los cálculos sísmicos, que aún dependen en gran medida de ensayos de laboratorio, sujetos a las limitaciones metodológicas señaladas anteriormente para grandes estructuras.

## EL VÍNCULO CON LA NORMA EN 1090-2:2018 Y LA MONITORIZACIÓN

La nueva versión de la normativa que hemos estado discutiendo reafirma la importancia de la protección contra la corrosión, que siempre debe minimizarse, ya que de lo contrario, como se muestra en [7], las curvas S-N se deterioran, reduciendo la vida útil.

Sin embargo, más allá de las medidas de protección actuales en este campo, el marco del

Level of fatigue utilization <sup>a</sup>	Consequences from failure of joint or component <sup>c</sup>	Stress in weld <sup>b</sup>	Weld Inspection Class (WIC)
High fatigue utilization	Substantial <sup>b</sup>	Welds with the direction of dynamic principal stress transverse to the weld (between 45° and 135°)	WIC5
		Welds with the direction of dynamic principal stress in the direction of the weld (between -45° and +45°)	WIC4
	Not substantial <sup>c</sup>	Welds with the direction of dynamic principal stress transverse to the weld (between 45° and 135°)	WIC3
		Welds with the direction of dynamic principal stress in the direction of the weld (between -45° and +45°)	WIC2
No fatigue (i.e. quasi-static) or Low fatigue utilization	Substantial <sup>b</sup>	Welds with high <sup>d</sup> tensile stresses transverse to weld	WIC5
		Welds with low tensile stresses transverse to weld and/or high <sup>d</sup> shear stresses	WIC4
	Not substantial <sup>c</sup>	For welds in EXC3 or EXC4 with high <sup>d</sup> tensile stresses transverse to weld	WIC3
		All other load-bearing welds except welds in EXC1	WIC2
		Welds in EXC1 and non-load-bearing welds	WIC1
<p><sup>a</sup> Low fatigue utilization means connection with calculated fatigue life longer than 4 times the required fatigue life.</p> <p><sup>b</sup> Substantial consequences means that the failure of the joint or member will entail:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— possible multiple loss of human life; and/or;</li> <li>— significant pollution; and/or;</li> <li>— major financial consequences.</li> </ul> <p><sup>c</sup> The consequences may be assessed as Not substantial if the structure has been provided with sufficient residual strength to meet specified accidental actions.</p> <p><sup>d</sup> High stresses are those that (quasi-)static stresses that exceed 50 % of the welds tensile or shear capacity, as appropriate. Low stresses conversely. Special consideration should also be given to the selection of WIC where the principal stress is in the through-thickness direction of the parent material.</p>			

Figura 5: Definición de la clase de inspección de soldadura (WIC) del Anexo L de la norma EN 1090-2 que se gestionará con la Tabla 24. (véase la Figura 6)

Type of weld	Shop and site welds		
	EXC1	EXC2	EXC3 <sup>a</sup>
Transverse butt welds and partial penetration welds in butt joints:	0 % <sup>b</sup>	10 %	20 %
Transverse butt welds and partial penetration welds:			
— in cruciform joints	0 % <sup>b</sup>	10 %	20 %
— in T joints	0 %	5 %	10 %
Transverse fillet welds <sup>c</sup> :			
with $a > 12\text{mm}$ or $t > 30\text{ mm}$	0 %	5 %	10 %
with $a \leq 12\text{mm}$ and $t \leq 30\text{ mm}$	0 %	0 %	5 %
Full penetration longitudinal welds <sup>d</sup> between web and top flange of crane girders	0 %	10 %	20 %
Other longitudinal welds <sup>d</sup> , welds to stiffeners and welds specified in the execution specification as being in compression	0 %	0 %	5 %
<sup>a</sup> For EXC4 the percentage extent shall be at least that given for EXC3. <sup>b</sup> 10 % for such welds executed in steel $\geq S420$ . <sup>c</sup> Terms $a$ and $t$ refer respectively to the throat thickness and the thickest material being joined. <sup>d</sup> Longitudinal welds are those made parallel to the component axis. All others are considered as transverse welds.			

Figura 6: EN 1090-2 Tabla 24: Tipo y tasa de END que preparan la definición de WIC

llamado mantenimiento —un término que sugiere un proceso manual en lugar de un proceso de ingeniería— se complementa con las herramientas presentadas en [12], Tablas L.1 y 24.

Estas herramientas, utilizando los índices de aprovechamiento por fatiga, el tipo y orientación de las tensiones, los parámetros geométricos de la soldadura —como el tipo, la preparación de la junta (groove) y el espesor— y factores derivados de análisis detallados, asignan una clase de inspección probabilística (WIC) a las soldaduras.

Esto permite determinar el porcentaje y el tipo de inspecciones de soldadura que se realizarán en el taller o en obra, basándose únicamente en la información disponible en el ordenador del proyectista. Este proceso carece de incertidumbre y de cualquier influencia arbitraria.

Si bien durante las fases de diseño pueden ser necesarias algunas iteraciones a medida que los equipos de preproducción y de terceros responden a las decisiones del diseñador. El proceso queda ahora completamente bajo su control y responsabilidad, salvo la ejecución.

De hecho, tanto para la fatiga como para la resistencia, solo el diseñador tiene acceso al factor de utilización máximo (UF) y a su ubicación en el modelo de elementos finitos (FEM). Esta información se puede recuperar, organizar y proporcionar fácilmente en planos de taller, informes o modelos BIM del puente con realidad aumentada. Pero eso no es todo: como la soldadura es rastreable y el WIC ha definido un estándar integral, se proporciona un mapa de riesgos operacionales como punto de partida.

Podríamos denominarlo mapa de diseño de riesgos, ya que el espectro de carga considerado es solo el del diseño, no el espectro real, que solo se irá definiendo con el tiempo mediante el monitoreo, la recopilación de datos y el análisis.

Con este espectro real y en constante evolución, es posible dar un paso crucial al calibrar e integrar un modelo de "fatiga gemela". Este modelo proporciona datos a los submodelos de elementos finitos para el análisis de fatiga, incluso el control de las entallas individuales.

# e-BrIM

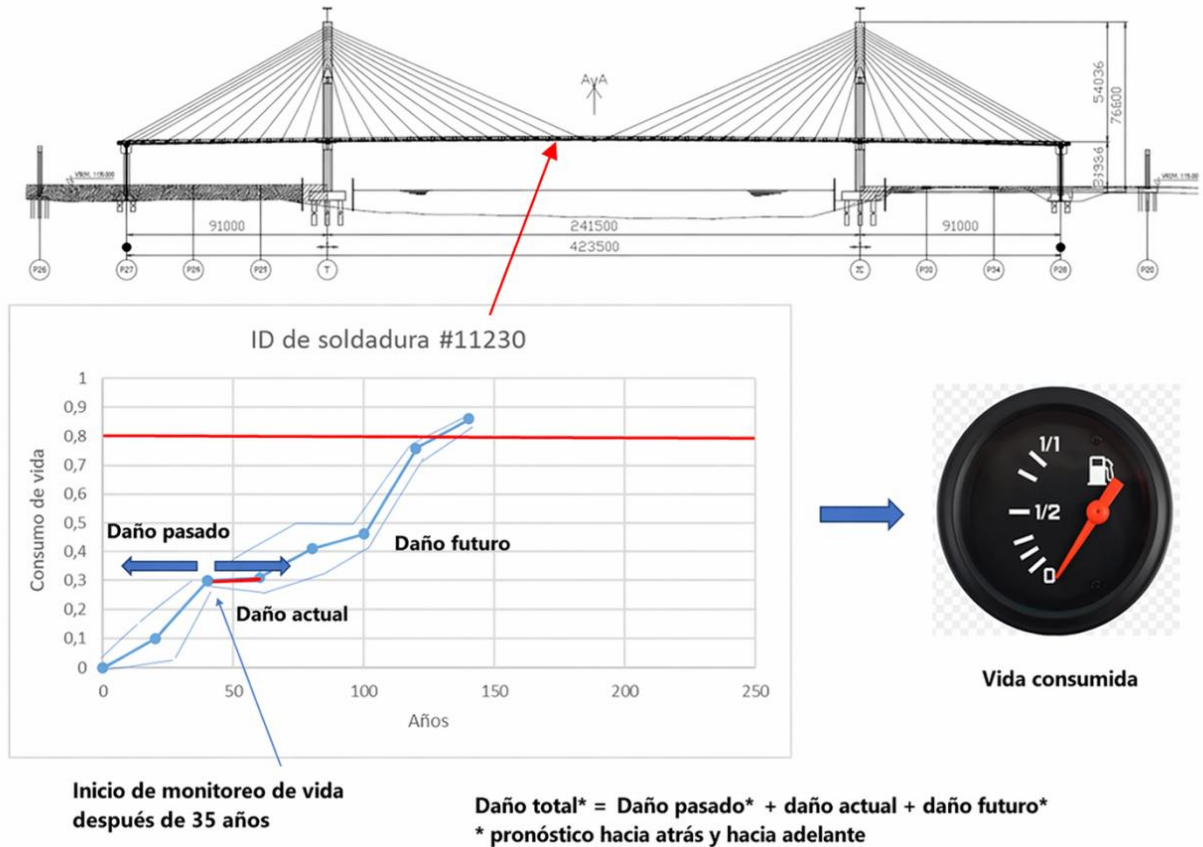


Figura 7: Con plena trazabilidad de la entalla sobre el mapa topológico, puede realizarse una evaluación del consumo de la vida útil en el ámbito de cada soldadura individual, tanto hacia adelante como hacia atrás en el tiempo. Con intervalos de confianza variables, utilizando el espectro real, temporal parcial, pero real, teniendo siempre presente el límite de diseño rojo.

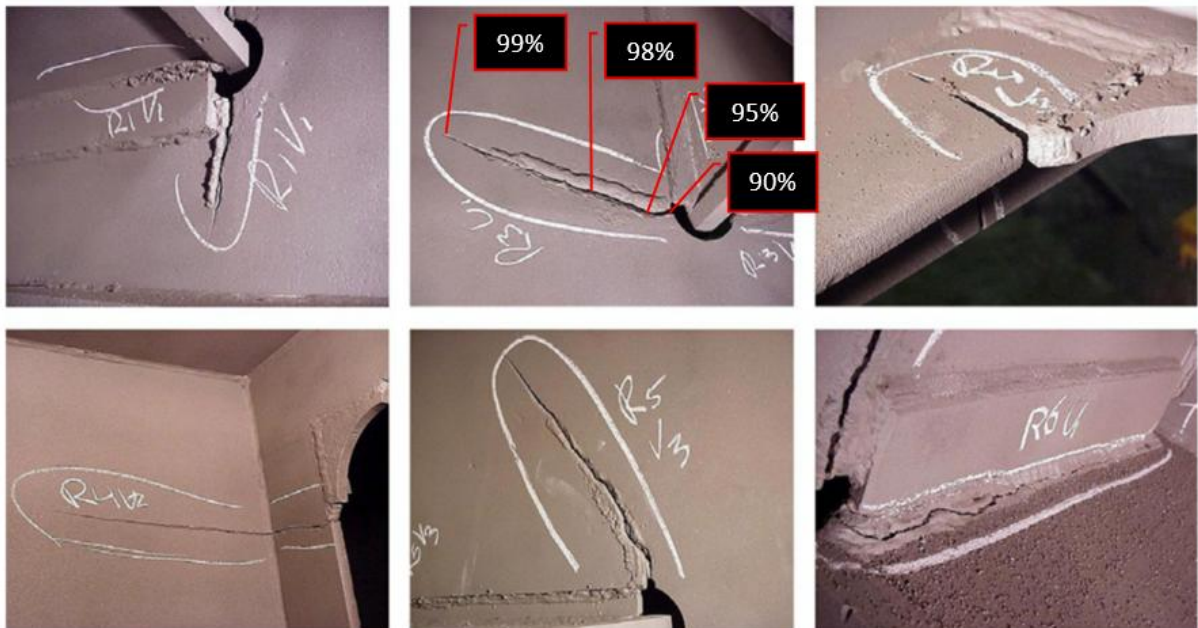


Figura 8: La fisura en esta pieza transversal ortotrópica se desarrolló por el uso a lo largo de los años sin hacerse visible, en una entalla con tensión biaxial local y global. Tras consumir el 90 % de su vida útil durante la fase de nucleación sin mostrar signos visibles, en el 10 % restante de su vida, la fisura experimentó un aumento exponencial de la tensión en el ápice y se propagó rápidamente. En última instancia, la rotura ocurre en la mayoría de los casos.

Lo que permite calcular el daño real punto por punto y realizar un seguimiento del consumo acumulado de vida útil de la entalla del puente de acero, comparándolo con las estimaciones de resistencia realizadas durante el diseño.

El mapa de riesgos se vuelve así topológico, registrando la progresión real del daño a medida que las cargas varían con el tiempo. Con intervalos de confianza adecuados, puede evaluar los daños pasados y futuros. Los tres tipos de daño se pueden consolidar en una única cifra de daño total, que se actualiza con el tiempo, refinando el mapa de riesgos.

Si se tiene en cuenta que, en el 90 % de los casos, una fisura se inicia sin presentar signos visibles. Resulta evidente la diferencia entre, por un lado, un sistema informatizado de detección de daños, capaz de guiar directamente al experto no solo hasta la soldadura monitorizada y resaltada en rojo, sino hasta la posición exacta "x". Donde el ultrasonido de fatiga (UF) detecta ahora la evolución con respecto al punto "x" utilizado en taller para los ensayos no destructivos (END), definido a partir del diseño. Frente a por otro lado, los procedimientos actuales, en los que el personal de mantenimiento inspecciona a oscuras los cajones, recorriendo la megaestructura de arriba abajo, en busca únicamente de aquello que llega a hacerse visible en el 10 % restante del tiempo previo a la catástrofe.

## REFERENCIAS

- [1] The fatigue of metals (La fatiga de los metales), H. J. Gough , Scott Greenwood, Londres, 1924
- [2] Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints (Recomendaciones para el diseño a fatiga de uniones soldadas), Hobbacher , IIW 2008
- [3] Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints, Hobbacher, IIW 2016
- [4] New development at the recent update of the IIW recommendations for fatigue of welded joints and components (Novedades en la reciente actualización de las recomendaciones del IIW sobre fatiga de uniones y componentes soldados), A. F. Hobbacher , ECCS Steel Construction, vol. 3, Ernst & Son , Múnich, 2010.
- [5] Metal fatigue (Fatiga de los metales), Frost, Marsh, Pook, Oxford University Press, Londres, 1974
- [6] Neubewertung und Erweiterung des Kerbfallkatalogs nach Eurocode 3 für eine zukunftsfähige Auslegung hochbeanspruchter Stahlkonstruktionen (Reevaluación y ampliación del catálogo de casos de entalla según el Eurocódigo 3 para un diseño sostenible de estructuras de acero sometidas a altas tensiones), M. Feldmann, T. Ummenhofer , U. Kuhlmann, Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 2019
- [7] BS 7608:2014+A1:2015 Guía para el diseño y la evaluación de la fatiga de productos de acero
- [8] BS 7910:2019 Guía de métodos para evaluar la aceptabilidad de defectos en estructuras metálicas
- [9] DNV GL – RP – C203, Diseño a fatiga de estructuras de acero marinas, 2016
- [10] Advanced methods of fatigue assessment (Métodos avanzados de evaluación de la fatiga), Dieter Radaj – Michael Vormwald, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [11] ISO 19902:2020 Industrias del petróleo y del gas natural — Estructuras fijas de acero en alta mar
- [12] EN 1090-2:2018+A1:2024 Ejecución de estructuras de acero y estructuras de aluminio - Requisitos técnicos para estructuras de acero
- [13] Metal fatigue in engineering (Fatiga de metales en ingeniería), RI Stephens, A. Fatemi, RR Stephens, HO Fuchs, John Wiley & Sons, 2000
- [14] Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints, Hobbacher, IIW 2024

## REFLEXIONES FINALES

En lo que respecta a la fatiga, que cuesta anualmente el 2 % del PIB mundial [13], el progreso logrado en los últimos 20 años por el Eurocódigo EN1993-1-9:2025 para puentes de acero ha sido notable. Sin duda, el documento servirá como una guía fiable para la nueva generación de profesionales.

Sin embargo, su formación requiere tiempo y dedicación, y sus medios exigen recursos, así como un uso constante y actualizaciones periódicas para adquirir la experiencia propia de un proyectista.

Por ello, debe reconocerse que esta nueva generación de ingenieros tendrá dificultades para abordar estos desafíos sin la financiación, el apoyo y el reconocimiento adecuado a su importancia; de lo contrario, el ideal de la longevidad eterna de un puente dentro de una sociedad democrática también se verá comprometido.

## CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA DE UN PUENTE DE CARRETERA: INTEGRACIÓN DIGITAL DEL DISEÑO, LA FABRICACIÓN Y EL MONTAJE

*Gitae Roh, postdoctorado; Changsu Shim, Profesor, Universidad Chung-Ang;  
Hyunmin Kim, BasisSoft; Daeho Jang, Universidad CheongJu;  
Corea del Sur*

### INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de avanzar en la construcción de puentes, más allá de la digitalización convencional, se llevó a cabo una iniciativa orientada a investigar y demostrar la posibilidad de avanzar hacia un sistema de producción totalmente industrializado. Mientras que los esfuerzos recientes en el sector de la construcción se han centrado principalmente en la digitalización de tareas específicas como el modelado 3D, el detallado automatizado o la prefabricación aislada.

El presente proyecto persiguió un objetivo más ambicioso: la integración del diseño, la fabricación y el montaje dentro de un flujo de trabajo unificado y basado en datos. Empleando principios ampliamente consolidados en industrias de fabricación avanzada, el proyecto tuvo como objetivo verificar la viabilidad de transformar la construcción de puentes en un sistema orientado a la producción mediante la integración digital de procesos de extremo a extremo.

En lugar de tratar las tecnologías digitales como herramientas independientes, el proyecto hizo hincapié en la interoperabilidad de la información a lo largo del ciclo de vida, el intercambio fluido de datos entre los distintos agentes implicados y la optimización de procesos desde una perspectiva de industrial. Para ello, se seleccionó un puente de autopista, cuya construcción estaba prevista, como banco de pruebas a escala real bajo la dirección del promotor del proyecto, en el marco del programa nacional «Desarrollo de Tecnologías de Construcción Inteligente» de la República de Corea. Al integrar el estudio en un proyecto de

construcción en curso, la validación se llevó a cabo en condiciones reales de obra, garantizando así la aplicabilidad práctica, la constructibilidad y la fiabilidad de los procesos.

El puente objeto de estudio, está situado en una autopista de reciente construcción, tiene una longitud total de 175 m y consta de cinco vanos de 35 m.

La calzada en sentido ascendente tiene 16,11 m de ancho con seis vigas por vano, mientras que la calzada en sentido descendente tiene 12,51 m de ancho con cuatro vigas por vano. La superestructura comprende vigas prefabricadas de hormigón pretensado (PSC) y losas de tablero prefabricadas de hormigón armado (RC), reflejando una estrategia de fabricación fuera de obra, alineada con los principios del Diseño para la Fabricación y el Montaje (DfMA). La subestructura consta de pilas de hormigón armado tipo T. La figura 1 ilustra la configuración general del puente, incluyendo las condiciones del emplazamiento y los principales componentes estructurales seleccionados para su industrialización e integración digital dentro del marco de este proyecto.

En este proyecto, se seleccionaron las vigas de PSC y las losas prefabricadas del tablero como elementos principales para la industrialización, llevándose a cabo un análisis orientado a la fabricación a lo largo de los procesos integrados de diseño, fabricación y montaje.

El análisis se centró en las ineficiencias asociadas a procesos repetitivos e intensivos en mano de obra, así como en el uso paralelo de métodos de

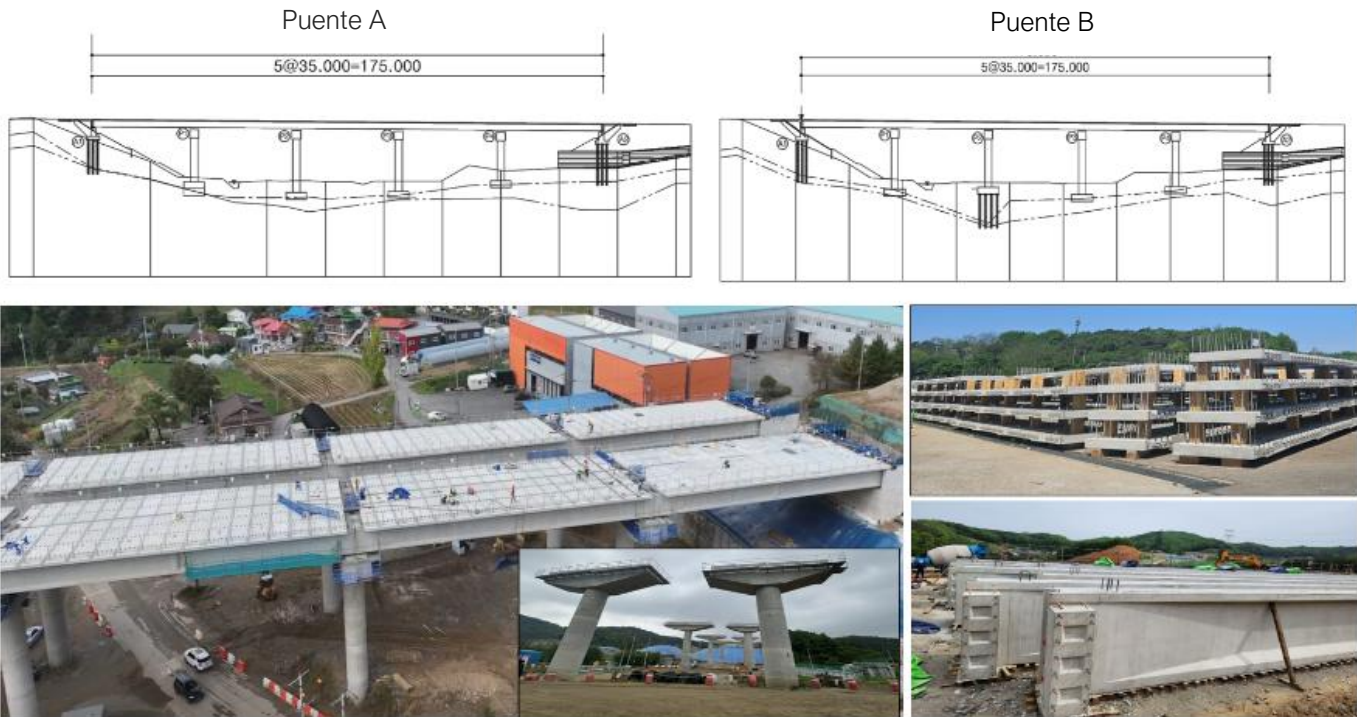


Figura 1: Resumen del proyecto Testbed Bridge

construcción tradicionales y tecnologías digitales en la construcción convencional de puentes. Se prestó especial atención a las limitaciones que podrían impedir la transición hacia la industrialización completa, tales como la fabricabilidad, el control de la tolerancia dimensional y la compatibilidad del montaje in situ. Estos factores fueron identificados a nivel de elemento estructural y vinculados directamente con la información de diseño, con el fin de establecer una estrategia de mejora integrada y alineada con un sistema constructivo orientado a la producción. Mediante este enfoque, el proyecto demostró la viabilidad de lograr la interoperabilidad e integración de los procesos a nivel de fabricación, más allá de la simple incorporación de herramientas digitales aisladas.

## COLABORACIÓN DIGITAL Y GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN

El proyecto se ejecutó bajo un Entorno Común de Datos (CDE) liderado por el promotor. El CDE actuó como plataforma centralizada para el almacenamiento, intercambio y gestión de la información a lo largo de todo el ciclo de vida, desde el diseño hasta la fabricación y el montaje en obra. El acceso se estructuró en base a los roles y se limitó a los agentes autorizados—promotores, proyectistas, fabricantes y contratistas—,

garantizando la integridad de los datos, la trazabilidad y la responsabilidad específica de cada fase. Organizado conforme a fases del ciclo de vida claramente definidas, este marco minimizó la discontinuidad de los datos y estableció un flujo de información estructurado y coherente con un sistema de construcción industrializado y orientado a la producción.

En la fase de diseño, se desarrollaron modelos digitales interoperables y estructuras de datos predefinidas con el objetivo de dar soporte directo a las etapas posteriores de fabricación y montaje, evitando reinterpretaciones de la información. Durante la fabricación, los datos de mediciones, registros de inspección, resultados de control de tolerancias e historiales de producción se integraron en el modelo, manteniendo la continuidad de la información.

En la fase de montaje, toda la información relativa a la inspección permitió verificar la construcción. Además, las simulaciones de la construcción en 3D—que incorporaban parámetros del terreno y de los equipos, como la capacidad de la grúa y sus radios de trabajo— se utilizaron para evaluar los riesgos operativos y optimizar la eficiencia en obra.

La figura 2 ilustra las fases del proyecto, los roles de los agentes implicados y el flujo de información a lo largo de las distintas etapas.

# e-BrIM

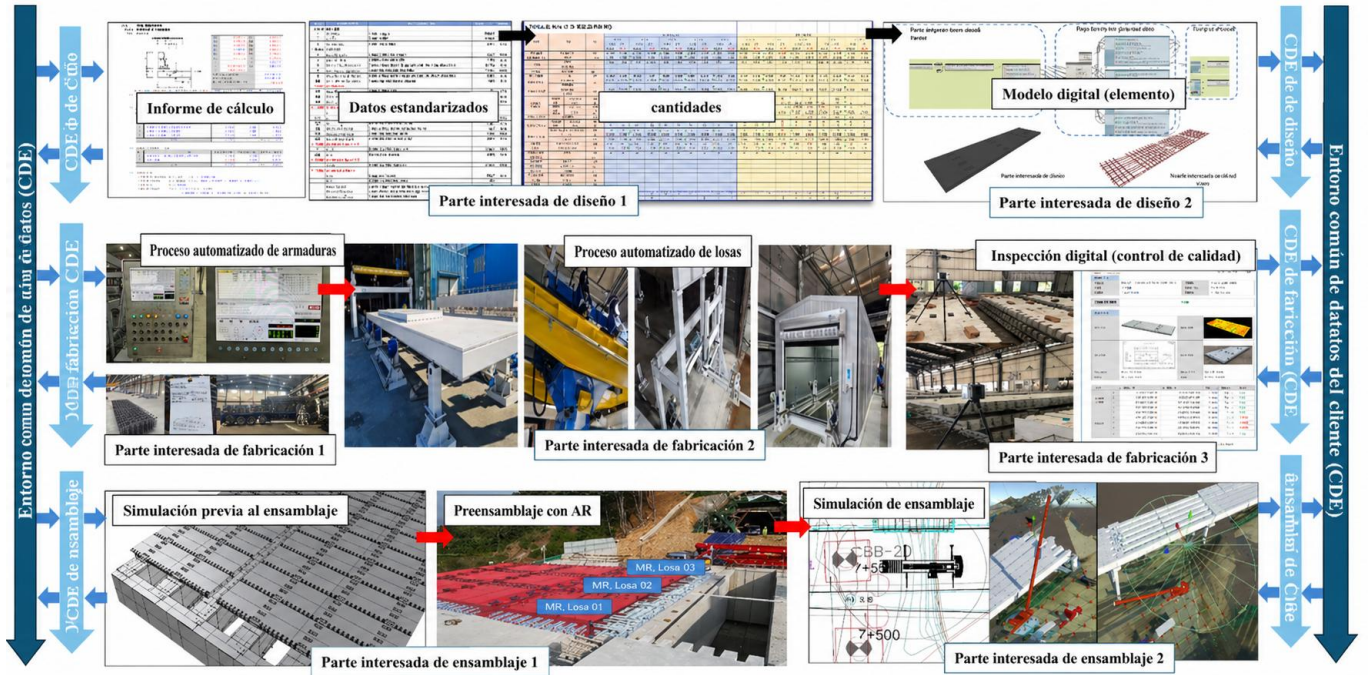


Figura 2: Procesos basados en datos y modelos a lo largo del ciclo de vida dentro de un entorno CDE

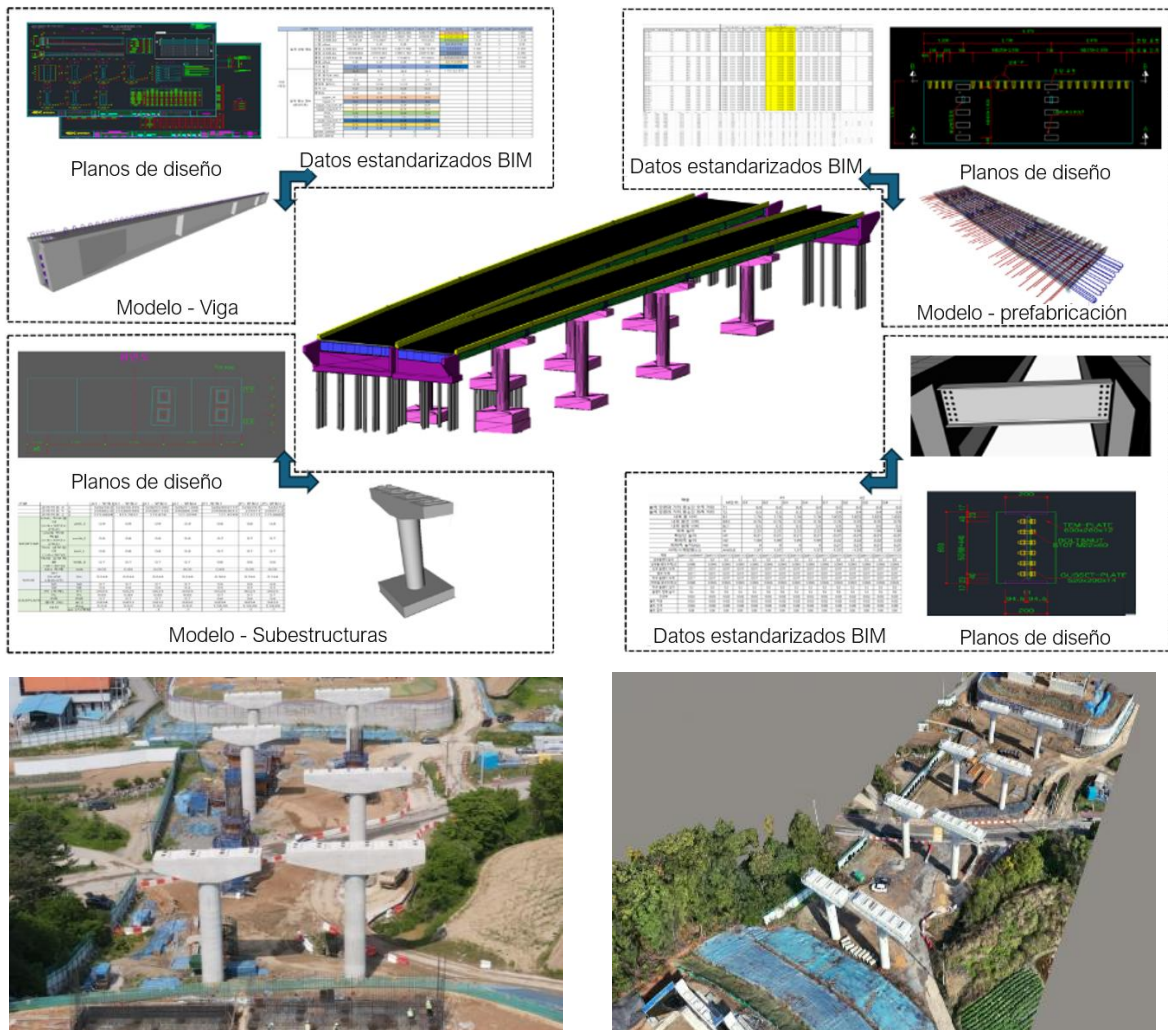


Figura 3: Definición del modelo digital en la fase de diseño

## **FASE DE DISEÑO: DISEÑO PARA LA FABRICACIÓN Y EL MONTAJE (DfMA)**

En la primera fase —la etapa de diseño— el puente se concibió según los principios del Diseño para la Fabricación y el Montaje (DfMA). El diseño estructural no solo se desarrolló para cumplir con los requisitos de la normativa y las limitaciones específicas del terreno y entorno, sino también para garantizar la fabricación, el transporte y una ejecución eficiente del montaje en obra.

El modelo del puente se generó a partir de la documentación de cálculo estructural y los planos de diseño, incorporando no solo la definición geométrica, sino también atributos orientados a la fabricación y el montaje, tales como la segmentación de elementos, puntos de izado, tolerancias admisibles y condiciones de interfaz entre componentes. La figura 3 muestra la captura de datos topográficos, el correspondiente modelo digital del terreno y el marco de modelización basado en DfMA adoptado para el puente.

El modelo estructural basado en BIM se definió como un prototipo digital listo para la producción, en lugar de una representación geométrica estática. Se estructuró como un conjunto de datos interoperable capaz de dar soporte a los procesos posteriores de fabricación y montaje. El marco de modelización incorporó reglas paramétricas para absorber las desviaciones derivadas de la fabricación y ajustes durante la fase de montaje, reduciendo así la necesidad de reinterpretación en fases posteriores.

Para garantizar un posicionamiento preciso en obra, el modelo estructural se integró con un modelo del terreno generado a partir de imágenes captadas por drones, lo que permitió una alineación espacial exacta en coordenadas absolutas. Esta integración permitió simular las operaciones de izado, la verificación de interferencias con equipos y la planificación de la secuencia de montaje bajo condiciones reales de obra, validando así la constructibilidad y la viabilidad operativa antes de la construcción física.

## **FASE DE FABRICACIÓN: FABRICACIÓN AUTOMATIZADA E INSPECCIÓN DIGITAL**

En la fase de fabricación, los elementos estructurales se produjeron a partir de los planos y las mediciones generadas durante la fase de diseño. En el caso de las losas prefabricadas del tablero, la fabricación se dividió en función de las

unidades de transporte y las restricciones logísticas, lo que dio lugar a la producción de múltiples losas en función de la anchura del puente y la configuración de los vanos. Dado que la fabricación del tablero implica operaciones repetitivas y estandarizadas, estos procesos fueron automatizados para mejorar la eficiencia de la fabricación. En consecuencia, el flujo de trabajo de producción se estructuró en dos etapas principales: (1) procesado y montaje de armaduras y (2) hormigonado y curado. Los datos necesarios en cada etapa se definieron y gestionaron de forma sistemática para garantizar la integración y la coherencia del proceso.

En la fase de diseño, las especificaciones de las armaduras y su espaciado se definieron a partir de los documentos de cálculo de estructuras, junto con la correspondiente información detallada incluida en los planos de diseño. Esta información se trasladó a los agentes responsables de la fabricación y montaje de armaduras en la fase de producción. Los datos transmitidos se introdujeron en la maquinaria de fabricación y ensamblaje, lo que permitió la producción automatizada de las jaulas de armado para las losas de hormigón.

A continuación, las armaduras montadas se trasladaron a la planta de prefabricación para ejecutar el hormigonado. En este proyecto demo, se implementó un sistema automatizado de producción de losas prefabricadas con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso. En la planta, la información geométrica y dimensional de los encofrados de cada panel se definió y gestionó como datos estructurados, considerando la variabilidad geométrica de los mismos.

A partir de esta información, los moldes metálicos se configuraron automáticamente, ejecutándose el proceso completo de fabricación del tablero—incluyendo hormigonado y curado—hasta la fase previa al transporte.

Para garantizar el control de calidad de las losas prefabricadas, fue necesario cumplir con las tolerancias dimensionales especificadas en la normativa vigente. Por ello, se realizó una inspección previa de la geometría del encofrado antes de la fabricación. Tras la fabricación, se evaluaron las dimensiones de las losas prefabricadas terminadas empleando técnicas basadas en imágenes RGB y modelos de nube de puntos.

# e-BrIM

Mediante este procedimiento, se cuantificaron y analizaron las desviaciones entre las especificaciones de diseño y la geometría realmente ejecutada. La figura 4 presenta los procedimientos de verificación y los resultados correspondientes.

La verificación geométrica de los encofrados metálicos se llevó a cabo para comprobar si todas las dimensiones —como salientes y bloques para cavidades de corte— estaban situadas de acuerdo con los datos geométricos introducidos y las especificaciones de diseño. Esta inspección se realizó mediante métodos de extracción numérica basados en imágenes captadas por drones.

En el caso de las losas prefabricadas terminadas, se obtuvo información dimensional mediante la extracción de contornos de imágenes basada en RGB. Paralelamente, se utilizaron modelos de nube de puntos para extraer automáticamente los vértices de los bordes, permitiendo la medición automatizada de las dimensiones.

En comparación con los levantamientos topográficos convencionales, los métodos de inspección digital propuestos redujeron el tiempo de inspección en aproximadamente un 70 %, lo que demuestra una mejora sustancial en la eficiencia del control de calidad.

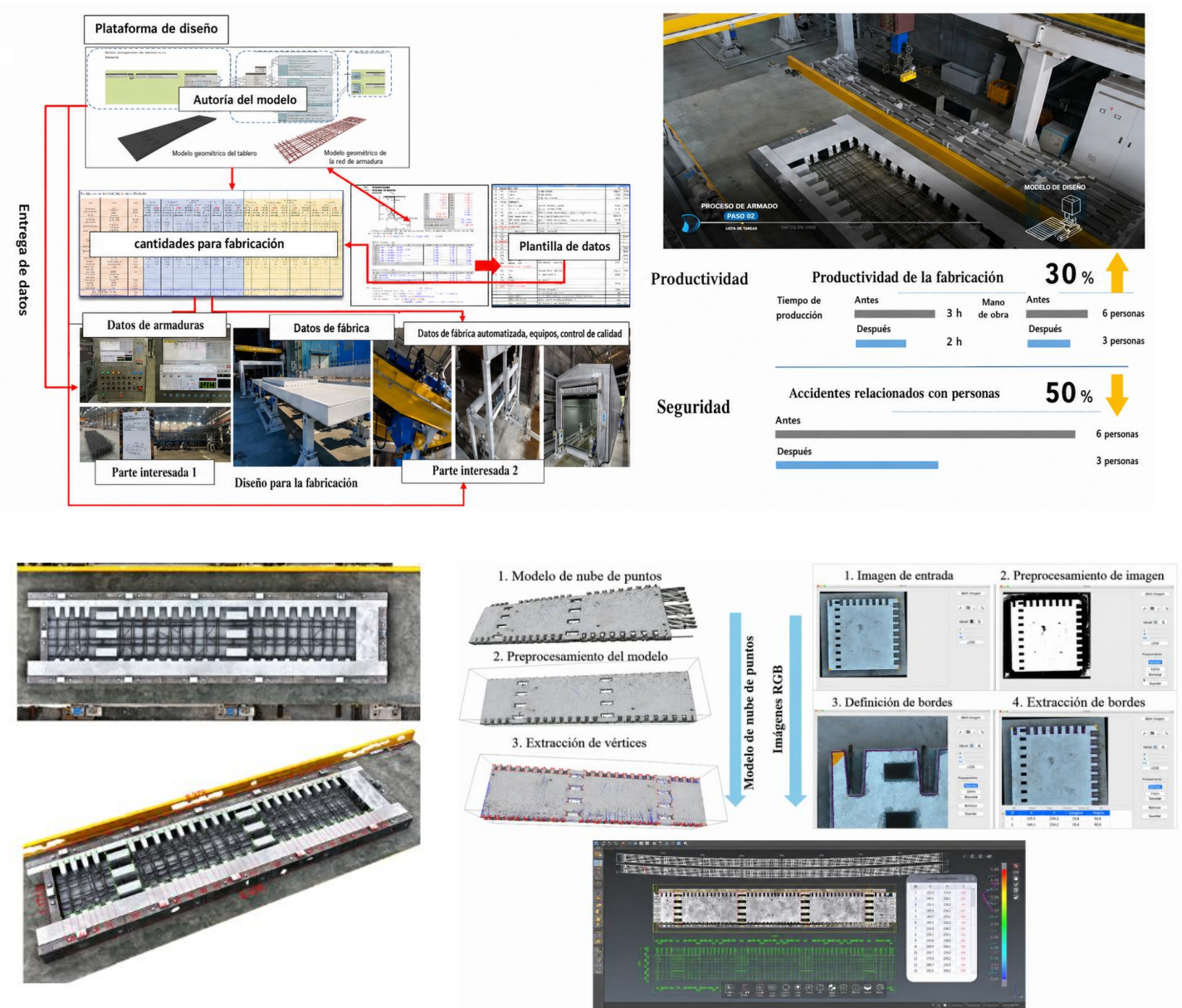


Figura 4: Fabricación digital y evaluación de la calidad de las losas prefabricadas

Las vigas de hormigón pretensado (PSC) desarrollan una contraflecha ascendente tras el tesado y, aunque esta deformación se prevé en la fase de diseño en función de la rigidez y del nivel de pretensado, los valores medidos difieren con frecuencia de las estimaciones analíticas.

En función de la longitud de la viga y de sus propiedades seccionales, pueden producirse tanto deformaciones verticales como transversales, lo que influye en el comportamiento a cortante en la interfaz tablero–viga, en la alineación durante el montaje y en el comportamiento compuesto a largo plazo.

Para cuantificar estos efectos, se fijaron tres puntos de medición en cada viga con el fin de monitorizar los desplazamientos verticales y transversales durante las fases de fabricación, montaje, desarrollo de la acción compuesta, así como durante las pruebas de carga y servicio. Las mediciones evidenciaron un incremento progresivo de la contraflecha debido a la fluencia entre el pretensado y el montaje, mientras que los desplazamientos transversales se vieron afectados tanto por la fluencia como por las condiciones de apoyo.

En lugar de archivar únicamente para mantener un registro, los datos de deformación medidos se integraron en el modelo digital para actualizar las configuraciones geométricas y mantener la coherencia dentro del marco de gestión de la información, que recoge todo el ciclo de vida del proyecto.

## FASE DE MONTAJE: PRECONSTRUCCIÓN Y GEMELO DIGITAL DE OPERACIONES DE LA GRÚA

En la fase de montaje, se simuló previamente el proceso de instalación de las vigas de hormigón pretensado (PSC) fabricadas y las losas prefabricadas del tablero para evaluar posibles interferencias entre los conectores y las losas del tablero.

En caso de producirse interferencias durante la construcción, sería necesaria la modificación de los conectores, provocando retrasos en el calendario y sobrecostes. Estos problemas de interferencia se ven directamente afectados por los desplazamientos transversales de las vigas derivados del pretensado y de la fluencia durante la fase de fabricación. En consecuencia, la simulación del montaje se llevó a cabo utilizando modelos de vigas

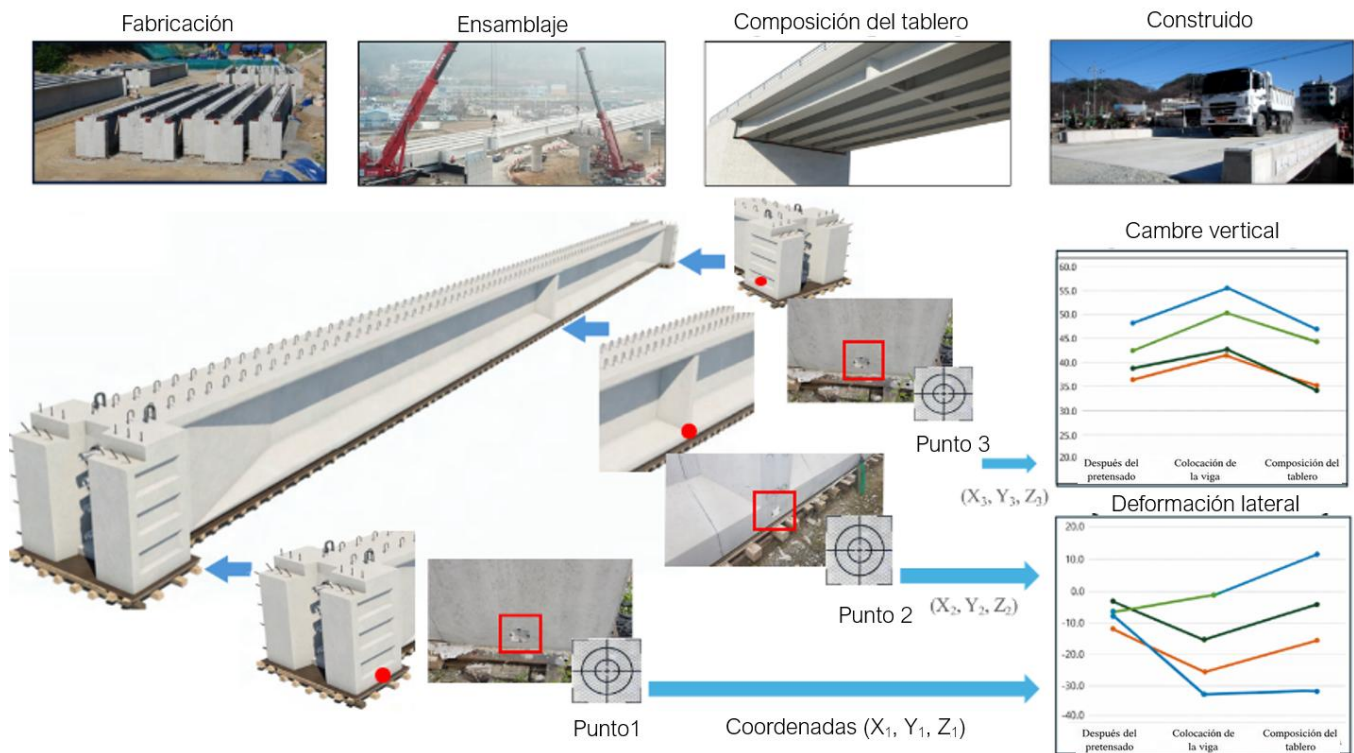


Figura 5: Medición de la deformación de la viga de hormigón pretensado

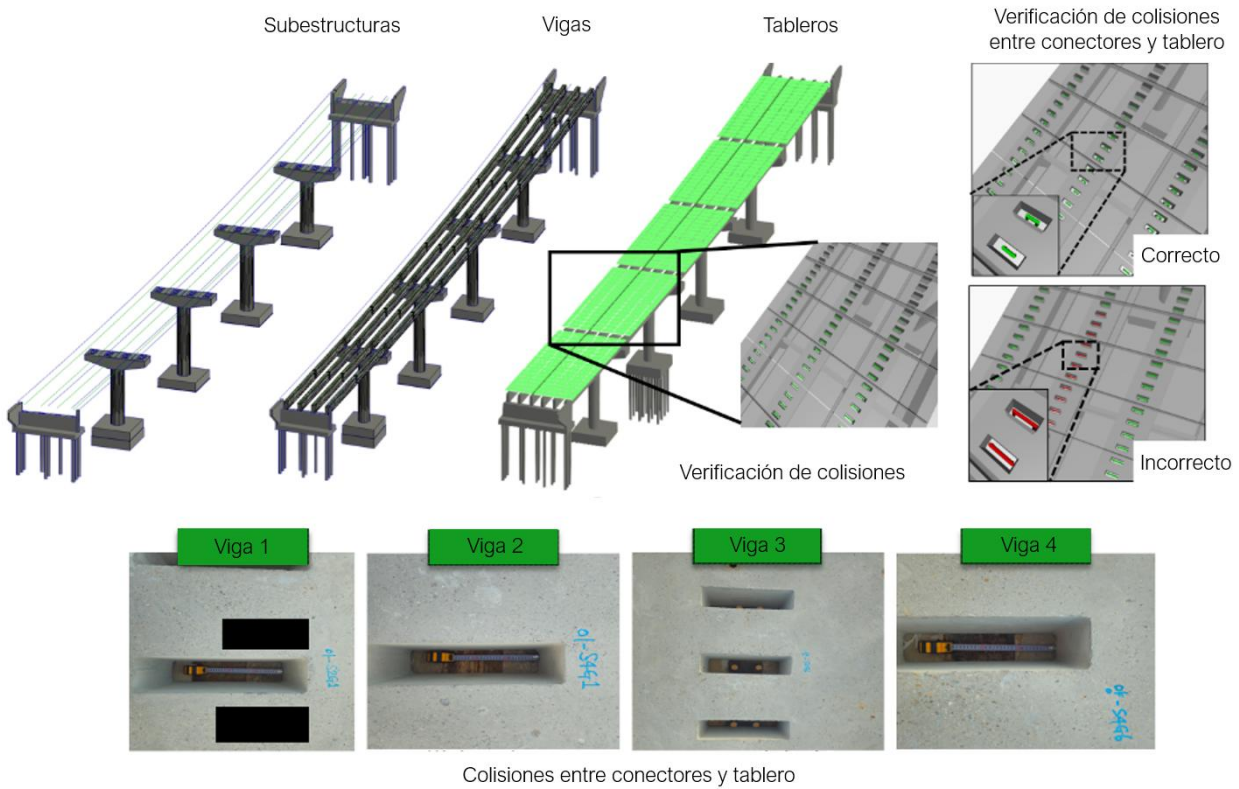


Figura 6: Simulación previa al montaje utilizando modelos digitales 3D actualizados

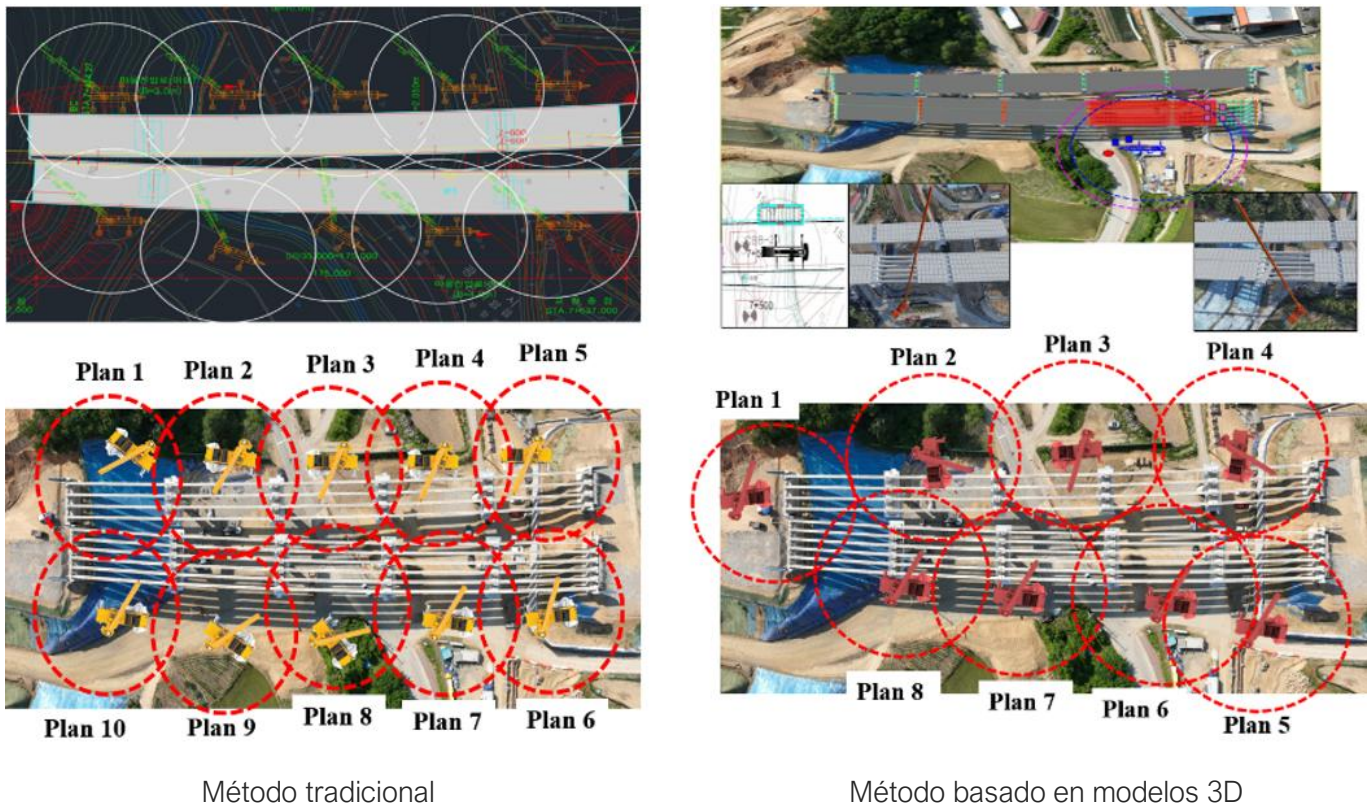


Figura 7: Planificación digital para el montaje de cubiertas

y tableros que incorporaban los datos de deformación medidos en la fase de fabricación. La figura 6 ilustra el flujo de trabajo de la simulación del montaje.

La simulación siguió el procedimiento real de montaje. En primer lugar, se alinearon las vigas y se colocaron sobre los apoyos de la subestructura, integrando en el modelo los datos de deformación obtenidos mediante puntos de control durante la fabricación.

A continuación, se colocaron las losas prefabricadas del tablero de acuerdo con la alineación de las vigas o la línea de referencia del puente. Se examinó la posible interferencia entre las losas del tablero instaladas y los conectores en la parte superior de cada viga. Los resultados de la evaluación se cuantificaron y se almacenaron como datos estructurados para respaldar la evaluación posterior y toma de decisiones.

Una vez verificada la compatibilidad del montaje del tablero, se desarrolló un plan de izado basado en simulación digital para determinar la ubicación de las grúas, en lugar de depender exclusivamente de la experiencia. La planificación convencional suele depender de personal cualificado para determinar las posiciones de las grúas en función del radio de trabajo y la capacidad, lo que limita la evaluación cuantitativa de los obstáculos y las configuraciones alternativas de los equipos.

Para abordar esto, se realizaron simulaciones de montaje integrando los modelos BIM del puente y del terreno con grúas de diversas especificaciones. La posición de las grúas y el radio de trabajo se ajustaron de forma iterativa teniendo en cuenta la capacidad de elevación y las condiciones del entorno, tras georreferenciar el modelo estructural en coordenadas absolutas.

La subestructura y las vigas se colocaron en sus ubicaciones reales, y las losas del tablero se colocaron secuencialmente en la simulación. Este enfoque basado en modelos 3D permitió evaluar previamente la viabilidad del montaje, el espacio libre respecto a los obstáculos y la idoneidad del equipo, estableciendo un plan de ejecución basado en datos y orientado a la producción.

La figura 7 compara el método de planificación convencional con los resultados de la simulación basada en el modelo 3D.

## CONCLUSIÓN

Este proyecto piloto validado en condiciones reales, aporta la evidencia de que la construcción de puentes puede evolucionar hacia un sistema industrializado y orientado a la producción. Mediante la integración completa de tecnologías digitales a lo largo del ciclo de vida diseño–fabricación–montaje. Combinando, la implementación de un diseño basado en DfMA, la gestión de la información a través de un CDE liderado por el promotor, la fabricación automatizada, la inspección geométrica digital, la actualización del modelo basada en datos reales de deformación y la simulación 3D del montaje. El proyecto superó el enfoque tradicional de digitalización aislada, avanzando hacia un flujo de trabajo interoperable y basado en datos. Los resultados confirman que la continuidad de la información a lo largo del ciclo de vida y el intercambio estructurado de datos pueden transformar de forma significativa los procesos convencionales de ejecución de puentes.

La fabricación automatizada y la verificación de la calidad basada en modelos, mejoraron la eficiencia y la trazabilidad. Mientras que el análisis previo de interferencias y las simulaciones de izado redujeron los riesgos de ejecución, la incertidumbre en los plazos y la posibilidad de tener que volver a realizar trabajos. En conjunto, estas medidas demuestran un cambio en la toma de decisiones que se basada en la experiencia y que pasa a una gestión de procesos proactiva y respaldada cuantitativamente. Aunque fue validado en un puente de carretera, el marco propuesto es transferible a otros sistemas de infraestructuras. Constituyendo una base escalable, para avanzar hacia la industrialización completa del sector de la construcción bajo principios propios de la fabricación.

## REFERENCIA

- [1] Jang, D. H., Roh, G. T., Jeon, C. H., & Shim, C. S. (2025). Optimización basada en simulación de la posición y la capacidad de elevación de la grúa utilizando un gemelo digital de la construcción para el montaje de tableros de puente prefabricados. *Buildings*, 15(3), 475.
- [2] Nguyen, D. C., Jeon, C. H., Roh, G., & Shim, C. S. (2024). Análisis de premontaje basado en BIM para el diseño de la fabricación y el montaje de puentes prefabricados. *Automation in construction*, 160, 105338.

# ENTREVISTA A HÉCTOR BERNARDO COO, PONTEM ENGINEERING, ESPAÑA

*Antonio Caballero, Magdaléna Sobotková*

*En primer lugar, gracias por dedicarle su tiempo a esta entrevista.*

*Nuestras dos revistas, e-mosty y e-BrIM, giran en torno a los puentes. ¿Podría contarnos cuál es su relación con los puentes y cómo empezó todo?*

Es un placer colaborar con e-mosty y e-BrIM.

Si echo la vista atrás a mi trayectoria profesional, los puentes han sido, sin duda, el eje central de toda mi carrera. No fue un campo al que llegué por casualidad, sino más bien una elección deliberada que hice desde muy temprano.

Incluso durante mis años universitarios, mientras muchos de mis compañeros se centraban en otras disciplinas como la gestión del agua o el urbanismo, yo me sentía constantemente atraído por los puentes. Hay algo en la integridad estructural y la «honestidad» de un puente que me llega al alma. Sin embargo, los cimientos de esta pasión se sentaron mucho antes.

Mi interés se remonta a mi infancia; aunque no provengo de una larga estirpe de constructores, sí tenía familiares que trabajaban en el sector de la construcción. Estar cerca de ellos despertó en mí un profundo interés, y me sentí cautivado por las obras civiles y las infraestructuras a gran escala.

Ya entonces sabía que quería dedicar mi vida a construir obras de ingeniería que realmente importaran.



Ahora, más de veinte años después, mi vida profesional sigue girando en torno a los puentes. Ya sea desarrollando un nuevo diseño desde cero o determinando cómo dar nueva vida a un tramo envejecido mediante una compleja renovación, disfruto de verdad con el proceso.

Cada día presenta un nuevo rompecabezas técnico y no lo cambiaría por nada. Ha sido un largo camino desde mis intereses de la primera infancia hasta la supervisión de grandes proyectos de puentes, pero la pasión por el oficio sigue tan fuerte como siempre.

## *¿Quién ha influido más en su carrera, su misión y su forma de pensar?*

Es difícil atribuir el mérito a una sola persona. A lo largo de mi carrera, he tenido el privilegio de colaborar con algunos de los nombres más destacados de la ingeniería de puentes, profesionales cuya experiencia ha marcado la pauta en nuestro sector. Observar su enfoque ante retos de diseño complejos fue, sin duda, fundamental para mí.

Sin embargo, debo destacar que también me han influido muchos colegas que quizá no sean tan conocidos, pero que son profesionales excepcionales por derecho propio.

He trabajado junto a ingenieros y técnicos brillantes que poseían un profundo conocimiento de la disciplina y fueron lo suficientemente generosos como para transmitírmelo.

## *¿Cuál es el proyecto en el que ha trabajado que le ha proporcionado mayor satisfacción personal y por qué?*

Esa es otra pregunta difícil de responder, ya que es todo un reto seleccionar un solo proyecto de una carrera de veinte años. Sin embargo, si tengo que elegir, mi experiencia en el **Queensferry Crossing** destaca como especialmente gratificante.

La magnitud de la estructura era impresionante, pero lo que realmente hizo que el proyecto fuera personalmente satisfactorio fue el entorno. Me brindó la oportunidad de trabajar en el extranjero y colaborar con colegas de todo el mundo.

Trabajar con un equipo tan diverso e internacional es increíblemente enriquecedor; estás constantemente expuesto a diferentes perspectivas y técnicas de resolución de problemas que quizá no encontrarías en otros lugares.

Además, el compañerismo profesional y la intensa curva de aprendizaje que conlleva un proyecto de esa envergadura fueron excepcionales. Cada día en esa obra fue una oportunidad para ampliar mis conocimientos técnicos.

Contribuir a la construcción de una infraestructura tan emblemática, junto a profesionales tan talentosos, sigue siendo uno de los momentos más destacados de mi vida profesional.



*Construcción del puente de Queensferry, Reino Unido*

*Fuente: e-mosty*

## *¿Se acuerda aproximadamente en cuántos proyectos de puentes ha participado y qué funciones desempeñó?*

Es complicado dar una cifra exacta si tenemos en cuenta todos los tipos de puentes con los que me he encontrado a lo largo de los años. Sin embargo, si limitamos el alcance a los grandes proyectos de puentes, he tenido el privilegio de participar en unos diez de ellos.

Mis funciones en estos proyectos han sido muy variadas, desde director de obra hasta consultor de diseño. Esta diversidad de perspectivas ha sido inestimable; participar tanto en la fase de diseño conceptual como en las realidades prácticas de la obra permite una comprensión más holística de la estructura.

En todos los casos, independientemente del cargo específico que ocupara, la experiencia fue una importante oportunidad de aprendizaje que perfeccionó aún más mi experiencia en el campo.

## *¿Hay algún proyecto que sea especialmente significativo para usted o que destaque como uno de sus favoritos?*

Sí, hay algunos que destacan por su especial importancia. Concretamente, el puente sobre la bahía de Cádiz, el Queensferry Crossing y la ampliación del puente de Rande son los proyectos que considero más significativos.

***A lo largo de su carrera, ¿qué cambios importantes ha observado en la tecnología de los puentes? ¿Qué avance técnico considera el más significativo?***

En las últimas dos décadas, he observado un cambio significativo tanto en la complejidad del diseño como en la precisión del control de la ejecución.

Diseñar estas estructuras hoy en día requiere un esfuerzo humano considerablemente mayor y modelos analíticos más sofisticados que cuando empecé mi carrera.

Sin embargo, esta mayor inversión en la fase de diseño se traduce en un beneficio sustancial en la fase de construcción. Los métodos modernos requieren menos mano de obra, son intrínsecamente más seguros para los trabajadores y dan como resultado un producto final de mucha mayor calidad y durabilidad.

Si tuviera que identificar un único avance que haya cambiado más drásticamente nuestro flujo de trabajo, sería la capacidad de que múltiples equipos internacionales colaboren a través de Internet en tiempo real.

Esta conectividad ha agilizado la toma de decisiones e integrado diversos conocimientos especializados, aunque, sin duda, plantea sus propios retos, como la gestión de flujos de datos constantes.

De cara al futuro, creo que el modelado de información de la construcción (BIM) supondrá la próxima transformación significativa en nuestro sector.

Aunque ya vemos sus ventajas, la integración plena del BIM a lo largo de todo el ciclo de vida de un puente —desde el primer boceto hasta el mantenimiento a largo plazo— redefinirá de manera fundamental la forma en que concebimos y gestionamos las infraestructuras en los próximos años.

***También es miembro activo de la FIB. ¿Podría presentar la FIB a nuestros lectores, compartir su motivación para participar y explicar en qué grupos colabora?***

Mi implicación comenzó con la Asociación Española de Ingenieros de Estructuras (ACHE), que actúa como Grupo Nacional de la fib en España.



*Puente de la Bahía de Cádiz, España*

*Fuente: Pontem Engineering*

Durante ese tiempo, tuve el privilegio de participar en la creación del Grupo de Jóvenes Miembros de la fib, una experiencia que profundizó significativamente mi compromiso con la asociación.

Aunque ya he superado el límite de edad para el grupo de jóvenes, actualmente tengo la suerte de contribuir al Grupo de Trabajo 1.7, dedicado a la construcción.

En este grupo, colaboro con colegas para compartir conocimientos técnicos e impulsar avances en la tecnología del hormigón.

La motivación que impulsa mi participación es doble: en primer lugar, un deseo genuino de contribuir a la evolución de nuestro campo; y, en segundo lugar, la inmensa satisfacción que me produce el intercambio de experiencias con profesionales de primer nivel procedentes de una amplia variedad de países y de empresas internacionales.

Se trata de un entorno muy gratificante que fomenta tanto el crecimiento profesional como la innovación en todo el sector.

***Recientemente, la fib publicó el Boletín 115, un documento de buenas prácticas titulado «BIM en la construcción». ¿Podría hablarnos de este boletín, qué motivó su elaboración y qué innovaciones clave aporta al sector?***

En un momento dado, nuestro grupo de trabajo barajaba varios temas potenciales para nuestro próximo proyecto.

Llegamos al consenso de que el BIM, especialmente en la fase de construcción, se encontraba en una etapa en la que era vital difundir sus principios fundamentales y su tecnología.

Consideramos que existía una clara necesidad de destacar las ventajas prácticas de su aplicación mediante casos prácticos del mundo real; esa fue, sin duda, nuestra principal motivación.

Aunque este boletín quizá no sea el documento más exhaustivo en la explicación de la tecnología BIM desde un punto de vista estrictamente formal o académico, ofrece una visión general muy sólida de la disciplina.

Y lo que es más importante, ofrece una serie de ejemplos auténticos de su aplicación en la construcción de estructuras de hormigón. Estos ejemplos abarcan un amplio espectro, que va desde obras más pequeñas y localizadas hasta grandes proyectos internacionales.

Creo que este enfoque práctico es lo que hace que el documento sea tan valioso para los profesionales que buscan implementar estas herramientas de manera eficaz en la obra.

### ***¿Cómo ve el desarrollo de la utilización del BIM en el sector de los puentes?***

Tengo una visión algo parcial de la evolución global, pero diría que la tecnología ya está bien consolidada en las fases de diseño e ingeniería. Sin embargo, aún queda mucho por hacer en su implementación durante las fases de construcción y mantenimiento.

Esto hace que el momento actual sea especialmente emocionante, ya que existe una enorme oportunidad para desarrollar flujos de trabajo y aplicaciones innovadores.

Creo que, en unos años, la adopción del BIM será total. En muchos aspectos, la trayectoria actual me recuerda a los primeros tiempos en que se introdujo por primera vez en nuestro sector el sistema de gestión de la calidad ISO 9001.

En aquel momento, era un concepto novedoso que se enfrentaba a cierto escepticismo, pero hoy en día es el estándar universal. Espero que el BIM siga un camino similar; lo que actualmente consideramos una ventaja tecnológica



*Ampliación de Capacidad Puente  
Atirantado de Rande, España*

*Fuente: Grupo Tyspa*

especializada pronto se convertirá en el procedimiento operativo estándar para cualquier proyecto de puente.

Nos dirigimos hacia un futuro en el que el gemelo digital será tan esencial como la propia estructura física.

### ***¿De qué manera ha cambiado su propio trabajo la introducción del BIM?***

La integración del BIM ha alterado de forma fundamental mi flujo de trabajo diario, principalmente al aumentar la velocidad y la eficiencia de nuestros procesos. La estructura de toda la documentación del proyecto es ahora mucho más clara, y el avance de la construcción se refleja en el modelo casi al instante.

Para un director de proyecto o de obra, este nivel de actualización en tiempo real proporciona una trazabilidad inestimable. Podemos hacer un seguimiento de cada componente y decisión a lo largo del ciclo de vida del puente con un grado de precisión que simplemente no era posible en el pasado.

En esencia, el BIM nos permite completar muchas de las tareas tradicionales en menos horas y con mucha mayor precisión.

Al reducir el tiempo dedicado a la introducción manual de datos y a la resolución de conflictos, podemos reinvertir ese tiempo «recuperado» en tareas de alto valor, como optimizar soluciones estructurales o mejorar los protocolos de seguridad.

Ha desplazado nuestro enfoque de la mera gestión de la información a la verdadera ingeniería de mejores resultados.

***En su opinión, ¿cuál es el nivel actual de aceptación del BIM en el sector de la construcción y qué retos quedan por superar para su plena implantación?***

Como mencioné anteriormente, creo que el BIM ya está muy bien establecido en los niveles de diseño e ingeniería. Sin embargo, cuando nos fijamos en las fases de construcción y mantenimiento, aún queda un largo camino por recorrer antes de poder afirmar que se ha logrado su plena implantación.

Uno de los principales retos técnicos es la necesidad de herramientas más versátiles. Necesitamos un software que pueda salvar mejor la brecha entre un modelo de diseño estático y el entorno dinámico y en rápida evolución de una obra. Necesitamos aplicaciones que faciliten otras dimensiones del BIM, como la programación 4D y la estimación 5D, de una manera que resulte intuitiva para el personal de campo.

Sin embargo, el motor más importante del cambio viene de arriba hacia abajo. El impulso de las administraciones públicas y los promotores—al convertir el BIM en un requisito contractual obligatorio— ha sido el catalizador necesario.

Nuestro sector se ha mostrado tradicionalmente bastante reacio a los grandes cambios estructurales, pero estas obligaciones están obligando a toda la cadena de suministro a actuar.

Esta presión contractual es exactamente lo que se necesitaba para superar la inercia inicial y garantizar que la transformación digital de la construcción de puentes se convierta en una realidad permanente.

***Hoy en día, vemos cómo muchas tecnologías emergentes —IA, RA, vehículos autónomos, IoT— están dando forma a la construcción. ¿Cuál de ellas cree que influirá más en el futuro del BIM y de qué manera?***

Para ser sincero, no estoy del todo seguro de qué tecnología se situará definitivamente a la cabeza, ya que nos encontramos en medio de una evolución muy rápida.

Estamos viendo cómo la inteligencia artificial comienza a alterar ciertos flujos de trabajo, aunque

su penetración en el sector de la ingeniería estructural y la construcción parece actualmente menos profunda que en industrias más puramente tecnológicas o de análisis de datos.

Sin embargo, tengo muchas ganas de ver el impacto que tendrá la IA una vez que se haya integrado plenamente en nuestro campo de especialización.

Nuestro sector se basa en enormes cantidades de datos—desde cálculos estructurales hasta lecturas de sensores y registros históricos de mantenimiento— y la IA está especialmente preparada para optimizar todas esas complejidades.

Por lo tanto, si tuviera que apostar por algo, sería por la inteligencia artificial. Creo que, con el tiempo, irá más allá de la simple automatización y comenzará a proporcionar información predictiva que mejorará de manera fundamental la forma en que utilizamos los modelos BIM, transformándolos de bases de datos estáticas a activos digitales verdaderamente «inteligentes».

Es una transición que estoy deseando presenciar de primera mano.

***¿Cómo se puede utilizar el BIM en la explotación, el mantenimiento y la conservación a largo plazo de los puentes?***

El BIM sirve como una base de datos centralizada e intuitiva que es mucho más fácil de consultar y analizar que los archivos en papel tradicionales.

En la conservación a largo plazo de los puentes, el modelo actúa como un registro «vivo» en el que cada informe de inspección, historial de reparaciones y lectura de sensores está georreferenciado al componente estructural exacto al que pertenece.

Es precisamente aquí donde creo que la inteligencia artificial desempeñará un papel transformador, especialmente para las administraciones públicas y los propietarios de activos.

Al utilizar modelos que el personal de mantenimiento actualiza continuamente, la IA puede realizar complejos análisis predictivos con facilidad. Esto permitirá a las autoridades pasar de las reparaciones reactivas a una planificación proactiva, identificando posibles problemas antes

de que se vuelvan críticos y optimizando la asignación de los presupuestos de mantenimiento en todo el inventario de puentes.

En esencia, el modelo BIM se convierte en el cerebro de la estructura, ayudándonos a garantizar su seguridad y funcionalidad durante las próximas décadas.

## ***¿Qué tareas y retos prevé para la próxima generación de ingenieros y para el sector de los puentes en su conjunto?***

La escasez de profesionales cualificados es, en mi opinión, el reto más acuciante al que se enfrenta nuestro sector. En los últimos años, he observado que la ingeniería civil ha perdido parte de su atractivo en comparación con otros campos que se perciben como más «de alta tecnología» o prestigiosos.

A los ojos de la próxima generación, las infraestructuras tradicionales suelen carecer del glamour que se atribuye a Silicon Valley o a la floreciente industria del software. Sin embargo, la realidad es que nuestro campo se está volviendo cada vez más sofisticado.

Motivar a los jóvenes talentos para que elijan esta trayectoria profesional será un reto importante. Debemos comunicar mejor que la ingeniería de puentes ya no se limita al hormigón y al acero, sino que abarca gemelos digitales, materiales avanzados y la resolución de los complejos rompecabezas de la sostenibilidad del futuro.

## ***¿Qué consejo daría a los jóvenes ingenieros que comienzan hoy su carrera?***

Mi consejo para los jóvenes ingenieros sería que encontraran un equilibrio entre lo antiguo y lo nuevo. Es innegablemente importante dominar las últimas tecnologías y el software: esas son las herramientas que definirán su flujo de trabajo diario y su eficiencia. Sin embargo, nunca deben perder de vista el hecho de que los principios básicos de la ingeniería estructural y de puentes siguen siendo los mismos.

El software y las plataformas digitales seguirán evolucionando a un ritmo vertiginoso, pero los puentes en sí mismos y la física que los rige no cambian.

Puede tener el modelo BIM o el asistente de IA más sofisticado del mundo, pero si no tiene una comprensión profunda e intuitiva del comportamiento estructural y la mecánica, solo estará manejando una herramienta sin entender el «porqué».

Domina primero los fundamentos. Comprende cómo se transmiten las cargas a través de una estructura y cómo se comportan realmente los materiales bajo tensión.

Una vez que tenga esa base sólida, la tecnología se convertirá en una extensión increíblemente poderosa de su propia experiencia, en lugar de una caja negra en la que simplemente confía. Sea un estudiante de por vida de este oficio y nunca deje que las herramientas digitales sustituyan su criterio de ingeniería.

## **Por último, ¿cuáles son sus planes para el futuro?**

En este momento, tenemos varios proyectos muy interesantes en marcha, pero el que creo que tiene más potencial es la implementación de la supervisión BIM in situ durante la construcción. Este es el eslabón crítico que realmente une el diseño y la construcción.

Garantiza que las innumerables horas y el inmenso esfuerzo invertidos durante las fases de planificación y diseño se traducen con precisión en la realidad, al tiempo que proporciona un legado digital para el mantenimiento a largo plazo.

Además, la sostenibilidad es un reto que nuestro sector está empezando por fin a abordar con la seriedad que merece.

Me interesa mucho explorar más este campo, ya que creo que será un factor decisivo en los próximos años. Encontrar el equilibrio entre la eficiencia estructural, la reducción de la huella de carbono y la longevidad de nuestras infraestructuras es una prioridad para el sector.

Mi objetivo es seguir ampliando estos límites, garantizando que los puentes que construimos hoy no solo sean técnicamente sólidos, sino también respetuosos con el medio ambiente para las generaciones venideras.



RÚBRICA  
BRIDGES®

TU DESAFÍO ES EL NUESTRO

Equipos para diferentes tipo de puente y métodos constructivos



**+ 25 PREMIOS Y RECORDS MUNDIALES**  
**AÑOS DE EXPERIENCIA**



**EQUIPOS  
PERSONALIZADOS  
PARA PUENTES**

**CARRO INFERIOR**



**EQUIPOS DE ELEVACIÓN DE  
DOVELAS Y SEGMENTOS DE PUENTE**  
PRECISIÓN Y SEGURIDAD EN CADA MONTAJE



**SISTEMAS PARA LA REALIZACIÓN  
DE DOVELAS PREFABRICADAS**  
ADAPTABLES A CUALQUIER GEOMETRÍA



**ARCOS**



**CARRO SUPERIOR**

[www.rubricaingenieria.com](http://www.rubricaingenieria.com)



# Carreteras Puentes Túneles

Puente del valle del Schorgast  
**diseño · planificación · supervisión de obras**

# Building Strong Connections



**Con los cables espirales de FATZER se pueden diseñar las más diversas estructuras construidas con cables de máxima calidad.**

Los clientes se benefician de nuestra vasta experiencia en este tipo de construcciones, de nuestros amplios conocimientos técnicos y de una atención constante a sus necesidades, abarcando desde los propios estudios de viabilidad y producción de soluciones de cable individuales hasta el montaje y monitoreo a largo plazo.



[fatzer.com](https://fatzer.com)

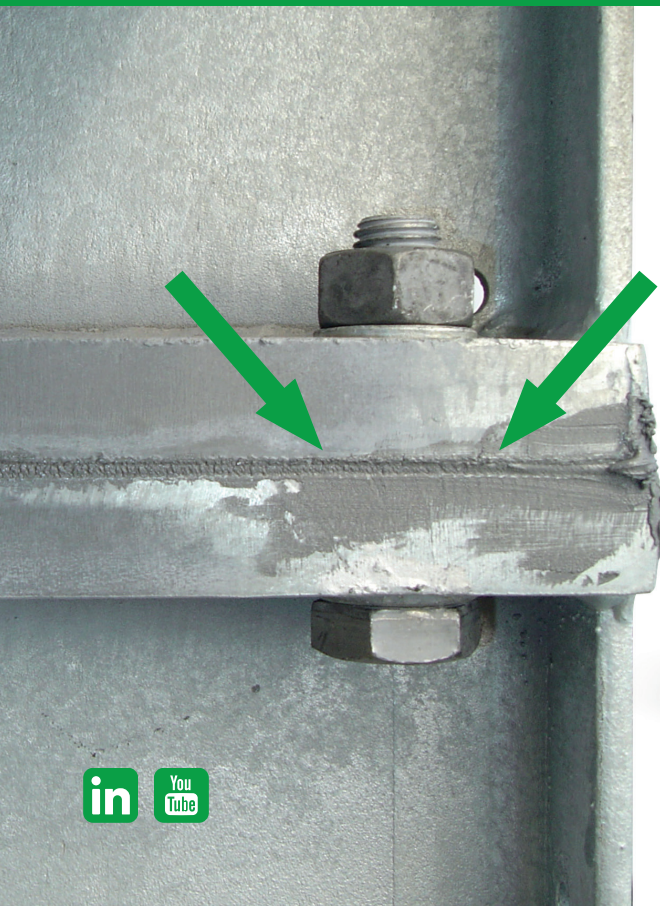
**BRUGG**  
Fatzer 



Para ofrecerle el mejor servicio posible, nuestro equipo está preparado para aplicar nuestros productos directamente in situ. Tal y como hicimos con éxito en proyectos como el puente Chenab (India) y el puente Yavuz-Sultan-Selim (Turquía).

## COMPENSACIÓN DEL 100 % DE LA HOLGURA Y LA TOLERANCIA

### CON MM1018 – EL CALZADO LÍQUIDO



En un solo paso. Sin procesamiento mecánico. Más rápido y menos costoso que las placas de revestimiento o las placas de cuña convencionales.

¡Presentamos nuestra solución **MM1018**, reconocida mundialmente, para la compensación de holguras y tolerancias en la construcción de puentes! Aplicado en innumerables obras de construcción en todo el mundo, nuestro innovador producto garantiza una integridad estructural y una seguridad sin igual para sus puentes. Ahorre tiempo y dinero con nuestra avanzada tecnología, que permite el ajuste y la alineación precisos de los componentes del puente en un solo paso, sin costosos retrasos. Únase a nuestros clientes satisfechos y experimente la eficacia probada de nuestro **MM1018**.



Asesoramiento y ventas:  
[www.diamant-polymer.com/es](http://www.diamant-polymer.com/es)  
[customerservice@diamant-polymer.com](mailto:customerservice@diamant-polymer.com)

**DIAMANT**  
POLYMER SOLUTIONS





Software de análisis estructural para ingenieros estructurales

# ¡Software de análisis estructural que da gusto usar!

Desde 1987, hemos estado desarrollando soluciones de software intuitivas para análisis estructural, dinámica, CFD y diseño estructural. Nuestro objetivo es ser no solo el más conocido, sino también el software de análisis estructural más fácil de usar en el mundo. ¡Queremos que todos puedan decir: Usamos Dlubal porque hace que el análisis estructural sea divertido!

## Productos

### RFEM



- Método de elementos finitos para analizar y diseñar estructuras portantes.
- Permite la creación de modelos 3D complejos.

### RSTAB



- Especializado en el análisis y diseño de estructuras de marcos y vigas.
- Compatible con materiales como acero, hormigón, madera y aluminio

### RWIND



- Software CFD para simular el flujo del viento alrededor de edificios y estructuras.
- Visualización detallada de las cargas del viento y los patrones de flujo.

### RSECTION



- Programa independiente para calcular propiedades de perfiles.
- Realiza análisis de tensiones en distintos tipos de secciones transversales.

## Dlubal en números

35

Años de experiencia en el desarrollo de software de análisis estructural

300

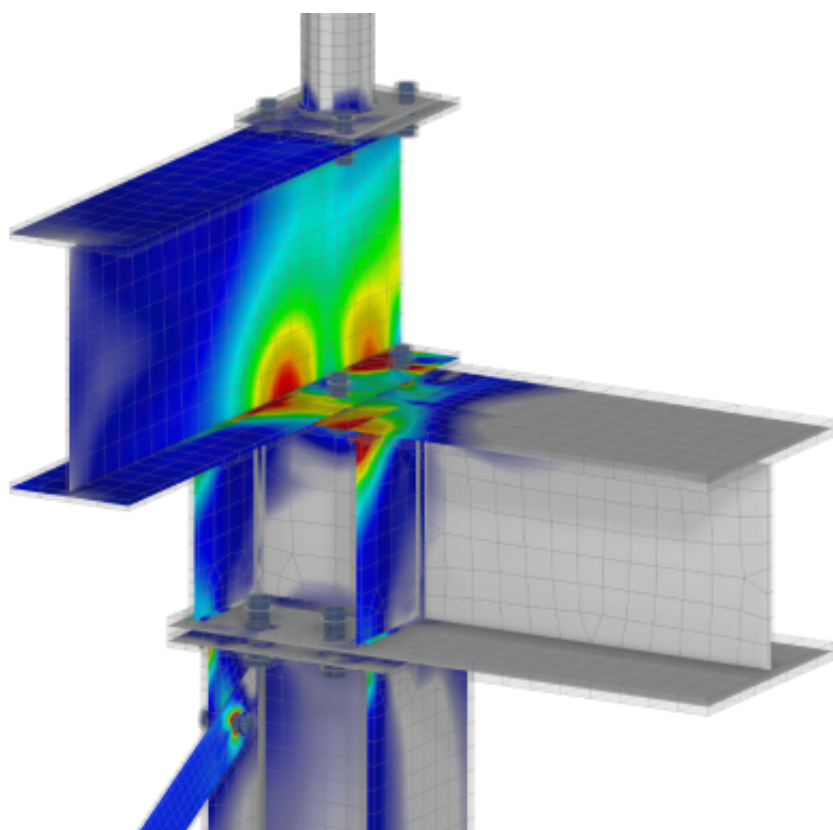
Empleados altamente motivados en todo el mundo

13.000

Empresas que trabajan con productos Dlubal en todo el mundo

130.000

Los usuarios confían en el software de Dlubal



 [www.dlubal.com/en](http://www.dlubal.com/en)

 [dlubal\\_software](https://www.instagram.com/dlubal_software)

 [Dlubal Software](https://www.linkedin.com/company/dlubal-software)

**BRUGG**  
Fatzer 



**Swiss Precision.**



**Global Trust.**



**Con los cables espirales de FATZER se pueden diseñar las más diversas estructuras construidas con cables de máxima calidad**

Los clientes se benefician de nuestra vasta experiencia en este tipo de construcciones, de nuestros amplios conocimientos técnicos y de una atención constante a sus necesidades, abarcando desde los propios estudios de viabilidad y producción de soluciones de cable individuales hasta el montaje y monitoreo a largo plazo.

[fatzer.com](http://fatzer.com)





***Pipenbaher Consulting Engineers***

PIPENBAHER INŽENIRJI d.o.o., Slovenia  
www.pipenbaher-consulting.com





Puente de Helgeland, Noruega

Foto : Jules van den Doel



\ ALLPLAN Civil 2026

# DESIGN TO BUILD A BETTER TOMORROW

Con **ALLPLAN Civil 2026** – anteriormente conocido como Allplan Bridge – los ingenieros y profesionales de infraestructuras entran en una nueva era de modelado integrado, inteligente y automatizado. Desde carreteras y túneles hasta movimientos de tierras e intersecciones, ALLPLAN Civil 2026 ofrece una precisión, fiabilidad y eficiencia inigualables en cada etapa de tu proyecto, desde el concepto hasta la construcción.

## ¿Por qué elegir ALLPLAN Civil 2026?

- > Herramientas diseñadas específicamente para el modelado de túneles e infraestructuras
- > Control avanzado de modelos 3D complejos con máxima precisión
- > Potentes funciones de edición y modelado para movimientos de tierras a gran escala
- > Intersecciones de carreteras más inteligentes y precisas, con mínima necesidad de retrabajo

¿Quieres descubrir cómo ALLPLAN Civil 2026  
transforma el diseño de infraestructuras?



# American Icon

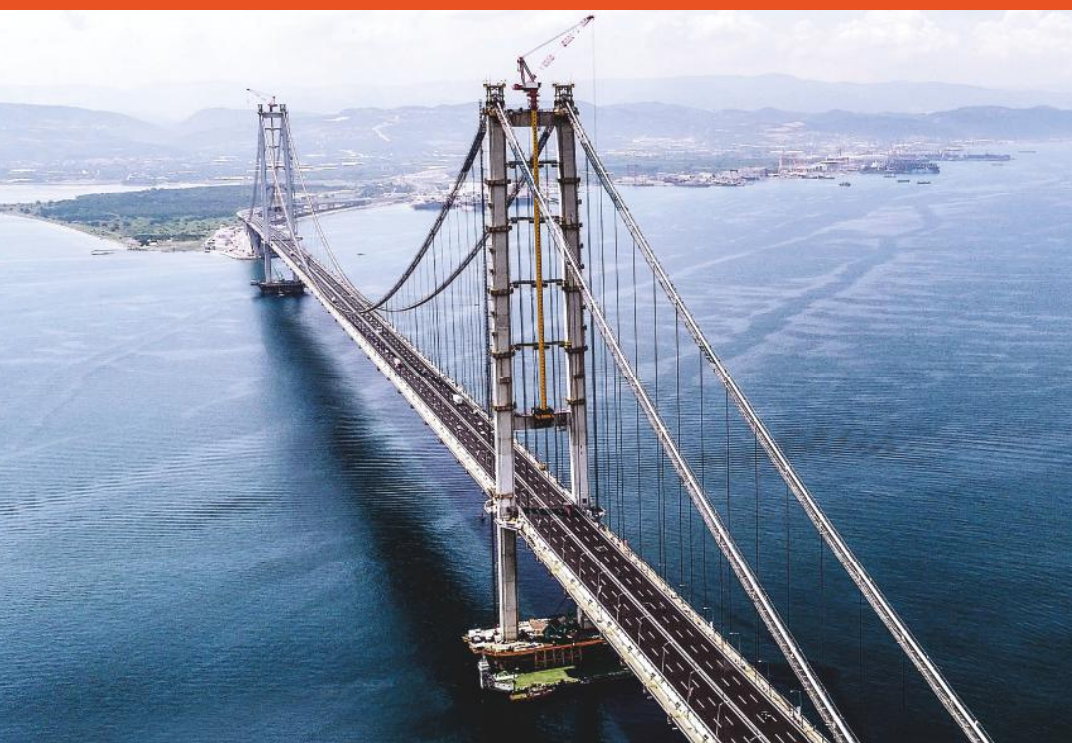
San Francisco-Oakland Bay Bridge East Span

**TYLin**

Photo Credit: Thomas Heinser

# MAURER MSM<sup>®</sup> Swivel Joist Expansion Joint

PUENTE OSMAN GAZI, IZMIT, TURQUÍA | CUARTO PUENTE COLGANTE DEL MUNDO CON ALTA CARGA SÍSMICA



## Ámbito de aplicación:

La instalación de la junta de dilatación MAURER Swivel Joist permite el acceso al tablero del puente y lo protege de sobrecargas horizontales durante un evento sísmico.

## Características:

- Absorción sin restricciones de movimientos específicos y transmisión simultánea de cargas de tráfico
- Funcionalidad de la estructura después del sismo
- Protección del tablero del puente frente a sobrecargas horizontales causadas por movimientos de cierre extremos durante el sismo
- Alta expectativa de vida útil gracias al uso de componentes de alto rendimiento
- Desplazamiento sísmico longitudinal de aprox. 4 m
- Velocidad de servicio de hasta 20 mm/seg (10 veces superior a la de un puente normal)
- Estanqueidad en todo el ancho del puente
- Libre de mantenimiento

## Referencias:

- Bahía de Cádiz, España
- Hochmoselübergang, Alemania
- Puente Osman Gazi, Izmit, Turquía
- Mainbrücke Randersacker, Alemania
- Viaducto de Millau, Francia
- Rheinbrücke Schierstein, Alemania
- Puente de Río-Antirio, Grecia
- Puente de la isla Russki, Rusia
- Puente Tsing Ma, China



# BRIDGE DRAINAGE

Suitable for  
75 and 150 mm  
Kerb height and  
all heights in  
between

# BRIDGE DRAINAGE UNIT

The bridge drainage channel Type M is designed to collect and discharge surface and structural water from bridges and elevated roads, used by all types of road vehicles.

## AVAILABLE HEIGHT OPTIONS

The height of the inlet openings is milled to project-specific dimensions.

### BD350x150 = 150mm high element

Top slope 4%  
(according to BAST guideline Kap12)

### BD350x200 = 200mm high element

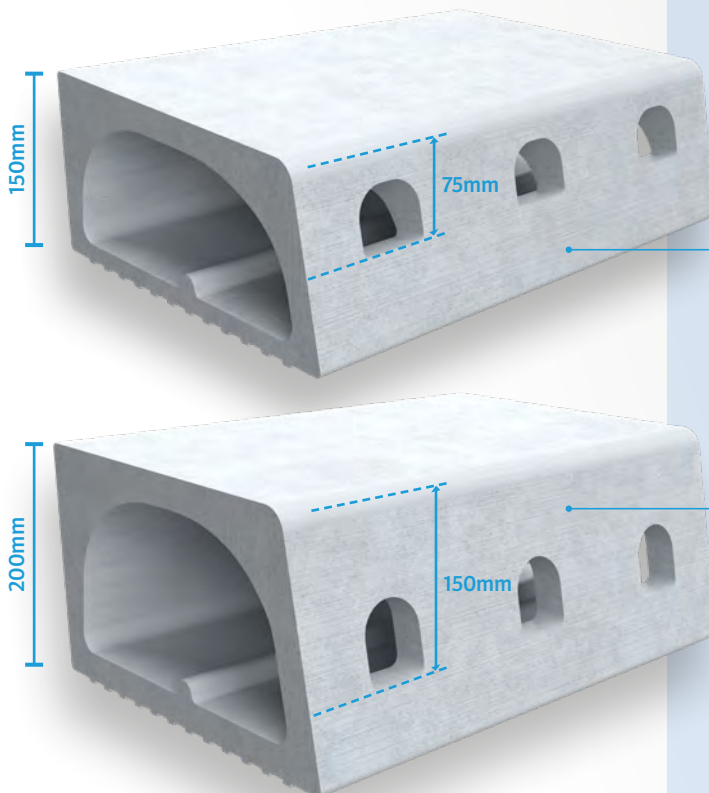
Top slope 2%  
(according to BAST guideline Kap12)

## TECHNICAL FEATURES AND ADVANTAGES

The bridge drain elements are made of one material and are moulded monolithically. In other words, they are manufactured in one piece, which ensures a stable structure with high impact resistance.

## CUSTOM SOLUTIONS

We specialize in customization. Depending on your requirements, we determine which element best fits your project. We can utilize various production locations, material types, and manufacturing methods to meet your schedule and needs.

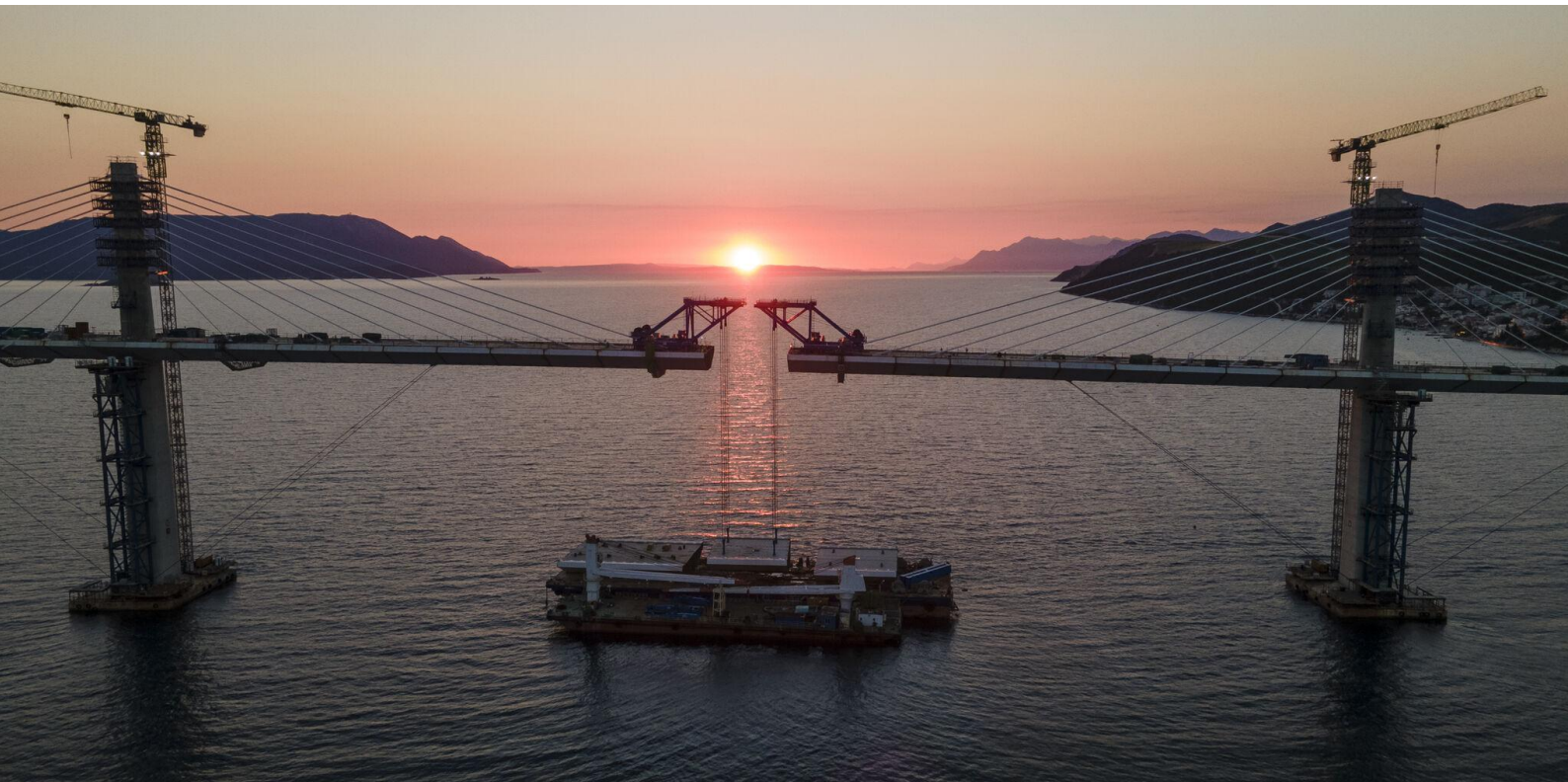


**CLICK HERE**

For more features, advantages and examples.

We design bridges

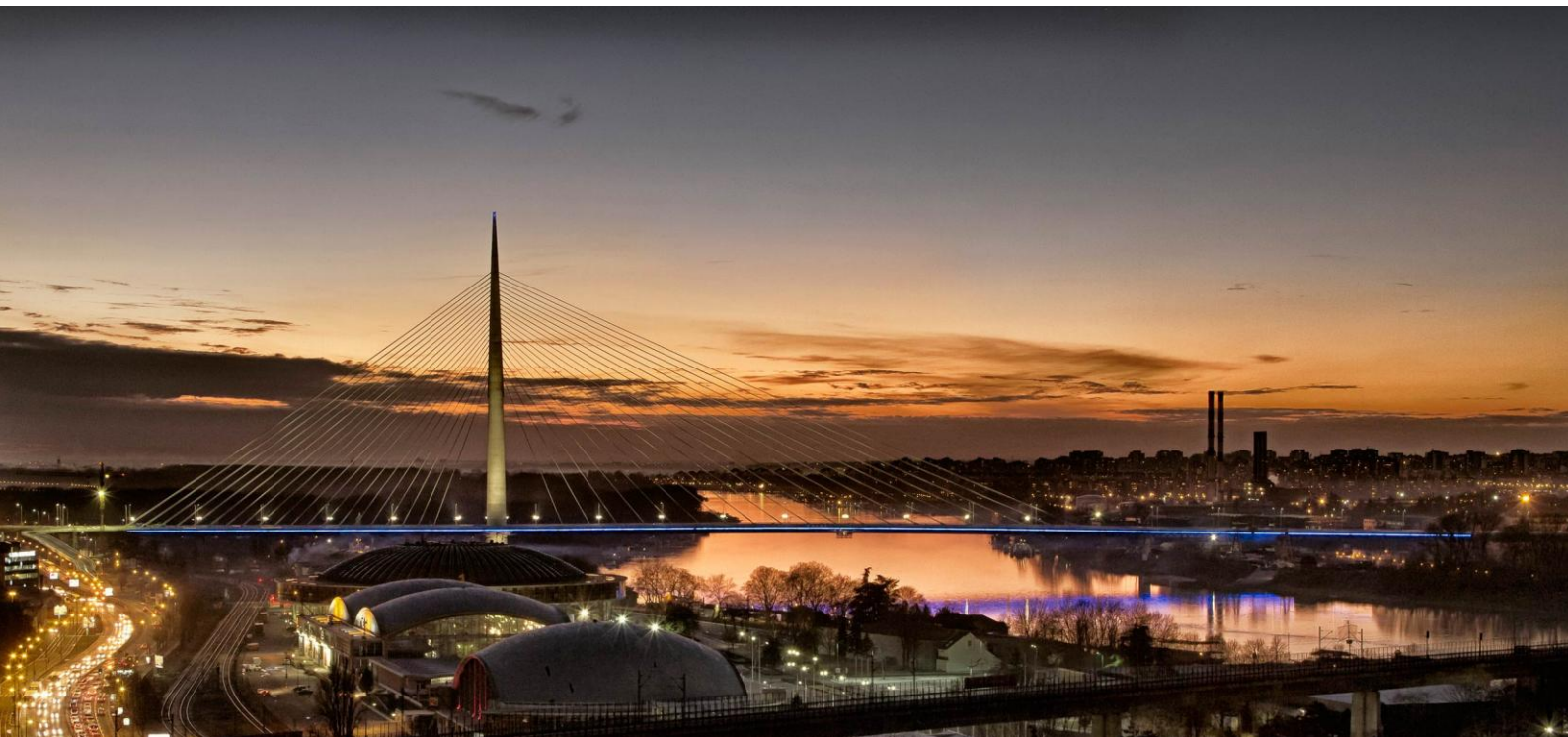
**ponting**  
bridges



Puente de Pelješac, Croacia

Diseño conceptual/preliminar/final

Empresa conjunta: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Zagreb; Ponting; Pipenbaher Consulting Engineers



Puente Ada sobre el río Sava en Belgrado, Serbia

Diseño ganador del concurso/Preliminar/ICE para el diseño final y detallado

Ponting inženirski biro d.o.o., Strossmayerjeva 28, 2000 Maribor, Eslovenia





Engineers in Action

# Construye Puentes Conecta Comunidades Atrae el Mejor Talento

Únete a un equipo de voluntarios y construye un puente peatonal o un proyecto hidráulico transformador junto a una comunidad aislada como parte de nuestro **Programa de Voluntarios Independientes**. O trae a todo un equipo de tu empresa como parte de nuestro **Programa de La Industria**. ¿Te interesa reclutar? **Conviértete en mentor** de estudiantes en nuestro **Programa Universitario** y comparte tus habilidades mientras atraes a los mejores talentos de más de dos docenas de universidades de élite de todo el mundo. **O dona** herramientas, servicios de ingeniería o gestión de proyectos, o materiales como cables de acero.

Estamos derribando las barreras que perpetúan la pobreza mediante la construcción de infraestructura esencial, y necesitamos tu ayuda. Contáctanos hoy mismo para saber cómo tú o tu empresa pueden participar.

Piénsalo: tú, nosotros, un puente.



BOLIVIA

ECUADOR

ESWATINI

PERU



Diferentes  
Formas de  
Participar

UNETE A NOSOTROS Y CONSTRUYE PUENTES O SISTEMAS DE AGUA QUE  
CONECTEN A MAS PERSONAS A LA SALUD, LA EDUCACIÓN Y NUEVAS  
OPORTUNIDADES.

ENGINEERSINACTION.ORG



**Visualizamos llegadas seguras para todos, en todas partes.**

*Un mundo donde más de mil millones de personas rurales actualmente desatendidas estén conectadas con servicios esenciales y oportunidades.*



*Nuestra misión es facilitar un acceso seguro y confiable al transporte rural, ayudando a los gobiernos y a los actores locales a planificar, financiar, diseñar, construir y mantener de manera independiente la infraestructura que sus comunidades necesitan.*

**Los socios nos ayudan a convertir esta visión en realidad apoyando la infraestructura rural que transforma vidas y fortalece las economías.**



**Juntos, estamos construyendo los sistemas que hacen que el acceso seguro sea inevitable.**



**BRIDGING  
THE GAP  
AFRICA**  
BUILDING BRIDGES &  
TRANSFORMING LIVES



**LA NECESIDAD  
ES GRANDE.**

**LA NECESIDAD  
ES AHORA.**



**FORMA PARTE DE ESTO. SÉ UN PUENTE.**



# e-BrIM

MAYO 2026

