

Reemplazo de dos puentes atirantados sobre el Rin: el puente de Leverkusen y el puente de Duisburg

Replacement of the Cable-Stayed Bridges over the River Rhine in Leverkusen and Duisburg

Wolfgang Eilzer^a, Michael Müller^b, Marc Schumm^b, Martin Romberg^c,
 Rafael Rodríguez Molina^{*,d}, Fernando Gutiérrez Manzanedo^d

^a Dipl. Ing. Leonhardt, Andrä und Partner Beratende Ingenieure VBI AG. Consejero Delegado

^b Dipl. Ing. Leonhardt, Andrä und Partner Beratende Ingenieure VBI AG. Director Dpto. Internacional Puentes

^c Dipl. Ing. Leonhardt, Andrä und Partner Beratende Ingenieure VBI AG. Jefe de proyectos

^d ICCP. Leonhardt, Andrä und Partner Beratende Ingenieure VBI AG. Ingeniero de proyectos

Recibido el 11 de agosto de 2020; aceptado el 9 de abril de 2021

RESUMEN

Los puentes atirantados de Leverkusen y Duisburg-Neuenkamp se terminaron de construir en 1965 y 1970 respectivamente. Ambos son puentes de cajón metálico con losa ortótropa, de los primeros en ser soldados casi en su totalidad. Ambos son también cruces emblemáticos sobre el Rin, hitos de la historia de la ingeniería de puentes. Diseñados para unas cargas y volúmenes de tráfico muy inferiores a los que han soportado durante décadas, vienen registrando desde hace años daños y reparaciones asociados a la fatiga. Ante las proyecciones de tráfico futuras, ambos puentes requieren con urgencia el reemplazo por nuevos puentes, asegurando el mantenimiento del tráfico en todas las fases de la construcción.

©2022 Hormigón y Acero, la revista de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

PALABRAS CLAVE: Fatiga, losa ortótropa, atirantado, reemplazo, ripado, empujado.

ABSTRACT

The Leverkusen Bridge and the Duisburg-Neuenkamp cable stayed bridges were completed in 1965 and 1970 respectively. Both are steel box girders with steel orthotropic deck, being among the first-world bridges to be almost completely welded. Both Rhine crossings are also historical milestones in bridge engineering. They were designed for loads and traffic volumes remarkably lower than the ones they have been bearing for decades. In the last years, several damages caused by fatigue have been recorded and repaired. Provided the near future traffic prognoses, both bridges need an urgent replacement by new bridges, ensuring that the traffic flow is not disrupted at any moment during construction.

©2022 Hormigón y Acero, the journal of the Spanish Association of Structural Engineering (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) License

KEYWORDS: Fatigue, orthotropic deck, cable-stayed, replacement, launching.

1. INTRODUCCIÓN

El río Rin ha sido desde la antigüedad hasta nuestros días un importante obstáculo natural en tiempos de guerra, y los puentes que lo cruzan un elemento clave para la comunicación y comercio entre ambas márgenes, constituyendo un símbolo de

reconciliación y convivencia. La mayoría de ellos se integran en la red alemana de autopistas federales, que suma alrededor de 50 000 km, siendo una de las redes de mayor densidad de tráfico de Europa.

El 40% de los puentes de la red cuentan entre 50 y 60 años de antigüedad. Su conservación, rehabilitación o sustitución

* Persona de contacto / Corresponding author.
 Correo-e / e-mail: rafael.rodriguez@lap-consult.com (Rafael Rodríguez Molina).

son grandes retos para la gestión de infraestructuras y para la ingeniería actual. En [1] se profundiza en este marco histórico y normativo, exponiendo el sistema alemán de gestión de estructuras existentes.



Figura 1. Localización del Puente sobre el Rin en Leverkusen (Imagen: Staßen NRW, editada)

2. PUENTE SOBRE EL RÍO RIN EN LEVERKUSEN

2.1. El puente existente

La actuación se engloba en la ampliación 4.55 km de la autopista A1 y cierra la renovación del cruce Leverkusen-Oeste y la adaptación del cruce Köln-Niehl (figura 1), dependiente de la Oficina Estatal de Carreteras de Renania del Norte-Westfalia, como parte de la Administración Federal. La autopista A1 es un eje de tráfico de gran relevancia a nivel europeo. El aumento de volumen de tráfico pronosticado para 2030 en este tramo requiere su ampliación a ocho carriles, cuatro por sentido.

El puente original fue terminado en 1965. Se trataba de un puente atirantado con una luz principal de 280 m y un ancho de 37.1 m, con dos pilonos metálicos de 49.30 m de altura y tablero metálico, con tan solo cuatro parejas de cables por pilono (dos parejas hacia cada vano, figura 2). Fue diseñado con dos carriles por sentido para 40 000 vehículos diarios.

El aumento del tráfico en los años 80 ya obligó a una primera ampliación a tres carriles por sentido en 1986 a costa de los arces, con el consiguiente aumento de las cargas. Además, el peso medio de los camiones ha aumentado desde su construcción inicial de 24 t a 44 t. En la actualidad se superan los 120 000 vehículos diarios, de los cuales 15 000 son camiones [2].

Ya poco después de la puesta en servicio se identificaron daños causados por tensiones residuales en algunas soldaduras de los rigidizadores de la losa ortótropa con las vigas transversales, registrándose ya en 1975 una cierta acumulación de daños, llevándose a cabo en 1990 la reparación de cerca de 12 000 defectos [3]. En 2007 las inspecciones realizadas en el marco de la norma DIN 1076 le otorgaron una calificación de 3 (“Estado no suficiente”) [1]. Desde entonces se han venido realizando de manera continuada reparaciones de fisuras en distintos elementos de la estructura metálica, especialmente en los anclajes de cables y en elementos transversales. En 2010

se identificó la propagación de dichos daños a elementos longitudinales principales. En 2012 se cerró el puente al tráfico de vehículos pesados durante 3 meses, para una inspección exhaustiva. Tras la reparación de los daños más urgentes se monitorizó el puente y se abrió de nuevo al tráfico con limitaciones para vehículos pesados.

Como resultado, se inició un proceso urgente que debe cerrar una primera etapa a finales de 2020, con la apertura al tráfico de la primera calzada de un nuevo puente que reemplace al existente. Esta calzada, de 34.15 m de ancho entre barreras, permitirá la adecuación de seis carriles incluso durante trabajos de inspección o mantenimiento de los cables. Una vez terminada se prevé su apertura al tráfico y desmantelación del puente existente, para la posterior construcción en su lugar de una segunda calzada gemela de la primera.



Figura 2. Puente original sobre el Rin en Leverkusen (foto: A.Savin, Wikimedia Commons).



Figura 3. Propuesta de Leonhardt, Andrä und Partner para el concurso del nuevo puente (LAP).

2.2. Proyecto del nuevo puente

En 2018 se sacó a concurso el diseño preliminar del nuevo puente. La propuesta de Leonhardt, Andrä und Partner (LAP) consistía en un solo pilono para cada calzada, configurando dos puentes asimétricos que resultan en un conjunto simétrico al superponerse ambos alzados (figura 3). El diseño adjudicatario resultó ser el propuesto por la oficina alemana Ingenieurbüro Grassl GmbH, que destaca por el diseño en forma de A de los pilonos para calzada (figura 4). Posteriormente se procedió al



Figura 4. Diseño conceptual definitivo (foto: Landesbetrieb Straßenbau NRW).

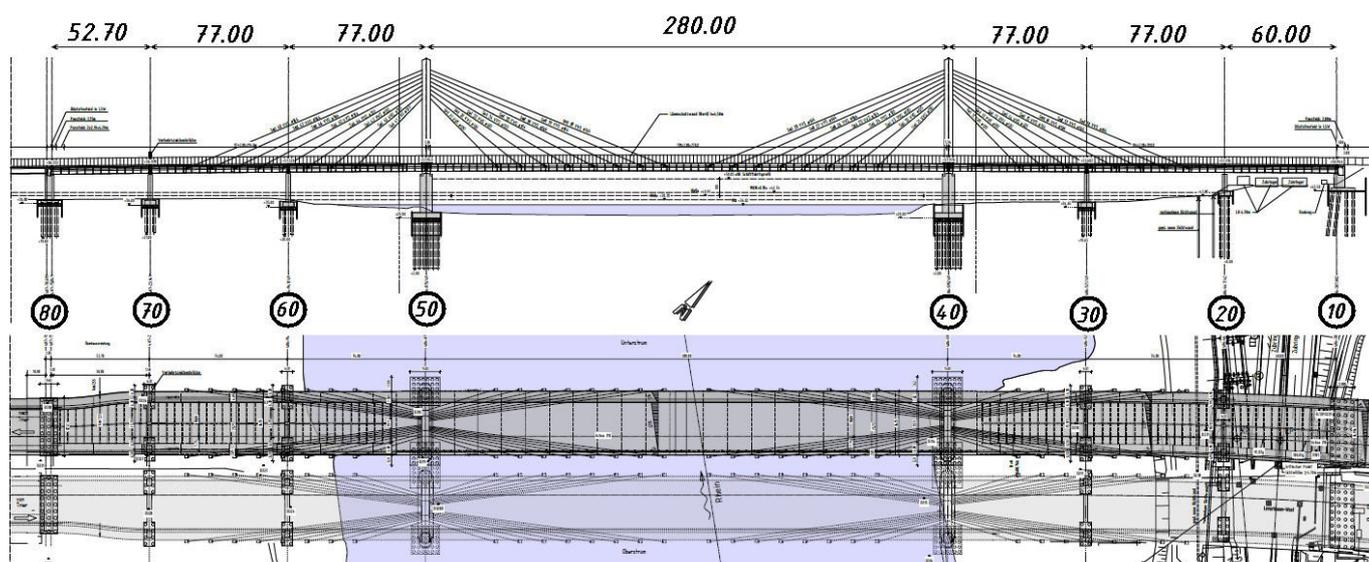


Figura 5. Alzado y planta del nuevo puente sobre el Rin en Leverkusen (LAP).

concurso para el proyecto de detalle y construcción, que fue adjudicado a Porr Deutschland GmbH en colaboración con Leonhardt, Andrä und Partner.

Precedidos en la margen izquierda de sus respectivos puentes de acceso de 377 m de longitud total, los puentes que cruzan el Rin para cada calzada suman cada uno casi 690 m de longitud total, con luces de 60+74+74+280+74+74+52.7 metros (figura 5). La superestructura de cada calzada consta de dos cajones metálicos laterales y una viga metálica central, unidos por vigas transversales separadas 4.30 metros.

La losa en el vano principal se resuelve mediante losa ortótropa metálica, mientras que en los vanos laterales se dispone una losa de hormigón de 35 cm de espesor que confiere un comportamiento mixto al tablero, y compensa de cara a la flexión del pylon las cargas permanentes del vano principal, más largo que el conjunto de los vanos traseros. Los pilonos están formados por cajones metálicos que se unen en la parte superior formando una A, y están rigidamente unidos al tablero,

descansando el conjunto sobre apoyos en las pilas. En la parte superior de los pilonos se anclan 16 parejas de cables (ocho hacia cada vano), anclándose cada una al tablero en consolas exteriores a los cajones (figura 6).

Para el diseño y ejecución de las cimentaciones hubo de prestar especial atención, como es habitual en los proyectos de la zona, a la posibilidad de encontrar restos de materiales explosivos de la II Guerra Mundial.

El diseño y ejecución de las cimentaciones se ve afectado adicionalmente por las necesarias medidas de protección ante el impacto de embarcaciones, así como por la posible afección a las mismas por suelos contaminados por los depósitos de residuos de las potentes industrias químicas y farmacéuticas de la zona.

2.3. Proceso constructivo

El proceso constructivo se ve determinado por el plazo tan estricto ya indicado, por el cual debe realizarse en primer lugar

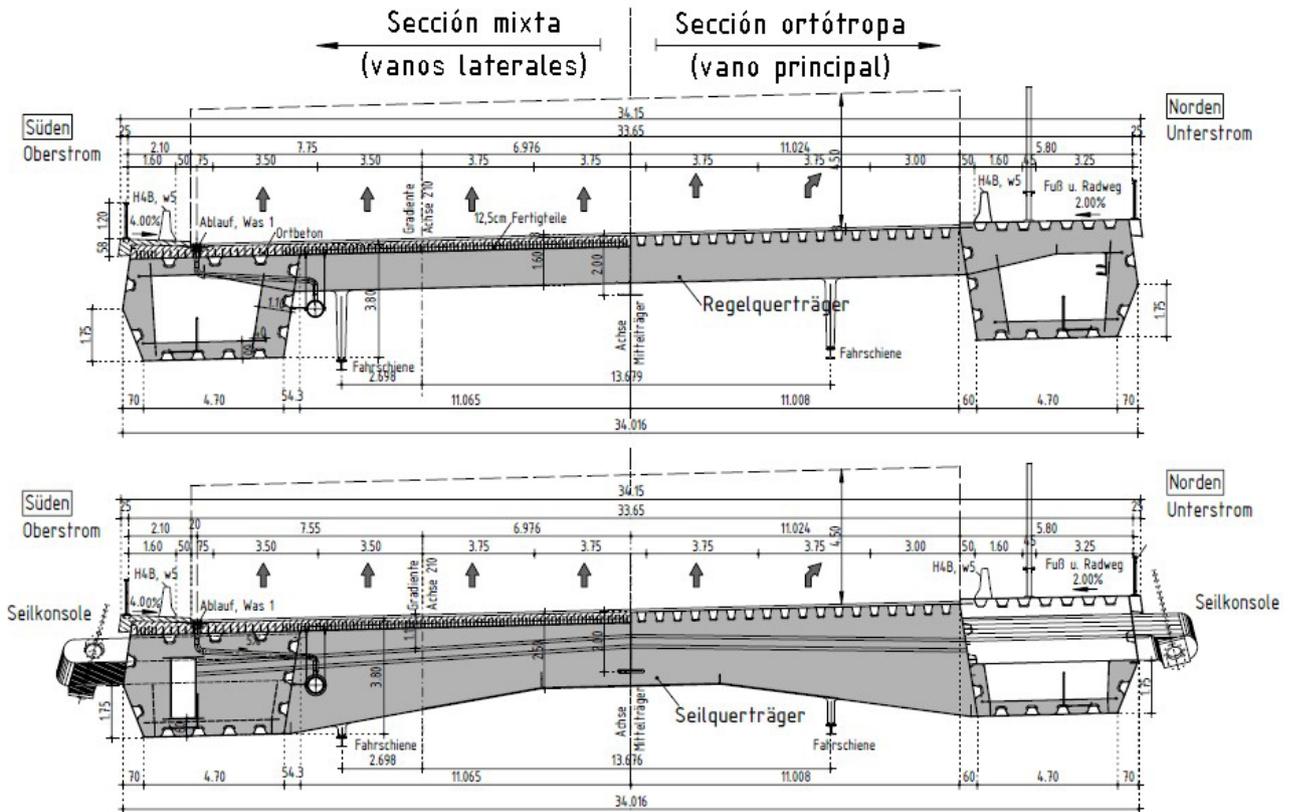


Figura 6. Secciones transversales por viga transversal típica y por viga de anclaje de cables (LAP).

la calzada de aguas abajo (Norte) para derivar el tráfico del puente existente una vez la primera calzada esté terminada.

La afectación al canal de navegación del Rin ha de limitarse, obligando obviamente a una construcción en voladizo, pero permitiendo la colocación de dovelas (de 12.90 m) mediante grúas flotantes (o grúas sobre pontonas).

Como se aprecia en la planta (figura 5), entre los ejes 10 y 20 en la margen derecha, el puente cruza sobre la autopista federal BAB 59. Para reducir al mínimo el impacto sobre el tráfico de esta autopista, los 137 primeros metros de estructura metálica (entre los ejes 10 y 30 en posición final) se montarán entre los ejes 40 y 20 con ayuda de 6 pares de pilas provisionales (con un vano máximo de 25.50 m). Una vez soldados los distintos tramos, se desaparean los apoyos de tres de los ejes provisionales, y se empuja el tablero algo más de 50 m hacia el estribo del lado Este sobre apoyos deslizantes situados bajo el alma interior de cada uno de los dos cajones de cada sección, hasta salvar 54.85 m de luz sobre la autopista BAB 59 y alcanzar su posición definitiva (en realidad hasta una posición 250 mm más hacia el Este).

A continuación, se monta el resto de la estructura metálica hasta el eje del pilono (eje 40), se colocan las prelasas prefabricadas colaborantes y se hormigona el resto de la losa de la sección mixta por fases. En la margen izquierda el montaje de la estructura metálica se realiza en su posición definitiva, también con ayuda de pilas provisionales que limitan la luz de los tramos biapoyados a un máximo de 26.40 m. El montaje es análogo al proceso posterior al empuje en la margen derecha.

Tras la ejecución de los vanos laterales se procede al montaje de los pilonos, y a continuación comienza el avance en

voladizo para el vano principal. Dado que los cables son de tipo cable cerrado (la mitad de ellos, los más cortos, de diámetro 120 mm, y la otra mitad, los más largos, de diámetro 164 mm) es preciso conferirles una fuerza de tesado mínima del 42% de su capacidad última, para asegurar la correcta imbricación de los alambres exteriores. Para los primeros cables este tesado se hace tras la colocación del segmento que soportan (de 37.75 m en el caso de los primeros segmentos). Para el resto de cables (excepto los últimos), el tesado al 42% se efectúa con un segmento de retraso, tras la colocación del segmento siguiente al que soportan, por ser este el momento de mayor carga sobre el cable. Los últimos cables se tesan tras soldar la dovella de cierre, ya sobre el sistema del puente cerrado. Durante el proceso de tesado de algunos de los cables, para evitar la descarga excesiva de los cables previamente tesados, y para reducir momentos flectores en el tablero, es preciso proveer cierto lastre temporal sobre el tablero (hasta un máximo de 188 toneladas en cada voladizo).

Las dovelas se colocan mediante grúas sobre pontonas. En primer lugar se coloca el segmento mediante ménsulas provisionales instaladas sobre la chapa superior del segmento a colocar, que se apoyan sobre el anterior, justo sobre ambas almas de cada uno de los dos cajones, y sobre el alma de la viga central, para asegurar la transmisión de la carga vertical.

Junto a estas ménsulas se disponen chapas verticales en cada segmento, que se unen mediante platabandas atornilladas que resisten las tracciones derivadas del momento flector entre ambos segmentos. Las compresiones se transmiten en la zona inferior mediante gatos horizontales, que permiten ajustar la geometría. De esta manera se consiguen instalar cada

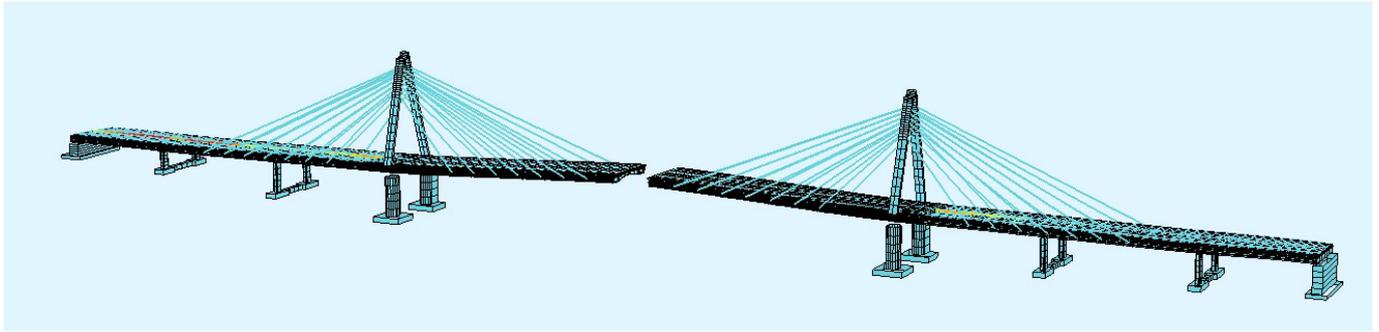


Figura 7. Modelo global para el proceso constructivo. Deformaciones afectadas de un factor de 10. (LAP).



Figura 8. Puente existente de Duisburg-Neuenkamp sobre el Rin (foto: Deges).

segmento en prolongación con la tangente del anterior. Una vez se conectan estas uniones, se libera la carga de la grúa y se procede al tesado de los cables del segmento anterior, que habían sido instalados hasta una carga inicial parcial, esta vez hasta un 42% de su capacidad última. Tras 12 horas a este nivel de carga, bajo la cual quedan imbricados los alambres externos del cable cerrado, se reajusta de nuevo la tensión en el cable (generalmente se relaja) hasta la longitud final teórica del cable (controlando fuerza en cables y también deformación en tablero). A continuación, se procede al soldado completo del segmento instalado, y a la posterior inspección de las soldaduras. Seguidamente se traslada hacia el segmento siguiente el carro de avance inferior con los equipos para la instalación y tesado de los cables, mientras se ejecutan en paralelo las soldaduras de los rigidizadores trapezoidales en todo el perímetro de la sección. Una vez finalizadas las operaciones se liberan los apoyos de las ménsulas y llaves temporales y se reinicia el ciclo para el segmento siguiente. Para el cierre del vano principal, tras la colocación de la dovola de cierre, se empuja todo el lado Este del tablero 150 mm en dirección Oeste (el lado Este del tablero se coloca tras el empuje 250 mm movido hacia el Este respecto de su posición final, y se empuja 100 mm hacia el Oeste al unirlo con la viga transversal del pylon, quedando 150 mm de apertura pendiente para el cierre central).

A finales de 2019 se encuentra finalizado el diseño de detalle e ingeniería de construcción para la primera calzada, y se encuentra en desarrollo el proyecto para la segunda. La construcción avanza con la subestructura Norte casi terminada.

3. PUENTE DE DUISBURG-NEUENKAMP

3.1. *El puente existente*

El puente Duisburg-Neuenkamp se terminó de construir en 1970 para el cruce del Rin de la autopista A40, que conecta la región del Ruhr con el Bajo Rin y con Holanda, por lo que es un eje clave para la economía local. Se trata de un puente atirantado de ocho vanos y 777.4 m de longitud total, con un vano principal de 350 m de luz. El tablero metálico consiste en una losa ortótropa de 36.3 m de ancho total, sostenida por un cajón central bicelular de 12.7 metros de ancho y jabalcones laterales. Los pilonos son mástiles metálicos centrados con el tablero, en los cuales se anclan seis grupos de cables (tres hacia cada vano).

El puente original fue diseñado para 30 000 vehículos diarios, siendo el volumen actual de tráfico de más de 100 000, y

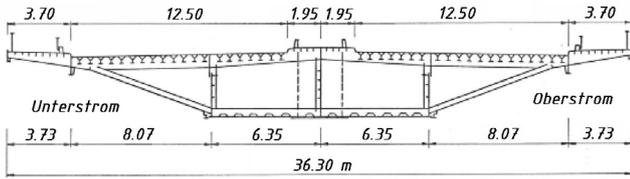


Figura 9. Sección transversal del puente existente de Duisburg-Neuenkamp (LAP).

la proyección para 2030 de más de 125 000. En 1993 se identificaron los primeros daños en la losa ortótropa y en las soldaduras de sus rigidizadores con las vigas transversales, que fueron reparados por primera vez en 1996 y de nuevo en 2010/2011 (en cerca de 1800 localizaciones [3]). En esta última campaña se repararon además daños en elementos transversales. En los últimos años se han identificado daños en la unión de los

jalbalcones con el cajón central, debidos a desgarro laminar en la parte inferior de las almas (de 12 mm de espesor) a nivel de la soldadura de las cartelas de la unión. Estos daños han sido a su vez el foco de propagación de nuevas fisuras de fatiga. En [3] se pueden observar imágenes y descripciones detalladas de todos estos daños y sus reparaciones.

Análogamente al puente de Leverkusen, el puente de Duisburg-Neuenkamp se encuentra actualmente abierto al tráfico con solo cuatro carriles (para más de 115 000 vehículos diarios), bajo monitorización, reparaciones frecuentes y limitaciones permanentes al tráfico pesado, por lo que su sustitución por un nuevo puente con 8 carriles es obligada y urgente.

3.2. Proyecto del nuevo puente

La gestión del proyecto en nombre del gobierno federal y del estado de Renania del Norte-Westfalia corre a

A. Puentes atirantados de dos torres simétricas, dos puentes con calzadas separadas



B. Puente atirantado de dos torres simétricas con calzada única



Figura 10. Estudio de soluciones para el nuevo puente de Duisburg-Neuenkamp (LAP).

C. Puentes colgantes autoanclados, dos puentes con calzadas separadas



D. Puentes atirantados asimétricos de una torre, dos puentes alternos con calzadas separadas



E. Puentes arco, dos puentes con calzadas separadas



Figura 11. Estudio de soluciones para el nuevo puente de Duisburg-Neuenkamp (LAP).



Figura 12. Visualización del nuevo puente de Duisburg-Neuenkamp (Keipke Architekten).

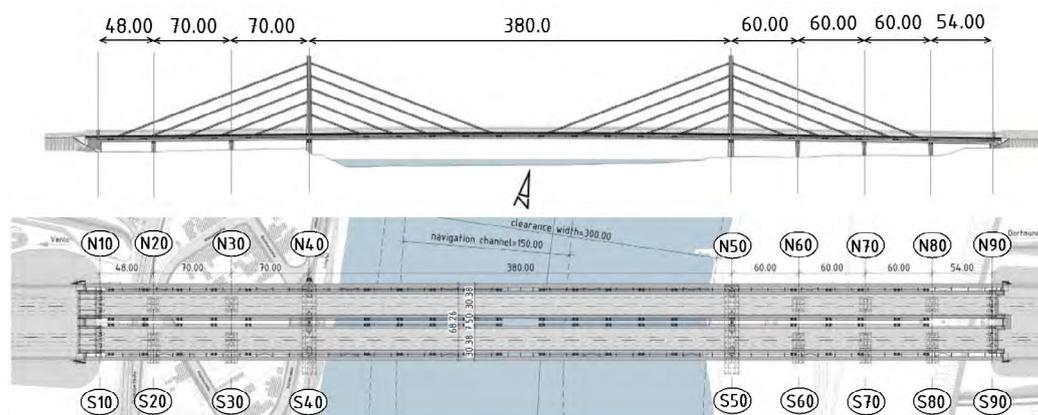


Figura 13. Alzado y planta del nuevo puente de Duisburg-Neuenkamp (LAP).

cargo de la DEGES (una empresa privada de participación pública, creada en 1991 para gestionar los proyectos de carreteras vinculados a la reunificación, que a día de hoy gestiona proyectos a cargo generalmente de las direcciones de carreteras de los distintos estados federales). Ya en 2014 se encargó a Leonhardt, Andrä und Partner el primer estudio de viabilidad y soluciones para el reemplazo del puente de Duisburg-Neuenkamp. En este primer estudio se tantearon las cinco soluciones mostradas en las figuras 10 y 11.

De entre ellas se eligió la primera, dos puentes atirantados con calzadas separadas, de dos torres simétricas cada uno. Con esta solución de base se invitó a concursar a tres firmas de arquitectura (GMP, Knight Architects y Keipke Architekten) bajo la asesoría técnica de LAP, resultando elegido el diseño de Keipke Architekten (figura 12), que mantenía en cierto modo el aspecto del puente original al resolver los pilonos con mástiles metálicos esbeltos e independientes para cada plano de cables (no arriostrados entre sí). Los cables se disponen también agrupados, en 10 grupos por cada mástil (5 hacia cada vano), manteniendo mediante esta gran separación de los anclajes de cables en el tablero (30 metros) el aspecto que los puentes

de Leverkusen y Duisburg heredaron de los pioneros puentes atirantados sobre el Rin en Düsseldorf. Sobre este diseño con grupos de cables con separación relativamente grande (respecto de los diseños habituales en la actualidad) y su relación con la redundancia, cabe señalar que entre todos los escenarios de sustitución o pérdida de cables considerados se incluyó también como situación accidental la pérdida de un grupo completo de cables por acción del fuego (si bien se asume que la rotura es gradual y por lo tanto sin efecto dinámico, es decir con coeficiente de impacto 1.0).

Las luces del nuevo puente serán de $48+2 \times 70+380+3 \times 60+54$ metros (figura 13), modificando ligeramente la distribución de apoyos respecto del puente existente para evitar interferencias entre sus cimentaciones. La sección transversal (figura 14) de cada calzada tiene un ancho total de 30.38 metros, con un cajón metálico tritelular principal de 23.90 metros y un cajón lateral adicional para la acera. La losa del vano principal es metálica ortótropa. En los vanos traseros se dispone una losa de hormigón de 55 cm de espesor (15 de ellos de prelosa) confiriendo comportamiento mixto a la sección. En [4] puede encontrarse más información sobre el diseño [4].

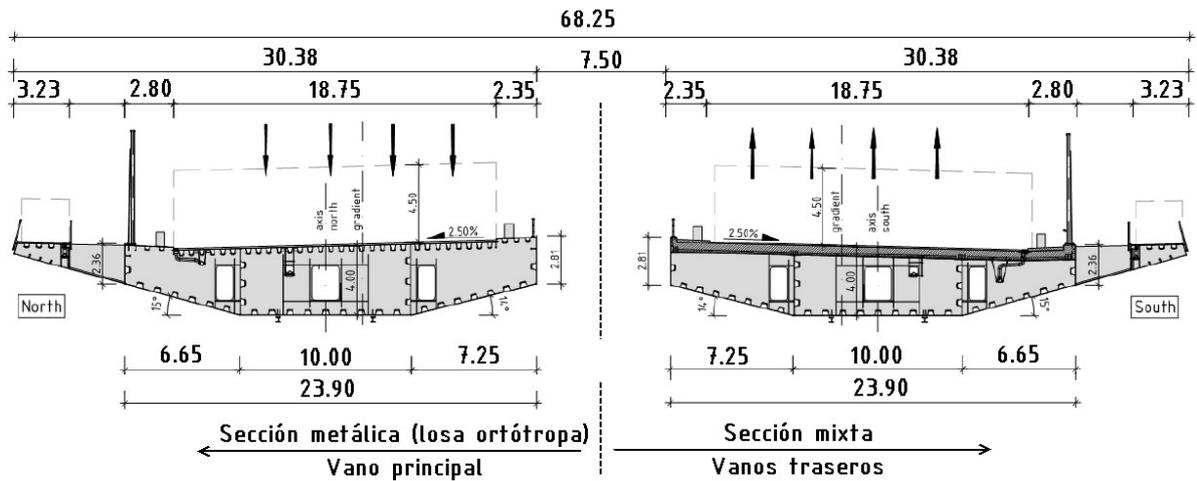


Figura 14. Sección transversal por centro de vano y por vanos traseros (LAP).

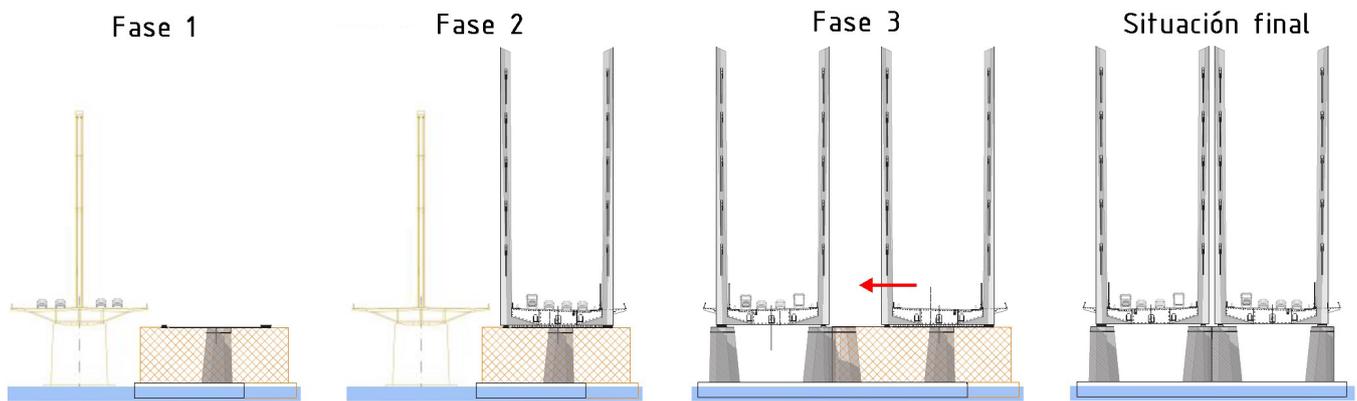


Figura 15. Proceso constructivo: ripado transversal del puente completo (LAP).

3.3. Proceso constructivo

El proceso constructivo estaba desde el principio marcado por la urgencia del proyecto y las ajustadas condiciones geométricas. Se optó por la construcción de una primera calzada en el lado Sur en una alineación provisional (figura 15). Una vez terminado el primer puente (mediante empuje de los vanos laterales y el avance en voladizo del vano principal) se derivará el tráfico del puente existente por los cuatro carriles de la nueva calzada, procediendo a la desmantelación del puente antiguo. A continuación, se procederá a la construcción de la calzada Norte en su posición definitiva. Una vez terminada, se deriva de nuevo el tráfico de la calzada Sur a la Norte, y se procede al ripado transversal del puente Sur completo hasta su posición definitiva. En [5] puede verse una vídeo-animación completa de su construcción.

4. CONCLUSIONES

Muchos puentes en Alemania que fueron construidos en los años 60 y 70 han sufrido las consecuencias del incremen-

to en las décadas posteriores de las cargas y volúmenes de tráfico de las principales arterias europeas. Los puentes de Leverkusen y Duisburg-Neuenkamp son ejemplos emblemáticos de puentes metálicos con acusados daños de fatiga, que requieren procedimientos sistemáticos de inspección, mantenimiento, reparación o sustitución por nuevos puentes que aseguren unas prestaciones al nivel de los retos que depara el futuro.

Referencias

- [1] Müller, M., Rodríguez Molina, R. & Kratzke, B. (2020) Puente de Colonia-Mülheim sobre el Rin: equilibrio entre la conservación del patrimonio y las estrategias de renovación de estructuras existentes, *VIII Congreso ACHE*, Santander.
- [2] Ritterbusch, N. (2019) Ausbau der A1 zwischen Köln-Niehl und Leverkusen-West, *Brückenbau Constr. and Eng.*, H. 1-2 46-51.
- [3] Paschen, M., Hensen, W. & Hamme, M. (2017) Instandsetzungs- und Sicherungsmaßnahmen bei den Rheinbrücken Leverkusen und Duisburg-Neuenkamp – ein Zwischenbericht (Teil 1 & 2), *Stahlbau* 86, Heft 7 & 12, Berlin, 603-618 & 1113-1119.
- [4] Schumm, M. (2019) Replacement strategies of existing highway bridges in Germany, *NYC Bridge Conference*, Nueva York.
- [5] www.deges.de/projekte/projekt/a-40-ausbau-der-autobahn-und-ersatzneubau-der-rheinbruecke-duisburg-neuenkamp