viaductos

de hormigón pretensado contruidos por vanos sucesivos

Dr. Ingeniero HANS WITTFOHT, director de la firma Polensky & Zöllner

562-110

sinopsis

Las dificultades que presentaba la utilización de las cimbras tradicionales al construir ciertos puentes de hormigón pretensado han forzado a encontrar una solución que superase los inconvenientes, conservando, o mejorando a ser posible, todas las ventajas en orden a seguridad, rapidez, economía, etc.

Los andamiajes de lanzamiento parecen llenar todos los requisitos impuestos y han venido empleándose con éxito creciente, especialmente en las autopistas alemanas, en puentes de todos los tipos—con luces muy diversas y asentados sobre toda clase de terrenos—, algunos de los cuales presentaban las condiciones más desfavorables.

1 Introducción

El rápido desarrollo alcanzado en los últimos años por la construcción de puentes de hormigón pretensado por vanos sucesivos, ha superado ampliamente los pronósticos del autor en su informe sobre el puente de Krahnenberg [1]. Impulsada por la puesta a punto de nuevos equipos de avance, esta técnica representa uno de los adelantos más importantes en la construcción de puentes pretensados, y son ya muchas las empresas que la han empleado, o que se disponen a hacerlo.

No obstante, se han producido ciertos malentendidos en torno a la situación actual. No se trata, como algunos parecen pensar, de que haya que descartar por anticuada la construcción por los métodos tradicionales. Antes bien, existen algunos casos en los que resultará idónea; pero hay otros muchos en los que era lenta u onerosa, y que tampoco parecían adecuados al empleo de métodos más modernos, como la prefabricación o la construcción por voladizos sucesivos. Y es en éstos en los que la nueva técnica viene a llenar una importante laguna.

Ante todo representa su empleo una inversión elevada, pues el coste de cada equipo puede estimarse en unos 20 millones de pesetas. Sólo mediante una perfecta racionalización del equipo mismo y del proceso de su empleo resulta posible compensar este gasto y obtener una economía en el conjunto de la obra frente a la competencia, y en todo caso no es posible olvidar la amortización del equipo a la hora de acudir a los concursos.

Así, por ejemplo, si en cada obra se amortizase la tercera parte del coste del equipo, serían necesarios al menos cuatro empleos del mismo para lograr la amortización completa, teniendo en cuenta los intereses devengados. Como se trata de obras de cierta duración, esto equivale a suponer un plazo de amortización de 8 años, en el mejor de los casos. Y la previsión para plazos tan largos siempre resulta arriesgada, sobre todo si se consideran las posibles modificaciones del equipo para adaptarse a nuevas luces o anchos de puente, modificaciones que resultan tan frecuentes como costosas.

Estas y parecidas consideraciones indujeron a las empresas Polensky & Zöllner y Strabag Bau A.G. a compartir su experiencia en este campo y a fundar una empresa autónoma (VRG) para la puesta a pun-

to (proyecto y construcción) de nuevos equipos de avance, la obtención de la correspondiente patente y la promoción de su uso, incluso por otros clientes, pues ninguna de las empresas fundadoras tenían capacidad para monopolizar su empleo.

Esta empresa dispone actualmente de ocho equipos, que presentan entre ellos algunas diferencias que los hacen adecuados a situaciones diferentes (ver los apartados 3 a 5). Cada caso distinto que se presenta exige un análisis cuidadoso de sus posibles utilizaciones, a fin de no multiplicar excesivamente el número de equipos, que quedarían pronto anticuados e inservibles.

2 Avance por vanos mediante andamiajes desmontables

El empleo de andamiajes desmontables es recomendable para la construcción de viaductos que cumplen las siguientes condiciones:

- tramos continuos de gran número de vanos aproximadamente iguales;
- altura reducida de la rasante sobre el terreno;
- longitud total de la obra no muy elevada (en general, 300 m como máximo);
- geometría variable en planta, lo que imposibilita el empleo del mismo encofrado en los vanos sucesivos.

2.1. El caso típico es el del puente de sección transversal constante, que se construye por vanos sucesivos partiendo de uno de los extremos, o bien del vano central y avanzando en ambos sentidos. Es el caso del viaducto de Bergerstrasse en Porz (tabla I, núm. 1), que debía salvar un grupo de vías férreas de elevado tráfico. Se comenzó construyendo el vano central, que era el de mayor luz, y prolongándolo en voladizo hasta los puntos de momento nulo de los vanos adyacentes, y se avanzó después hacia ambos lados, en cinco fases, hasta llegar a los estribos. Se emplearon dos andamiajes de tubos de acero, sistema Mannesmann (fig. 1), que por llevar tubos de gran sección se apoyaban en pocos puntos y podían montarse en un tiempo relativamente corto, y se trabajaba en ambos simultáneamente, aunque con un desfase de medio ciclo entre los dos sentidos. El encofrado estaba formado por elementos de peso reducido que podían desmontarse rápidamente con ayuda de una grúa (fig. 2).

El puente tiene una sección en cajón bicelular, que se repetirá en los ejemplos siguientes. Esta sección es especialmente adecuada para la construcción de puentes por vanos sucesivos de hasta 50 m de luz,

Fig. 1. Viaducto de Bergerstrasse en Porz: Andamio de tubos de acero Mannesmann en el vano que cruza la línea férrea principal.

Fig. 2. Viaducto de Bergerstrasse en Porz: Encofrados del cajón.

Fig. 3. Manguito de anclaje para la prolongación de los cables de pretensado en la construcción por vanos sucesivos. Cable tipo PZ A 100.

y presenta buena resistencia frente a la torsión, incluso en el caso de directriz de planta curva. El canto total es constante, de 1,24 m, esto es, $1/24$ de la luz del vano central y $1/19$ de la luz del vano tipo; la necesidad de respetar el gálibo impidió ir a un canto mayor, que habría resultado más económico.

El pretensado se hizo con cables del tipo PZ A 100 alojados en las almas del cajón, que se anclaban en la junta de cada vano y mediante manguitos se empalmaban entre sí para constituir cables continuos a lo largo de todo el puente.

Esta forma de empalme ha demostrado su sencillez y eficacia en todas las obras que se describen en este artículo (fig. 3). Una vez tesado el cable e inyectada la vaina, sobresale de la placa de anclaje un vástago fileteado, al que se rosca el manguito de empalme. El vástago del nuevo cable se coloca a tope y se hace retroceder el manguito dándole vueltas en dirección contraria hasta su posición definitiva, observando el proceso por agujeros dejados al efecto. El cable prolongado vuelve a anclarse en la siguiente junta de hormigonado (fig. 4).

El pretensado transversal del forjado se consigue por medio de cables del tipo PZ A 40, y para las traviesas se emplean cables del tipo PZ A 80 y PZ A 100.

La ejecución de la cimentación y de las pilas debe tener igual velocidad de avance que la superestructura. En este caso las pilas eran soportes aislados de sección elíptica. Una vez colocada la jaula de las armaduras, previamente preparada, se realizaba el hormigonado sin interrupción, usando un juego de encofrados que constaba de dos partes (fig. 5).

2.2. Otro ejemplo típico es el del viaducto sobre el Messeschnellweg en Hannover-Bischofshol (fig. 6, y tabla I, núm. 2). El vano central, de 53 m de luz, era relativamente importante, por lo que se decidió empezar por él. El canto es constante y de 1,35 m, o sea,

Fig. 4. Junta de vano después del anclaje de los cables.

TABLE I

AÑO	Nº	SECCION LONGITUDINAL	SECCION TRANSVERSAL
1963/65	1		
1963/64	2		
1965/66	3		
1965/66	4		
1963/64	5		
1964/65	6		
1965/66	7		
1961/64	8		
1962/64	9		
1964/66	10		
1964/66	11		
1964/66	12		

13	1965/67	
14	1966/67	
15	1965/66	
16	1965/67	
17	1965/67	
18	1966/68	
19	1966/68	
20	1965/69	

Núm. 1. Viaducto de Bergerstrasse en Porz.
Núm. 2. Viaducto en Hannover-Bischhofshol.
Núm. 3. Zoobrücke en Colonia, zona Z.
Núm. 4. Zoobrücke en Colonia, zona D.
Núm. 5. Pasarela sobre la calle Cassella en Francfort.
Núm. 6. Autopista elevada en Leverkusen.
Núm. 7. Paso de la Wandsbeker Allee en Hamburgo.

Núm. 8. Viaducto de Kralnberg.
Núm. 9. Viaducto de Lenneberg.
Núm. 10. Viaducto de Pleichach.
Núm. 11. Viaducto sobre el valle de Lang-Göns.
Núm. 12. Viaducto sobre el valle de Münchholzhausen.
Núm. 13. Viaducto sobre el valle de Unterteden.
Núm. 14. Viaducto sobre el valle de Klüfelfeiberg.

Núm. 15. Viaducto sobre el valle de Kattenohl.
Núm. 16. Viaducto sobre el valle de Sührehagen.
Núm. 17. Viaducto sobre el valle de Sterbecke.
Núm. 18. Viaducto sobre el valle de Eichelnbleck.
Núm. 19. Viaducto urbano de la Stadtkern tangente en Maguncia.
Núm. 20. Viaducto sobre el valle de Sleg, cerca de Eisfeld.

Fig. 5. Viaducto de Bergerstrasse en Porz: Juego de encofrados desmontables, en dos partes, para las pilas.

1/39 de la luz del vano central. La esbeltez es considerable; por ello se necesita un pretensado relativamente alto, que obliga al uso de cables de mayor sección. Esto dio lugar al empleo, por primera vez, de gran número de cables del tipo PZ A 200, cuya fuerza de pretensado es de unos 220 Mp (*). En otra publicación [2] pueden encontrarse detalles y datos adicionales sobre estos cables.

Los anclajes de 200 Mp son del mismo tipo que los de los cables menores A 10 hasta A 100, y pueden emplearse tanto con cables de sección oval como de sección circular. No obstante, para la transmisión al hormigón del esfuerzo de pretensado se emplea una «campana de acero», en lugar de la placa moldeada habitual (fig. 7). Esta campana va rodeada por hormigón de calidad B 600 fuertemente zunchado (figura 8 y [2]).

Se empleó por primera vez un andamiaje de tubos de la empresa Peiner Maschinen- und Schraubenwerke A.G., que tenía un reducido número de uniones, lo que facilitaba el desmontaje. El encofrado estaba compuesto por elementos transportables con una grúa, como en el caso anterior.

(*) 1 Mp (megapondio) = 1.000 kp, unidades correctas de fuerza a emplear en vez del kg y la t.

Fig. 6. Viaducto en Hannover-Bischofshol.

Fig. 7. Anclajes de los cables tipos PZ A 100 y PZ A 40.

Fig. 8. Anclaje de los cables tipo PZ S 200 (A 200). Colocación del anclaje en el hormigón.

2.3. Las rampas de acceso al Zoobrücke en Colonia (tabla I, núms. 3 y 4) pueden servir como ejemplo de puentes con planta de forma irregular [3].

Se trata de estructuras sin juntas. La rampa de la orilla izquierda del Rin, zona Z (fig. 10), tiene una superficie en planta de 12.600 m², mientras que la de la orilla derecha, zona D (fig. 11), llega a los 25.000 m². En ambos casos están constituidas por una rampa principal, cuya sección transversal es un cajón multicelular, de la que se separan ramales de planta curva y sección en cajón con uno o dos huecos.

Se construyeron por vanos sucesivos, prolongando el pretensado a lo largo de toda la estructura con manguitos de empalme, y empleando un andamiaje desmontable de tubos sistema RôRo. Las pilas, de sección octogonal, se hormigonaron sin interrupción usando un juego de encofrados análogo al de la figura 5; en la rampa principal van por parejas, y en los ramales, aisladas. Los apoyos sobre las pilas se hacen por intermedio de una capa de Teflon, y la reacción máxima transmitida es de 2.400 Mp.

En la rampa de la zona Z el canto varía de 1,90 a 2,45, siendo la luz de la rampa principal de 52,5 m ($h/l \approx 1/25$). El pretensado, relativamente elevado, se consiguió fácilmente utilizando cables A 200, y los anclajes en las juntas de cada vano se dispusieron en una sola fila vertical (fig. 12).

Fig. 9. Viaducto en Hannover-Bischofshol: Andamiaje Peiner.

Fig. 10. Zoobrücke en Colonia. Rampa de la orilla izquierda del Rin, zona Z. Planta con fases de la obra.

Fig. 11. Zoobrücke en Colonia. Rampa de la orilla derecha del Rin, zona D, durante la construcción.

Fig. 12. Zoobrücke en Colonia. Rampa de la orilla izquierda del Rin, zona Z. Empalme con manguito de un cable tipo PZ A 200.

Fig. 13. Zoo-brücke en Colonia. Rampa de la orilla izquierda del Rin, zona Z. Soporte auxiliar para resistir las torsiones del ramal circular durante la construcción.

Fig. 14. Zoo-brücke en Colonia. Rampa de la orilla derecha del Rin, zona D. Traviesa de la rampa principal antes del hormigonado.

Las traviesas sobre las pilas van fuertemente pretensadas con el fin de transmitir a los apoyos las reacciones provenientes de las almas del cajón. El pretensado, de hasta 4.900 Mp, se consiguió mediante cables A 100 anclados por un extremo en el paramento exterior del cajón, mientras que el otro extremo (anclaje pasivo) termina escalonadamente en el alma.

El ramal de salida, por el cual comenzó la construcción (fig. 10), requirió cuidados especiales. En efecto, la alteración de la ley de momentos flectores, debida al proceso constructivo por vanos sucesivos se incrementa, en este caso, por las torsiones ocasionadas por la fuerte curvatura, que producen tensiones tangenciales especialmente peligrosas [3]. Por ello se decidió emplear, durante la construcción, un soporte auxiliar al lado de cada pila, que impidiera la torsión de la superestructura (fig. 13). Estos soportes auxiliares se retiraron una vez terminado el ramal.

La zona D se comenzó por el gran vano central de la rampa principal, de 56 m de luz, y se progresó después por vanos hacia los extremos, incluyendo los ramales al llegarse a ellos. El canto es de 2,0 m en la rampa principal y de 1,55 m en los ramales. El pretensado longitudinal se hizo con cables A 100, que resultaron suficientes por ser la luz tipo (33 m) menor que la de la zona Z. Los cables iban anclados en la junta de cada vano en dos filas verticales, y se prolongaban mediante manguitos de empalme.

Las traviesas sobre las pilas en las secciones de arranque de los ramales reciben una reacción adicional con gran excentricidad. Por ello fue necesario darles anchura de hasta 7 m y una fuerza de pretensado de hasta 5.400 Mp (ver fig. 14, y [3]).

En la figura 15 puede verse el anclaje de los cables A 100 en el paramento exterior del alma lateral del cajón. La figura 16 da una idea de la necesidad de fuertes traviesas para la transmisión de las reacciones a los apoyos.

3

Avance por vanos mediante andamiajes móviles

Las condiciones idóneas para el empleo de andamiajes móviles son las expuestas en el apartado 2, salvo la de la longitud total del viaducto, que debe ser mayor de 300 m, siendo además necesario que la sección transversal se mantenga constante.

Fig. 15. Zoobrücke en Colonia. Rampa de la orilla derecha del Rin, zona D. Travesía de la rampa principal. Anclaje de los cables PZ A 100.

Fig. 16. Zoobrücke en Colonia. Rampa de la orilla derecha del Rin, zona D. Vista inferior parcial.

3.1. El caso más simple es el del empleo de un andamiaje móvil sobre carriles, el cual se va colocando a medida que la construcción progresa. Un ejemplo de este proceso constructivo se encuentra en la pasarela para peatones y bicicletas sobre la calle de Cassella, en Francfort (fig. 17, y tabla I, núm. 5). Los encofrados permanecen unidos al andamiaje, no siendo necesario montarlos en cada ciclo. Durante el hormigonado el andamiaje se apoya sobre las pilas, de forma que los carriles quedan descargados. Una vez pretensado el vano, se hace descender el andamiaje hasta apoyarse en los carriles, con lo que se produce el desencofrado; se abren las planchas del fondo del encofrado para permitir el paso del mismo a través de la pila, y se trasladan andamiaje y encofrado hasta la posición para el hormigonado del vano siguiente.

En la pasarela citada las luces variaban entre 18 y 36,5 m, con un canto constante de 1,0 m. El equipo estaba preparado para la luz máxima, y el encofrado frontal de junta era intercambiable, con lo cual podía adaptarse a cualquiera de los vanos. Los ramales (fig. 18) se deben hacer, en estos casos, una vez terminada la obra principal, con objeto de no estorbar el paso del encofrado móvil. Como las armaduras

Fig. 17. Pasarela para peatones y bicicletas sobre la calle de Cassella en Francfort. Andamiaje móvil.

Fig. 18. Pasarela para peatones y bicicletas sobre la calle de Cassella en Francfort, con ramal intermedio.

de espera no tesas plantearían esta misma dificultad, es preferible asegurar la unión mediante cables de pretensado que se insertan en canales vacíos dejados al efecto en la obra principal.

3.2. En el caso de una cimentación costosa o insegura, puede resultar conveniente sustituir el andamiaje por vigas-cimbra. Estas vigas se apoyan en carriles, por intermedio de un carrito, solamente para su transporte de un vano al siguiente; durante el hormigonado del vano se apoyan por detrás en la estructura terminada y por delante en pequeñas ménsulas dispuestas provisionalmente en las pilas, de forma que el peso del nuevo vano se transmite a la cimentación definitiva de la estructura y no son necesarias cimentaciones auxiliares para los andamiajes.

El ejemplo más notable de este sistema es la construcción de la autopista elevada B en Leverkusen, perteneciente a la red federal de autopistas (fig. 19 a, y tabla I, núm. 6; así como [4]). La anchura total de plataforma es de 33,5 m, y se empleó un equipo de avance para construir la sección completa en una sola pasada. Se alcanzó un ritmo de hasta tres vanos de 29,5 m por mes, con lo cual pudo terminarse la obra, cuya longitud era de más de 900 m, en el plazo fijado de un año. Esta elevada velocidad se consiguió gracias al sistema constructivo con el equipo de avance, así como a la cuidadosa organización de obra y a la prefabricación parcial de encofrados interiores y armaduras (fig. 19 b; y fig. 39 de [12]).

Fig. 19 a. Autopista elevada B en Leverkusen. Equipo de avance.

Fig. 19 b. Autopista elevada B en Leverkusen. Colocación de las armaduras.

La sección transversal está constituida por dos cajones bicelulares de 2,0 m de canto total. Una traviesa común solidariza estos cajones sobre las pilas (formadas por un soporte de sección circular bajo cada cajón) y da rigidez al conjunto. Para permitir el paso del equipo de avance con los encofrados, se hormigonaron estas traviesas después de terminados los vanos adyacentes, asegurando la unión mediante pretensado con cables A 100 para los que se habían dejado canales en espera en las almas de los cajones. El encofrado interior se extrajo, una vez desmontado, por aberturas especiales dejadas al efecto en el forjado, las cuales se cerraron posteriormente. El forjado lleva un pretensado transversal en toda su anchura, que se dio, una vez terminada la obra, mediante cables A 40 insertados asimismo en canales preparados para ello.

3.3. El equipo de avance usado en Leverkusen fue aprovechado para el paso de la Wandsbeker Allee en Hamburgo. A pesar de que en este caso la longitud total de la obra, de 300 m, estaba en el límite inferior del empleo económico del sistema, y de que fue necesario construir aparte uno de los vanos, que salvaba la vía férrea principal, así como modificar el equipo, se consiguieron también aquí, gracias a su empleo, mayores rapidez y economía. La sección transversal, de 15,3 m de ancho, es un cajón bicelular cuyo canto total es de 1,40 m, y las pilas están formadas por dos soportes (tabla I, núm. 7).

4

Avance por vanos mediante equipos independientes del terreno

Los equipos de avance sin apoyo sobre el terreno son de empleo idóneo si se cumplen las condiciones del apartado 3, pero el terreno está inundado, es demasiado accidentado o está muy por debajo de la rasante. En estos casos resulta conveniente apoyarse sólo en las pilas del viaducto y en el tramo ya construido, tanto durante el hormigonado de cada vano como durante el transporte de un vano al siguiente.

4.1. El ejemplo más significativo de este proceso constructivo es, hasta el momento, el puente de Krahnenberg, cerca de Andernach, empezado en el año 1961 y terminado en el 1964 (tabla I, núm. 8; y fig. 33 en [12]). Todos los otros puentes citados en este artículo han utilizado la experiencia adquirida en su construcción en mayor o menor escala. La descripción detallada de esta obra ha sido dada en otra publicación [1], por lo que aquí nos limitaremos a lo esencial. La longitud del puente, de casi 1.100 m, y la dificultad de la cimentación en la ladera del Krahnenberg, con peligro de deslizamientos, indujeron al empleo de un nuevo sistema de avance, adecuado a estas condiciones, a las que se debe añadir la existencia de una curvatura variable en planta.

El equipo de avance está formado por cuatro jácenas, de las cuales las dos centrales van unidas entre sí rigidamente, y con las laterales mediante planchas abatibles que constituyen el fondo del encofrado, de modo que resulta posible hacer avanzar las laterales independientemente de las centrales (obsérvese la fig. 23; y las figs. 3 a 5 de [1]). Las jácenas se apoyan sobre traviesas desmontables aplicadas a las pilas del puente, que son de sección hexagonal. Se emplean tres de estas traviesas, de las que dos soportan al vano que se está hormigonando, mientras que la otra se halla ya colocada en la pila siguiente esperando el próximo avance.

Cada una de las jácenas se prolonga por un brazo en celosía, con lo que alcanza una longitud algo mayor del doble del vano del viaducto; así en cualquiera de sus posiciones durante el avance se sustenta en dos traviesas sin ninguna dificultad. Cuando las cerchas centrales, que avanzan después que las laterales, han alcanzado la traviesa delantera, la tercera traviesa se desmonta y se traslada a su nueva posición. Los brazos delanteros de las cerchas exteriores son giratorios para poder ajustarse a la planta de curvatura variable.

Los encofrados de los paramentos exteriores del cajón van unidos a las jácenas y sólo necesitan pequeños ajustes para adaptarse a la curvatura en los distintos vanos. Los encofrados interiores, por el contrario, se montan y desmontan en cada paso, por lo que están formados de elementos de fácil manejo. Una vez desmontados, se unen estos elementos, y el encofrado se traslada con una grúa que se mueve sobre el puente, y se coloca en su nueva posición, después de haber montado las armaduras del fondo y de las almas. La eficacia de este sistema constructivo se basa en la concentración de todas las operaciones en el vano que se está hormigonando, incluyendo el montaje de los cables de pretensado y su puesta en carga; por este motivo resulta de gran utilidad el empleo de la citada grúa, la cual se mueve sobre el vano en construcción y el recién terminado, y sirve para trasladar de uno a otro todos los elementos auxiliares de la obra, permitiendo independizarse completamente del terreno.

La central de hormigonado permaneció fija en un extremo del puente, y el transporte hasta la grúa se efectuó en camiones. El trabajo de la grúa resultó fácil, por ser reducido el recorrido vertical de la carga; y con objeto de ganar tiempo, se simultaneaba el movimiento horizontal con el giro del brazo. La grúa se situaba cerca del borde del puente para facilitar el enganche de la cubeta y su traslado hasta el encofrado mediante un giro de noventa grados. Se consiguieron así velocidades de hormigonado que no bajaron de los 20 m³/hora.

Se encontró que la cadencia de avance más económica era de 14 días por vano. Para mantenerla era necesario preparar cuidadosamente todos los detalles y disponer de un equipo de avance sin fallos, y de operarios capacitados y compenetrados entre sí. Aunque es posible elevar la cadencia empleando turnos extraordinarios y otras medidas especiales, en general no se conseguirán mejoras apreciables en la economía de la obra.

La construcción de puentes mediante equipos de avance recibió un fuerte impulso en el viaducto de Krahnenberg, como lo demuestran los ejemplos que se verán a continuación. Con la construcción de nuevos equipos, además de aprovecharse los conocimientos adquiridos en este primer caso, se ha podido ampliar y completar la experiencia en este campo.

4.2. Estando aún sin acabar el viaducto de Krahnenberg comenzaron las obras del viaducto de Lenneberg [4], situado a continuación del puente de Schiersteiner sobre el Rin (tabla I, núm. 9). Se utilizó aquí el equipo de avance empleado en Kettig, aunque hubo que modificar ligeramente la sección transversal de la obra para evitar demasiados cambios.

Este equipo de avance tiene jácenas cuya longitud es de sólo un vano (fig. 20), y cuyo transporte exige el empleo de una viga auxiliar, la cual está situada en el vano siguiente al que se hormigona. Sobre esta

viga se mueve un carrito, del que se cuelgan las jácenas por su extremo frontal para trasladarlas a su nueva posición. Las jácenas se apoyan además en un travesaño que permanece fijo y que está colgado de un carrito análogo por sus extremos, fuera ya de la sección del puente. Durante el hormigonado las jácenas se apoyan por delante en ménsulas previstas para ello en las pilas, y por detrás se sujetan a la junta de hormigonado mediante ganchos que atraviesan las almas del cajón y van anclados al carrito. Mientras se hormigona pueden trasladarse la viga de avance y el travesaño trasero a su nueva posición en el vano siguiente.

La proximidad al puente sobre el Rin condicionó la situación de la central de hormigonado, originando un molesto transporte tanto para el hormigón como para los otros materiales.

4.3. En el año 1963 se comenzó la construcción del viaducto de Pleichach, en el tramo de autopista federal Würzburg-Fulda.

Se trata del primer empleo de un equipo de avance para un puente de autopista. El ancho total de la plataforma es de $2 \times 14,75$ m. A pesar de que la longitud del viaducto (350 m) es relativamente corta para el empleo idóneo del sistema, se consiguió una buena economía mediante la construcción de las dos mitades por separado, una tras otra. Resultaron así veinte vanos, con una luz máxima de 36,25 m. El equipo de avance partió de uno de los semiestribos, y al llegar al opuesto se desmontó y se volvió a montar en el semiestribo contiguo para iniciar la construcción de la segunda mitad avanzando en sentido contrario.

Como los equipos de avance de los viaductos de Krahnenberg y de Lenneberg estaban ocupados, fue necesario preparar uno nuevo. Aunque la luz máxima era en este caso de unos 36 m, se le calculó para resistir con luces de hasta 40 m, previendo futuros empleos. En el proyecto de este equipo de avance se tuvieron en cuenta los conocimientos adquiridos con los equipos anteriores.

La sección transversal del puente era muy parecida a la del de Krahnenberg, aunque con un ancho inferior en 3,5 m; esto permitió reducir las dos jácenas centrales a una sola, cuya longitud era aproximadamente doble de la de un vano (fig. 21). Las jácenas laterales, por el contrario, tienen sólo la longitud de un vano, y avanzan simultáneamente con ayuda de carritos que corren por la jácena central y por el vano terminado (compárese con el sistema del viaducto de Lenneberg).

Para el hormigonado las jácenas laterales se apoyan por delante en ménsulas previstas para ello en las pilas, y por detrás se cuelgan del tramo terminado, que vuela ligeramente; y estando así descargada la jácena central, puede avanzar el vano siguiente (compárese con el sistema del viaducto de Krahnenberg) y unirse a las laterales mediante la colocación de las planchas para el encofrado del fondo del cajón. De esta forma la jácena central tiene como función adicional la de colaborar en el avance, sistema que ha recibido el nombre de «método de la regla de cálculo».

Fig. 20. Viaducto de Lenneberg. Equipo de avance.

Fig. 21. Viaducto de Pleichach. Equipo de avance en la ejecución de la segunda mitad del viaducto.

Fig. 22. Viaducto sobre el valle de Münchholzhausen.

Las reducidas dimensiones del equipo de avance permitieron emplear pilas formadas por dos soportes rectangulares huecos independientes, bajo los cajones bicelulares gemelos. El ancho de estos soportes es de 4,5 a 5,5 m, con el fin de dejar espacio suficiente para los apoyos —que son dos sobre cada uno de ellos—, aparte del necesario para el paso de las jácenas. Este paso se hace gracias a rebajas existentes en la cabeza de los soportes, que posteriormente pueden recrecerse, o bien quedar vistos (fig. 24). Los soportes se hormigonaron con encofrados desmontables en trozos de 5 m, de manera que la última junta coincidiese con la cabeza del soporte.

4.4. En el viaducto que cruza el valle de Lang-Göns, del mismo tipo que el anterior (tabla I, núm. 11), se empleó el equipo de avance de Lenneberg, tras profundas modificaciones para adaptarlo al «método de la regla de cálculo» con una luz de 39,20 metros.

Se trató aquí por vez primera de utilizar un blondín en lugar de la habitual viga de brazo horizontal que se desplaza sobre el mismo puente. En este caso el viaducto tiene una longitud total de 480 m y la curvatura es poco importante, con lo cual pudo emplearse también el blondín para la ejecución de las pilas, incluyendo el montaje y desmontaje de sus encofrados. La central de hormigonado se instaló en el centro del puente. Pudo comprobarse que el empleo del blondín está especialmente indicado en los casos de viaductos rectos o de poca curvatura en terreno accidentado.

4.5. El viaducto sobre el valle de Münchholzhausen se construyó al mismo tiempo que el de Lang-Göns, y también está situado en el tramo de autopista federal Siegen-Giessen (fig. 22; y tabla I, núm. 12). Su sección transversal y las luces de sus vanos fueron proyectadas de forma que facilitasen el empleo del equipo de avance de Krahnenberg. Estos dos viaductos tienen configuraciones bastante distintas, a pesar de ser de longitudes aproximadamente iguales y no ser muy diferentes sus alturas sobre el terreno, por lo que dan lugar a una comparación interesante. En el de Lang-Göns las fuertes pilas de sección rectangular y con separación de 39,2 m dan una sensación de orden y reposo, mientras que en el de Münchholzhausen los esbeltos soportes colocados en grupos de cuatro a una distancia de 32 m causan una impresión de ligereza y transparencia, como puede observarse ya durante la construcción (fig. 23). Las circunstancias de cada caso pueden inclinarnos a cualquiera de las dos soluciones; en general son preferibles las pilas dobles, y cuanto más esbeltas, mejor.

Fig. 23. Viaducto sobre el valle de Münchholzhausen. Equipo de avance.

4.6. Parece imposible llegar a una normalización de las anchuras de los puentes, ni aun restringiéndose a los puentes de autopista, dado que las necesidades del tráfico son esencialmente variables. Si a esto unimos la variabilidad de las luces, que dependen de múltiples circunstan-

cias, resulta que casi siempre es necesario transformar los equipos de avance en cada nuevo empleo para adaptarse a las distintas situaciones.

En el viaducto sobre el valle de Unterrieden, en el tramo de autopista federal Nuremberg-Regensburg (tabla I, núm. 13), se empleó el equipo de avance del viaducto de Pleichach, alargándolo para adaptarlo a la nueva luz, de 40 m, lo cual resultó factible gracias a haber sido prevista esta posibilidad durante el proyecto.

En el viaducto sobre el valle de Klöf felsberg (tabla I, núm. 14) la plataforma tenía mayor anchura, por llevar una vía adicional de circulación lenta para camiones. Aunque el equipo de avance de Lang-Göns era adecuado a las luces, fue preciso reformarlo añadiéndole algunos elementos.

4.7. Es claramente imposible que un solo equipo de avance pueda adaptarse económicamente a las diferentes situaciones; por ello la empresa fundada para su preparación ha tratado de cubrir todas las posibilidades mediante un cierto número de equipos distintos. Se han normalizado además los elementos principales de estos equipos, para permitir así los intercambios dentro de lo posible.

Los viaductos sobre los valles de Kattenohl y Sührenhagen (tabla I, números 15 y 16), situados en el tramo de autopista federal de Sauerland, son demasiado cortos para el empleo económico de un equipo de avance. Sin embargo, el terreno montañoso y la posibilidad de construirlos uno tras otro indujeron a emplearlo. Se preparó para ello un equipo de avance de tipo ligero que trabajase con el «método de la regla de cálculo», pues eran necesarios varios montajes y desmontajes, cuyo coste es proporcional al peso del equipo (figs. 24 y 25). Este equipo puede usarse con luces de hasta 36 metros.

Se introdujo la innovación de dotar a cada pila de un equipo de elevación propio, con lo cual los encofrados para las pilas podían desmontarse y subirse con facilidad.

Para los viaductos sobre los valles de Sterbecke y Eichelbleck (tabla I, núms. 17 y 18), situados en la misma autopista, se preparó otro equipo de avance basado en el mismo principio y utilizable para luces de hasta 45 m. En este caso hubo que preparar también una grúa especial, sustituyendo a la que se emplea habitualmente moviéndose sobre el puente, a fin de conseguir un brazo bastante mayor sin disminución de la carga máxima.

4.8. El empleo de los equipos de avance se facilita cuando los vanos del viaducto son iguales entre sí. En el caso de vanos variables es difícil mantener la cadencia del avance y se ocasionan gastos adicionales. Estas dificultades no descartan por completo la posibilidad de empleo económico del sistema, como se demostró con la construcción del viaducto urbano de la Stadtkerntangente de Maguncia (tabla I, núm. 19).

Para respetar las condiciones impuestas por la situación dentro de la ciudad hubo que adoptar un trazado cuya planta era de curvatura variable y radio mínimo de 400 m; luces de hasta 55 m para salvar ciertos obstáculos; y pilas cuya forma pasaba en ciertos tramos del habitual soporte doble de sección octogonal a una Y especial. Apoyándose en la experiencia conseguida en el viaducto de Krahnenberg se preparó un equipo de avance especial adecuado a estas condiciones (fig. 26).

Figs. 24 y 25. Viaducto sobre el valle de Kattenohl durante la construcción.

Fig. 26. Viaducto urbano de la Stadtkerntangente en Maguncia. Sección transversal con el equipo de avance.

5

Avance por dovelas mediante equipos independientes del terreno

En el caso de un viaducto que cumpla las condiciones del apartado 4, pero cuyos vanos tengan luces de cierta importancia (entre 50 y 150 m), puede resultar conveniente en vez de avanzar por vanos enteros, hacerlo por dovelas de longitud bastante menor.

Puede emplearse con este fin un equipo de avance que se traslada sobre el viaducto. La construcción se realiza a partir de cada pila en las dos direcciones, avanzando por dovelas hasta llegar a los centros de vanos. El equipo está formado por cerchas cuya longitud es de vez y media de la del vano, de forma que permanecen apoyadas en la pila a partir de la cual se avanza, y en la anterior, y vuelan medio vano más (ver fig. 46 en [12]). El andamiaje y encofrados se trasladan colgando de estas cerchas para permitir la ejecución de las dovelas sucesivas, hacia atrás, llegando hasta el voladizo de la pila anterior (posteriormente debe hacerse un pretensado de cosido para asegurar la continuidad frente a la acción de la sobrecarga), y hacia adelante, volando hasta el centro del vano siguiente. Entonces puede avanzarse el equipo un vano completo hasta su nueva posición.

Este sistema permite tanto la prefabricación de las dovelas y su montaje en obra como el hormigonado in situ de las mismas. Las condiciones de cada caso indicarán cuál de estas variantes es la más adecuada, así como la longitud que conviene dar a las dovelas.

5.1. La primera vez que se empleó el avance por dovelas en lugar del avance habitual por vanos completos fue en la construcción del puente sobre el río Main en Bettingen [6]. Como el peso de cada dovola es soportado por el andamiaje únicamente mientras dura el hormigonado de la misma, pues luego pasa al voladizo tesando los cables necesarios para ello, resulta una gran libertad en la elección de la longitud de las dovelas y puede conseguirse que durante la construcción el tablero esté sometido a compresión simple.

En el puente de Bettingen las dovelas tenían 7 m de longitud y se hormigonaron in situ. Aunque la longitud de dovola pudiera haber sido hasta dos o tres veces mayor, esto hubiera exigido un andamiaje más pesado y, por tanto, más caro, que no se justificaba por la longitud del puente. El pretensado de cosido de cada nueva dovola se efectúa de la misma forma que en el caso de dovelas prefabricadas (fig. 27 y [7]).

En Bettingen los andamiajes se trasladaban sobre carriles que se apoyaban en el terreno. En los casos en que esto no sea conveniente por estar el terreno inundado o ser muy accidentado, la solución más idónea será independizarse del mismo mediante el empleo del equipo descrito al principio de este apartado.

5.2. Las condiciones citadas, necesarias para el empleo económico del sistema, no se produjeron en Alemania hasta el año 1965, con el viaducto sobre el valle de Sieg, cerca de Eiserfeld, uno de los más interesantes puentes de autopista realizados hasta la fecha (tabla I, núm. 20; y figs. 44 a 46 en [12]).

En el extranjero existían ya precedentes de este sistema y se habían demostrado sus ventajas en la construcción del puente sobre el Oosterschelde en Holanda [9] y en el de la isla de Oléron en Francia [10]. En el primero de estos puentes el equipo estaba preparado para el montaje de las dovelas prefabricadas, de 12 m de longitud, en dos vanos simultáneamente.

Mientras que los dos puentes citados, cuyas longitudes totales son de 5 y 3 km, están situados en mar abierto, el viaducto sobre el valle de Sieg tiene una longitud total de 1.050 m, una anchura de plataforma de 30,4 m, alturas de pilas de hasta 100 m y luces máximas de 105 m (ver [11] y la pág. 109 de [12]). El viaducto se divide en dos mitades separadas por una junta longitudinal, las cuales se construyeron por separado, una después de la otra, avanzando en direcciones opuestas. La longitud de las dovelas era de 10 metros.

Pudo comprobarse que la variación de las luces, de 63 a 105 m, y el canto constante de los cajones, de 5,80 m, no presentaban ninguna dificultad para el sistema. La publicación de los detalles se hará más adelante.

Los soportes gemelos de cada pila se elevan simultáneamente. Las pantallas de unión están remetidas con el fin de que resalten los dos soportes. En este caso, al ser importantes el perímetro y la altura de las pilas, resultó más conveniente el empleo de encofrados deslizantes.

6

Consideraciones finales

Se ha planteado frecuentemente la cuestión de si es preferible construir los viaductos de autopista con un equipo de avance para media sección, que recorre la obra dos veces, o bien emplear un equipo para terminar la sección entera en una sola pasada. La primera solución ofrece la ventaja de una mayor utilización del equipo, que disminuye los costes de transporte del equipo a la obra y de su montaje.

Los ahorros que podrían conseguirse con la ejecución en una sola pasada son discutibles, y por otra parte la inversión necesaria para la preparación del equipo es más alta, así como el coste de su transporte y montaje. Por todo lo expuesto parece que la construcción en una pasada sólo es recomendable cuando la gran longitud de la obra reduce los costes de amortización del equipo o cuando el plazo fijado para su terminación es muy corto. Y aun en muchos de estos casos, podría resultar preferible el empleo de dos equipos para media sección trabajando simultáneamente con un cierto desfase.

Bibliografía

- [1] Wittfoht, H.: Die Krahnenbergbrücke bei Andernach. B. u. St. 1964, H. 7 u. 8, S. 145... 152, 176... 181.
- [2] v. d. Haar, E.-A. und Wittfoht, H.: Eine neue Hochstrasse in Hannover-Bischofshol, erscheint später in B. u. St.
- [3] Zoobrücke Köln: Festschrift. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, München.
- [4] Gass, H.: Feldwieser Vorbau der Hochstrassen Lenneberg und Leverkusen. Bauingenieur 1965, H. 3, S. 111... 118.
- [5] Gass, H.: Die Brücke am Kettiger Hang. Bautechnik 1960, H. 12, S. 445... 452.

Fig. 27. Puente sobre el río Main en Bettingen. Esquema del pretensado de una dovela.

- [6] Wittfoht/Bilger/Schmerber: Neubau der Mainbrücke Bettingen im Zuge der Bundesautobahn Frankfurt-Würzburg. B. u. St. 1961, H. 4 u. 5, S. 85... 96 und 114... 122.
- [7] Wittfoht, H.: Die neue Autobahnbrücke über den Main bei Bettingen. Deutscher Beton-Verein. Vorträge 1961.
- [8] Klingenberg, W.: Einsparungen von Rüstträgern beim Bau von Massivbrücken. Deutscher Beton-Verein. Vorträge 1963, S. 182... 213.
- [9] Hoving, Krijn und van Loenen: Brug over de Oosterschelde, Cement 1964, S. 685... 693, 760... 764, vgl. auch Deutscher Beton-Verein. Vorträge 1965.
- [10] Chaudesaigues: Evolution de la technique de construction. Travaux, 1966. S. 5... 14.
- [11] Wittfoht, H.: Die Autobahnbrücke über das Siegtal in Siegen-Eiserfeld. Bauingenieur 1966. Erscheint demnächst.
- [12] Thul, H.: Brückenbau. Beiträge der Deutschen Gruppe der FIP zum V. Internationalen Spannbeton-Kongress. B. u. St. 1966, H. 5, S. 97... 115.

résumé • summary • zusammenfassung

Viaducs en béton précontraint construits par partées successives

Dr.-Ing. Hans Wittfoht, directeur de l'entreprise Polensky and Zöllner

Les difficultés rencontrées dans l'utilisation des cintres traditionnels pour la construction de certains ponts en béton précontraint ont forcé à trouver une solution permettant d'en surmonter les inconvénients et de conserver, ou d'améliorer, si possible, tous les avantages quant à la sécurité, la rapidité, l'économie, etc.

L'échafaudage de lancement paraît satisfaire toutes les conditions imposées et a été employé avec un succès croissant, particulièrement aux autoroutes allemandes, aux ponts de tous les types, ayant des portées très diverses et situées sur toute sorte de terrains, certains d'entre eux présentant les conditions les plus défavorables.

Prestressed concrete viaducts made by successive launchings

Dr. Eng. Hans Wittfoht, director of the firm Polensky and Zöllner

The difficulties involved in the use of traditional formwork in the case of certain types of prestressed bridges have led to the adoption of new methods, to overcome these difficulties, though retaining or improving the existing standards of safety, cost and speed.

The launching devices seem to meet these needs and are being used with increasing success, particularly in German motor road bridges of all types, of a variety of spans and resting on many kinds of soils: sometimes under the most adverse conditions.

Feldweise Vorbau von Spannbetonbrücken

Dr. Ing. Hans Wittfoht, Direktor von der Firma Polensky und Zöllner

Die Schwierigkeiten, die die Verwendung von traditionellen Lehrgerüsten beim Bau bestimmter Brücken aus Spannbeton mit sich führt, haben eine Lösung dieser Probleme beschleunigt unter Beibehaltung oder sogar Verbesserung aller gegebenen Vorteile in bezug auf Sicherheit, Schnelligkeit, Wirtschaftlichkeit, usw.

Bei Vorbaugerüsten scheinen alle notwendigen Forderungen zu erfüllen und werden mit wachsendem Erfolg verwendet, besonders bei den deutschen Autobahnbrücken jeglicher Art. d.h. mit den unterschiedlichsten Spannweiten, bei verschiedenartigster Bodenbeschaffenheit und unter schwierigsten Bedingungen.