puente sobre el Oosterschelde HOLANDA

H. T. HOVING, A. C. KRIJN y J. H. VAN LOENEN

sinopsis

Este nuevo puente, que forma parte del Plan de obras denominadas del Delta, es de hormigón y se ha construido por el procedimiento de voladizos sucesivos, utilizando, en su mayor parte, elementos prefabricados. Tiene una longitud total de 5.000 m; una anchura de 11,85 m; tramos principales de 95 m de luz, salvo uno, levadizo, que tiene 40 m. La altura libre sobre las aguas del mar es de 15 m, que es insuficiente para las naves de gran tonelaje; esto exigió que uno de sus tramos, en aguas profundas, fuera basculante, de dos hojas, lo que permite la navegación de grandes embarcaciones. Presentan particular importancia los apoyos intermedios, constituidos por pilotes de hasta unos 38 m, cilíndricos, huecos, de 4,25 m de diámetro exterior, hincados en fases sucesivas, que atravesaron las arenas del fondo del Oosterschelde. Para la hincada se utilizó un dispositivo excavador—instalado en el interior del pilote— y un sistema de dragado de succión para limpiar el fondo y permitir el descenso por gravedad; pero cuando el rozamiento en la superficie exterior no lo permitía, se procedía a lastrarlos con cargas de hasta 500 toneladas. Una serie de tres de estos pilotes—dispuestos en palizada, sobre los que se solidarizó un cabezal de arriostamiento, y sobre él, los llamados elementos de pila—constituye cada apoyo o soporte intermedio. La construcción se hizo por trozos sucesivos, colocados en voladizo y dos en cada tramo, cerrándose con un dispositivo especial en la clave. La prefabricación ha sido tan extensa, que bien merece el nombre de puente prefabricado.

562-103

71

situación

El proyecto del puente se hallaba tan avanzado, que el 29 de mayo de 1962 pudo contratarse el trabajo con el consorcio de empresas anteriormente citadas y a base de una inversión de unos 64 millones de florines.

Para el estudio económico se partió de la base de que la circulación sobre el puente, y según años sucesivos, sería como sigue:

Año	Vehículos/día	Vehículos/año
1965	2.200	800.000
1968	4.000	1.400.000
1972	5.000	1.800.000
1978	7.000	2.500.000

El número de bicicletas y motociclos se presume experimente un aumento que pase de 510.000 a 780.000 por año y sobre el período anteriormente referido.

Introducción

Como consecuencia de la realización del Plan del Delta, la parte meridional holandesa se va recuperando para salir del estado de aislamiento en que se encontraba. Las presas proyectadas, actualmente en construcción, establecerán vías directas entre las islas de las provincias meridionales holandesas. Así, pues, y a partir del año 1978, la ciudad de Middelburg disfrutará de una unión terrestre con Rotterdam utilizando, para ello, las presas de Veerse Gat, Oosterschelde, Brouwershavense Gat y Haringvliet.

Faltaba únicamente una unión permanente entre las márgenes del Oosterschelde, para cuya solución se estudiaron varias posibilidades.

Por iniciativa de J. G. Snip, ingeniero jefe de la División Provincial de Obras Hidráulicas y Carreteras del Departamento de Zeeland, se propuso la posibilidad de construir un puente como solución más viable. Suponiendo que el puente se construyese a base de derechos de peaje, la empresa Van Hattum, la N. V. Amsterdam Ballastmaatschappij, conjuntamente con la colaboración financiera de un sindicato bancario y bajo la dirección de los señores Pierson, Heldring y Pierson, daría lugar a una promoción de medios capaz para la realización de la obra; la recaudación obtenida por derechos de peaje constituiría la base económica fundamental. El 12 de abril de 1962 las autoridades provinciales de Zeeland decidieron proceder a la construcción del referido puente, decisión que fue aprobada por Real Orden del 27 de abril del mismo año.

Desgraciadamente, el señor Snip no sobrevivió al momento de iniciación de las obras, ya que murió, repentinamente, a principios del año 1963.

ubicación

Aspecto general del puente.

Ubicación de la obra

Un gran número de factores ha sido objeto de consideración antes de decidir el lugar más apropiado para la situación del puente; entre ellos, y con carácter más sobresaliente, citaremos aquellos más importantes, como son: la interconexión entre caminos de la red vial existente; la longitud total del puente; evitar, en la manera posible, las partes profundas del Oosterschelde y, finalmente, la necesidad de buscar aguas poco profundas que permitiesen la construcción fácil de los cimientos. Todas estas consideraciones dieron por resultado adaptar la alineación y ubicación del puente como puede apreciarse en una de las figuras adjuntas.

Dimensiones principales del puente

La longitud total del puente es de 5.020 m; tiene una anchura total de 11,85 m, de los que 7,60 corresponden a la calzada y 2,75 a una pista para bicicletas y velomotores, pero de tal forma, que la pista y calzada pueden ser utilizadas indistintamente si fuera necesario por cualquier clase de vehículo. Si comparamos esta anchura con la de otros puentes en carreteras nacionales, resulta ser relativamente

soporte

tienen una pendiente aproximada de 1/45. En la margen septentrional las curvas de los accesos tienen un radio de 350 m, mientras que en la margen meridional los dos primeros kilómetros de accesos y continuación del camino siguen la misma alineación que el eje del puente.

Solución

La primera consideración para llegar a una solución general de la obra ha sido el espaciamiento que debía darse a los soportes.

Aparte de consideraciones económicas, fue necesario tener en cuenta el empuje y presencia de bloques de hielo; por todo lo cual se adoptó, por creer la más favorable, una luz de 95 m. Estudios posteriores demostraron que no eran ventajosas las luces superiores a la indicada.

Debido a la gran profundidad del agua, que llega hasta 35 m en alguna parte, el método utilizado en la construcción de pilas es el generalmente empleado en los puentes de la Administración, pues el de ataguías cerradas con tablestacas metálicas no podía practicarse en este caso particular.

Las primeras investigaciones fueron realizadas por el Laboratorio de Mecánica del Suelo, de Delft, y los servicios geológicos nacionales, las cuales ponían de relieve que el fondo del Oosterschelde está constituido por un depósito reciente de arena del mar perteneciente al tramo holoceno y con una profundidad variable de 20 a 45 m bajo las aguas medias. Debajo de estas arenas se hallan otras del tramo prehistórico.

En los depósitos prehistóricos el penetrómetro daba una resistencia de 250 kg/cm² o más. Los valores obtenidos en las capas superiores de arenas marítimas recientes fue considerablemente inferior. Los sondeos realizados desde 1827 dan prueba de haber existido movimientos importantes en estas capas recientes de arena.

estrecha, pero no fue posible adoptar otra más amplia debido a los recursos financieros de que se disponía.

Esto no obstante podemos anticipar que la capacidad de tráfico será superior a la necesaria. El túnel de Amberes, bajo el Scheldt, tiene una calzada de sólo 6,75 m de anchura y, sin embargo, ha sido utilizada por más de 7 millones de vehículos durante el año 1959.

Perfil longitudinal de la obra

La altura de la superestructura sobre el agua permite contar con 15 m libres, por lo que el puente no presenta prácticamente obstáculo alguno para la navegación actual del Oosterschelde. Sin embargo, se ha previsto un tramo basculante de 40 m de luz para las naves de altura, situado a unos 400 m a partir de la margen de Schouwen-Duiveland.

Este tramo basculante permitirá el paso de la flotilla de plataformas o pontones que se utilizaron para la construcción del dique Oosterschelde. Los 40 m de luz del tramo para permitir la navegación se justifican por el hecho de que la dirección de la corriente no es perpendicular al eje del puente.

El tablero se halla a la cota + 17 m, en relación al plano de comparación que determina el nivel medio de las aguas en Amsterdam. Los diques de cada una de las márgenes del canal se salvan a un nivel suficientemente alto para permitir un recrecimiento subsiguiente si fuera necesario. Los accesos al puente

Rápidamente se puso en evidencia que las cimentaciones para el puente se localizarían sobre el tramo de materiales prehistóricos. El perfil geológico muestra claramente la presencia de la erosión en varias partes del prehistoceno. Basándose en la cimentación sobre pilotes ya empleada por la empresa constructora Van Hattum en Blankevoort N. V., el tipo de pila elegido para el puente es el constituido por tres pilotes huecos, de hormigón, de 4,25 m de diámetro exterior, hincados hasta el firme con ayuda de material auxiliar especial montado sobre plataformas flotantes. Estos pilotes tienen tal longitud que, además de las cargas verticales, pueden transmitir momentos al suelo.

Dado el método utilizado para la construcción de cimientos y puesto que es racional el empleo de la menor cantidad de material posible en la mitad de la luz, donde su presencia en exceso aumentaría el peso muerto y los momentos flectores, el sistema estructural adoptado es el de una sucesión de elementos independientes, en forma de T, constituyendo tramos apoyados directamente sobre soportes.

Este tipo de estructura ha permitido una economía de un 50 por 100 del volumen total de hormigón necesario para la superestructura si lo comparamos con el proyecto preliminar basado en un sistema cantilever cerrado con un tramo recto de 55 m de longitud y suspendido entre los brazos en voladizo.

En la disposición y redacción del proyecto prevaleció la idea de introducir la prefabricación en la mayor extensión posible. El período de construcción debía ser reducido, ya que en 1978 el dique de cierre del estuario proporcionará una carretera que se apoyará en el mismo. Además, como el puente tenía que construirse en lo que virtualmente puede decirse mar abierto, la prefabricación presenta apreciables ventajas sobre otro tipo de construcciones y reduce el número de operaciones y trabajos a realizar en la propia obra. Dada la gran longitud del puente y las grandes dimensiones de los pilotes cabía pensar, desde un primer momento, que las piezas prefabricadas deberían ser de grandes dimensiones.

El sistema principal adoptado no es el más indicado para el empleo de vigas, por cuya razón se adoptó una sección hueca, tipo cajón, con una losa superior que sirva de tablero para cada una de las estructuras en forma de T de que se compone el puente. Esta forma constructiva tuvo su inspiración en los puentes alemanes contruidos utilizando los sistemas de construcción en voladizo. El canto de esta estructura, tipo cajón, varía de 1,90 m en la clave a 5,47 m en los arranques.

junta en clave

el proyecto

Cargas

El proyecto se redactó basándose en las cargas denominadas Clase 60, de acuerdo con las normas revisadas V.O.S.B. de 1963.

Las cargas utilizadas para el cálculo de momentos flectores y esfuerzos cortantes se aumentaron de 1 al 3 por 100. El cálculo de la losa del tablero tuvo que modificarse considerablemente, puesto que el nuevo tren de carga admitido se componía de ocho ruedas de 5 t, mientras que el anterior sólo tenía cuatro de dichas sobrecargas.

El espesor de la losa del tablero no sufrió modificación alguna; sin embargo, las armaduras longitudinales y transversales experimentaron cierto aumento. También se tomaron en consideración, además de las sobrecargas, los efectos del viento y la posibilidad de asientos diferenciales en los soportes. Se admitieron asientos de hasta 6 cm de diferencia relativa entre dos apoyos adyacentes, de acuerdo con las directrices aconsejadas por el Laboratorio de Mecánica del Suelo.

Respecto a la infraestructura, las cargas provocadas por el empuje del hielo juegan gran importancia. Actualmente no se dispone de información precisa concerniente a este tipo de presiones. Los valores que para estas cargas se disponen, de acuerdo con las dimensiones de las pilas para este caso concreto y según distintos países son los siguientes:

	t
Rusia	900
Canadá	600
Alemania	430
América (U.S.A.)	800

En colaboración con los departamentos gubernamentales de hidráulica y carreteras, el valor eventual adoptado para este puente sería de 500 t por soporte durante el período en que el Oosterschelde permaneciera en comunicación directa con el mar y 1.000 t después de haber cerrado la presa de la bocana del estuario. En estos valores se incluye el efecto correspondiente al viento que se ha valorado en unas 100 t.

Este aumento del empuje provocado por el hielo se fundamenta en el hecho de que el Oosterschelde, una vez cerrado, se transformará en una especie de lago de agua dulce y, por tanto, expuesto a una formación de hielo más intensa, dando lugar a un aumento de presión debido al movimiento del hielo, en este caso animado de menor velocidad. Por consiguiente, cuando el Oosterschelde haya sido cerrado y liberado de corrientes el movimiento de la masa de hielo será provocado únicamente por el viento. La posibilidad de mayores presiones induce a suponer un aumento notable.

A primera vista carece de contenido la adopción de un valor inferior de la presión durante el período anterior al cierre del estuario en el que perdurarán las corrientes que normalmente en el Oosterschelde se desarrollan; sin embargo, no debe olvidarse que un empuje horizontal de 1.000 t afecta a los soportes apoyados sobre pilotes en la zona de los tramos de mayor luz, es decir, en aquellas partes de mayor profundidad.

Téngase también en cuenta que, dentro de las condiciones del régimen actual en este brazo de mar, no es posible reducir estas grandes profundidades, de unos 30 m; pero sí podrán reducirse después de haber terminado el dique de cierre, en cuyo momento la referida profundidad podrá reducirse a unos 15 m. Dadas estas circunstancias parece razonable adoptar los valores mínimos para la presión provocada por el hielo en la primera fase de trabajo.

Posteriormente, y después del año 1978, la referida profundidad podrá reducirse rellenando el fondo con arenas, lo que dará lugar a contar con soportes sustancialmente más resistentes. El nuevo nivel proyectado para el fondo después del referido relleno se indica en una de las figuras adjuntas.

Los esfuerzos provocados por la retracción, deformación lenta y variaciones de temperatura se han tenido en cuenta para la redacción del proyecto, como posteriormente se indicará.

Disposición general de la estructura

Como anteriormente se dijo, el puente se compone de una sucesión de tramos con elementos en forma de T solidarizados en obra y suficientemente resistentes para absorber las cargas por peso propio y sobrecargas. Sin embargo, las diferencias de flechas motivadas por flexión en los distintos tramos y debido a las sobrecargas pueden llegar a ser inadmisibles. Esto sucede cuando la mitad de la luz ha sido cargada de acuerdo con las normas V.O.S.B. y uniformemente distribuidas, colaborando conjuntamente con dos juegos de ruedas cargadas con 60 t.

Bajo estas condiciones, las extremidades de los brazos en voladizo de cada tramo experimentarán una desviación de unos 25 cm en aquellas partes del puente en las que la profundidad media del agua es de 15 m y unos 40 cm, en aguas profundas, es decir, de 33 m de profundidad, mientras que los semitramos adyacentes permanecerán inmóviles.

Resulta, por tanto, necesaria la unión entre las extremidades de los brazos de cada tramo. Estas uniones deben ser tales que prevean deformaciones en dichas extremidades, por lo que han de dotarse de medios suficientes para la transmisión de esfuerzos cortantes. Sin embargo, los dispositivos de unión deben permitir una variación en la luz de las juntas que forma dicha unión.

La luz antes mencionada podrá absorber las deformaciones debidas a cambios de temperatura, así como la deformación lenta a que se halla sometido el hormigón. Además, estos dispositivos de unión permitirán a las dos extremidades experimentar una rotación angular de una extremidad con relación a la otra y, por tanto, no se transmitirán momentos de flexión. En una de las figuras adjuntas se indica la disposición general de estos dispositivos.

Los movimientos diferenciales relativos entre extremidades de brazos se halla, pues, reducido a cero, por lo que la deformación en la clave queda disminuida en 14 cm donde la profundidad del agua es de 15 m y en 21 cm en las zonas en que dicha profundidad es de 30 m. Esta deformación excede al valor límite de la relación 1:600 entre flecha y luz del tramo.

Con objeto de permanecer siempre dentro de este límite se previó una unión resistente al empuje en tramos alternados. Estos dispositivos de unión han sido posibles debido a que los fustes de los soportes pueden absorber los momentos flectores a que dan lugar las variaciones de temperatura de los tramos de 95 m de luz.

Aun cuando se podría asegurar que la flecha en la clave permanecería por debajo de $1/600$ de la luz del tramo de 95 m, existían razones fundadas para esperar que un vehículo pesado, moviéndose sobre el puente, daría lugar a desplazamientos perceptibles sobre cierto número de tramos.

Este fenómeno, entre otros, se ha presentado en el puente francés de Sabine, cuyos soportes y superestructura tienen casi las mismas relaciones de rigidez que las del puente que nos ocupa. Según las normas holandesas, una obra que se comportase de esta forma se consideraría de rigidez insuficiente.

La solución adoptada para prevenir esta circunstancia consiste en proveer la obra con un sistema de mecanismos, para absorber choques, que no permiten desplazamientos de corta duración bajo los efectos de carga; sin embargo, no ofrecen resistencia apenas a los cambios de longitud de la estructura de hormigón como resultado de cargas aplicadas gradualmente.

Los dispositivos de unión en las juntas, bajo los efectos de sobrecargas, se comportan virtualmente como un elemento resistente al empuje; es más, proporcionan un campo adecuado para posibles cambios de longitud debidos a variaciones de temperatura.

A requerimiento de los autores del proyecto de la obra se encargó la empresa KONI, OUD Beierland de la fabricación de mecanismos de absorción de choques, capaces de satisfacer a las exigencias anteriormente mencionadas. Dos o tres elementos de absorción de choque han sido instalados en cada una de las juntas para las que se proyectaron.

Cimentación

Como anteriormente se dijo, cada una de las pilas se apoya sobre tres soportes cilíndricos de hormigón. Su diámetro exterior es de 4,25 m, y la parte superior de los tres soportes que constituyen el apoyo se unen y arriostran con un cabezal de hormigón. Además de las cargas verticales estos soportes transmiten momentos flectores al suelo. Cada uno de estos cilindros huecos, de hormigón, han sido pretensados con una tensión residual de 20 kg/cm^2 . La carga máxima vertical es del orden de 3.000 t y el momento máximo flector de aproximadamente 3.000 t por soporte. Una gran parte de estos momentos se debe a las cargas provocadas por los bloques de hielo.

Después de la colocación de estos soportes y debidamente apoyados en terreno firme, la parte hueca inferior se rellenó hasta unos 5 m de altura, a partir del fondo, con un relleno de grava inyectado con una lechada de hormigón, es decir, siguiendo los procedimientos PREPAKT. Se tomaron precauciones especiales con objeto de asegurarse de la contribución completa de la sección transversal de cada uno de los soportes para la capacidad de carga prevista.

La parte superior de la zona rellenada de cada uno de los soportes se dejó hueca hasta el nivel del cabezal de arriostramiento; no obstante, se previó un posible relleno posterior que podría realizarse con arena en fecha posterior.

La necesidad de recurrir al relleno completo de estos soportes huecos sería una consecuencia del cambio experimentado en las actuales corrientes a que se halla sometido el Oosterschelde, dando lugar a la creación de una vibración de dichos soportes.

Superestructura

Las cargas de la superestructura se transmiten a cimientos a través de unos elementos en forma de V invertida. Esta forma se debe a un intento de reducir, dentro de lo posible, los esfuerzos cortantes a que se hallan sometidos los cabezales que arriostran los soportes.

La actual superestructura del puente es hueca, tipo cajón, por ser la más adaptable para resistir momentos flectores considerables, de dirección longitudinal, con una cantidad relativamente reducida de materiales de construcción.

En la zona en voladizo estos momentos son de, aproximadamente, $26.000 \text{ t} \cdot \text{m}$, de cuyo valor unas $19.000 \text{ t} \cdot \text{m}$ se deben al peso propio. El canto de las vigas cajón se adapta al esquema de momentos flectores. El pretensado longitudinal se ha realizado con cables, tipo Freyssinet, colocados principalmente en la losa del tablero. El número de cables decrece desde 148 sobre los apoyos hasta 6 en la proximidad de la junta de la clave.

En la región de esta junta y en una distancia de unos 12 m hay algunos cables que se extienden en la parte inferior de la losa, puesto que en esta zona los momentos flectores actúan en dirección opuesta debido a las cargas procedentes de los tramos adyacentes. Los tabiques de la estructura, tipo cajón, tienen un espesor apropiado para los esfuerzos cortantes que han de resistir.

elementos prefabricados

central de prefabricación

1. Silos de cemento.—2. Central hormigonera.—3. Garaje.—4. Cantina.—5. Elementos de pila.—6. Cajones. 7. Almacenes y talleres.—8. Vigas.—9. Pilotes.—10. Vías para las grúas.—11. Carretera.—12. Transbordador.—13. Oficinas.—14. Arenas.—15. Pilas.

Con objeto de disminuir el peso propio, el espesor de estos tabiques es muy reducido; esto, no obstante, es suficiente para resistir a las tensiones provocadas por el pretensado de cables verticales que los cruza. El interior de esta estructura, tipo cajón, es asequible a través de aberturas formadas en la losa de intradós. Estos huecos se cierran con losetas de hormigón.

En la junta de la clave el acceso de un brazo a otro en su interior se puede realizar a través de huecos que se han dejado en los diafragmas extremos y, por tanto, en el futuro será posible la colocación de tubos y canalizaciones a través de todo el puente y sin dificultad alguna.

Terminado el proyecto en el que se tomó por base consideraciones de tipo funcional, pudo llegarse a la conclusión de que la obra mejoró desde el punto de vista estético y, comparativamente, respecto al proyecto original.

Prefabricación

El lugar de ubicación del puente se halla expuesto a los efectos rigurosos del tiempo y del mar. De haberse adoptado un sistema tradicional de construcción y hormigonado in situ hubiera sido necesario hacer frente a un gran número de vías, perdido mucho tiempo anualmente como consecuencia de los efectos mencionados y, además, el transporte de personal y materiales hubiese constituido una fuente continua de inconvenientes.

Estas consideraciones, el período de construcción extremadamente reducido y el carácter repetido de los elementos estructurales, llevaron a los autores del proyecto a una solución en la que la prefabricación constituyese la directiva general. Con ayuda de la prefabricación podría realizarse una considerable proporción del trabajo dentro de condiciones más favorables, lo que constituye una ventaja para la velocidad de construcción, productividad y calidad del trabajo.

El principio de prefabricación ha sido aplicado en la medida de lo posible, logrando la preparación de elementos de grandes dimensiones que debían colocarse en obra con un mínimo de esfuerzos y trabajo. En una de las figuras adjuntas se muestran las distintas unidades empleadas que han sido objeto de prefabricación.

El empleo de elementos de grandes dimensiones ha disminuido notablemente las operaciones y maniobras para su colocación y transporte.

Debido a un considerable número de repeticiones, de aproximadamente 1.000 elementos para soportes, 54 para cajones y unas 100 unidades para la superestructura, fue necesario prestar mayor interés a la disposición general de los talleres de prefabricación y a la maquinaria auxiliar. Al proyectar la estructura de hormigón se concedió particular interés a los detalles que pudieran ser causa de dilaciones y complicaciones en el momento de su realización en obra.

fases constructivas

sección tablero

puente levadizo

disposición de pilotaje

Disposición general del taller de prefabricación

El taller de prefabricación se extiende en una extensión de aproximadamente 7 hectáreas, situadas en una zona denominada Kats en la isla Noord-Beveland.

Se empezó por elevar el nivel del terreno a una cota de 4,25 m con respecto al nivel medio de las aguas, lo que permitió conservar la plataforma en seco durante la mayor parte del año. La elevación de estos terrenos exigió una serie de derivaciones en las inmediaciones de la zona reservada a los talleres de prefabricación. Las directivas generales de la disposición del taller han sido gobernadas por la necesidad de realizar el transporte de elementos pesados desde los lugares de fabricación hasta los de almacenamiento y, desde este último, hasta el puerto para su embarque y transporte al lugar final de ubicación.

Para conseguir este objetivo, el taller puede ser recorrido en su dirección principal por dos grúas pórtico, cada una de ellas con una capacidad de 300 t y pórtico de 60 m de luz. Las vías de estas grúas, una a cada lado del taller, se prolongan hasta los muelles de embarque del puerto. Las zonas de producción y almacenaje se hallan localizadas entre estas dos vías. La zona de producción dispone de ocho grúas pórtico, secundarias, cuyas capacidades varían de 8 a 75 t. Todas estas grúas pueden pasar libremente por debajo de las dos principales anteriormente mencionadas.

Al terminar uno de los elementos se eleva y separa de su encofrado por medio de una de las grúas, de 300 t, que lo lleva y deposita en la zona de almacenamiento, donde se le somete a las operaciones finales complementarias tales como las de pretensado, inyección, etc., etc. Cuando se necesita una de estas unidades se obtiene del apilamiento por medio de una grúa, de 300 t, que la transporta al muelle, donde se carga directamente sobre la plataforma flotante que la transporta al lugar donde se está construyendo el puente. Los servicios auxiliares se agrupan alrededor de las vías de las grúas que constituyen la espina dorsal del taller de prefabricación.

El puerto está dotado de un muelle de descarga—construido con un tablestacado metálico y provisto de grúas móviles—, donde es descargada la arena y grava que transportan las gabarras de suministro para la reserva de áridos de la central hormigonera del taller de prefabricación, la cual es automática y dispone de dos mezcladoras de 1.000 l de capacidad cada una. El cemento se almacena en dos silos montados sobre pilotes y con una capacidad de 500 t. A lo largo de una de las vías de las grúas pórtico se extiende, en los muelles, una zona reservada para descarga del acero que constituye las armaduras de los elementos prefabricados.

Además, a lo largo del taller de prefabricación se han instalado depósitos de aguas, garajes, aserreas, almacenes, central generadora de vapor y todo un equipo de compresores, así como un barracón de unos 145 m de longitud, para la preparación de armaduras, y talleres mecánicos.

Colocación de pilotes y cajones

El fondo del Oosterschelde se compone principalmente de arena fina. Los pilotes, cilíndricos tubulares, se hincan en dicho fondo excavando en el interior de los mismos a medida que van descendiendo. El equipo auxiliar para realizar estas operaciones se compone de una grúa flotante, que tiene una capacidad de 600 t para la manipulación de estos pilotes y, además, está equipada con una instalación para el dragado por succión.

Elemento de pila en el taller de prefabricación.

La secuencia que constituyen estas operaciones se puede resumir diciendo: que el pilote que ha sido transportado en su posición horizontal sobre el pontón o barcaza se eleva con ayuda de una grúa que lo engancha en un aparejo, previamente colocado en una de sus extremidades, que lo lleva a una posición vertical en la que es elevado.

Cuando el pilote se ha colocado en posición correcta se le descende hasta apoyar en el fondo, colocando después la instalación de los elementos de excavación y succión en el interior del pilote. Se procede después a la succión de la arena contenida en el interior del pilote que previamente ha excavado el dispositivo de hinca y vaciado. Como consecuencia de todo esto, el pilote va descendiendo en el interior de la arena debido a su propio peso. Cuando el rozamiento provocado por la superficie exterior del pilote en contacto con el suelo no permite el descenso del pilote por gravedad se procede a cargarlo, aplicando lastre en su parte superior, ayudándose para ello de una grúa que va colocando cargas que pueden llegar a 500 t. Durante los últimos metros de la hinca del pilote, el nivel del agua en su interior se conserva unos cuantos metros por encima de la correspondiente al exterior; esta precaución evita se pueda crear un régimen hidráulico rotacional en el subsuelo y, con ello, la formación de remolinos molestos y nocivos.

Las instalaciones de hinca y elevación de pilotes, así como de vaciado de fondo, se han montado sobre un pontón de 56×23 m en planta y de 4,50 m de altura.

Losa de intradós
del elemento de
superestructura.

El dispositivo para la excavación está constituido por un mecanismo que trabaja completamente sumergido en el agua. Los detritus de la excavación se extraen por medio de la instalación de succión.

Con objeto de guiar los pilotes durante el proceso de hincado se han instalado unos rodillos a la altura de la cubierta y enfrente de la grúa flotante. Cuando el pilote ha llegado a la profundidad requerida se le somete a un lastre o sobrecarga de unas 500 t, aplicadas en su extremidad y con ayuda de una grúa. Con objeto de conocer las condiciones del suelo de apoyo en este momento se procede a un control eléctrico y, si necesario fuera, se mejora por medio de vibraciones neumáticas hasta conseguir el resultado satisfactorio.

Transporte de
elementos C.

Finalmente, se procedió a rellenar el interior de los pilotes con hormigón, tipo Prepakt, y en una altura de 4 m a partir del fondo del pilote. El resto de la parte hueca interior del pilote se le deja lleno de agua hasta la base del cajón que constituye el cabezal o parte superior de dichos pilotes.

Colocación de cajones o cabezales sobre los pilotes

Una vez hincados los tres pilotes formando palizada, que constituye cada uno de los soportes, se coloca sobre ellos el cajón o cabezal. Los huecos previstos en la parte inferior de estos cabezales tienen un diámetro con una tolerancia de 35 cm que permiten, si no recobrar, sí facilitar la posición final de los pilotes. Antes de la colocación de los cabezales sobre los pilotes se ha colocado una especie de encofrado, formando pontón flotante, alrededor de cada una de las extremidades de los pilotes. Estos encofrados tienen por objeto hormigonar la primera capa de hormigón de sellado en la parte inferior de los cabezales. Cuando este hormigón ha endurecido, el encofrado se desplaza, por flotación, en dos mitades semicirculares.

El cabezal se soporta, temporalmente, sobre las extremidades de los pilotes por medio de gatos, los cuales permiten un ajuste exacto del cabezal en su correcto nivel, y, cuando tal se ha conseguido, la parte superior de los pilotes y los huecos de los cabezales se rellenan con hormigón. Se empieza por rellenar el espacio libre entre cabezal y pilotes y, después, cuando este hormigón ha endurecido se tesan los cables, tipo Freyssinet, previstos, a este objeto, inyectando después sus vainas. Finalmente se rellenan los huecos de los cabezales con hormigón y se concluyen las últimas operaciones que dan por terminada la operación de colocación del cabezal en su posición definitiva.

Colocación de elementos de pila y superestructura

Para la colocación de estos elementos se han utilizado pontones preparados especialmente al objeto. El conjunto de los elementos de pila y de superestructura presentan, una vez unidos, una forma similar a la de un martillo. Los elementos de pila propiamente dicha tienen un peso de 400 t, mientras que el elemento que constituye parte de la superestructura es de 600 t.

Dichas unidades están soportadas durante su transporte sobre pontón por dos torres. Dos de estos pontones se unen entre sí mediante una estructura colocada en la parte de popa de los pontones. En la parte superior de las torres se han colocado cuatro gatos de 150 t de capacidad cada uno y un recorrido de un metro.

Los elementos de pila se soportan con dos vigas y se apoyan en la estructura auxiliar sobre la que se montaron las dos mitades que constituyen el elemento de pila en el taller de prefabricación. Con la marea alta, los dos pontones se colocan en posición, uno a cada lado del cajón. Sobre el cajón se han montado previamente cuatro gatos que soportan la estructura que, a su vez, soporta los elementos de pila, permitiendo así un ajuste perfecto posicional con ayuda de dichos gatos.

Los cables de pretensado del cajón y de las unidades de pila se empalman y sus respectivas vainas se unen. Seguidamente se colocan algunas armaduras de refuerzo en las juntas de construcción que finalmente se hormigonan.

Después del hormigonado de estas juntas, de unos 40 cm de luz, se procede al relleno de los elementos huecos de pila con hormigón y hasta unos 5 m sobre la cota de aguas medias con objeto de mejorar su resistencia contra la presión que pudieran ejercer los bloques errantes de hielo. Después de endurecer el hormigón de la junta creada entre el cajón y las unidades de pila, se desencofra, se tesan los cables de pretensado y se colocan, temporalmente, apoyos de goma sobre los elementos de pila.

Para la colocación de los elementos de superestructura se utilizan los mismos pontones especiales, pero estos elementos se apoyan sobre una serie de gatos. Con marea alta los dos pontones que constituyen una unidad se llevan a la posición requerida y, como anteriormente se dijo, a uno y al otro lado del cajón, procediéndose después a su colocación. Los gatos que soportan los elementos de la superestructura descienden parcialmente aprovechando el momento de las mareas bajas hasta llegar a apoyarse sobre los elementos de pila.

En caso de que estos elementos no se hallasen en su posición exacta, puede corregirse con ayuda de los gatos antes mencionados. Una vez que estos elementos se hallan en una posición correcta se les fija y solidariza por medio de cuatro series de barras, tipo Dywidag, que se tesan con ayuda de las tuercas al objeto previstas y sin llegar a la tensión final definitiva.

Una vez terminado un tramo de puente las unidades de superestructura anteriormente mencionadas, que se apoyaban indirectamente sobre los elementos de pila, se vuelven a elevar por encima de sus apoyos de goma por medio de ocho gatos de 300 t de capacidad cada uno. Con todo ello se puede reajustar el tramo completo a un nivel correcto. Los 5 cm de luz de la junta temporal creada entre estos elementos de superestructura y los de pila se rellenan con un hormigón de granulometría óptima. Finalmente, las 40 barras, tipo Dywidag, para el pretensado, se tesan hasta conseguir la tensión final definitiva.

Colocación en obra de otros elementos de la superestructura

Para la colocación y lanzamiento de los elementos prefabricados que constituyen la superestructura o entramado del tablero del puente se construyó una viga auxiliar; esencialmente, constituyen tres tipos distintos que denominaremos con las letras B, C y D, y cuyos pesos son: 275, 225 y 190 t, respectivamente. En la posición inicial, la viga auxiliar de lanzamiento se apoya sobre los dos elementos de superestructura anterior, previamente colocados. La parte posterior de dicha viga auxiliar descansa sobre la zona de superestructura ya terminada, mientras que su morro avanzado lo hace sobre la pila inmediata. Los pontones de transporte llevan dos elementos tipo B y se colocan simétricamente a cada lado de la pila.

El aparejo de elevación y lanzamiento instalado sobre la viga auxiliar dispone de cuatro ganchos de 150 t de capacidad cada uno, móviles, que permiten moverse a lo largo de dicha viga. Los dos elementos tipo B se levantan después con ayuda de dos de los ganchos y se les lleva a una posición próxima al nivel inferior de la viga de lanzamiento para después llevarlos a su posición correcta, mientras que los otros dos ganchos se trasladan a la pila inmediata para elevar y colocar en posición otros dos elementos también del tipo B.

Llevados los elementos a su posición definitiva se procede a la colocación del entramado provisional que los retiene en posición. Se unen los conductos previstos para los cables de pretensado, se enfilan y colocan los cables en su interior, para finalmente colocar las armaduras de refuerzo en las juntas que así se van creando.

Las juntas, de unos 40 cm de luz, se rellenan con hormigón transportado por medio de cubos que se mueven sobre un monocarril que se traslada a lo largo de la viga auxiliar de lanzamiento. Se ha previsto un posible curado con ayuda de vapor para el hormigón de las juntas durante períodos fríos.

Tan pronto como el hormigón de dichas juntas ha adquirido el endurecimiento suficiente para asegurar la resistencia necesaria se procede al tesado de los cables longitudinales. Después de haber tesado la mitad de ellos, son capaces de soportar el peso propio de los elementos, lo que permite desmontar los dispositivos provisionales previamente preparados para la sustentación temporal.

Después de haber sido tesados el resto de los cables, el apoyo de la viga de lanzamiento pasa de la posición original a la extremidad de cada uno de los elementos tipo B. Después se procede a la colocación de los elementos tipo C y, seguidamente, a los de tipo D, siguiendo un procedimiento muy similar al que se ha descrito para la colocación de los elementos tipo B.

Cuando estos elementos adquieren la capacidad de autosoportarse, la viga auxiliar de lanzamiento se traslada a su nueva posición, es decir, a un nuevo tramo, operación que se realiza de la forma siguiente: el carro de ruedas montado sobre los elementos de superestructura anteriormente mencionados se eleva por medio de gatos hidráulicos hasta que la referida viga se apoya completamente sobre estas ruedas. Dichas ruedas giran contra la parte inferior de la viga auxiliar, que puede así avanzar una distancia de 190 m con ayuda de un torno eléctrico. Una vez llevada esta viga auxiliar a su nueva posición, se repite nuevamente la secuencia de operaciones anteriormente descritas. Un ciclo de erección comprende dos tramos y dura aproximadamente unas 3 semanas.

Tramo basculante

Aunque cada uno de los tramos dispone de una altura libre de 15 m sobre el nivel medio de aguas se consideró necesario prever un tramo capaz de disponer de una altura libre mayor que permitiese la navegación a embarcaciones de gran tonelaje. Para ello se pensó en la construcción de un tramo basculante colocado en aguas profundas y en la proximidad de Schouwen-Duiveland. Como la dirección de la corriente en esta zona no es perpendicular al eje longitudinal del puente, es necesario dar a dicho tramo una luz de 40 m como mínimo.

Grúa para la colocación de pilotes y cajones.
Colocación de un elemento de superestructura.

Con objeto de evitar la construcción de pozos excesivamente profundos para los contrapesos se decidió construir un tramo basculante de dos hojas, de 20 m de longitud cada una. La estructura metálica y maquinaria de este tramo fue proyectada y construida por la N. V. Werkspoor. Las dos hojas basculantes y el lastre se colocaron en una sola operación por medio de una potentísima grúa flotante.

Las hojas metálicas basculantes se apoyan en los muros interiores de los pozos previstos para los contrapesos. Como la unión de los tramos normales de hormigón a un soporte rígido es difícil de conseguir, los pozos para los contrapesos, que constituyen los estribos del tramo basculante, se han prolongado formando un voladizo de 35 m de longitud.

Las cargas que actúan en las estructuras de los pozos se componen de las reacciones debidas al tramo basculante y de los momentos y esfuerzos cortantes que provienen del voladizo de 35 m. Los esfuerzos cortantes son particular y considerablemente elevados.

Para resistir los esfuerzos de compresión transmitidos por la losa de intradós del voladizo hueco, así como las tensiones de tracción transmitidas por la losa de extradós de dicho voladizo, cada uno de los pozos de los contrapesos se ha reforzado con un sistema de elementos de hormigón formando celosía. Los elementos principales de la estructura de los pozos son: la losa de fondo y dos tirantes fuertemente pretensados para resistir los esfuerzos de compresión y de tracción que proceden del tablero. La losa de fondo del pozo tiene una inclinación que permite absorber los efectos de impacto del oleaje.

Los cimientos de los pozos para los contrapesos se construyeron en forma similar a la utilizada en los cimientos de una pila normal.

Cada una de las estructuras del contrapeso se soporta por medio de dos empalizadas de 3 pilotes coronados por un cajón o cabezal.

Colocación de un elemento del tablero.

Pila y un estribo.

Fotos: BERN. VAN GILS

Ménsula del tablero.

Estos cabezales se recrecieron hasta lograr un nivel de 4,5 m sobre el nivel medio de aguas y alrededor del pozo propiamente dicho.

Con objeto de evitar la colocación de una estructura que soportase la losa inferior del pozo durante la construcción, esta losa se prefabricó en el taller y se colocó en posición con ayuda de una grúa flotante.

Una vez terminados los pozos del contrapeso se procedió a la construcción de los brazos en voladizo o ménsulas, con ayuda de la viga de lanzamiento y siguiendo el mismo procedimiento que en los demás tramos. Los elementos prefabricados de que se compone cada una de las ménsulas tienen las mismas dimensiones que las de los elementos correspondientes a los tramos normales, y sólo varían las armaduras de refuerzos y las del pretensado.

La cabina para el operador del tramo basculante se ha colocado en la estructura correspondiente al pozo del contrapeso sur, el cual contiene la cabina para el equipo del transformador, el cuadro de mandos y la maquinaria de emergencia. También se ha previsto instalar en este pozo las taquillas para los boletos de peaje.

Estribos

Debido a los métodos de construcción empleados para la cimentación del puente no fue posible la continuación de la estructura sobre los diques existentes en el Oosterschelde. Por tanto, fue necesario construir, en cada extremidad del puente, un apoyo que se extendería sobre el dique y con altura suficiente para la unión normal con la superestructura. Otras condiciones consistían en que no debía permitirse descansar sobre el dique propiamente dicho y que una carretera secundaria debía cruzar el dique constituyendo paso inferior, así como que el propio dique debía recrecerse hasta lograr una altura de unos 2 m sobre la original en caso necesario.

Esta última condición hizo necesaria la construcción de un dique masivo, coronado a una cota aproximada de 10 m sobre el nivel medio de las aguas, sobre el que se construirían los caminos de acceso al puente. Con objeto de evitar movimientos de tierra y presiones horizontales en los estribos y en la medida de lo posible, fue necesaria la estabilización del suelo a una profundidad —1,6 m respecto al nivel de aguas medias en el estribo sur y a —3,5 m en el estribo norte. Los cimientos de los estribos están constituidos por una serie de pilotes de hormigón armado que se extienden hasta una profundidad de —9 m respecto al nivel de aguas medias y —14 m para el del sur y norte, respectivamente.

Con la misma intención de disminuir los esfuerzos horizontales contra las pilas, parte de la arena de relleno se colocó antes de hincar los pilotes. Gracias a esta precaución no hubo que lamentar ningún movimiento horizontal en el terreno al terminar las plataformas para los accesos.

La estructura que constituye los estribos está constituida por un pórtico de 13 m de luz prolongado, por un lado, con una ménsula de 17,30 m y, por el otro, con otra ménsula de 29,30 m de longitud. Los soportes más próximos al estribo de dicho pórtico actúan como elementos articulados, mientras que los otros se pueden considerar como fijos a su estructura de cimientos y articulados en su unión con el cabezal. En general, estos estribos tienen una forma muy similar a la del resto del puente. La parte del tablero correspondiente a los estribos se ha pretensado longitudinalmente con cables tipo Freyssinet.

Los dos estribos se hormigonaron en obra utilizando encofrados de madera.

Los apoyos de las columnas articuladas se han proyectado de tal forma que después de haber endurecido el hormigón y de haber desencofrado, pueda reajustarse en dirección vertical por medio de gatos. La razón de este procedimiento se justifica por la posibilidad de un asiento en los soportes que descansan sobre el dique durante el hormigonado y cuya importancia no podría preverse. Gracias a la libertad de movimiento prevista pudo ser posible variar la altura del brazo en voladizo para ajustarse, en la unión, con el resto de la estructura del puente. Logrado este ajuste se procedió a hormigonar la parte inferior de estos soportes.

La extremidad de unión entre estribo y dique se ha protegido con muros de contención, de hormigón.

Conclusión

Los materiales utilizados en la construcción del puente se distribuyen de la siguiente manera:

130.000 m³ de hormigón, de los que el 60 por 100 corresponden a la infraestructura, y el 95 por 100 de la superestructura, a piezas prefabricadas de hormigón;

7.400 t de acero para armaduras;

3.300 t de acero para los cables del pretensado, tipo Freyssinet, y barras del sistema Dywidag;

162 pilotes con una longitud total de 7.000 metros.

Traducido y adaptado por J. J. Ugarte.

Pont sur l'Oosterschelde, Hollande

H. T. Hoving, A. C. Krijn et J. H. van Loenen

Ce nouveau pont en béton, qui fait partie du plan de travaux, dit du Delta, a été construit suivant le procédé d'encorbellements successifs en utilisant, pour sa plus grande partie, des éléments préfabriqués. Il mesure 5.000 m de long pour 11 m 85 de large. Les travées principales sont de 95 m de portée, sauf une, basculante, à deux tabliers, de 40 m. Cette dernière a été réalisée pour livrer passage aux navires de grand tonnage, la hauteur libre de 15 m au-dessus du niveau de la mer n'étant pas suffisante.

Une importance toute particulière est présentée par les appuis intermédiaires, constitués par des piliers mesurant jusqu'à environ 38 m, cylindriques, creux, de 4 m 25 de diamètre extérieur, enfoncés par étapes successives et traversant les sables du fond de l'Oosterschelde. Pour leur battage a été utilisé un dispositif excavateur, installé à l'intérieur du pilier, ainsi qu'un système de dragage à succion pour nettoyer le fond et permettre la descente par gravité. Mais quand le frottement sur la surface extérieure le rendait impossible, les piliers étaient lestés avec des charges allant jusqu'à 500 tonnes.

Chaque appui ou support est constitué par une série de trois piliers, en palissade, dûment entretoisés par leurs têtes. La construction a été réalisée par tronçons successifs placés en encorbellement, deux à chaque travée, assemblés à l'aide d'un dispositif spécial à la clé.

La préfabrication a été si amplement appliquée que cet ouvrage mérite bien le nom de pont préfabriqué.

Bridge over the Oosterschelde, Holland

H. T. Hoving, A. C. Krijn & J. H. van Loenen

This new bridge, forming part of the Delta project, is made of concrete, and was built by successive overhangs. Precast units were mainly used.

The bridge is 5,000 m long, and is 11.85 m wide. The main spans are 95 m in length, except one, which can be opened up to sea traffic, which is 40 m long. The free height of the bridge over the sea is 15 m, which is insufficient for large ships. This required that one of the spans, in deep water, should open up, on hinges, and provide free passage to large ships.

The intermediate bridge supports are of special interest. They rest on piles which go down to 38 m. They are hollow, cylindrical, of 4.25 m external diameter, and are driven into the ground in several stages, as they penetrate through the sands at the bottom of the Oosterschelde. To drive them in, an excavating device, inside the pile, was utilised, and also a dredging and suction mechanism, to clean out the bottom, and allow the piles to sink by gravity. But when external friction did not allow this to happen, the piles were weighed down with up to 500 tons of ballast.

A series of three of these piles, in a row, makes up each bridge support. A cross member over the pile heads supports, in turn, the bridge deck.

The bridge was built in successive sections, overhanging from each support, and then finally connected with a central portion. Use of precast units has been very extensive, so that the bridge can be justifiably regarded as being prefabricated.

Brücke über dem Oosterschelde-Holland

H. T. Hoving, A. C. Krijn und J. H. van Loenen

Diese neue Brücke, die Teil vom Werkplane des genannten Deltas bildet, ist aus Beton und wurde durch die Freivorbauweise-methode gebaut. Der grösste Teil der Elemente sind vorgefertigte.

Sie hat eine Gesamtlänge von 5.000 m, eine Breite von 11,85 m, hauptsächlich Strecken von 95 m Spannweite, mit Ausnahme einer Zugstrecke, die 40 m hat. Die freie Höhe über dem Meerwasser ist von 15 m, was es ungenug für die Schiffe von grossem Tonnengehalt ist.

Das verlängt, dass eine ihrer Strecken über dem tiefen Wasser eine Klappe von zwei Stücken wäre, was die Schifffahrt von grossen Schiffe erlaubt. Besondere Wichtigkeit haben die Zwischenstütze, die durch hohle zylindrische Pfähle bis zu 38 m, von 4,25 m Aussendurchmesser eingeschlagen wurden, die das Boden des Oosterscheldes durchstechen.

Vor dem Einschlagen hat man eine Trockenbaggervorrichtung benutzt, die inner des Pfahles eingerichtet ist, und ein Sauge-nassbaggerungssystem um der Grund zu putzen und das Scherkraftabsenken zu erlauben; aber wenn es die Reibung auf der äusseren Oberfläche nicht erlaubte, lädt man mit Ladungen bis zu 500 Tonne ein.

Jede Stütze oder jedes Zwischenaufleger besteht aus einer Reihe von drei Pfähle in Zaun durch ihre Köpfe, verstrebt.

Der Bau wurde in nachfolgenden Feldern in Freivorbauweise und zwei in jeder Strecke gebaut, um mit einer besonderen Vorrichtung im Scheitel abzudichten.

Die Vorfertigung war so gross, dass man vorgefertigte Brücke sagen kann.