

EL PUENTE DE GIBRALTAR

Miguel Ángel Astiz Suárez.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid.
Carlos Fernández Casado S.L.

Antonio Martínez Cutillas.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Profesor de la Universidad Politécnica de Madrid.
Carlos Fernández Casado S.L.

NOTA DE LA REDACCIÓN

La viabilidad técnica, económica y financiera de una comunicación fija a través del Estrecho de Gibraltar está siendo objeto de estudio conjunto por España y Marruecos desde 1980. Un Comité Mixto intergubernamental es responsable del cumplimiento de los acuerdos firmados al respecto, y dos sociedades estatales, SECEG S.A. en España y SNED en Marruecos, lo son de la realización de los estudios pertinentes.

La ROP va a publicar en sus próximos números una serie de artículos sobre el desarrollo de este proyecto de unión de África con Europa, el estado actual en que se encuentra y las aportaciones que ha supuesto ya para el conocimiento del medio físico del Estrecho y para afrontar y encontrar soluciones a un empeño técnico-económico de este alcance.

La solución puente, descrita en el artículo que se publica en este número, fue una de las alternativas consideradas.

RESUMEN

Este artículo describe el proyecto de un puente sobre apoyos fijos a través del Estrecho de Gibraltar. Se presentan los condicionantes del proyecto en términos de variables del medio físico, metodología de proyecto, materiales empleados y la solución a la que se ha llegado después de la fase de anteproyecto primario recientemente finalizada. El puente propuesto consta de un puente colgante central de 13.650 metros de longitud con vanos de 3.550 metros y de dos viaductos de acceso con vanos 300 metros. Se describen algunos de los problemas encontrados durante el proyecto respecto a la cimentación en aguas profundas, al choque de barcos o a la estabilidad aeroelástica.

ABSTRACT

This paper describes the design of a bridge on fixed supports across the Strait of Gibraltar. The design conditions such as physical environment variables, design methodology and materials are presented along with the solution which has been proposed after the preliminary project phase which has recently been finished. The proposed solution consists in a 13.650 meters long central suspension bridge with 3.550 meters long spans and two approach viaducts with 300 meters long spans. Some of the problems which have been encountered during the design such as deep sea foundations, ship collision or aeroelastic stability are described.

Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
agosto de 1996.

Recibido en ROP:
abril de 1996

INTRODUCCIÓN

El Estrecho de Gibraltar es un accidente geográfico que ha representado siempre un vínculo de comunicación muy importante entre Europa y África. Hitos tan importantes como la llegada de los iberos o de los árabes son fundamentales para explicar la historia de España y de Europa. Sin embargo también es verdad que el Estrecho ha sido siempre una barrera que ha separado los dos continentes y ha mantenido diferencias políticas, económicas y culturales, que de otro modo no hubieran sido tan marcadas.

La imaginación de los hombres ha sido siempre propensa a crear mitos alrededor de los grandes accidentes geográficos (Caribdis y Escila, la Atlántida, el Maelstrom) y el Estrecho de Gibraltar no se escapa a esta tendencia al atribuirse su aparición a la realización de uno de los trabajos de Hércules consistente en separar los montes Calpe (Gibraltar) y Abila. Por ello el plantearse su cruce mediante una conexión fija tiene ese encanto que poseen todos los grandes trabajos de la ingeniería civil por lo que representan de desafío a la naturaleza y de quebrantamiento de uno de los más antiguos mitos que podemos encontrar en nuestra historia.

En el año 1979 la construcción de una conexión fija a través del Estrecho se plantea seriamente al firmarse un convenio entre España y Marruecos por el que se crean dos sociedades estatales gemelas, SECEG y SNED, que se encargarían en lo sucesivo de organizar todos los estudios encaminados a la realización del enlace.

En el caso de la solución puente, son tres consultores, uno español, Carlos Fernández Casado S.L., otro danés, Cowiconsult AS y otro marroquí, CID, quienes han llevado el peso principal de la realización de estos estudios con la colaboración puntual de otros consultores internacionales. En dichos estudios se ha pasado por varias fases: estudios previos, estudios del medio físico, estudios de factibilidad técnica y anteproyecto primario (por no citar más que aquellos que tienen una repercusión más directa sobre el proyecto del puente).

La última fase ha finalizado en 1995 y con ella se ha llegado a definir una solución puente que se considera factible con la tecnología y los materiales actuales aunque no tiene que ser necesariamente la solución óptima. De hecho, es sabido que los gobiernos español y marroquí han adoptado recientemente la decisión de construir un

túnel bajo el Estrecho por lo que la solución puente queda aplazada sine die. En este artículo se pretende presentar la solución puente así como mostrar el tipo de estudios que ha sido necesario realizar para definir dicha solución.

CONDICIONES DE PROYECTO

Las campañas de geofísica marítima y el reconocimiento del terreno de ambas márgenes indican que el fondo del Estrecho tiene una composición caótica, denominada genéricamente *flysch*, en la que se alternan las margas, arcillas, areniscas, pelitas y calcarenitas por lo que es muy difícil predecir el tipo de terreno que se va a encontrar en un punto concreto. Los últimas campañas de reconocimiento visual y batimétrico demuestran que el fondo es tremendamente irregular y probablemente más duro de lo que indican las medidas tomadas en las orillas.

La batimetría del Estrecho demuestra que se pueden encontrar profundidades de hasta 900 m aunque existe una protuberancia central cuya cumbre se encuentra a 445 m de profundidad. De cara al proyecto de un puente es interesante destacar la presencia de una banda de relieve que cruza el Estrecho en dirección Norte-Sur y cuyas profundidades no sobrepasan los 300 m: es lo que habitualmente se denomina el Umbral S (a causa de su forma serpenteante).

Las corrientes en el Estrecho son muy importantes y su distribución es compleja. A grandes rasgos, el Atlántico y el Mediterráneo están intercambiándose continuamente 1.000.000 m³/s de agua. El agua del Mediterráneo circula cerca del fondo mientras que el agua del Atlántico se mueve por las capas superiores. A este fenómeno, producido por la diferencia de temperatura y de salinidad entre las dos masas de agua, hay que superponerle el efecto de las mareas, con una carrera de marea de 4,25 m en el Atlántico (en Cádiz) y sólo 1,45 m en el Mediterráneo (en Ceuta) para un período de retorno de 150 años. Se ha adoptado una velocidad de corriente de proyecto de 2,5 m/s en la superficie y valores decrecientes con la profundidad hasta producirse el cambio de signo de estas velocidades en un punto situado a una profundidad comprendida entre 100 y 200 m.

Los estudios de oleaje llevados a cabo hasta hoy y las Recomendaciones ROM 0.3-91 indican

que la máxima altura de ola significativa para un período medio de retorno de 150 años es de 10,8 m. El período asociado es de 15 segundos aunque también se han considerado olas de menor altura y de períodos comprendidos entre 7 y 19 segundos.

Los vientos del Estrecho son conocidos por su intensidad y persistencia. Estos vientos son debidos fundamentalmente a circunstancias de tipo macrometeorológico que provocan intercambios de masas de aire entre el Mediterráneo y el Atlántico en función de sus temperaturas y presiones relativas. Las últimas medidas de viento han permitido definir la velocidad de referencia (media en un período de 20 minutos, a 10 m de altura y para un período de retorno de 120 años) en 30,8 m/s (111 km/h). De acuerdo con este dato se han adoptado como velocidades de proyecto los siguientes valores: 52 m/s (187 km/h) para el tablero en régimen estático y 68 m/s (245 km/h) para los problemas de inestabilidad aerodinámica (las torres y cables soportan una velocidad de viento variable en función de la altura).

Las condiciones sísmicas del Estrecho vienen caracterizadas por la presencia de la falla Azores-Gibraltar que separa la parte oceánica de las placas Africana y Euroasiática. Aunque existen otras fuentes de terremotos en la región, ésta es la que ha producido los terremotos más importantes, de entre los que hay que destacar el de Lisboa (1/11/1755) cuya magnitud Richter estimada es 8,5. Los distintos estudios sísmicos realizados han permitido definir una aceleración sísmica básica de proyecto de 0,117 g para un período de retorno de 500 años y a nivel de la roca basal. Este valor se incrementa hasta en un 50% en función de la naturaleza del terreno de cimentación. El espectro sísmico de proyecto que se considera es el de un sismo lejano como corresponde a la distancia desde la falla activa hasta el Estrecho.

Finalmente hay que tener en cuenta, como condición de proyecto, el tráfico marítimo en el Estrecho. El más importante es el que lo atraviesa en dirección Este-Oeste, que se ha evaluado en unos 50.000 barcos por año. Entre estos barcos hay que incluir no solamente grandes petroleros sino también barcos militares entre los cuales hay un buen número de submarinos, que atraviesan el Estrecho sumergidos. Cualquier solución puente se verá fuertemente condicionada por este tráfico tanto en lo que se refiere al galibó como al riesgo de choque de barcos.

PLANTEAMIENTO INICIAL DEL PROYECTO

El proyecto se plantea inicialmente como el de un puente sobre apoyos fijos para tráfico de carretera o mixto (carretera y ferrocarril). La solución de puente sobre apoyos flotantes con grandes vanos laterales que permitirían el paso del tráfico marítimo, considerada en un principio, se abandonó fundamentalmente por los problemas jurídicos que plantearía a causa de su incidencia sobre dicho tráfico.

En todo momento se han considerado las dos posibilidades funcionales (tráfico de carretera y mixto) aunque con un mayor énfasis en la solución de puente de carretera por considerarse más factible. La necesidad de incluir el tráfico de ferrocarril es más difícil de justificar a la vista de la estructura de distribución de tráfico existente a ambos lados del Estrecho y de las ventajas que tendría un túnel ferroviario frente a la solución puente.

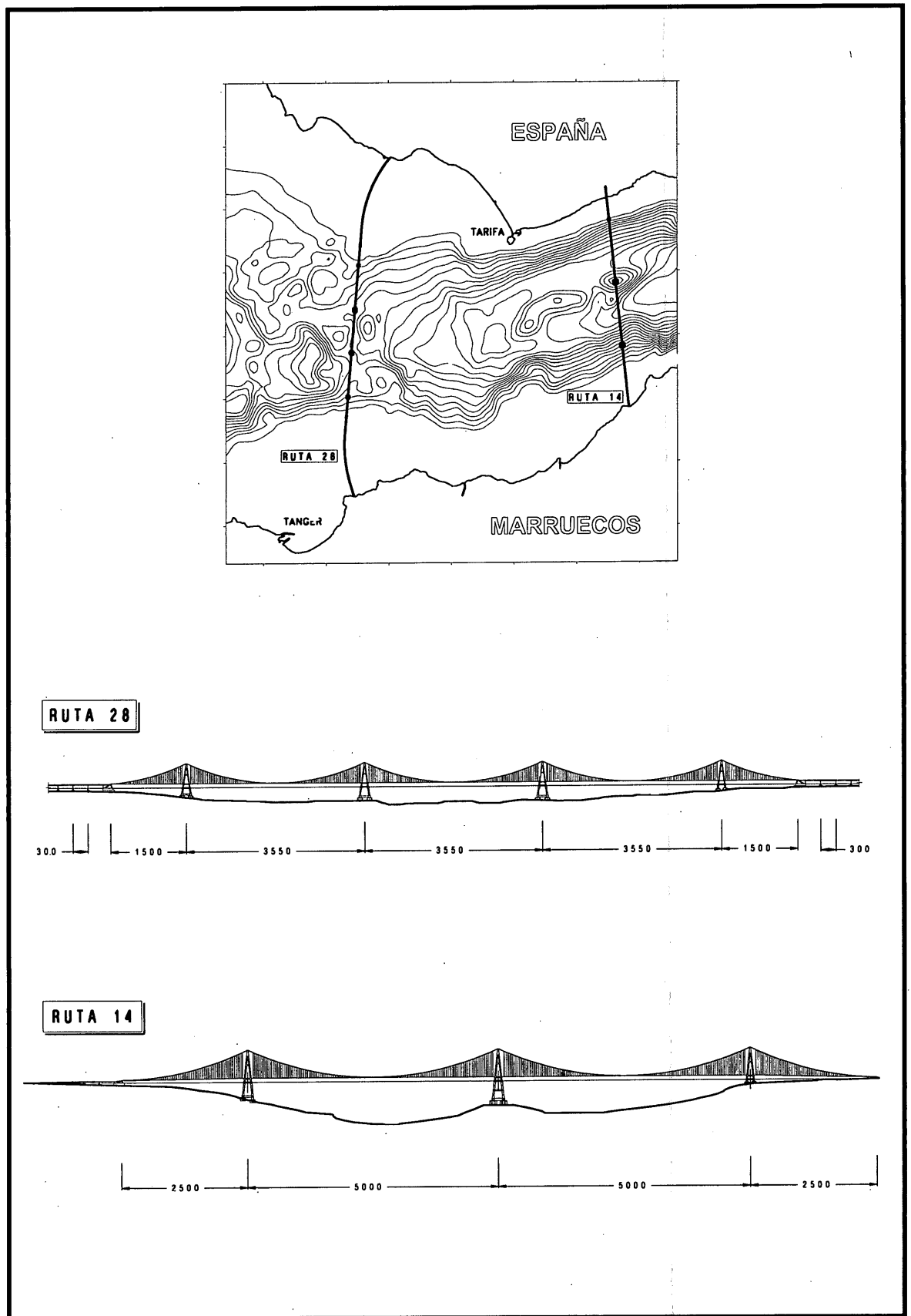
En estas condiciones han sido dos las alineaciones que se han contemplado como alternativas más evidentes (Fig.1). La más estudiada es la que sigue el Umbral "S", también conocida como ruta 28, que permite cruzar el Estrecho desde Punta Paloma a Punta Malabata) sin que la profundidad en los puntos de cimentación de los apoyos sobrepase los 300 m. La longitud total de este trazado sería de unos 28 km. Los estudios llevados a cabo hasta la fecha sitúan la luz óptima para esta alineación en alrededor de 3.500 m.

El cruce por el camino más corto, que va de Punta Cires a Punta Canales y tiene una longitud total de unos 14 km (ruta 14), exige disponer un apoyo central que se cimentaría a 480 m de profundidad y salvar el Estrecho mediante 2 vanos de luces de 5.000 m. La búsqueda de una zona de aceptable estabilidad geotécnica para la cimentación del apoyo lateral Sur ha obligado a girar la alineación aumentando así su longitud total hasta unos 15 km.

El análisis de otras alineaciones permite detectar alternativas intermedias que permitirían combinar un trazado más corto que el de la ruta 28 y con unos condicionantes técnicos (luces, profundidades) no tan restrictivos como los de la ruta 14.

El galibó vertical se ha definido mediante el estudio de las características actuales del tráfico marítimo y mediante la previsión de su evolución futura llegándose a un valor mínimo de 70 m en

Figura 1.
Alineaciones
alternativas y
perfiles
longitudinales.



la parte central y de 25 a 70 m en los vanos de acceso, por debajo de los cuales circularía el tráfico costero. En la determinación de estos valores se ha tenido en cuenta el hecho de que el Estrecho sea una de las dos únicas vías de entrada y de salida en el Mediterráneo.

Se dedica la mayor parte de este artículo a la presentación de la solución propuesta para la ruta 28 por ser la que se considera más factible. En el último apartado se describirá brevemente la solución correspondiente a la ruta 14.

La solución de la ruta 28 consiste en un puente colgante central de tres vanos de 3550 m y dos medios vanos de 1.500 m. La elección de esta luz es el resultado de una serie de estudios de optimización y en definitiva es también la consecuencia de la batimetría del Umbral, que presenta zonas más apropiadas para las cimentaciones a distancias sensiblemente coincidentes con esta luz. Este puente central tendría una longitud total de 13.650 m y el resto del trazado consistiría en dos viaductos de acceso de 5.550 y 6.750 m (accesos Sur y Norte respectivamente) y dos rampas sobre terraplen de unos 725 metros de longitud cada una.

SUBESTRUCTURA

PLANTEAMIENTO

El análisis de los condicionantes del diseño de los apoyos (profundidad, cargas hidrodinámicas, cargas permanentes y sobrecargas de uso, problema del choque de barcos y condiciones de cimentación) y el recurso a la tecnología desarrollada en los últimos años por la industria de extracción petrolífera han llevado a proponer varias alternativas para la construcción de estos apoyos. De entre estas alternativas sólo dos son apropiadas: la solución de hormigón (también llamada de gravedad por estar basada su estabilidad en su propio peso) y la solución metálica (llamada tipo "jacket" al igual que las plataformas petrolíferas sobre las que se inspira). Por razones de mantenimiento y de resistencia frente al choque de barcos, sólo se ha considerado la solución de hormigón.

El apoyo de hormigón (Fig. 2) consiste en cuatro columnas inclinadas interconectadas en cabeza y en su base y apoyadas sobre cuatro zapatas celulares. Esta estructura se cimenta sobre

un lecho de grava con el que se solidariza mediante inyección.

Las razones de la elección de este concepto estructural hay que buscarlas en los condicionantes del proyecto que han sido enumerados anteriormente:

- ▼ relativa sencillez de las operaciones a realizar en el fondo para la preparación de la cimentación.
- ▼ se trata de una solución completa que no transmite acciones horizontales permanentes al terreno.
- ▼ se consigue una mayor resistencia a las acciones horizontales mediante la inclinación de las columnas.
- ▼ la plataforma superior, necesaria para solidarizar la columnas, se coloca a nivel del mar para optimizar la resistencia del conjunto frente al choque de barcos.
- ▼ es una solución inspirada en las plataformas de hormigón desarrolladas para la extracción de petróleo en el Mar del Norte y por ello su factibilidad está asegurada.

Esta solución está fuertemente condicionada por el proceso constructivo puesto que en él se aprovecha la flotabilidad de la estructura. Esto introduce grandes presiones diferenciales lo que hace necesario el recurso a hormigones de alta resistencia (del orden de 70 MPa).

DESCRIPCIÓN

La base sobre la que se apoya esta estructura tiene unas dimensiones del orden de 300x300 m en el caso de los apoyos más profundos. Dado que cada zapata se apoyará a una cota diferente en función de la configuración del terreno, la excavación se reduce a cuatro cuadrados de unos 130 m de lado y unos 5 m de profundidad que luego se recubren con un lecho de grava de 2 a 3 m de espesor sobre el que se apoya la zapata.

Las zapatas están formadas por siete células cilíndricas cada una de las cuales está cerrada mediante dos casquetes esféricos. La función de estas células es doble: son flotadores necesarios durante el proceso de construcción y distribuyen la carga sobre la cimentación. La célula central se prolonga mediante una columna cilíndrica hueca de altura variable que conecta la zapata a la base inferior de la estructura de apoyo. De esta forma se solventa el problema de adaptar la

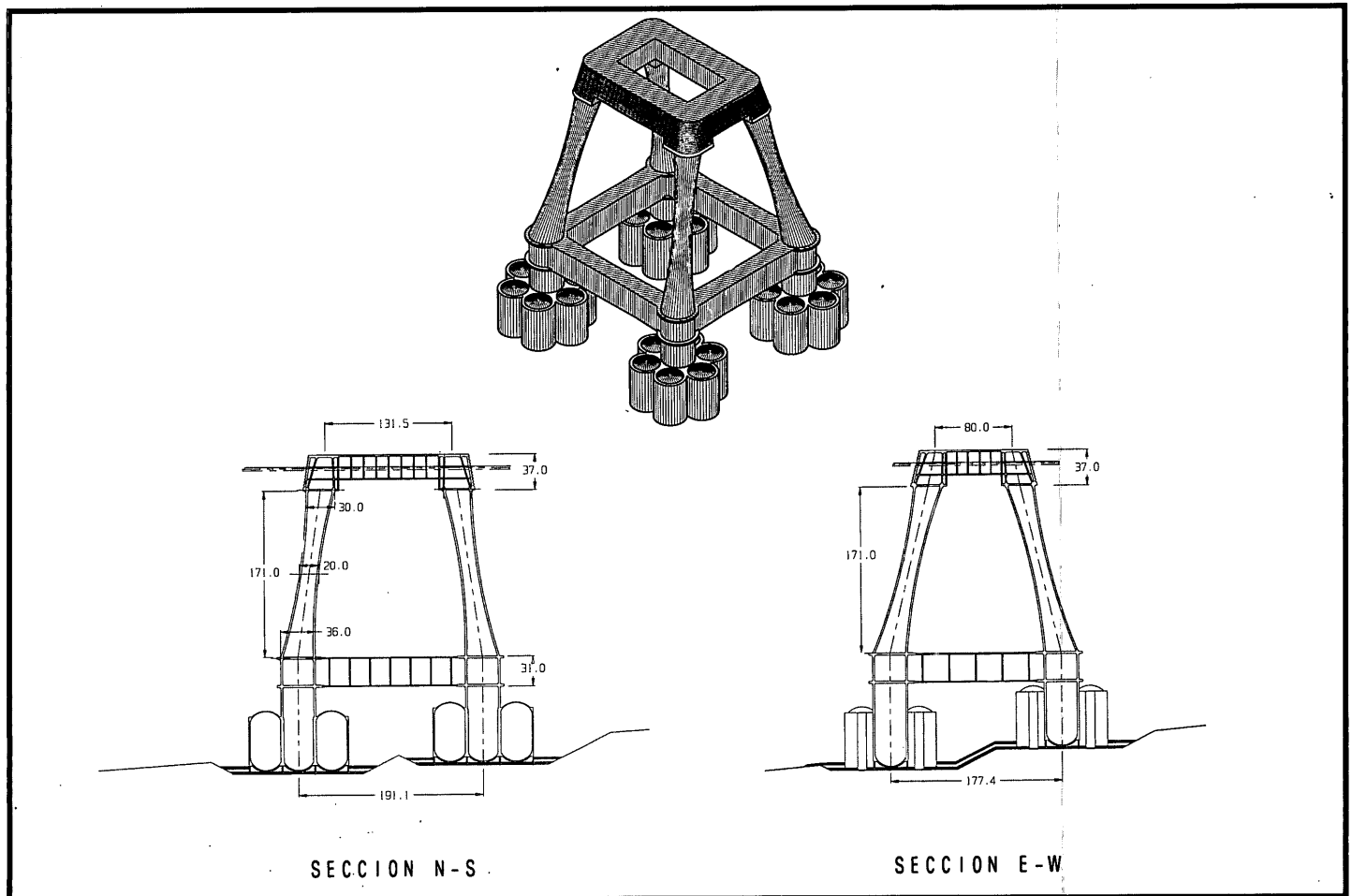


Figura 2. Apoyos (perspectiva y secciones).

geometría de los apoyos a la configuración batimétrica del terreno.

El apoyo propiamente dicho es una estructura formada por cuatro columnas inclinadas de sección circular hueca y diámetro variable que están unidas en cabeza y en su base mediante sendos marcos rígidos. El diseño de esta estructura facilita su construcción y elimina las acciones horizontales permanentes sobre la cimentación, y es rígida y al mismo tiempo dúctil lo que es muy conveniente para resistir las acciones sísmicas y de choque de barcos. El espesor de las paredes de las columnas inclinadas ha sido estudiado detenidamente para conseguir hacerlas resistentes al choque de submarinos; se ha conseguido asegurar una resistencia satisfactoria mediante espesores comprendidos entre 1,80 y 1,90 m.

La plataforma superior está formada por cuatro vigas horizontales que conectan entre sí a las cuatro columnas en cabeza. Esta plataforma cumple varias funciones. En primer lugar es el elemento que dota de rigidez al conjunto del

apoyo y permite su trabajo como pórtico. En segundo lugar, se trata de la parte de la estructura que recibe directamente los efectos de las fuerzas de impacto de barcos y la mayor parte de las acciones hidrodinámicas. Por ello se ha cuidado su diseño procurando dotar a estas vigas de la mayor ductilidad posible. Esto se ha conseguido independizando en lo posible las estructuras portantes (las columnas inclinadas y concretamente su prolongación a través de la plataforma superior) de las estructuras de defensa. Esto ha llevado a duplicar algunos elementos y a crear una compleja estructura de láminas de hormigón para conectar el muro exterior a las columnas portantes. Además, se ha procurado reducir el efecto del oleaje mediante el redondeo de las formas y la disposición de bandas de disipación de la energía de las olas a lo largo del muro exterior.

Esta plataforma superior podía haberse dispuesto al nivel del tablero, como se había hecho en propuestas anteriores con lo que se conseguiría disminuir las fuerzas hidrodinámicas y aumen-

tar la rigidez del apoyo (también en este caso se dispondría de una plataforma de trabajo al nivel del tablero lo que sería interesante durante la construcción de las torres). Sin embargo estas ventajas se ven anuladas al considerar la resistencia frente al choque de barcos, que es la que gobierna el diseño general del apoyo (la fuerza estática equivalente al choque del petrolero que se ha considerado en el proyecto es de 1.200 MN).

CONSTRUCCIÓN

Los procedimientos de construcción son los que se utilizan actualmente para la construcción de plataformas petrolíferas y por ello se trata de operaciones ya ensayadas y que se pueden considerar plenamente factibles.

La preparación de la cimentación requiere en primer lugar una excavación que puede llegar hasta 5000000 m³ para el conjunto del puente principal. En terrenos relativamente blandos la excavación se puede llevar a cabo desde una estructura semi-sumergible como las que se usan en el Mar del Norte. Estas estructuras están diseñadas y equipadas para minimizar sus movimientos de cabeceo a causa del oleaje; pueden trabajar normalmente con un oleaje de hasta 5 m de altura. Desde esta estructura se cuelga una celosía vertical que soporta las herramientas de corte y dragado. El material excavado se lleva por un conducto a una zona suficientemente alejada de la base de cimentación. Este procedimiento permite alcanzar rendimientos de hasta 20.000 m³ diarios en los terrenos que se encuentran en el Estrecho.

En caso de encontrar zonas localizadas de roca dura, se pueden utilizar técnicas alternativas como barrenado, voladura, martillos hidráulicos, etc. La perforación de los barrenos es una operación que ya ha sido ejecutada en una de las pilas del puente Bisan-Seto en Japón y se puede realizar desde una estructura semi-sumergible.

La colocación del lecho de grava se lleva a cabo desde un barco y a través de un tubo flexible cuyo extremo inferior se puede desplazar mediante un conjunto de toberas de agua a presión. Esta operación se ha experimentado en el Mar del Norte para profundidades superiores a 300 m. La compactación se puede realizar mediante una placa vibrante suficientemente pesada como se está haciendo actualmente en el puente del Gran Belt o mediante un rodillo vibrante como se

ha hecho ya en Japón. Los equipos de dragado también se pueden utilizar en la nivelación del lecho de grava.

La construcción del apoyo seguiría fielmente las técnicas puestas a punto para la construcción de grandes plataformas petrolíferas de hormigón en el Mar del Norte. En primer lugar se hormigona parte de las zapatas en dique seco. A continuación se llevan estas zapatas a un lugar de aguas tranquilas donde se amarran para poder completarlas hasta el nivel de las vigas riostras inferiores. Seguidamente se fondean las cuatro zapatas en cimentaciones provisionales para poder ejecutar las vigas riostras inferiores mediante cimbras metálicas. Estos elementos dotan de suficiente rigidez al conjunto por lo que a partir de este momento se pueden llevar a un lugar de aguas profundas (más de 250 m) donde se amarra y se hormigonan las columnas inclinadas (mediante encofrados deslizantes) y parte de la plataforma superior. Finalmente se remolca el apoyo hasta su posición definitiva donde se fondea, se inyecta de mortero el espacio entre las zapatas y el lecho de grava y se hormigona el resto de la plataforma superior. Todas estas operaciones requieren que el apoyo esté sólo parcialmente inundado para mantener su flotabilidad y estabilidad. Para remolcar el apoyo contra las corrientes del Estrecho sería preciso utilizar entre seis y ocho petroleros adaptados a este fin ya que los remolcadores habituales serían claramente insuficientes.

SUPERESTRUCTURA

El sistema estático recomendado es el clásico de puente colgante aunque con pilas rígidas, capaces de absorber los desequilibrios de tensiones en los cables principales que se producen al cargar vanos alternos. Otra cualidad importante de este sistema consiste en que permite conseguir una estructura más rígida, lo cual es necesario por tratarse de un puente de muy gran luz y por ello excesivamente flexible. La posibilidad de atirantar el tablero no se puede considerar más que como una solución complementaria de la anterior para conseguir mayor rigidez pero no como esquema estático único.

Sin embargo este sistema requiere además algunas modificaciones para incrementar hasta donde sea posible su rigidez. La primera consiste en conectar los cables principales al tablero en

clave con lo que se consigue transmitir parte de las tensiones de sobrecarga directamente a la base de las torres y por lo tanto se disminuyen las cargas aplicadas en cabeza de torres. Pero para que este sistema sea plenamente efectivo es necesario que estas cargas puedan ser transmitidas a las torres a través del tablero y es de suponer que entre estos dos elementos deberá existir una junta de dilatación. Para obviar este problema se ha diseñado una junta que permita transmitir las cargas de aplicación rápida (las de sobrecarga, viento y sísmicas) y en cambio se deforme ante las cargas de aplicación lenta (principalmente las térmicas). Para ello se utilizarían amortiguadores hidráulicos muy rígidos. Este sistema permite por ejemplo reducir los desplazamientos verticales del tablero bajo sobrecarga de uso en un 30-40% hasta llegar a valores del orden de los 11,5 m para el puente de carretera. Este valor se ha considerado aceptable en un puente de 3.550 m de luz.

TABLERO

Este punto es especialmente importante y polémico por su incidencia sobre la estabilidad aeroelástica del puente. En un principio se ha considerado una gran variedad de soluciones que incluyen cajones cerrados (como en los puentes del Severn, Humber o Gran Belt), celosías (como en los puentes Golden Gate, Verrazano o Akashi), tableros a dos niveles, tableros cerrados de sección elíptica, tableros con rendijas longitudinales, etc. Se han llevado a cabo ensayos en túnel de viento de la mayoría de estas soluciones para conocer sus propiedades aerodinámicas y poder compararlas sobre una base común.

Finalmente la solución adoptada es la de tablero doble consistente en dos tableros independientes de canto estricto muy separados entre sí y apoyados sobre vigas transversales colgadas de las péndolas (Fig. 3). Los tableros tienen 13,5 m de anchura y dejan un espacio central de 28 m por lo que la anchura total del tablero resulta ser de 55 m. Este tipo de solución ha sido propuesto también para el puente de Messina y presenta la ventaja de una buena estabilidad aeroelástica incluso durante las fases de construcción. Esto no quiere decir que sea la única posibilidad ya que hemos comprobado que una sección más clásica de tipo cajón cerrado combinada con un sistema más rígido de cables y péndolas puede dar también resultados satisfactorios.

La resistencia frente al viento transversal se consigue mediante la colocación de elementos de arriostramiento diagonales en zonas seleccionadas del vano (las de mayor cortante) para evitar que la deformación del tablero sea la de una viga Vierendeel. La protección del tráfico frente a los efectos del viento lateral (muy frecuente en el Estrecho) se consigue mediante unas pantallas de 3,5 m de altura. Los ensayos en túnel de viento han demostrado que estas pantallas no tienen un efecto perjudicial sobre la estabilidad del puente.

La protección contra la corrosión de las superficies interiores del tablero se lleva a cabo mediante un sistema de deshumidificación que ha sido probado con éxito en otros grandes puentes como el del Pequeño Belt en Dinamarca (construido en 1970). Este sistema permite un importante ahorro en los costes de mantenimiento del puente.

CABLES

Cada uno de los dos cables principales consiste en 33.147 alambres galvanizados de 5,26 mm de diámetro. Estos alambres están agrupados en cordones de 127 alambres para facilitar el montaje de los cables. Los cables son continuos entre los dos anclajes extremos por lo que su longitud total es de 14.400 m. Los cables principales se apoyan sobre sillas fijas en las torres y sobre sillas móviles en los anclajes, a la entrada de la cámara de expansión.

Las péndolas, que pueden ser cables cerrados o cables de alambres paralelos, se cuelgan de los cables principales por el sistema tradicional de bridas, mazarotas y orejetas. En cuanto a la conexión al tablero, hay que destacar el uso de manguitos de neopreno para amortiguar las flexiones de las péndolas y disminuir por lo tanto los problemas de fatiga. Estas péndolas se agrupan por parejas y se considera la hipótesis accidental de rotura de las dos péndolas y como consecuencia flexión accidental suplementaria del tablero.

Se ha mencionado anteriormente la posibilidad de mejorar la estabilidad aeroelástica del tablero mediante la rigidización del sistema de cables. Hemos comprobado que el sistema más sencillo consiste en disponer péndolas cruzadas en planos normales al eje del puente lo que permite aumentar notablemente las frecuencias de

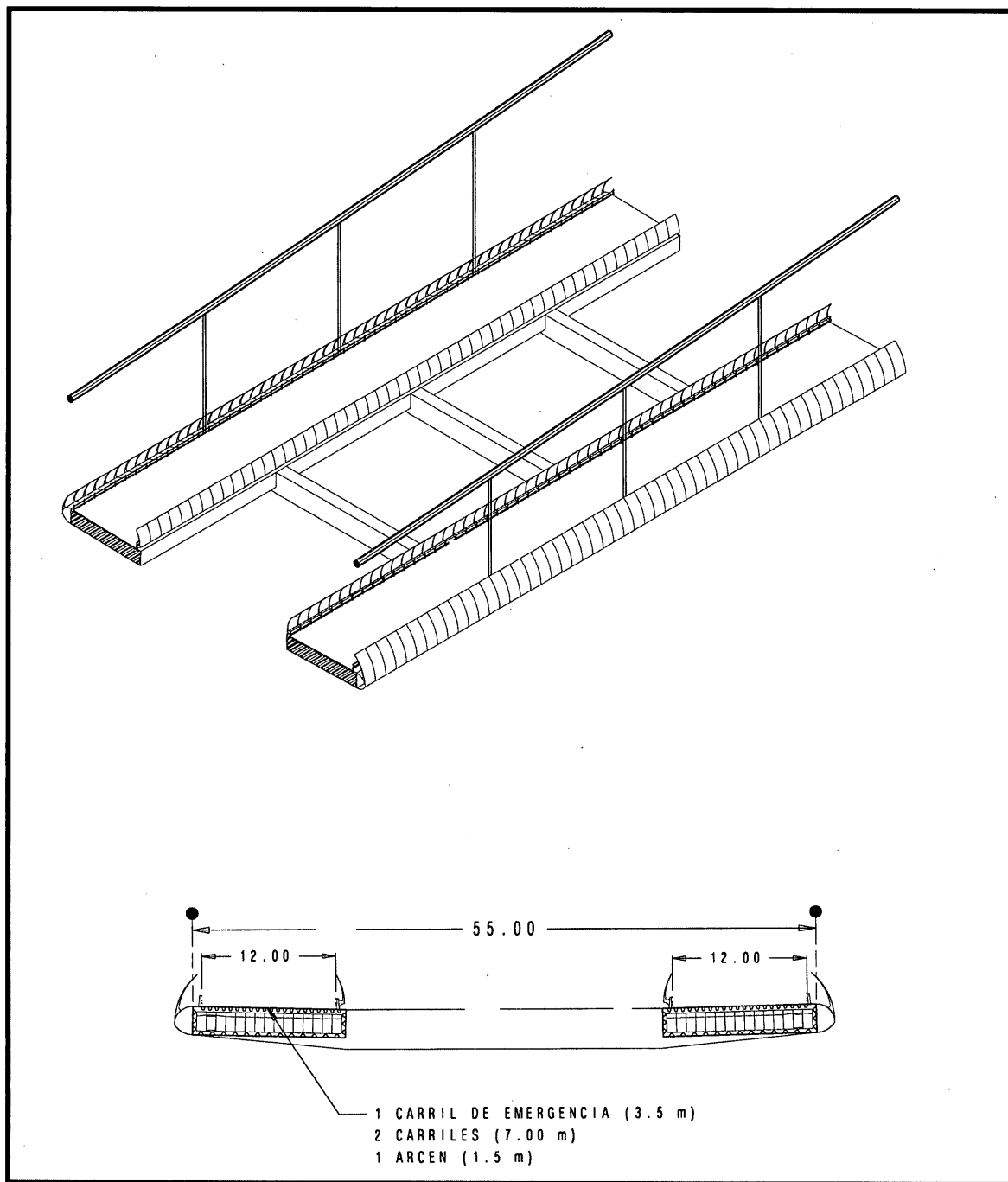


Figura 3. Tablero y cables (perspectiva y sección).

torsión y por lo tanto dificultar el flameo del tablero.

TORRES

Las torres son la prolongación de las columnas de los apoyos y por lo tanto consisten en dos estructuras en forma de "A" unidas por una serie de riostras transversales (Fig. 4). La razón

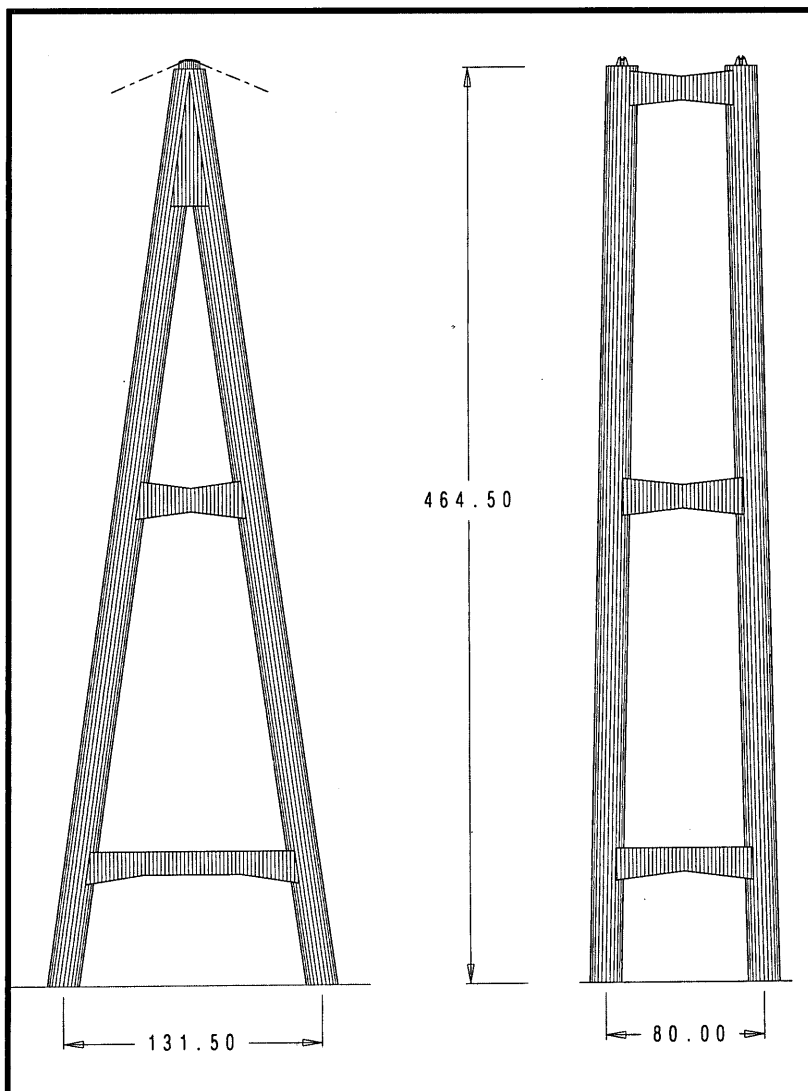
de esta tipología reside evidentemente en la necesidad de dotarlas de resistencia y de rigidez frente a las acciones horizontales procedentes del desequilibrio de tensiones en los cables de vanos contiguos. La altura de las torres sobre la base de apoyo es de 477 m.

La elección del material se lleva a cabo sobre la base de criterios económicos. En este caso, aunque las torres de hormigón por sí solas resul-

tarían más económicas que las metálicas, su mayor peso incide de forma notable sobre las acciones gravitatorias y sísmicas que llegan a las cimentaciones y por lo tanto sobre su coste. En consecuencia es la opción metálica la que a la postre resulta ser más económica. En cualquier caso éste no es un punto que esté totalmente claro ya que de los dos mayores puentes que se están construyendo en la actualidad, el del Gran Belt (luz 1.624m) tiene torres de hormigón y el de Akashi (luz 1.990 m y construido sobre el epicentro del reciente terremoto de Kobe) tiene torres metálicas. El acero utilizado tiene un límite elástico de 460 MPa.

La sección transversal de las columnas es poligonal aunque con 24 lados por lo que se diferencia muy poco de una sección circular de 16 m

Figura 4. Alzados de las torres.



de diámetro. La elección de la forma cuasi circular reside en primer lugar en la voluntad de minimizar los efectos del viento aunque también se han considerado las ventajas estéticas de esta solución. Cada una de las columnas consta de un sistema de almas, diafragmas y rigidizadores interiores cuya complicación contrasta con la sencillez del diseño exterior. También en este caso se utilizaría un sistema de deshumidificación interior como protección contra la corrosión.

La conexión de las torres metálicas a la plataforma superior del apoyo se realiza a través de una base metálica y una estructura metálica rigidizada que se cose al apoyo mediante barras de pretensado y que se recubre posteriormente de hormigón para darle forma troncocónica.

CONSTRUCCIÓN

El proceso de construcción de la superestructura no supone gran novedad respecto al de un puente colgante de luz más convencional por lo que no insistiremos en los detalles de este proceso. Sin embargo hay un cierto número de aspectos que se pueden considerar específicos de un puente de muchos vanos de gran luz como es el caso del puente de Gibraltar.

El tendido del cable es una operación que consume gran parte del tiempo total de la obra y existen ejemplos de obras que se han retrasado notablemente (con las consiguientes pérdidas económicas) a causa del viento. Los vientos del Estrecho de Gibraltar son muy importantes durante un gran número de días al año y por ello es imprescindible asegurar la plataforma colgante de trabajo mediante una red de cables que la atiranten y la mantengan fija incluso bajo fuertes vientos.

Dado que hay que construir los cables principales continuos de anclaje a anclaje hay que optimizar el tiempo de tendido de estos cables para lo cual es preferible utilizar el método PPWS en el que se tienden los alambres en grupos de unos 130 que se agrupan en obra formando tendones. Estos tendones se tienden de anclaje a anclaje mediante un alambre continuo que se apoya en pórticos transversales dispuestos de forma regular a lo largo del recorrido para que vaya adoptando la forma deseada. Una vez tendidos los tendones, se izan hasta las sillas, se ajustan longitudinalmente vano a vano para conseguir la flecha requerida y se fijan en cada silla. Este procedimiento se puede realizar de forma

simultánea para un grupo de tendones con lo que se consigue una ganancia de tiempo importante. Una vez llevados a cabo estos ajustes, se cortan los tendones en los dos extremos, se les ajustan las mazarotas y se anclan en las posiciones definidas previamente.

Las operaciones restantes (compactación, aplicación del alambre perimetral exterior y del recubrimiento de protección contra la corrosión y colocación de las bridas de cuelgue de las péndolas) son absolutamente convencionales.

El montaje del tablero se realizaría de forma similar al caso de un puente colgante de 3 vanos salvo que hay que cuidar de no imponer cargas de desequilibrio horizontales excesivas en cabeza de pilas. Para ello es necesario llevar a cabo el montaje de forma escalonada en varios vanos consecutivos: se sigue el mismo orden (desde el centro de vano hacia las torres y desde las torres hacia el centro del vano simultáneamente) pero con un cierto retraso en un vano respecto al anterior.

VIADUCTOS DE ACCESO

La extensión de los viaductos de acceso viene definida por una profundidad límite que se ha fijado en torno a los 55 m. Dado que se trata ya de una profundidad apreciable y que sigue existiendo el peligro del choque de barcos, las luces de estos viaductos deberán ser tan grandes como sea posible por lo que se ha adoptado un valor de 300 m.

La solución propuesta para las pilas consiste en una estructura a base de cajones que se hormigona en parte en dique seco y en parte en un emplazamiento provisional aprovechando la flotabilidad de los cajones. Una vez terminadas las pilas, se remolcan hasta su emplazamiento definitivo y se fondean sobre un lecho de grava previamente preparado de forma similar a la descrita para los apoyos del puente principal.

El tablero de estos viaductos es mixto y consiste en una estructura de tubos de acero de canto constante (20 m) formando una celosía de sección transversal triangular (un cordón inferior y dos cordones superiores) y una losa de hormigón de espesor variable. El acero es de 460 MPa de límite elástico y va incluso pretensado en alguna parte de los vanos. El hormigón de la losa es de 70 MPa y está suplementado con un pretensado transversal.

ASPECTOS ECONÓMICOS

Con todas las reservas que cabe hacer sobre la fiabilidad de la evaluación económica de una obra de esta importancia, se ha tratado de buscar información relativa a obras similares. Las fuentes utilizadas se refieren a obras en curso de ejecución, no a anteproyectos y por lo tanto los precios adelantados son precios reales internacionales. Estos precios se han corregido ligeramente para tener en cuenta que una parte importante de la mano de obra sería española o marroquí y por lo tanto con niveles salariales inferiores a los niveles de Estados Unidos, Canadá, Noruega o Dinamarca. Las obras que nos han permitido evaluar los precios de las unidades de obra son principalmente el puente del Gran Belt, las plataformas petrolíferas del Mar del Norte y las plataformas petrolíferas del Océano Artico.

En estas condiciones, el coste del puente (sin contar reconocimientos previos, proyecto, impuestos ni imprevistos) sería de 8.700 millones de ECU para el nivel de precios de Enero de 1994 (1,4 billones de pesetas). Esta cifra no puede incluir, evidentemente, los efectos de sobrecalentamiento de la economía local que induciría una obra de estas dimensiones. De todas formas, se está produciendo una internacionalización de las grandes obras públicas en el sentido de una mayor prefabricación y una dispersión de los talleres como consecuencia de una mayor competencia. Este hecho contrarresta de alguna forma los efectos locales que tienden a encarecer la obra.

SOLUCIÓN PARA LA RUTA 14

La ruta 14 tiene a priori varios atractivos interesantes: es significativamente más corta, lo cual redundará en una mejora apreciable de la comodidad y seguridad del tráfico, está más centrada en el Estrecho, lo que supone un ahorro del tiempo medio empleado en los recorridos que atraviesan el Estrecho, y el número de obstáculos a la navegación sería muy inferior al correspondiente a la ruta 28, lo cual se traduce también en una mayor seguridad. Las contrapartidas consisten en el salto tecnológico que supone una solución de este tipo y en el posible incremento de coste de construcción. Por estas razones la solución puente a lo largo de la ruta 14 se ha estudiado a un nivel de detalle menor aunque suficiente para

establecer comparaciones entre las dos alineaciones consideradas.

En este caso el puente constaría de dos vanos colgados de 5.000 m y dos vanos de compensación de 1.800 m por lo que su longitud total sería de 13.600 m y cubriría la práctica totalidad del Estrecho. Las soluciones técnicas propuestas son semejantes a las de la ruta 28 aunque siempre con mayores dimensiones.

El apoyo central se cimentaría sobre el llamado monte de Hércules, a 480 m de profundidad, y los apoyos laterales a 415 m en el lado Sur y a 94 m en lado Norte. Es de destacar que el apoyo Sur se asentaría sobre una ladera con una pendiente media del 20%. Las dimensiones de los apoyos se incrementarían notablemente respecto a los de la ruta 28. Por ejemplo, la base de cimentación del apoyo central pasaría a ser de 360x360 m, las zapatas se inscribirían en un círculo de 150 m de diámetro y estarían formadas por 13 células cilíndricas. En el caso del apoyo Sur, las zapatas adoptarían una forma alargada en dirección de las líneas de nivel para paliar en parte el problema de la pendiente del fondo. En cuanto a la tipología de los apoyos, cabe destacar la necesidad de disponer riostras transversales a media altura en el apoyo central tanto por razones de estabilidad durante el proceso de construcción como por necesidades resistentes respecto a la sollicitación de choque de barcos.

Las torres tendrían 630 m de altura sobre los apoyos y estarían formadas por columnas de 20

m de diámetro. El tablero pasaría a tener una anchura total de 58 m al ser necesario aumentar la anchura del hueco central para asegurar su estabilidad aeroelástica; este valor se ha obtenido a partir de extrapolaciones analíticas y estamos pendientes de llevar a cabo ensayos en túnel de viento que permitan fijar este valor con total seguridad. Los cables deberían desdoblarse para mantener su diámetro en valores sólo ligeramente superiores a 1 metro con el fin de limitar las cargas de viento y hacerlos más manejables.

CONCLUSIONES

Se ha pretendido dar en este artículo una imagen completa de las soluciones técnicas propuestas en el proyecto de un puente a través del Estrecho de Gibraltar. Sin embargo, cualquier proyecto de ingeniería civil, y más si tiene la importancia de éste, pone en juego muchos otros factores distintos de los puramente tecnológicos y económicos.

En primer lugar estaría la ecología. La realización de la obra no debería perturbar el equilibrio ecológico del Mar Mediterráneo, constantemente amenazado por otros muchos factores. La solución puente es bastante respetuosa de este equilibrio siempre que las obras de movimiento de tierras no afecten a la sección del Estrecho hasta el punto de alterar el régimen de intercambio de masas de agua entre el Atlántico y el Mediterráneo. Este problema ha sido considerado con sumo cuidado en el caso de los estrechos Gran Belt y Oresund para mantener el grado de salinidad del Mar Báltico y con mayor razón debería ser considerado en este caso. Por otra parte sería muy difícil asegurar que algunos sectores locales como el de la pesca en la zona del Estrecho (especialmente el atún) no se verían afectados por las obras.

En segundo lugar hay que considerar las relaciones entre los países ribereños del Mediterráneo. Este puente, que serviría de lazo de unión entre los países del Sur y los del Norte podría también provocar una gran batalla política y jurídica al suponer el cierre del Estrecho (y posiblemente el del Mar Mediterráneo) al paso de objetos flotantes de más de 70 m de altura. La batalla legal que en su día planteó Finlandia en la Corte de La Haya contra la construcción del puente del Gran Belt (y por la que recibió compensaciones económicas) quedaría pequeña comparada con la que podría provocar el puente de Gibraltar. Por

FICHA TÉCNICA

Sociedades estatales:

S.E.C.E.G.: J.M. Pliego, A. Villanueva, J.M. Serrano
S.N.E.D.: M. Taik, M. Bensaid

Sociedades consultoras:

Carlos Fernández Casado S.L.: M.A. Astiz, A. Martínez Cutillas
Cowiconsult AS: K.H. Ostefeld, F. Pedersen, O.D. Larsen,
A. Larsen, T. Forsberg, E.Y. Andersen
C.I.D.: F. Azil
B.C. Gerwick Inc.: B.C. Gerwick, G. Fotinos

Ensayos:

SINTEF: E. Hjorth-Hansen
MARINTEK: K. Reed
DMI: G. Larose

ello sería necesario no solamente el acuerdo de España y Marruecos sino también el consenso de los países mediterráneos para poder llevar a cabo esta obra.

A pesar de que la solución túnel ha sido considerada más adecuada que la solución puente, el proyecto de un puente a través del Estrecho de Gibraltar plantea unos retos técnicos apasionantes y debemos esperar que en un futuro (probablemente lejano) se pueda demostrar que esta solución es un complemento necesario para el túnel ferroviario.

REFERENCIAS

- Astiz M.A. & E.Y. Andersen**, "On wind stability of very long spans in connection with a bridge across the Strait of Gibraltar", Proc. 2nd Symposium on Strait Crossings (Trondheim), Balkema, 1990
- Astiz M.A.**, "Seismic behaviour of a bridge across the Strait of Gibraltar", Proc. 10th World Congress on Seismic Engineering (Madrid), Balkema, 1992
- Astiz M.A., Martinez Cutillas A., Ostenfeld K. & Azil F.**, "The design of deep water piers for the Gibraltar Bridge". IV Coloquio Internacional sobre el Enlace Fijo a través del Estrecho de Gibraltar. Sevilla, 1995.
- CFC, COWI & CID**, "Estudio de factibilidad técnica de apoyos fijos y flotantes para un puente sobre el Estrecho de Gibraltar", informe para SECEG, 1986
- CFC, COWI & CID**, "Comportamiento sísmico", informe para SECEG, 1991
- CFC, COWI & CID**, "Estudio de viento", informe para SECEG, 1991
- CFC, COWI & CID**, "Estudio de la superestructura de un puente sobre apoyos fijos a través del Estrecho de Gibraltar", informe para SECEG, 1991.
- COWI, CID & CFC**, "Etude de protection des piles contre les chocs de bateaux et évaluation des risques de collision pour un pont sur le Déroit de Gibraltar", informe para SNED, 1987
- COWI, CFC & CID**, "Avant-projet primaire d'un pont à travers le Déroit de Gibraltar", informe para SNED/SECEG, 1995
- Gerwick B.C.**, "Impact of new offshore technology on substructure for bridge across Strait of Gibraltar", III Colloque International sur la Liaison Fixe à travers le Déroit de Gibraltar, Marrakech, 1990
- Larsen A., Ostenfeld K. & Astiz M.A.**, "Aeroelastic Stability Study for the Gibraltar Bridge. Feasibility Phase". IV Coloquio Internacional sobre el Enlace Fijo a través del Estrecho de Gibraltar. Sevilla, 1995.
- Manterola J., Astiz M.A., Ostenfeld K.H. & Haas G.**, "Long span structures for the Gibraltar crossing", 13th IABSE Congress, Helsinki, 1988
- Martinez Cutillas A., Astiz M.A., Ostenfeld K. & Azil F.**, "The design of pylons for the Gibraltar Bridge". IV Coloquio Internacional sobre el Enlace Fijo a través del Estrecho de Gibraltar. Sevilla, 1995.
- MOPT**, "Recomendaciones para obras marítimas", ROM 0.3-91 Oleaje, 1991
- NCSE 94**, "Norma de Construcción Sismorresistente Española", MOPT, 1994
- Ostenfeld K., Forsberg T., Astiz M.A., Azil F.**, "Multi-span suspension bridges with 3500-5000 m spans. IV Coloquio Internacional sobre el Enlace Fijo a través del Estrecho de Gibraltar. Sevilla, 1995.
- Pedersen F. & Astiz M.A.**, "Deep water piers for bridge across the Strait of Gibraltar", III Colloque International sur la Liaison Fixe à travers le Déroit de Gibraltar, Marrakech, 1990. ●