Replanteamiento constructivo del Puente del Enlace Fijo a través del Estrecho de Gibraltar

Bringing back the bridge solution to establish a fixed link over the Strait of Gibraltar

Pablo Diaz Simal[1*]

Palabras clave

Gibraltar;
puente;
alternativa;
construcción;

Resumen

El propósito de este ensayo es analizar algunos de los aspectos constructivos de la solución Puente y examinar las conclusiones alcanzadas en 1995 sobre la viabilidad de dicha solución.

Tras haber quedado relegada durante décadas, la solución Puente del proyecto del Enlace del Estrecho de Gibraltar ha sido rescatada como alternativa para cubrir la distancia entre los dos continentes después de haberse detectado recientemente algún obstáculo en las capas inferiores de los terrenos del emplazamiento, anunciando nuevos aspectos geotécnicos a abordar.

Dado el nivel actual de desarrollo alcanzado por la solución Túnel, la solución Puente, que data de 20 años atrás, necesita ser actualizada en toda su extensión para poder así equipararse con aquélla.

Además de incorporar las nuevas tendencias presentes en el estado del arte en el diseño de estructuras, la solución Puente necesita también una actualización en sus procedimientos constructivos para incorporar todas las potencialidades que ofrecen: (1) los medios auxiliares; (2) la maquinaria; y (3), las numerosas y nuevas ideas que, provenientes de otros sectores distintos que el de las obras públicas, han sido adoptadas en el campo de la construcción. Asimismo, sería igualmente necesario tomar en consideración el incesante desarrollo de la ciencia de los materiales, que supone un constante incremento tanto en los niveles de resistencia como en el número de características que dichos materiales presentan.

Keywords

Gibraltar;
bridge;
alternative;
construction;

Abstract

The aim of this essay is to address some of the aspects of the Bridge alternative and to examine the conclusions reached back in 1995 over the feasibility of such a solution.

Although having been left aside for decades, the Bridge Solution of the Strait of Gibraltar Crossing Project has been brought back to life as an available alternative to close the gap between the two continents, being the reason to have recently detected some impediment down into the lower layers of the site laying grounds. All of which has revealed further geotechnical issues to tackle.

Given the current level of development the Tunnel solution has reached, the 20-year-old Bridge solution needs to be fully updated in order to catch up with the former.

As well as taking into consideration the new trends present in the state of the art on design of structures, the Bridge solution would also entail updating construction procedures if it is to incorporate all the potentialities offered by: (1) related tools; (2) machinery; and (3), many new ideas which, coming from distinct industrial sectors other than the public works', have worked their way through to the construction field. Furthermore, it would be necessary to bear in mind the ceaseless development materials science is going through, which involves constant increases in both levels of resilience and number of characteristics such materials present.

1. INTRODUCCIÓN

Describir aunque sea de forma somera, la compleja casuística que agrupa al conjunto de tareas y actividades ligadas a una obra como la que aquí se plantea para el paso del Estrecho de Gibraltar a través de un puente rebasa, con largueza, la extensión que pueda dedicarle un simple artículo como el que aquí se presenta, necesariamente limitado en cuanto a su extensión. La pretensión y el hecho de hacerlo en esta publicación requieren por ello de algunas consideraciones previas.

En primer lugar, el texto del artículo se ha centrado en la actualización de métodos y procedimientos que ya se plantearon en el anteproyecto del Puente del Estrecho de Gibraltar, redactado a instancias de las Administraciones marroquíes y españolas, y a cuyo planteamiento constructivo general este artículo se ciñe.

Por otro lado, existen muchas vertientes de la construcción de grandes obras, fundamentalmente las que tienen que ver con el diseño de la organización a movilizar, con el emplazamiento de los tajos a una y otra margen del Estrecho, o la envergadura de los medios de producción

* Autor de contacto: pablo.diaz@cedex.es

[1] Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, Madrid, España.

puestos al servicio de la obra, que escasamente pueden ser cubiertas por otros expertos que no provengan de un altamente tecnificado sector de la construcción, y el español puede recibir ese calificativo sin duda alguna. En nuestro descargo hay que decir que esto es algo que ya se ha hecho, recientemente además, a lo largo de las Jornadas celebradas en los meses pasados en Cádiz, Tarifa y en las instalaciones del CEDEX en Madrid, organizadas por este organismo en conjunción con la Sociedad Estatal competente en este caso (SECEGSA), con ocasión de la presentación de los documentos relativos a la cooperación transfronteriza incluidos en el proyecto TTGEM. Efectivamente, se contó en tal ocasión con la participación de expertos de varios países para cubrir muchos de los aspectos suscitados por la construcción de una obra tan apasionante.

Pero quedaba por resaltar una vertiente que, partiendo del planteamiento constructivo de décadas atrás, pusiera el acento en los avances técnicos y científicos ligados al estado del arte de la construcción producidos en estos años y revelase en mayor detalle el reto tecnológico que significa abordar una iniciativa tan gigantesca. A veces tal percepción va ligada a operaciones requeridas por las obras cuya incertidumbre en cuanto a la posibilidad de su materialización amenaza la viabilidad del proyecto, otras requiere tomar prestados procedimientos ideados para otros fines en distintos sectores industriales o empresariales, en definitiva, se trataba de profundizar en todas aquellas maniobras o actividades que se planteaban en el límite de lo factible.

El Proyecto del Puente sobre el Estrecho está salpicado de situaciones de este tipo, probablemente más de las que seamos conscientes, y algunas de ellas son las que examinaremos a continuación. A lo largo del artículo trataremos en primer lugar de las cimentaciones, las cuales constituyen uno de los mayores retos a abordar, el de cimentar los pylonos o torres a 300 metros bajo el mar. La propia construcción de las torres enclavadas en medio del Estrecho será objeto también de atención en ese sentido. El tendido de los cables maestros o catenarias, incidiéndose especialmente en la materialización del cordón-piloto que enlaza todas las cabezas de lado a lado del estrecho, viene a continuación. Seguirá el planteamiento y ejecución del tablero con su secuencia de montaje y manejo operativo de medios marinos auxiliares; para terminar con algunas consideraciones desde el punto de vista constructivo de la sección transversal y el comportamiento del puente ante las solicitaciones, fundamentalmente las debidas al viento, a las que está sujeto durante la fase constructiva.

Figura 1. Emplazamiento previsto para el cruce del Estrecho.

Nadie tiene experiencia en la construcción de puentes de más de 3500 metros de luz, por más que sobre el papel otros proyectos se vayan aproximando a esas magnitudes en distintos puntos del planeta. Por ello la extrapolación a nuestro caso pasa por el análisis de las experiencias acumuladas en las obras de los grandes puentes realmente construidos en Europa y, sobre todo últimamente, en el extremo del continente asiático. De todos ellos y de las soluciones aplicadas a los problemas que sus constructores han tenido que enfrentar somos por tanto deudores en nuestro ejercicio.

2. ANTECEDENTES

Del examen del anteproyecto del puente redactado en el año 1995, al que nos referiremos como solución APP-28, se pueden extraer algunas consideraciones constructivas relacionadas con el proyecto. Sobre todas ellas destaca la siguiente consideración genérica que da pie a todo el desarrollo ulterior de la solución:

> *Les méthodes de construction n'ont pas posé de problèmes notoires. La construction et l'installation de fondations en eaux profondes, l'assemblage de sections d'acier et la traction des câbles sur une hauteur de plus de 500m peuvent être copiées sur des méthodes actuelles et peuvent êtreadaptées à la solution de référence*

Lo que viene a significar que el planteamiento constructivo, a nivel de anteproyecto, no preveía enfrentarse a ningún impedimento determinante durante el desarrollo de las obras.

Así pues, el desarrollo de la solución puente quedaba abierto a la actualización del proyecto en todo lo que se refiere, no sólo a la justificación de precios tras estos años transcurridos, sino a cuantas innovaciones de diseño pudieran revelarse en los años posteriores y a la aplicación de métodos contrastados y de avances en el estudio de la ciencia de los materiales y sus elementos auxiliares de puesta en obra y control, en definitiva al incremento de productividad en todas las múltiples y variadas operaciones que conlleva acometer un tarea de esta envergadura.

A grandes rasgos, de las consideraciones constructivas establecidas por la APP-28 se pueden entresacar los siguientes datos:

En el capítulo de Cimentaciones propone hasta dos sistemas distintos de dragado, capaces ambos de alcanzar un rendimiento de hasta 20.000 m3/día. Cuenta para ello con el desarrollo futuro de un, entonces incipiente, sistema de posicionamiento, lo que luego sería el Global Positioning System (GPS), capaz apenas de garantizar en aquel momento una tolerancia geométrica para el dragado en el centro del estrecho de hasta 1 metro (lo que ha quedado afortunadamente superado con creces en el momento presente). Tras consideraciones someras en torno a la extensión del manto de escollera de protección, aconsejaba la ejecución individualizada de los cajones de cimentación, por resultar el manejo del conjunto excesivamente trabajoso e incierto, dotando por el contrario de una cimentación temporal a cada uno, según un proceso al parecer empleado habitualmente en Australia (sic). Una vez solidarizadas las componentes, el remolque y practicaje del conjunto de las cimentaciones requería esfuerzos y adaptaciones importantes, así como el

fondeo de campos de boyas de amarre adecuadas, pero no planteaba dificultades insalvables.

Figura 2. Guiado de cimentación.

Los párrafos dedicados a la construcción de los Bloques de Anclaje de las catenarias principales son escuetos y tampoco merecen aquí mayor comentario por tratarse de obras ejecutadas casi en seco, que caen más bien en el ámbito de la construcción convencional, por más que sus dimensiones fuesen en aquel momento inusuales.

Idéntico carácter tienen los dedicados a la construcción de los Pylonos, aspecto que se resolvía desde el punto de vista constructivo recurriendo a la prefabricación, transporte y erección de las partes mediante grúas flotantes (sea-derrick) cuya evolución de capacidades y prestaciones también viene siendo favorable en los últimos tiempos como así ocurre también con los medios de elevación vertical (heavy lifting).

De los dos Sistemas de Sustentación presentes en el diseño, a saber, los cables principales o catenarias y los secundarios (las péndolas de suspensión de las dovelas) se ocupa el APP-28 apenas de los procedimientos de construcción del primero. Por un lado las sillas de cabeza de pilas, dispuestas para recibir los cables pasantes, cuya colocación se prevé mediante izado por grúas de tope o sistemas de izado de elementos pesados y por otro el tendido, más crítico, de los cables portantes entre pilonos, distantes entre sí unos 3.350 metros. Recurre para esto al tendido de un torón piloto que afianzan a su vez los cables provisionales de montaje, con el mismo procedimiento que el que figuraba en el puente japonés Akashi-Kaikyo de 1.990 m de luz y cuyo proyecto estaba en marcha en aquel momento. La optimización de todo el sistema de montaje, haces de cables de rigidización incluidos, con distintos ángulos y posiciones ya se planteaba en ese momento. El torón piloto conectado al cable fabricado in situ se tendía pasando sucesivamente por las cabezas de pilas, anclándose finalmente en los macizos antes de ser reacomodado para conformar una sección transversal sensiblemente circular. Finalmente se completaba con la instalación de los cables, la protección y la fijación de las péndolas.

En cuanto al Montaje del Tablero el pre-diseño de la APP-28 preveía una dimensión de dovelas de 52 m que comprendía los dos tableros gemelos separados siendo el peso total a manejar en un ciclo de montaje de 700 t. Para fijar ese parámetro de diseño tan relevante en las operaciones de montaje no describía en detalle el sistema de izado proyectado, más allá de establecer que debería estar soportado en última instancia por los cables principales.

Desde la última década del pasado siglo, en la que viene a datarse la versión definitiva de la APP-28 el aumento de las luces principales en las propuestas de puentes enlazando islas y continentes no ha hecho sino crecer, materializándose varias de ellas en lo que hoy son, tras el Humber Bridge en el Reino Unido, los puentes de Tsing Ma en Hong-Kong, Great Belt East en el mar del Norte, Runyang sobre el Yangtzee y el de mayor luz construido hasta la fecha, el puente Akashi Kaikyo, enclavado en el cruce sobre el mar de Seto en Japón, puentes que sancionan con su existencia la solvencia del avance incesante de los procesos constructivos de los grandes puentes.

3. EL PROCESO CONSTRUCTIVO Y ÚLTIMOS DESARROLLOS TECNOLÓGICOS DE APLICACIÓN A LA SOLUCIÓN PUENTE

Las actividades ligadas a la construcción de cualquier puente intervienen en la decisión sobre las tipologías y el diseño de los elementos estructurales en mayor medida cuanto mayores son las dimensiones de la obra, con lo que el proceso constructivo es en estos casos una parte decisiva en la elección de los parámetros de diseño.

Las tipologías de puentes de grandes luces, cuyas dimensiones no han dejado de crecer en los últimos años estableciendo récords crecientes, son fundamentalmente los puentes atirantados y los puentes colgados.

En lo relativo al sistema de construcción, los primeros admiten aún variaciones significativas. Efectivamente, los puentes atirantados son en ese sentido estructuras autoancladas desde las primeras fases de su construcción y su evolución dentro de ese esquema estructural admite variantes constructivas, respondiendo cada una de las fases a un esquema de atirantamiento distinto que va evolucionando durante el proceso, normalmente mediante voladizos sucesivos, pero que converge, a medida que se va complicando, hacia la situación final de servicio deseada. Al poder llegar a ella por distintos caminos el proceso puede ser objeto de estudio, con su aspecto económico incluido, dando como resultado una secuencia optimizada en cuanto a conveniencia técnica y también en cuanto a costes. Los puentes atirantados han rebasado ya hace algunos años el umbral del millar de metros de luz principal.

Sin embargo esto no ocurre igual en el caso de los puentes colgados o suspendidos, únicos posibles en el momento actual cuando se trata de salvar luces del entorno de los 3,000 metros. En efecto, aunque compartan con los anteriores puentes atirantados el elemento estructural básico constituido por cables de acero en tensión, el puente suspendido tiene como característica principal la de recurrir a anclajes externos entre los cuales ha de tenderse, apoyándose en las cabezas de las torres, el cable principal del que depende la estabilidad del conjunto. Se puede decir entonces, a diferencia de los esquemas resistentes evolutivos del puente atirantado, que el esquema estructural del puente colgado no aparece como tal hasta el último momento, cuando las grandes catenarias ya se han tendido, ancladas en los respectivos macizos de anclaje y conectadas por supuesto a las coronaciones de los pylonos.

La secuencia constructiva es por ello en estos casos sumamente rígida: secuencialmente hay proceder a la construcción completa de los macizos de anclaje y las torres,

como tajos totalmente independientes y muy alejados entre sí, antes de abordar el tendido de los cables principales y el montaje de las dovelas suspendidas de las péndolas, sin que pueda avanzar simultáneamente el montaje del tablero.

Debido a lo anterior el rendimiento total del proceso se ve afectado por cualquier eventual retraso en las sucesivas tareas, demora que se va acumulando en cascada al procedimiento conjunto.

Los macizos de anclaje en las márgenes son en nuestro caso elementos de dimensiones extraordinarias, y aun no siendo obras que se vayan a realizarse totalmente en seco no presentan una dificultad especial salvo la asociada a su tamaño. La construcción de las cimentaciones de las pilas, sí que hemos visto que es especialmente difícil por su tamaño y por encontrarse sumergidas a más de 250 metros.

Al tratarse aquí del estudio de los procedimientos constructivos exclusivamente, dejando aparte las mejoras basadas puramente en las ideas de diseño y características de los materiales de construcción constitutivos, las referencias se ceñirán a los logros y ventajas contrastados en los puentes realmente construidos, sin apoyarnos apenas en propuestas en fase de proyecto o pendientes de realización, por más cercanas que puedan éstas resultar como sería el caso de los puentes de Djibuti en el Mar Rojo y del estrecho de Messina aún pendientes, frente a las realmente construidas estructuras del mar de Seto en el Japón con el puente de Akashi-Kaikyo a la cabeza.

3.1. Tendencias en la construcción de las cimentaciones

El reto de cimentar en el medio marino estructuras cada vez mayores ha sido una constante durante cientos de años de historia a lo largo de la construcción. Iniciándose con la necesidad de construir faros adentrándose en el mar, ha servido de base tecnológica para la materialización de otros tipos de elementos como los muelles y, claro está, las sustentaciones de los puentes que cruzan los mares. En nuestro caso, la construcción de las cimentaciones constituye el primer reto, y cabría decir que uno de los mayores, si no el mayor, del conjunto de operaciones conducentes a franquear el paso del Estrecho a través de un puente. A describir tal casuística dedicamos los párrafos posteriores.

Hay que reseñar, no obstante, que en los años que median desde el planteamiento de la solución puente del enlace a través del Estrecho de Gibraltar en la década de los noventa del pasado siglo hasta la actualidad, el avance en el conocimiento de las técnicas constructivas ligadas la cimentación de puentes como el que aquí se plantea ha venido guiado por un desarrollo, sin precedentes, de un sector industrial no directamente relacionado con la construcción clásica, a saber: la explotación de yacimientos de hidrocarburos subyacentes al lecho marino situados en localizaciones arbitrarias en altamar.

La disparidad de emplazamientos de estos depósitos naturales en los grandes océanos, desde las Falkland Islands, el mar del Norte europeo, las costas de la península del Labrador y los Grandes Bancos centro-atlánticos, hasta otras localizaciones en zonas tropicales del Mar del Sur de la China y del mar del Japón (Malampaya en Filipinas) ha traído como consecuencia la depuración de los diseños bajo condiciones de explotación muy estrictas. Además de los criterios clásicos relacionados con la capacidad portante de los terrenos subyacentes que han de ser tomados en consideración, como la estabilidad al vuelco, el deslizamiento lateral con o sin giro del pylono, el hundimiento de la cimentación o la licuefacción de los terrenos bajo las estructuras off-shore, tales cimentaciones han de estar diseñadas para soportar acciones cíclicas muy severas ligadas a la dinámica del medio marino en que se encuentran enclavadas. Particularmente, a la presencia de trenes de oleaje de altura significante de más de treinta metros con frecuencias cercanas a los 0,065 Hz., y con valores extremos aún mayores para la altura de ola. También a la aparición, durante los grandes temporales, de vientos de 45/50 m/s, considerados como valores medios horarios, y factores de racha que llegan a los 60/75 m/s (215/270 km/h), es decir cercanos a los valores de los mayores huracanes. Las acciones sísmicas que han de soportar son las propias de posiciones situadas en las fronteras entre placas continentales que, como el caso de las del sudeste de Asia, son de las más activas que se conocen. Es decir, condicionantes que, salvo los originados por la acción de los hielos en los emplazamientos más críticos del Ártico y el mar de Barentz, son aquí de aplicación rebasando sus parámetros ampliamente los propios de la localización geográfica que aquí nos ocupa, es decir, la del Estrecho de Gibraltar.

Las soluciones adoptadas para el establecimiento y anclaje de las plataformas petrolíferas se pueden agrupar en media docena de tipologías aproximadamente: el tipo D G Doris, McAlpine Sea, ANDOC Type, Condeep y CGS que repasaremos someramente a continuación.

La plataforma D G Doris de patente francesa fue la primera en ser probada en el Mar del Norte y consistía en una agrupación de cajones sumergidos hechos solidarios para funcionar como un conjunto mediante tendones pretensados.

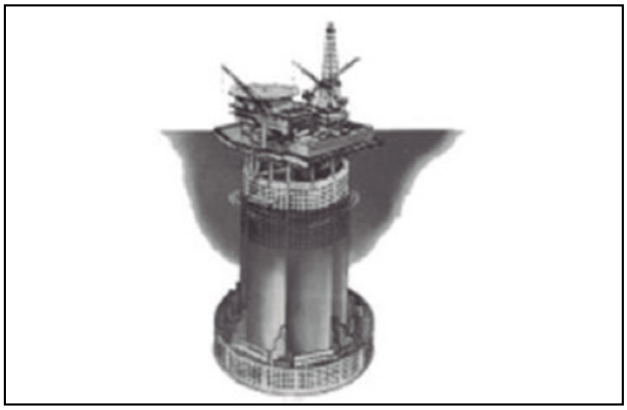


Figura 3. Plataforma DoRIS.

Otro planteamiento de la época fue la plataforma ANDOC, proyectada en Escocia, que representó el intento británico de competir con los desarrollos de procedencia nórdica cuya metodología finalmente se ha impuesto en la explotación de los yacimientos más profundos del mar del Norte, quedando subsumida en ella al igual que la McAlpine con la que está directamente relacionada (Mc Alpine no es sino un intento más de replicar la tecnología CONDEEP).

Han existido otros intentos como la plataforma CGS de Arup que se planteó como totalmente provisional y desmontable y que ha sido probada en algunos campos petrolíferos en las Islas Filipinas aunque de cara a su utilización como cimentación permanente tiene un interés escaso.

Pero fundamentalmente, la tipología que se ha impuesto en los campos gasísticos y petrolíferos del Troll del mar del Norte, y la que ha empujado al alza los valores de los parámetros de diseño y consecuentemente las dimensiones descomunales que estas estructuras están adquiriendo, es la denominada plataforma tipo CONDEEP, acrónimo que responde a "Concrete deep water structure". El último y más reciente desarrollo del concepto recibe a su vez una nueva denominación, CGBS (ó CGS) siglas inglesas de Concrete Gravity Base Structures.

Condeep (Concrete deep water structure) está concebida como una estructura de hormigón conectada al fondo marino por el procedimiento de succión activa que examinaremos a continuación en un posterior apartado. La última totalmente construida es la denominada Condeep Troll A (la Heidrun Tlp no reposa en el lecho marino y está fondeada mediante un sistema de anclas y cables) y está enclavada a una profundidad de 302 metros en la zona oriental del Troll (Troll es el nombre asignado en Noruega a este yacimiento tomado del nombre de la divinidad demoníaca clásica de la literatura escandinava).

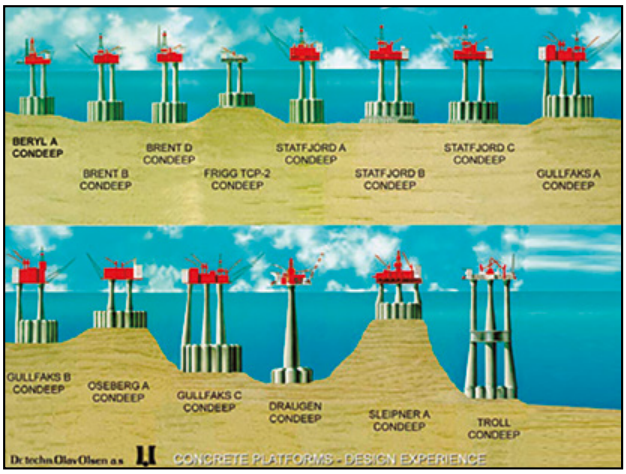


Figura 4. La experiencia noruega (Plataformas CONDEEP).

Es la mayor construcción jamás transportada sobre los mares y la cuarta mayor estructura erigida en el planeta.

El sistema de succión activa implica la disposición de cuchillos (skirts) de anclaje en el terreno del fondo marino que penetran hasta 36 metros en el estrato superior del lecho, rebasando el anterior récord establecido en 22. Las cavidades entre celdas van rellenas de hormigón. La altura total de la plataforma de 475 m. aunque no sea éste un parámetro relevante en la aplicación que aquí se persigue.

Figura 5. Plataforma Troll A en ruta.

El proceso constructivo de la plataforma requiriere los siguientes pasos:

- Proyecto, inspección y ensayos
- Preparación de fondos y tests de flotabilidad.
- Transporte y relleno tras colocación en el emplazamiento hasta que los cuchillos contactan con el fondo en el punto y posición indicados.
- Proceso de succión activa

El sistema de succión activa se beneficia de ventajas añadidas de cara a la construcción de la cimentación, ya que los cuchillos se aprovechan como encofrados perdidos en la inyección de lechada, detalle muy importante a esa profundidad. Además juegan un papel crucial en la nivelación de la estructura conjunta del cimiento y la pila al tiempo que protegen el conjunto de una posible socavación producida por las corrientes submarinas constituyendo un freno a los movimientos transversales.

En todo el proceso de construcción de estas cimentaciones el momento crítico que marca la viabilidad operativa aparece durante el hundimiento de la plataforma, instante en el que cualquier irregularidad del terreno del lecho puede punzonar la losa inferior de la estructura con antelación a la operación de su relleno e inyección, arruinando todo el proceso. Una vez salvado ese momento el resto de las operaciones están más controladas.

3.2. La succión activa

La necesidad de hincar en el terreno del lecho marino los cuchillos mediante los que la cimentación de la plataforma se empotra en el terreno es otro de los puntos clave del desarrollo de la tecnología constructiva de estas estructuras. Numerosas han sido las soluciones propuestas que finalmente se han materializado a través del concepto de succión activa, tal como se presenta en el trabajo de T. Saito (et alter) aplicado al cruce de los estrechos. El rango de profundidades para su desarrollo también rebasa los 300 metros de calado, utilizando la aplicación de presión hidrostática de forma escalonada. Requiere una profundidad mínima de operación que en el caso que nos ocupa es de sobra suficiente.

El sistema de cimentaciones por cuchillos de succión (skirt suction foundations) consiste en la construcción, bajo los depósitos cilíndricos agrupados de que se compone, de unas pantallas o cuchillos inferiores que contornean la contra-bóveda inferior de los cilindros. El cuchillo es un elemento similar al de los clásicos cajones indios de cimentación.

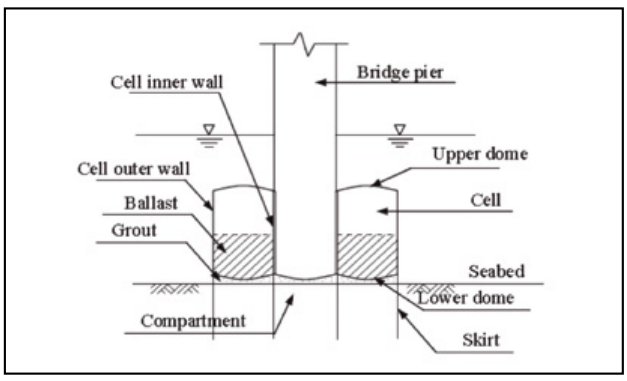


Figura 6. Esquema de succión activa.

El efecto de succión se aplica mediante variaciones en la presión hidrostática a través del accionamiento de bombas que intercambian caudales entre los distintos compartimentos bajo las células o depósitos. Como resultado del proceso se producen los siguientes efectos:

1. Una reducción significativa en la resistencia a la penetración del cuchillo. Durante la penetración el bombeo ocasiona depresiones en los compartimentos accionados y redirige un flujo de filtración que se activa en el terreno subyacente ocasionando una merma en la resistencia del terreno en el contacto con la punta del cuchillo, lo que favorece el hendimiento y reduce el rozamiento interno en el los terrenos. Cuando se trate de terrenos arenosos o lechos de grava el efecto es altamente beneficioso reduciendo la resistencia a la penetración a prácticamente cero.
2. Fuerza de penetración adicional. Al evacuar el agua de los compartimentos, la succión proporciona una fuerza adicional descendente. Tal acción es válida tanto en suelos arenosos como en arcillas.
3. Nivelación de la estructura. Al ajustar la presión hidrostática en los distintos compartimentos bajo las células-depósito durante el hendimiento de los cuchillos, es posible controlar la inclinación ante posibles desvíos de la vertical provocada por la distinta naturaleza de los suelos o las pendientes irregulares del lecho jugando juiciosamente con las diferentes presiones aplicadas a cada célula. De nuevo aquí la idea viene tomada de la ejecución de los antiguos cajones indios, si bien utilizando una acción hidrostática mecanizada a gran escala.

La aplicación La aplicación de este fenómeno a la construcción de cimentaciones de puentes se apoya en los aspectos conceptuales que se acaban de exponer y que se benefician además de lo siguiente:

1. Reducción de los asientos producidos en la pila durante los años de servicio. Durante la penetración por succión activa se aplica una notable carga vertical descendente a la subestructura que actúa como una precarga consolidando los terrenos del lecho marino subyacente. Si la carga de succión rebasa o se asemeja a la carga permanente que luego va a recibir la torre o pylono el asiento remanente es menor, al haber quedado en cierto grado preconsolidado durante la fase de succión con lo que su periodo activo es más reducido. Takashi Saito (et alter) han llevado a cabo experimentos concretos que garantizan este efecto.
2. Disminución del periodo constructivo dedicado a las torres. Aunque el incremento de productividad sugerido por este efecto haya de ser repartido entre el conjunto de las tareas relacionadas con la erección de todos los elementos del puente, la contribución en tal sentido no deja de ser notable y se basa en la prefabricación en dique seco de todos los componentes de la cimentación (cuchillos, células- depósito, etc ,,) que son ensamblados y remolcados a sus respectivos emplazamientos. Ello tiene además la ventaja, tan importante en el caso del Estrecho de Gibraltar, de, por un lado, no ocupar grandes zonas balizadas otras que las ya reservadas al tráfico marítimo en torno a las torres y por otro reducir en el tiempo las operaciones de construcción "in situ" al mínimo.
3. Ahorro en la preparación de los fondos. La succión activa tiene notables ventajas en lo que se refiere a los condicionantes de los terrenos de cimentación. Por un lado la nivelación de las pendientes irregulares y accidentes en la topología submarina se compensan durante la aplicación del procedimiento, evitándose dragados dificultosos y compensaciones de ese tipo. El procedimiento implica una autocompensación y relleno con suelos blandos. Las vibraciones y reacciones presentes en cualquier otro proceso mecánico de perforación, con su afección al avance de otros tajos simultáneos, se evitan aquí completamente. Y por último, hay que reseñar también que los efectos de socavación que, aun fuera del rango de acción del oleaje puedan ser debidos a las corrientes dominantes del Estrecho, resultan de nuevo notablemente reducidos.

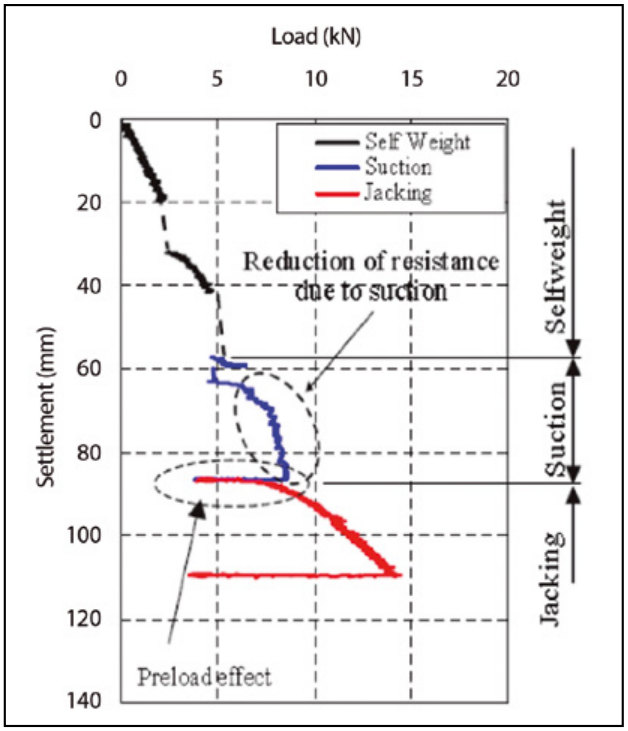


Figura 7. Efecto precarga en la succión activa.

Las contrapartidas del método, derivadas de la instalación de dispositivos necesarios para aplicar la succión son, por otra parte, escasas aunque puedan ser relevantes en algún punto, dadas las condiciones existentes en el Estrecho. Por un lado su posibilidad de aplicación se reduce a los suelos más o menos cohesivos, lechos arenosos y gravas. Otra limitación ligada al calado mínimo de agua (10 metros) no es aquí relevante.

Aunque no exista, al menos hasta donde seamos conscientes, ningún experimento que sancione la mejora que se esgrime en el comportamiento de la respuesta del conjunto ante posibles acciones sísmicas, un ensayo de tales

características no sería excesivamente difícil de implantar en modelo reducido aprovechando una instalación de ensayo de mesa sísmica.

Sí hay constancia, por el contrario, de otro tipo de experimentos realizados, tendentes a comprobar la facilidad de nivelación (recuperación de la vertical en caso de desalineaciones) o la reducción de asientos por precarga debida a la succión, ensayos por otra parte más sencillos de realizar que el apuntado en el párrafo anterior.

Durante la construcción por fondeo de las cimentaciones, el diseño de células- depósito y cuchillos (dowels & skirt) ofrece otras notables ventajas:

1. Los cuchillos cumplen una doble función como encofrado en el procedimiento de inyección de lechada, evitando fugas al exterior del recinto. El hecho de que exista ese compartimento entre el cajón y el lecho propicia también que la inyección de lechada se pueda llevar a cabo de forma controlada evitando la segregación de los componentes y el lavado de la mezcla bajo las condiciones de la dinámica submarina.
2. Cumplen también una función primordial en la nivelación de la estructura durante la puesta en obra. Esta ventaja es especialmente valiosa cuando en el lecho submarino exista una pendiente apreciable.
3. Cuando las corrientes submarinas sean perceptibles en los fondos, lo que puede ser el caso en algunos emplazamientos de pilas, la especial disposición de los cuchillos contribuye a prevenir el efecto de la socavación, reforzando las protecciones proyectadas inicialmente para tal fin.
4. Por otro lado la existencia de los cuchillos evita en cierto grado que, en el momento del contacto con el fondo se produzca un contacto puntual entre cualquier posible protuberancia del terreno y la losa inferior, con la subsiguiente concentración de tensiones susceptible de producir daños que comprometan o dificulten las tareas de construcción.
5. Y por último, y no menos importante, la existencia de cuchillos representa una restricción ante cualquier esfuerzo transversal inusitado durante la etapa de servicio, sin perjuicio de las estructuras dispuestas a tal fin en el proyecto constructivo.

No obstante el elemento más importante, y que más hay que preservar, durante la construcción y puesta en obra es la losa del fondo que recibe todo el juego de presiones y contra-presiones durante el fondeo de la plataforma de cimentación. En este sentido hay que reseñar que, durante el hundimiento a las profundidades requeridas, se contempla en la actualidad que las presiones que ha de soportar la losa rebasen los 200kN/m2. Esto representa un parámetro crítico en el diseño de la cimentación y su procedimiento constructivo depende en gran medida del valor que se acepte para ese parámetro. Como se ha explicado en apartados anteriores el avance en la tecnología de materiales en lo que se refiere al hormigón está en continuo progreso y permitirá en el momento de la construcción abordar el procedimiento constructivo con mayores ventajas que las ahora admitidas.

Como quiera que durante la construcción los efectos arriba mencionados se presentan en el momento del contacto con el fondo, a grandes profundidades, las necesidades de auscultación y monitorización del proceso requieren dispositivos fiables en esas condiciones, si bien las mejoras en la aplicación de esas técnicas y en la fabricación de esos dispositivos de auscultación permitirán, como cabe esperar del continuo avance en su conocimiento, abordar con garantías operaciones que hoy día se consideran excesivamente arriesgadas.

3.3. Erección de las torres ó pylonos

Una vez concluidas las cimentaciones el siguiente paso requiere disponer de los puntos de anclaje de las catenarias, tanto en los macizos situados total o parcialmente en las tierras de las márgenes como en los puntos elevados en coronación de las torres. Ya se ha señalado el carácter convencional de la construcción de los macizos, hecha la salvedad de lo extraordinario de su tamaño. Bajo este apartado nos ocuparemos directamente de los sistemas de erección de las torres o pylonos.

El anteproyecto de la solución APP-28 desarrolla el proyecto de las torres utilizando el hormigón como material constitutivo, aprovechando la adecuación del mismo para resistir los esfuerzos propios de estos elementos resistentes, cuales son los de compresión. Frente a la estructura metálica, que sería la otra alternativa, la solución propuesta resultaba más ventajosa dado el desarrollo en aquellos años de los medios de elevación disponibles. Efectivamente, el acero estructural aun resultando una estructura más ligera que la torre de hormigón, carece de la facilidad de moldeo y posibilidades de despiece de este último material. Con ello las piezas individuales en que ha de dividirse para su montaje resultan más pesadas y voluminosas.

En los años en los que se planteó el anteproyecto (década de los noventa) los elementos auxiliares de elevación vertical (grúas y equipos de heavy-lifting) no se habían diseñado para alcanzar las capacidades y precisiones de trabajo de que gozan los que están disponibles actualmente. Fue precisamente con ocasión de la construcción de los puentes del mar de Seto y otros similares en el continente asiático que estos elementos auxiliares se fueron desarrollando notablemente, tanto para las grúas montadas sobre elementos flotantes o sea-derricks como para aquéllas instaladas aprovechando el avance del trepado de los fustes. Así, los pylonos del Rainbow Bridge, de una altura total de 126 metros pudieron ser fraccionados en dos partes y montados sucesivamente mediante grúas flotantes capaces de izar y colocar estos fragmentos de 3,500 toneladas.

En el puente principal de la ruta de Kobe, referencia obligada por ser el mayor construido actualmente, se utilizó para las pilas el acero estructural como material de construcción, a pesar de encontrarse las pilas a una distancia relativamente cercana de la costa, ventaja de la que no se dispondrá en la construcción de los pylonos centrales del cruce del Estrecho, con lo que las actividades de las operaciones ligadas al hormigonado requerirán una mayor exigencia en lo que se refiere a medios auxiliares .

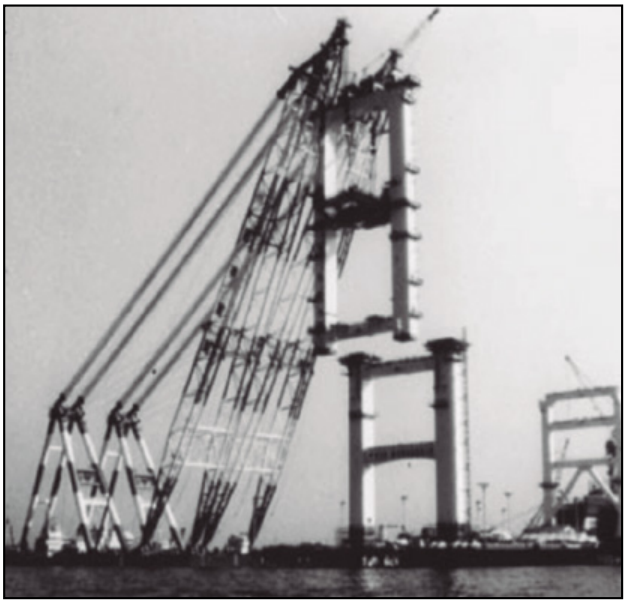


Figura 8. Izado de cargas pesadas.

Figura 9. Hormigonado en medio marino.

En el Akashi-Kaikyo se resolvió el montaje de los elementos verticales y diagonales mediante el uso de una sola grúa trepante asentada en un fuste tubular central rigidizado para controlar las longitudes de pandeo mediante riostras unidas a las diagonales de la propia pila.

Sin embargo el hormigón ha demostrado ser competitivo como material de construcción en otros casos notables como el Storebaelt East Bridge en el Báltico o el Tsing Ma Bridge sobre el Rambler Channel en la vía entre Hong-Kong Island y Chep Lak Tok Airport. La morfología de los elementos de hormigón resultantes puede conseguirse fundamentalmente por dos procedimientos: el encofrado deslizante y el trepante.

El deslizante implica un gran rendimiento al avanzar el encofrado de forma continua a la velocidad máxima que permita el fraguado del hormigón sobre el que desliza, mientras que el trepante lo va haciendo mediante pasos o trepas sucesivas, sin el apremio que implica el avance incesante del encofrado. En el primer caso se requiere un suministro de masa de hormigón ininterrumpido que normalmente requiere una situación del tajo muy próxima a tierra firme, no siendo esta condición tan estricta en el caso de los trepantes que permiten un suministro más discontinuo. Mediante el procedimiento deslizante fue construido el Tsing Ma Bridge, aunque este requerimiento de proximidad a la costa no se cumpliera completamente en la isla de Ma (el Tsing Ma Bridge recibe ese nombre al unir dos islas, la de Tsing y la de Ma, despoblada, situadas ambas en el mar del Sur de la China, cerca de los Nuevos Territorios de la entonces colonia británica de Hong Kong; a pesar de ello no es un puente basado en tecnología británica, sino japonesa; fue construido por Mitsui Corp.).

Figura 10. Montaje de pilonos con grúa trepante.

Otro requerimiento del avance por deslizamiento es la verticalidad de los fustes y la continuidad de las transiciones de sección. En el caso de de puente del estrecho de Gibraltar (y del de su heredero directo de Djibuti, propuesto para el cruce del mar Rojo) su diseño en forma de "A", inducido por el requerimiento límite al que ambos están sometidos por las luces principales, y por lo tanto formado por fustes inclinados unidos entre sí en la coronación y arriostrados por elementos horizontales, dificultaría notablemente, al menos en su rendimiento, la aplicación de este procedimiento.

En el caso del East Storebaelt, con sus torres erigidas a unos dos o tres kilómetros de la costa, con lo que para el suministro de hormigón hubo de recurrirse al transporte marítimo, la elección recayó en el sistema de encofrado trepante, siendo determinante en esta elección la desfavorable experiencia sufrida en la construcción de su homónimo West Storebaelt con idéntica fórmula de dosificación requerida, y cuya construcción se abordó en principio con encofrado deslizante. El sistema trepante se mostró como un método adecuado en las condiciones atmosféricas severas de latitudes tan septentrionales y en ambiente marino, con un rendimiento adecuado que permitió la erección de las torres en un plazo que apenas excedió de un año.

Figura 11. East Storebaelt, construcción de las pilas.

Cualquiera que sea el método de hormigonado elegido, la materialización de las riostras o vigas horizontales de los pilonos representará sin duda otro de los retos principales de la construcción. Si no pueden eliminarse, o reducirse merced a un nuevo rediseño, la existencia de estos elementos gigantescos, especialmente en el caso de los más inferiores, implica la instalación de una cimbra, con su encofrado, capaz de recibir el hormigón fresco y su posterior pretensado, todo ello en medio del mar y sin más apoyo que el de dos medios fustes inclinados en los extremos.

3.3.1. Exposición de las torres durante la fase constructiva

El esquema de cableado de los grandes puentes atirantados y suspendidos, además de constituir el elemento resistente del conjunto, dota a los pilonos de una rigidez en el plano longitudinal de la que carecen durante las fases previas del proceso constructivo. Por ello, tal como se ilustra a continuación en la descripción de los efectos presentes durante la construcción del nuevo puente suspendido del Firth of Forth:

> In a South-west wind of about 20 miles/h (32 km/h) the tower began to oscillate considerably, the movement at the top being estimated at several feet. The butt joints were opening and closing at the north and south faces, the opening of the lowest joint amounting to 0.05 in. ... with the tower at its full height and the climbing structure at the top, the sway culminated in a measured double amplitude of 7 ft 6 in. (2.3 m).

El pylono sufre durante todas las fases de construcción y hasta su cierre unos efectos dinámicos que si hubieran de limitarse dentro de los condicionantes del diseño definitivo encarecerían notablemente el proyecto. La vibración inducida por el viento, no necesariamente huracanado, es mucho más acusada en los puentes de torre metálica que en los de hormigón por la mayor ligereza y flexibilidad de los fustes y por ser su tasa de amortiguamiento, ligada también a la masa, mucho menor. En los puentes del mar de Seto fue necesaria la instalación de grandes amortiguadores provisionales para rebajar el umbral de amplitudes necesario para acometer los trabajos. Y en general es práctica habitual en estos puentes proceder a ensayar en el túnel de viento los pilonos aislados incorporando los resultados como parámetro retro-alimentador en el diseño. Todo ello lleva a un proceso interdependiente de estudio de procedimientos constructivos para los fustes y de diseño estructural que es necesario compaginar y tener en cuenta a la hora de definir la morfología definitiva de las torres.

En los puentes escandinavos del Báltico y del mar del Norte, más de treinta años después de la experiencia relatada en la cita anterior del Firth of Forth, se pusieron de manifiesto de nuevo problemas análogos. En el East Storebaelt Bridge, tercero en el rango de los puentes actualmente construidos, con una luz de 1.600 metros y altura de pila de más de 250 metros, se registraron oscilaciones del orden de los 25 cm con vientos que superaban ligeramente los 15 m/s medidos a una altura de 70 m., aunque dada la flexibilidad de los fustes ello no llegó a producir fisuras en el hormigón de las pilas. Para el puente del Estrecho de Gibraltar, con luces que para la APP-28 rondan el doble de las anteriores, si no se rediseñan al alza, lo que impulsaría en el mismo sentido las cifras ofrecidas anteriores y con rigideces presumiblemente mayores, las solicitaciones debidas al viento provocarán un estado de esfuerzos inducidos en el hormigón de las torres que habrá necesariamente que incorporar al diseño, por más que las resistencias mecánicas del hormigón hayan experimentado durante estos últimos años un incremento considerable y de que sean esperables aún mayores prestaciones en el futuro.

Figura 12. Ensayo en túnel de viento en fase de montaje.

En los casos de estos puentes escandinavos ha habido que estudiar el fenómeno mediante modelos físicos en túnel de viento, recurriéndose en algunos casos a la disposición de cables estabilizadores provisionales para controlar el fenómeno. En cuanto a los pylonos de los puentes japoneses del mar de Seto se ha optado, como se ha visto, por el acero estructural como material de construcción.

No obstante para reducir las oscilaciones en un pylono exento puede ser necesario instalar un sistema de arriostramiento compuesto de tirantes provisionales que enlace a todas o a parte de las torres, apoyándose en los macizos de anclaje. A medida que las catenarias se van construyendo el sistema provisional se va retirando.

3.4. Tendido de los cables maestros

Como se ha señalado en un apartado anterior el sistema constructivo de los puentes colgados está sujeto a una secuencia estricta de ejecución y ofrece pocas posibilidades de solapamiento de tareas. Las torres o pylonos han de estar construidas en su totalidad con los sistemas temporales de prevención de vibraciones dispuestos antes de tender las catenarias como paso previo a abordar la construcción del tablero.

El primer movimiento consiste en conectar un cable temporal muy ligero entre los macizos de anclaje pasando por la coronación de las torres. El hilo temporal habrá ser capaz de arrastrar a esa misma posición un cable de acero empalmado que servirá a su vez como guía para la disposición de las pasarelas o andariveles (catwalks), elementos que servirán de apoyo a la construcción de las catenarias definitivas cuya sección transversal está compuesta de cables de hilos o cordones de acero compactos dispuestos de una determinada forma en sección hexagonal.

Una vez culminada la construcción de dichos cables ya se estará en disposición de montar el tablero por fases, mediante el izado de las dovelas que han de quedar suspendidas de la catenaria mediante péndolas.

3.4.1. Conexión del torón-piloto

La tarea de tender un cable piloto entre las pilas constituye un reto tecnológico de primera magnitud, cuya acometida puede abordarse en principio mediante dos sistemas: por vía marítima llevando el extremo de pila a pila mediante una embarcación hasta el pie de pila para ser izado posteriormente a la coronación, o mediante un helicóptero que realice directamente la tarea de enlace en la cabeza del pilono.

El primer procedimiento presenta en este caso dos inconvenientes, a primera vista insalvables. Uno de ellos radica en el hecho de que durante el tendido de los cables piloto y los siguientes intermedios el espacio salvado por la luz del vano correspondiente habría de quedar cerrado a la navegación durante un intervalo de tiempo a definir. Y el segundo viene provocado por la profundidad de las aguas del estrecho. Por esta causa, a pesar de ser el calado del orden de los 300 m, con una luz de más de 3.500, no es descartable que el cable de acero tenga que ser acarreado en vilo (a pesar de que pueda reposar en el fondo en un a cierta longitud), con lo que la embarcación, que no puede modificar la tangente del ángulo con el que el cable pende del punto firme a bordo (única manera de modificar el esfuerzo en su componente horizontal) tiene que navegar en esas condiciones. Dicho de otro modo, el cable ejerce un efecto de retención en contra el sentido de la marcha y a medida que disminuye el ángulo de tiro aumenta la tensión con lo que o bien el barco se queda anclado o el material alcanza el límite elástico.

Por el contrario el helicóptero puede remontarse a una mayor altura, necesaria para que el ángulo aumente de manera que la componente horizontal de la tensión pueda reducirse, incluso rebasando momentánemente el objetivo. En el caso del Akashi Kaikyo Br., el tendido del cable piloto se acometió mediante este procedimiento del helicóptero, aunque la luz principal fuese sólo de 1990 metros frente a los 3.550 de nuestro puente del Estrecho; y aun así la capacidad mecánica del material de que estaba constituido el cable piloto fue el parámetro determinante de la operación seguida de la maniobrabilidad del helicóptero en esas condiciones.

Figura 13. Tendido de cable piloto.

El material elegido en este caso fue un cable sintético, el más avanzado de la época, con núcleo de aramida encapsulado dentro de un trenzado de poliéster y envainado en una corona de PEHD. El peso resultante era inferior al kilogramo, con un diámetro nominal de 10 milímetros, y con una carga de rotura superior a las 4,5 toneladas, con lo que se alcanzaba una eficacia en este sentido que resultaba ser de 6 veces la del acero trenzado.

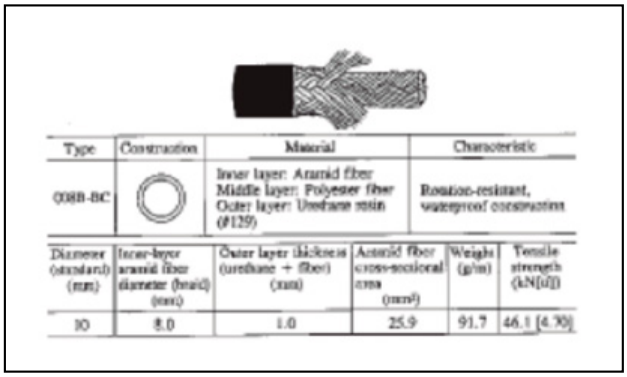


Figura 14. Características del cable piloto.

Para tender el cable piloto del Akashi Kaikyo hubo que recurrir al helicóptero de mayor capacidad de entre los comerciales disponibles en la época, ajustando su máxima impulsión con el efecto de retenida producido por el tiro del cable, cuyo ángulo venía a su vez controlado por la trayectoria y posición del artefacto en cada momento. Lo ajustado de las curvas de funcionamiento da idea del reto que aquella maniobra representó en su momento.

Las características de las nuevas fibras han ido incrementando sus valores en cuanto a capacidades mecánicas se refiere. No obstante y aun contando con la disponibilidad de un aparato (cuyas características presumimos que podrán alcanzarse al nivel requerido, bien sea a escala comercial o construyendo un prototipo) capaz de repetir esta maniobra en el Estrecho, cuyas luces principales superan aquéllas en una cifra que roza el 80%, el tendido e instalación del cable piloto supondrá, probablemente un esfuerzo tecnológico de la importancia que tuvo el anterior.

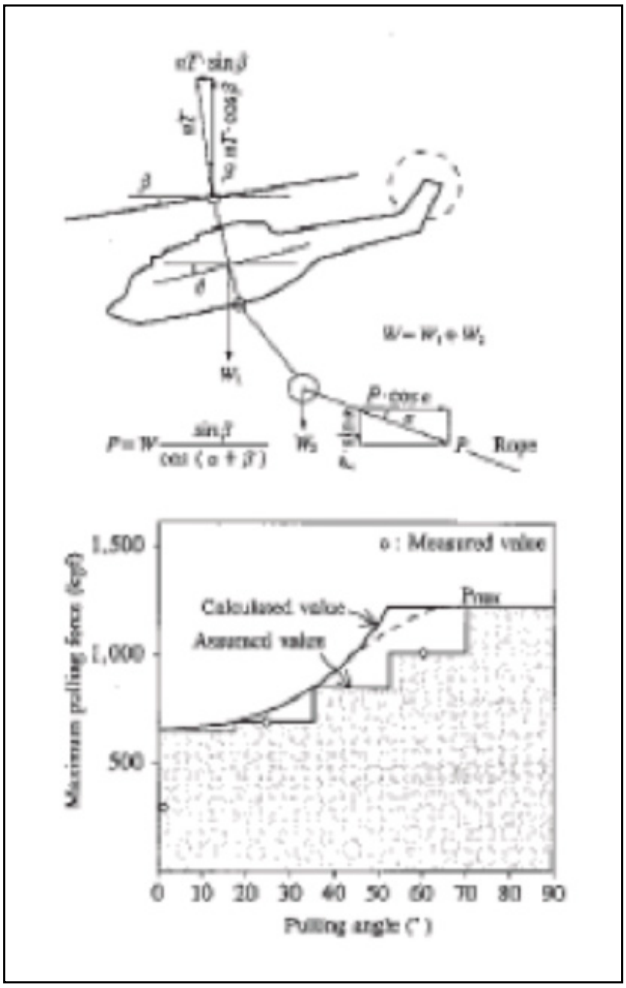


Figura 15. Ajuste del tiro en el cable.

Es poco probable, por otra parte, que las condiciones y derecho de paso del tráfico marítimo por el Estrecho de Gibraltar permitan plantear la operación con medios exclusivamente marítimos, cerrando el paso al tráfico por el Estrecho, ni siquiera vano a vano, con lo que el tendido del cable deja exclusivamente en manos del piloto del helicóptero una tarea que requiere, teniendo en cuenta la enorme tensión aplicada en cola del aparato, una gran habilidad y experiencia debido al enorme riesgo que conlleva para cualquiera de los trabajadores afectados por tareas de anclaje, sujeción y guiado del cable.

Efectivamente, durante el tendido del cable piloto del Akashi Kaikyo las variaciones de tensión en el cable arrastrado llevaron al aparato a funcionar próximo a los límites de inestabilidad, debido a los continuos desfases de trayectoria en un proceso de errores y correcciones acumulados, al variar la flecha de la catenaria

En la figura siguiente se muestran las discontinuidades en la tensión por esas causas (en la práctica el piloto experimentaba la sensación de encontrarse atado a un muelle a medida que avanzaba, pues tal es el efecto producido en la carga del tirante al variar la flecha).

Debido a todo lo anterior la maniobra de tendido, colocación y anclaje de cada uno de los cables de Aramida se prolongó cada vez durante horas, siendo la distancia a cubrir inferior a 2.000 metros.

En relación con la aplicación de estos procedimientos a la solución puente para el cruce del Estrecho hay que reseñar que, aun con los requerimientos de luces notablemente mayores, la tecnología de materiales ha evolucionado de manera muy favorable tanto en Europa como en Japón.

Así, en el Reino Unido se viene trabajando en la puesta a punto de trefilados de fibras paralelas de aramida en seco (sistema Parafil, desarrollado por Linear Composites). En Alemania el trabajo conjunto de Bayer AG y Strabag AG ha dado como resultado la puesta a punto del nuevo material Polystal para su aplicación al GFRP.

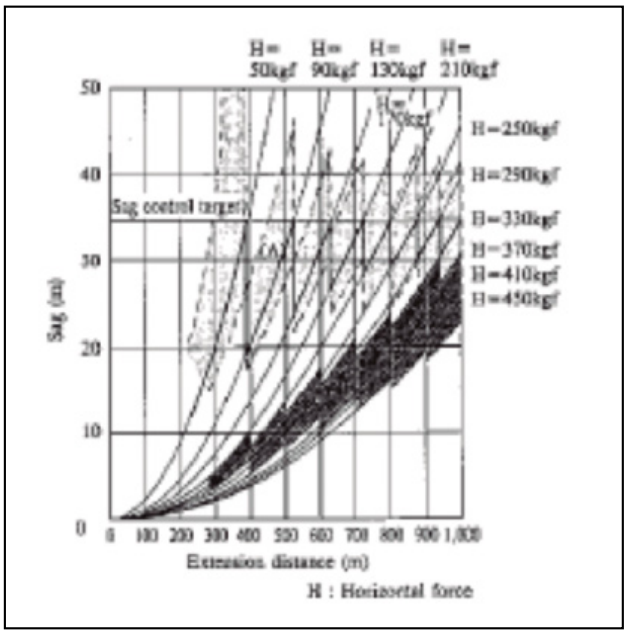


Figura 16. Escalones de carga en el montaje.

Más relacionado con el trenzado de cables ligeros de alta resistencia, BBR y el Laboratorio Federal de Investigación y Ensayo de Materiales (EMPA) han desarrollado un prototipo de cable ligero de fibras de carbono (GFRP), que sitúa la frontera de las características mecánicas requeridas en nuestro caso en un punto más favorable al de las prestaciones ofrecidas por los cables de Aramida del Akashi Kaikyo.

Las limitaciones al uso comercial de todos estos desarrollos, que impiden que su uso se haya extendido lo suficiente, no son relevantes en la aplicación que aquí se pretende. Por un lado van ligadas al elevado precio de la unidad de obra, insignificante en nuestro caso al tratarse de un solo torón y ser su medición muy reducida, y por otro a los avances en la lucha contra la corrosión de sus principales competidores metálicos. El carácter de elemento temporal del cable piloto descarta cualquier crítica a su utilización, hecha desde el punto de vista de la durabilidad (que en términos generales también existe, por tratarse de fibras susceptibles al ataque por exposición a las radiaciones UV).

3.4.2. Montaje del andarivel y cables principales

La construcción prosigue, una vez emplazado el cable piloto que se utiliza para arrastrar tras de sí otros cables de acero más gruesos, disponiendo un andarivel que se apoya en los cordones anteriores. Tiene éste como finalidad la de servir de sujeción y guiado de los cables principales que se montarán hilo a hilo conformándose la sección transversal de una determinada forma y de plataforma de trabajo para todas las tareas afectas al proceso (compactación del

paquete de cables, envuelta, engrilletado y colocación de las péndolas de las que suspenden las dovelas).

Cuando los cordones de la pasarela están completados y fijos, las cerchas transversales se deslizan desde la coronación de las pilas, tras lo cual se van completando las distintas partes de la sección transversal de la misma.

La pasarela, debido a su flexibilidad, se estabiliza por gravedad, aun siendo su masa muy ligera y está sujeta a movimientos y turbulencias debidos a la presencia de vientos de relativamente escasa intensidad por lo que se le añade un sistema de rigidización de tirantes que parten de las pilas y que a veces entran en conflicto con los gálibos requeridos por el tráfico marítimo inferior, por lo que pueden requerir un refuerzo consistente en aumentar la masa del andarivel.

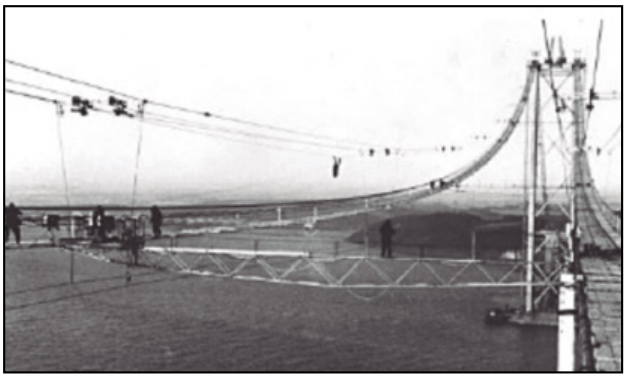


Figura 17. Montaje de andariveles (catwalks).

Las necesidades constructivas requieren elementos que proporcionen acceso entre las pasarelas cada cierto espacio lo que dificulta y retrasa las operaciones por la precisión requerida para el montaje.

La continuidad de los cordones de que se componen los cables de estos grandes puentes requiere recurrir a empalmes entre todos los componentes y en particular de los cordones de hilos (una bobina continua que abarcase toda la longitud del cordón resultaría inmanejable). Por eso las extrusiones de continuidad se han de efectuar en posiciones más o menos aleatorias de los cables mediante maquinaria montada en un impulsor (trolley) que ha de ser capaz de moverse por los andariveles.

La siguiente tarea consiste en enfilar cordones impulsados eléctricamente a través de un complejo sistema de polipastos que garanticen al mismo tiempo que la tensión en el cable activo (el extremo que se va enfilando) no se vea sometido a una tensión excesiva.

El sistema ha de garantizar, además, que todos los hilos paralelos estén sujetos a la misma tensión de montaje, lo cual (como en el caso de los cordones de un tirante en un puente atirantado) no ocurre de forma inmediata y ha de conseguirse ajustando la flecha del cable recién enfilado con idéntico valor al de los previamente construidos en un procedimiento que requiere tiempo y depende en todo caso de las condiciones atmosféricas. Por encima de los 15 m/s (54 km/h) de velocidad de viento no se ha conseguido asegurar la precisión y han de suspenderse los trabajos. En catenarias de las dimensiones de las planteadas en la APP-28 la propia vibración de los cables, necesariamente de amplitudes considerables, puede resultar un hándicap añadido en este sentido, lo que puede comprometer aún más, si cabe, el rendimiento del conjunto de los trabajos.

Figura 18. Plataforma de trabajo en cabeza de torre.

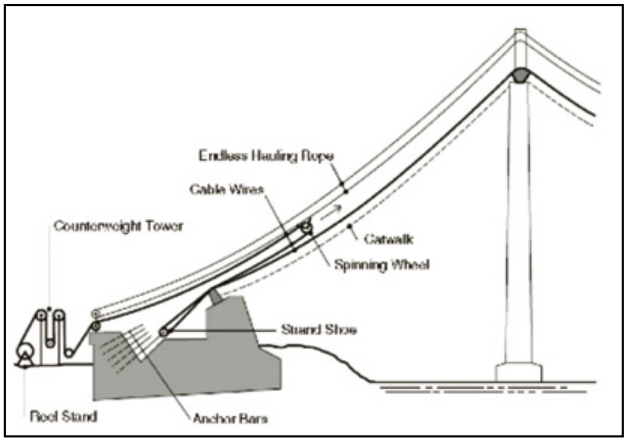


Figura 19. Sistema de impulsión de cordones.

La necesidad de igualar tensiones en los aceros del cable viene obligada, no obstante, más que por consideraciones resistentes del material, por la necesidad del ordenamiento en una sección compacta de las agrupaciones de torones en la sección transversal. Una diferencia de flecha de un metro no ocasionaría en un cordón enfilado una variación tensional fuera de tolerancias pero haría impracticables todas las operaciones posteriores de definición de la sección transversal compacta del cable, su engrilletado y la fijación subsiguiente de las péndolas sustentantes del tablero.

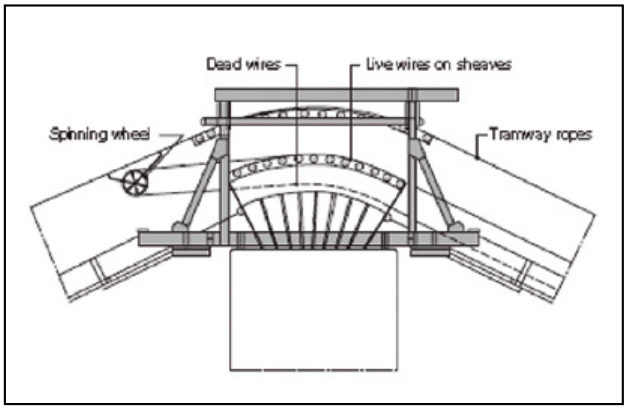


Figura 20. Silla y trolley en coronación de pilono.

Figura 21. Montaje de catenaria por paquetes de hilos.

Las correcciones destinadas a corregir la flecha de los cordones se efectúan mediante dispositivos instalados en la cabeza de las torres que son capaces de poner varios cordones en tracción cuando sea necesario.

Por otro lado las deflexiones y movimientos de los torones en el montaje los alejan del perfil inicialmente dispuesto para el andarivel, con lo que es necesario reajustar las tensiones en los cables portantes de ese elemento auxiliar, de manera que se aproximen a la situación de los cables principales en cada momento. Esto se consigue manipulando ciertos tensores instalados a lo largo del camino de andadura de los andariveles llamados cordones especiales de control (SCS en sus siglas inglesas) situados en el suelo de la pasarela. Claro está que acomodar todas estas operaciones en el diseño de un andarivel proyectado para más de 3.500 metros de luz puede situarnos de nuevo en los límites de diseño, habida cuenta de las capacidades mecánicas resistentes de los aceros actuales, y toda vez que, por otra parte, este dispositivo auxiliar está concebido como un elemento estructural ligero y flexible, sin que la posibilidad de aumentar en él la masa añadiendo sección de acero sea plausible.

Por otro lado, y por diversas razones, en el puente Akashi Kaikyo no se abordó la erección de las catenarias por el mismo procedimiento que en el Storebaelt Br., es decir, mediante el procedimiento de tensión controlada (derivado éste último de un procedimiento similar estrenado en el Shimotsui Seto Br. En 1.980). En el gigante japonés se implantó el conocido como PPWS que implica el montaje de paquetes prefabricados de más de cien alambres de 5 mm.

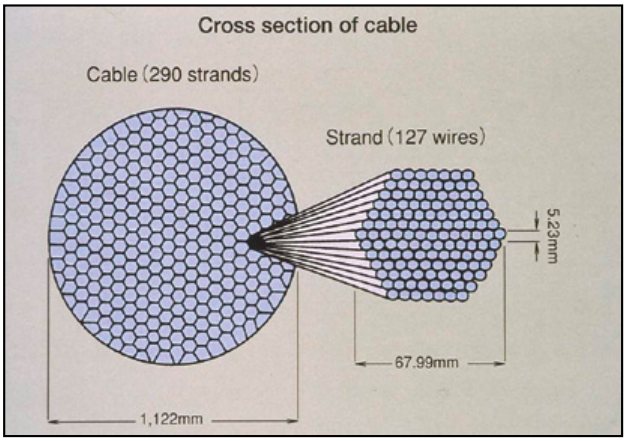


Figura 22. Sección transversal de la catenaria.

El procedimiento se apoya en una serie de rodillos previamente depositados en unos raíles dispuestos en el suelo del andarivel que son conducidos a los puntos de anclaje a través de unos cables de tracción. La adaptación del procedimiento para una luz de catenaria como la correspondiente a las luces previstas para el Estrecho necesita naturalmente de un estudio previo antes de ser planteada. El PPWS requiere por otra parte una disposición vertical del paquete de torones hexagonales, disposición que se va imponiendo frente a la clásica horizontal empleada en los puentes clásicos.

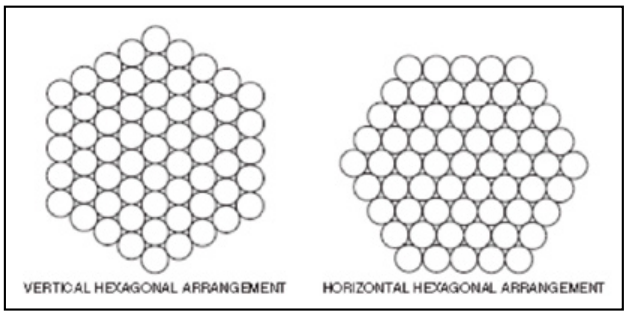


Figura 23. Esquemas de compactación de cordones.

En cualquiera de los dos casos se requiere una compactación general del paquete conjunto antes de proseguir con el engrilletado y la envuelta posterior antes de la fijación de las péndolas. La compactación en paquetes muy potentes como es el caso del puente sobre el estrecho de Gibraltar es requerida regularmente durante proceso, ya que por el efecto Poisson la presión de las bridas sobre la sección transversal del paquete se relajando a medida que el acero va entrando en carga, lo que constituye otra merma añadida al rendimiento esperado.

3.5. Construcción del tablero

La libertad de programación de tareas en los procesos constructivos de los grandes puentes es, como hemos señalado repetidamente a lo largo del texto, tanto más rígida cuanto mayores son las luces principales a salvar. En nuestro caso se reduce sencillamente a una secuencia de operaciones consecutivas, cada una de las cuales requiere la compleción de la inmediatamente anterior. Tras la construcción de las catenarias ancladas en los macizos, de las cuales penderá el peso total del tablero, el montaje se inicia con la fijación de las péndolas y, una vez que quedan suspendidas de los cables principales, con el izado de los fragmentos de puente o, también llamados por analogía, dovelas.

La primera tarea a acometer es la colocación de las péndolas, operación en la que la dimensión del conjunto de la obra ya no es tan relevante en cuanto a la dificultad de ejecución se refiere, más allá del hecho de la existencia de una mayor sección transversal de la catenaria a abrazar y de la longitud de las primeras péndolas próximas a las pilas. La suspensión de estos elementos en sus posiciones exactas puede perfectamente estudiarse en base a la experiencia de ejecución de puentes anteriores, aunque la luz de estos sea menor.

Desgraciadamente esto no es igual al plantear el izado y subsiguiente conexión de las dovelas que van conformando el tablero, porque el mecanismo resistente de la

catenaria, un cuerpo funicular que va adaptando su forma a la secuencia de cargas del proceso, provoca mayores movimientos en el sistema cuando la luz es mayor y esas variaciones hacen más difícil encajar el procedimiento dentro de las tolerancias de montaje. Por esa razón la secuencia de montaje de dovelas es discontinua y ha de dividirse por fases. En el análisis del desmontaje total del tablero se han de tener en cuenta las siguientes prioridades sancionadas por la experiencia:

1. Izado de un determinado número de dovelas en los vanos principales. Cuando las cargas del tablero quedan suspendidas en la parte central los movimientos en la catenaria son enormes, tanto en desplazamientos como en cambios de curvatura. De ahí la elección de dovelas a suspender que en ningún caso puede comprender en esta primera fase las más próximas a los pylonos, que serán las últimas en cerrar el vano, para evitar flexiones excesivas en el dintel.
2. Izado y colocación de las dovelas de los vanos laterales, tras lo que los movimientos en las cabezas de pilonos adyacentes quedarán reducidos.
3. Izado, mediante secuencia alternativa, de las dovelas de cierre del tablero en las cercanías de las torres.
4. Cierre consecutivo de todas las juntas de tablero. Si bien esta tarea habrá podido ir solapándose (única excepción en la secuencia) parcialmente durante las fases anteriores.

Figura 24. Secuencia de montaje de tablero.

En determinadas fases del proceso puede ser importante limitar el peso propio de las dovelas del puente, lo que sólo se puede hacer indirectamente utilizando un acero dotado de una resistencia mecánica mayor, para de esta forma reducir la sección transversal resistente.

Por esa razón, en el proyecto de algunos puentes suspendidos de grandes luces, los mayores, se han utilizado de aceros de alta resistencia (HSS) en algunas de sus partes, aceros cuya dosificación y tratamientos térmicos aplicados le dotan de un límite elástico que puede llegar como poco a los 700 MPa (S700).

En el puente Akashi Kaikyo se utilizaron aceros HT690 and HT780 de Nippon Steel en determinados puntos del tablero.

Este requerimiento de ajustar el peso propio del tablero será más apremiante en el caso del puente de Gibraltar con luces superiores a los 3.500 metros. En la actualidad se pueden conseguir aceros tratados (quenched&tempered) de alta resistencia que cubren hasta los rangos QT1100, lo que implicará no solamente ahorro en peso propio sino una considerable reducción en la duración de las operaciones de soldadura a acometer en condiciones comprometidas como son las del ambiente marino del Estrecho.

Los códigos de diseño de aplicación en Europa para estos aceros (EN 1993-1-12:2007) incorporan disposiciones adicionales que contemplan el empleo de estos aceros hasta de grado S700. Sin embargo, los estándares de calidad llegan a cubrir hasta los aceros de límite elástico 960 Mpa, lo que da pie a pensar en futuras actualizaciones del Eurocódigo que incluyan en su articulado estos avances tecnológicos.

Por otro lado, existen resultados experimentales de ensayos que muestran que este tipo de acero no sufre ninguna desventaja respecto a los laminados convencionales en su comportamiento frente a fatiga (Puthli et al. 2006), lo que representa un valor añadido en la decisión de emplearlos en la construcción de un tablero de puente de estas características. Igualmente admite tratamientos post-soldadura que mejoren el comportamiento en ese sentido de la ZAC.

En cuanto a su precio, el factor de escala no lo hace por el momento muy competitivo, aunque es previsible que este aspecto se vaya corrigiendo en un futuro relativamente cercano.

3.5.1. Suspensión de las péndolas

Para atajar los problemas de durabilidad asociados a la falta de estanquidad de los sistemas clásicos de fijación de las péndolas, susceptibles de ataque por corrosión electroquímica especialmente en ambientes marítimos, y resolver la vulnerabilidad de estas conexiones ante el ataque por fatiga, Nippon Steel ha desarrollado un nuevo sistema muy eficiente frente al primero de los riesgos de durabilidad descritos y con alta resistencia a la fatiga. El nuevo sistema, NEW-PWS, incluye un cable envuelto en una vaina de polietileno que al no poder exceder en el doblado de un cierto umbral en el valor de la curvatura, incluye una brida en dos mitades acoplada a la catenaria que permite conectar la péndola mediante una fijación de pasador. De esa manera la péndola ha de tener dos anclajes, uno a una placa superior que no es sino un apéndice de la brida, y el otro a otra inferior solidaria con el tablero.

Por ello el procedimiento de montaje de las péndolas se desdobla en dos, por un lado la colocación y fijación de la brida, que es en sí un elemento relativamente liviano y manejable, y por otro la conexión del cable vertical de cuelgue al que se conectará el tablero.

El acarreo de las bridas hasta sus puntos específicos de instalación se resuelve mediante un carro que, partiendo de la coronación de pilas, va montado sobre la catenaria y, rodando sobre unos "bogeys", se desplaza hasta el punto requerido con las dos medias bridas suspendidas de unas garras excéntricas dotadas de un muelle, lo que permite cerrarlas automáticamente en torno al cable, al ser presentadas desde una cierta distancia. En el momento oportuno se acciona el muelle y las bridas se cierran. Las barras de anclaje se tesan con gatos de barra que clavan también las cuñas, controlándose la tensión de las tuercas por ultrasonidos. El procedimiento es cuasi-automático.

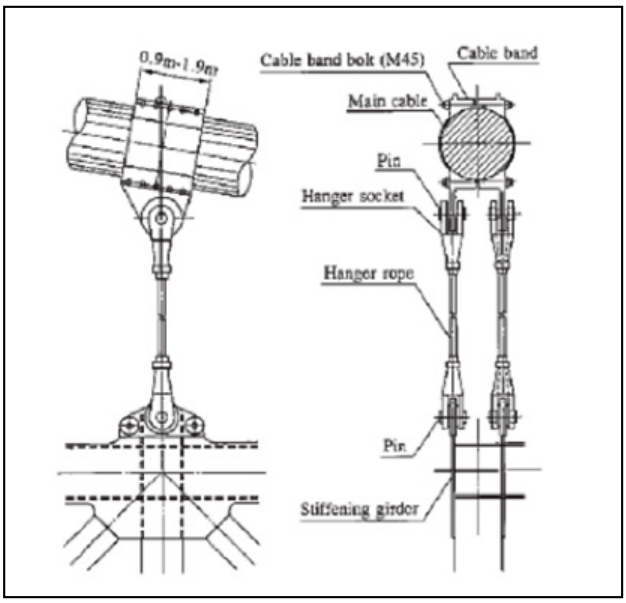


Figura 25. Sistema de anclaje de péndolas.

En cuanto a las péndolas, envainadas en poliuretano, mucho más pesadas (sobrepasan los 250 metros de longitud en muchos casos) y flexibles, resultan más difíciles de dominar durante el montaje.

En primer lugar hay que aproximarlas al punto de conexión, lo que es un problema en sí mismo. Se comienza por situar la bobina completa sobre una barcaza junto a la torre. A continuación se recoge el extremo de la péndola a conectar desde una grúa en el tope del pylono y se conectan las bridas próximas a la torre, que son las más largas y pesadas. Para las más alejadas, de menor longitud, es preciso impulsarlas, desde la posición en altura descrita para las anteriores, sobre un tren de rodillos existentes en el andarivel hasta sus puntos de anclaje.

Figura 26. Montaje de péndolas en la catenaria.

Este sistema requiere cuidados especiales que eviten que la protección de poliuretano que envuelve al acero de las péndolas se dañe por contacto con todo el conjunto de medios auxiliares dispuestos.

3.5.2. Izado y montaje de las dovelas

El sistema de montaje descrito en el encabezamiento de este apartado, consistente en reservar para el final el montaje de las dovelas próximas a las torres, tiene la ventaja de primar la prefabricación y de que, al quedar las dovelas, relativamente esbeltas, suspendidas por las péndolas pero desconectadas directamente de las torres, se recojan las solicitaciones excéntricas no a través de esfuerzos de torsión del tablero en la fase de montaje, sino mediante variaciones de carga en los cables.

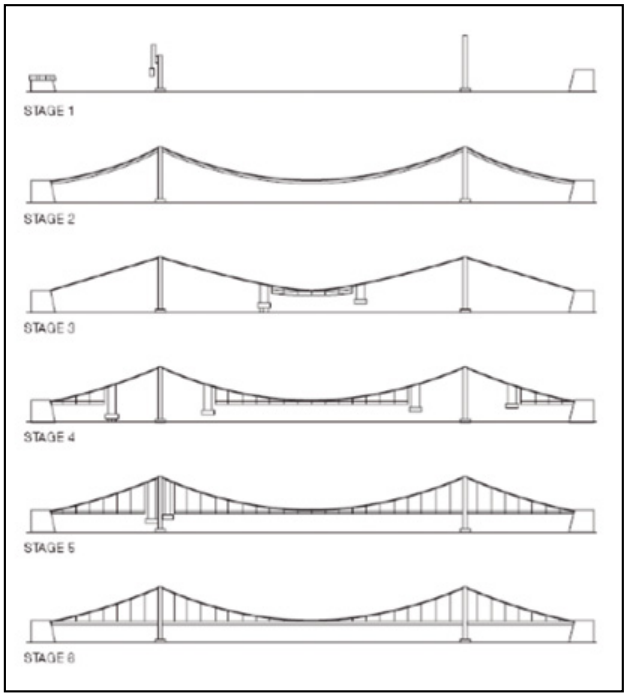


Figura 27. Secuencia de montaje tradicional.

Mediante este procedimiento todo el trabajo de construcción de las dovelas se ejecuta en taller, pero tiene el inconveniente de que el tablero o los tableros parcialmente montados no pueden utilizarse como plataformas de trabajo.

Mediante este procedimiento se montaron los puentes del StoreBaelt East y el Tsing Ma Bridge de Hong-Kong.

Este sistema tiene la desventaja de estar sujeto a posibles perturbaciones debidas al viento lateral sobre el puente durante las fases intermedias de montaje. Efectivamente, de acuerdo con experiencias contrastadas tanto en modelos a escala como en los puentes reales, a medida que la secuencia de montaje se aleja de la simetría respecto al centro de vano, la estructura se vuelve más vulnerable ante el flameo autoexcitado de la parte del tablero existente.

Sin embargo, en los puentes más recientes del mar de Seto la secuencia propuesta fue precisamente la contraria. Se apoyaba en el hecho de disponer de una sección transversal que había sido proyectada en principio para carretera y ferrocarril (aunque después se abandonara tal idea de compartir ambos modos de transporte, bien avanzada ya la fase de construcción, tras el terremoto de Kobe), con lo que la rigidez del tablero a torsión era mucho mayor. De esta manera la secuencia partió de las dovelas próximas a la torre a la que estaban conectadas y los esfuerzos de torsión los resistió fundamentalmente el tablero.

Figura 28. Secuencia de montaje en el Gran Belt.

Tuvo esto la ventaja de que la plataforma del tablero, con su acceso desde las pilas, quedó expedita para ser aprovechada como plataforma de trabajo. Además el procedimiento permitió fragmentar el tablero en dovelas de montaje enormes, minimizando el número total de maniobras de izado. Claro está que esto implica que una parte importante de los trabajos de fabricación del tablero hayan de realizarse "in situ" en lugar de venir completamente terminados del taller, lo que implica mayor intensidad del control de obra por las condiciones más desfavorables.

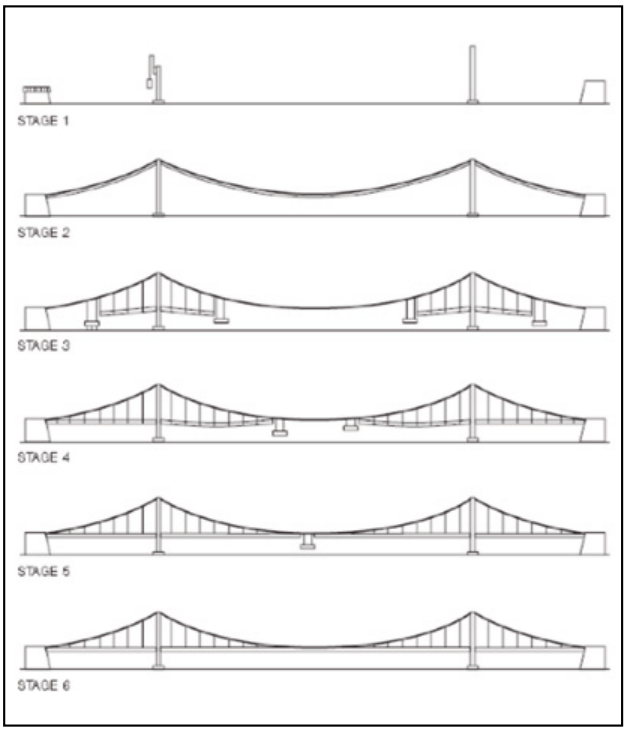


Figura 29. Secuencia de montaje alternativa.

En relación con la solución Puente del enlace fijo para el estrecho de Gibraltar ambos procedimientos quedan abiertos a estudio, en función de las mayores luces y subsiguientes amplitudes en la respuesta cinemática de la catenaria durante el montaje, la facilidad operacional condicionada por el tráfico del Estrecho y otras que puedan surgir derivadas de la estabilidad estructural y aerolástica durante las fases estructurales de proceso.

Este sistema requiere además otra precaución. Para lograr el efecto de retención de las cabezas de los pylonos, lo que en la solución clásica se conseguía mediante el montaje de dovelas muy excéntricas tanto en los vanos laterales como en el central, hay que recurrir a tesar cables de retenida provisionales entre los macizos y la coronación de los pylonos. Esta circunstancia puede, en el caso de un puente de varios vanos como es el del paso del Estrecho de Gibraltar, contribuir a decantar la elección por un procedimiento de montaje determinado, al no ser tan factible la aplicación de este método de retenida.

Figura 30. Montaje de tablero en el Akashi Kaikyo.

Una vez contrastados los pros y contras de la secuencia del procedimiento a elegir para montar las dovelas, queda por definir el conjunto de operaciones necesarias para el izado que, dadas las características y emplazamientos de estos puentes, ha de contar, en alguna medida, con un medio de transporte marítimo capaz de proporcionar al conjunto una estabilidad aceptable, en las condiciones atmosféricas y del estado de la mar reinantes.

El proceso se esquematiza de la siguiente manera:

1. La embarcación o barcaza que acarrea la dovela o parte del puente se estaciona en la vertical de las péndolas correspondientes convenientemente orientada.
2. Los ganchos de las dos vigas de izado, pendientes de la catenaria se conectan a la dovela.
3. La dovela se desprende de la barcaza que es retirada del emplazamiento dejando la dovela en vilo suspendida de la viga de izado que comienza a impulsarla.
4. Las péndolas se conectan a las placas dispuestas en la dovela pero antes de recibir la carga se practica la unión temporal por soldadura u otro procedimiento con la dovela adyacente ya montada.

Estas operaciones conviene hacerlas escogiendo las condiciones climáticas más favorables. El momento más incierto del procedimiento es la conexión de la dovela a la viga de izado provisional que desciende a su encuentro perfectamente situada, colgando provisionalmente de ambas catenarias. Por eso la barcaza debe ser autopropulsada y dotada con varias hélices que garanticen su posicionamiento y orientación.

Figura 31. Sistema de aproximación para el izado de las dovelas.

En los puentes del mar de Seto tal embarcación, orientada mediante GPS, era activada por un sistema en remoto conectado a éste que propulsaba instantáneamente las hélices por servomecanismos independientes para cada una, en función de los desplazamientos debidos al viento a las corrientes y al oleaje que había que contrarrestar.

La viga de izado también fabricada ex-profeso era capaz de situarse pendiendo de las catenarias con tolerancias mínimas y disponía de un sistema de cables de seguridad corredizos que prevenían cualquier fallo en los cables temporales de impulsión. Su apoyo en las catenarias estaba repartido en una cierta longitud para evitar la formación de garrotes en los cables principales.

Queda tan sólo queda referirnos al sistema de conexión temporal entre la dovela adyacente y la izada, que se realizaba mediante un sistema machiembrado guiado que se conectaba con suma facilidad en cuanto las cotas entre ambas partes se igualaban.

3.5.3. Aspectos aerodinámicos de la respuesta estructural ligados a la construcción

En el análisis de las secciones transversales de los puentes de grandes luces cobra una gran relevancia el efecto aerodinámico producido por las solicitaciones provenientes de las acciones del viento, cuya influencia en la definición del diseño reviste una enorme importancia, mayor sin duda que otro tipo de acciones estáticas más conocidas. En efecto, el conocimiento de la respuesta estructural de los tableros ante los diversos efectos en que se concretan los fenómenos aerodinámicos a los que se ven sujetos estos puentes suspendidos ofrece aún hoy un cúmulo de incertidumbres. Pero además, las consecuencias provocadas por la inestabilidad ante esos fenómenos son mucho más dañinas y de desenlace más inmediato, pudiendo llegar al colapso instantáneo, que las derivadas del agotamiento de la sección debida a las solicitaciones originadas por otras acciones, fundamentalmente estáticas, cuyo planteamiento teórico es más conocido y, en el caso de los grandes puentes a los que nos estamos refiriendo en todo el texto, ocasionan daños más localizados.

La inquietud que desencadenó la necesidad de profundizar en el estudio de las acciones aerodinámicas y sus consecuencias en los grandes puentes se manifestó a mediados del pasado siglo a raíz del ya famoso colapso del puente suspendido del Tacoma Narrows originado por vientos de una determinada componente respecto a la directriz del tablero, aunque de una intensidad (42 mph) relativamente moderada, y en cualquier caso menor que el soportado por el mismo puente en épocas inmediatamente anteriores.

Por el estudio y las experiencias acumuladas desde entonces se ha podido avanzar en el análisis de las respuestas estáticas y dinámicas de la sección del tablero ante las cargas producidas por la acción del viento. Ambas inquietudes están presentes en el diseño de los puentes, lo que ha propiciado que sea la inestabilidad aerolástica de la sección el parámetro que en última instancia condicione su diseño.

Las acciones estáticas del viento pueden producir flexiones laterales excesivas, pandeos y divergencias, pero son las dinámicas, cuya intensidad e incidencia varían en función de la respuesta de la estructura, las que la pueden llevar al material constitutivo más allá de los límites resistentes a través de fenómenos de diversos tipos, unos más importantes que otros. Las formas o modos de respuesta asociadas a las correspondientes frecuencias reciben nombres específicos tales como desprendimiento de remolinos (que ya fue apreciado por von Karman), oscilaciones autoexcitadas (que lo son al coincidir sus frecuencias con las auto-frecuencias propias de la estructura, y otros términos, algunos aún ingleses, como galloping, buffeting, o flutter.

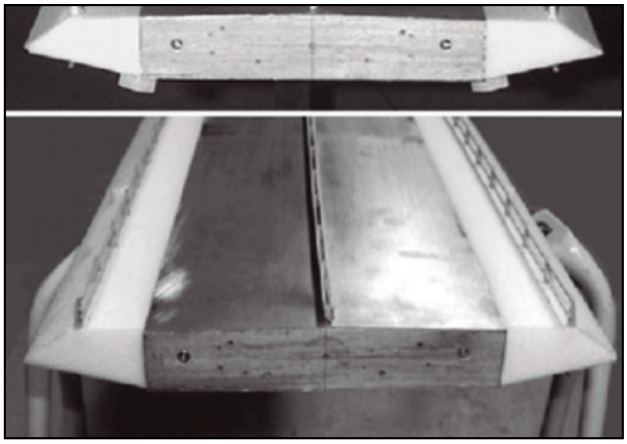


Figura 32. Optimización de secciones aerodinámicas mediante winglets.

El primero de estos últimos citados, galloping, se puede traducir como un estado de ondulaciones de muy baja frecuencia que no viene siendo relevante en el diseño de los puentes en servicio, aunque ya veremos el interés que tiene para nosotros; se suele manifestar en los tendidos de las conducciones eléctricas heladas en algunos casos. El buffeting es una especie de tableteo provocado por los cambios incesantes de velocidad del paquete fluido y viene asociado a la aparición de vientos en régimen turbulento

y la divergencia torsional está asociada más bien a la respuesta estática.

El flutter, una especie de flameo o aleteo, es el fenómeno más preocupante en el comportamiento de las secciones. Se le ha llegado a definir como un estado de vibraciones inducido por el viento, soplando a una determinada velocidad crítica, en el que el amortiguamiento adquiere valores negativos (si sólo llegase a cero el movimiento sería estacionario) con lo que las amplitudes van creciendo proporcionalmente hasta que se produce el colapso cuando los materiales rebasan su límite elástico. El modo de vibraciones en el puente recuerda el flameo de una bandera con flexiones y torsiones acopladas (en el Tacoma Narrows Bridge se produjeron dos estados simétricos en concordancia de fase en cada una de las torres que confluían en oposición en el centro del vano produciéndose el colapso).

De acuerdo con Graham, Limebeer et al. (2011) la tripleta de soluciones que Astiz estableció (1998) para atajar estos efectos nocivos debidos a la aerodinámica de los puentes puede seguir considerándose paradigmática, a saber:

1. Modificar el diseño de la sección transversal adaptándolo a las características requeridas por las solicitaciones aerodinámicas.
2. Modificar el diseño del sistema de sustentación mediante cables ajustándolo a condiciones ventajosas en función de las formas modales de vibración y sus autofrecuencias.
3. Introducir dispositivos, estacionarios o controlados dinámicamente, en los tableros para reducir los efectos del flameo (flutter) en los puentes.

Los sistemas de comprobación o justificación de las soluciones planteadas en esos frentes sí que han avanzado mucho desde entonces, tanto en el ámbito de los modelos físicos (túnel de viento) como matemáticos (El.Finitos, Discrete Vortex, Diff. Finitas) y en cuanto a los modelos de turbulencia, Reynolds Navier-Stokes promediado, Simulación de remolinos, etc ...

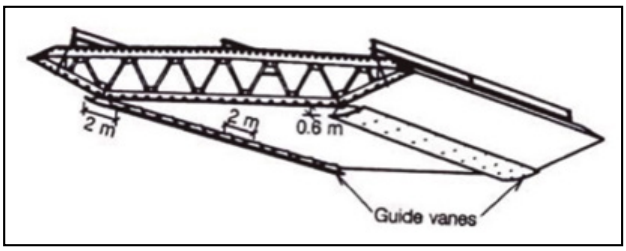


Figura 33. Dispositivos aerodinámicos (guide vanes).

Los modelos físicos que implican la construcción de modelos a distintas escalas para estudiar todo el abanico de efectos aerodinámicos incorporan soluciones en este sentido, como la disposición de alerones (flaps) de borde accionados mecánicamente en remoto (aún está por probar su manipulación dentro de la interacción viento estructura) o timones inferiores (winglets) de los que también existe algún ejemplo.

Larsen&Larsen han estudiado para un puente colgado de varios vanos secciones provistas de veletas y winglets intentando maximizar en el laboratorio la velocidad crítica en el caso del modelo dirigido a estudiar el flutter.

Figura 34. Modelo puente colgado multi-vano.

Para el Puente del Estrecho de Gibraltar, si bien los máximos vientos dominantes no alcanzan las intensidades de otros más septentrionales o tropicales, los aspectos a considerar han de ser, a la vista de las luces planteadas en la APP-28, todos los posibles efectos estáticos y dinámicos debidos al viento aprovechando el abanico de tecnologías aplicadas que incesantemente se van poniendo a punto para cubrir las incertidumbres que, en la respuesta resistente, provocan todos esos fenómenos.

En realidad, el estudio de la mayoría de los mecanismos de repuesta descritos cubre las situaciones a las que el puente ha de enfrentarse en servicio. Aunque las condiciones térmicas no sean en el emplazamiento del Estrecho excesivamente severas, sí que hay uno de los efectos que, por tratarse de un puente multivano puede afectar a las actividades de montaje y éste no es otro que el galloping, que aparece en esos casos al sobrepasarse umbrales de intensidad de viento relativamente reducidos. De tal efecto hay estudios recientes (Belhaq et alter, Casablanca 2013). No obstante, los parámetros de diseño incorporados en los Eurocódigos (u otra normativa de aplicación) asignan valores específicos para las acciones del viento en condiciones extremas del proceso constructivo, durante cuyos intervalos estadísticamente determinados de aparición de valores extremos, las tareas de construcción habrían de interrumpirse. Los efectos de esta oscilación de baja frecuencia no representan una sobretensión exagerada en las catenarias durante el proceso, pero pueden sacar de tolerancias sistemáticamente a las numerosas operaciones de montaje descritas anteriormente, máxime cuando las condiciones térmicas entre zonas más alejadas y las más centradas en el paso del Estrecho pueden resultar estacionarias. Sólo el estudio de estos efectos y su cuantificación pueden servir a la concreción de sistemas de auscultación mecánica que anticipen las posiciones exactas de los puntos requeridos la estructura construida de cara a su progresión.

4. CONCLUSIONES

Los sistemas constructivos requeridos para desarrollar, mejorar y materializar en un proyecto de construcción el puente planteado como solución para el enlace fijo a través del Estrecho han ido evolucionando en estos años muy favorablemente.

La incertidumbre principal consistente en ejecutar las cimentaciones de las torres a esa profundidad en el lecho marino del emplazamiento se ha ido concretando y los diferentes sistemas, apoyados en la experiencia de la construcción de las plataformas off-shore, van confluyendo en una tecnología que, si bien no se puede afirmar que haya madurado completamente, está perfectamente ajustada a las características y dimensiones del problema planteado

en el Estrecho. Y lo que no es menos importante, las incertidumbres económicas que acompañaron tal desarrollo en un principio van convergiendo como un factor más en la estandarización del método.

El avance experimentado en las posibilidades constructivas no es ajeno al obtenido en el estudio de los materiales, como ya se ha descrito sobradamente en otro artículo. Cabe aquí reseñar, no obstante, por tratarse de un material temporal aunque básico en el aspecto constructivo, el desarrollo igualmente satisfactorio de las características de los nuevos materiales, composites y fibras de carbono.

Por último, la experiencia en la construcción de los grandes puentes recientes (fundamentalmente Akashi Kaikyo y Storebaelt) ha alumbrado procedimientos de montaje nuevos, a veces radicalmente distintos respecto a los contrastados en puentes anteriores de estas características, lo que aparte de ampliar el rango de posibilidades constructivas ha permitido acometer las obras de forma más segura y con una productividad mayor.

5. BIBLIOGRAFÍA

Ayre, G. J. (2011). A Critical Analysis of the Akashi-Kaikyo Bridge, Japan. Reino Unido. Disponible en: http://www.docstoc.com/docs/69767940/Akashi-Kaikyo-Bridge-(PDF)

Belhaq et al. (2013). Periodic and quasiperiodic galloping of a wind-excited tower under external excitation, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 74, Nº 3, pp. 849-867.

Bisplinghoff, R. L. y Ashley, H. (1962). *Principles of Aeroelasticity*. EE UU. Wiley.

Clough, R. y Penzien, J. (2010). *Dynamics of Structures*. Second Edition. Computers and Structures Inc.

Elkem ASA Materials. (2013). Troll A Platform, North Sea. Noruega. Disponible en: http://www.docstoc.com/docs/149131279/Troll-A-Platform_-North-Sea---Elkem#

Fernández Troyano, L. (2003). *Bridge Engineering: A global perspective*. Reino Unido. ICE Publishing.

Gatti, P. L. y Ferrari, V. (2014). *Applied Structural and Mechanical Vibrations: Theory, Methods and Measuring Instrumentation*. Second Edition. CRC Press.

Gimsing, N. J. y Georgakis, C.T. (2012). *Cable Supported Bridges: Concept and Design*. Third Edition. EE UU. Wiley.

Gogou, E. (2012). Use of High Strength Steel Grades for Economical Bridge Design. Disponible en: http://www.scia.net/sites/default/files/thesis/reportgogou.pdf

Gudmestad, O. T., Holand, I. y Jersin, E. (2000). *Design of Offshore Concrete Structures*. EE UU. CRC Press.

Haifan, X. y Yaojun, GE. (2007). State-of-the-art of long-span bridge engineering in China, *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*. Vol. 1 (4), pp. 379-388.

Harazaki, I., Suzuki, S. y Okukawa, A. (2000). Capítulo 18: Suspension Bridges. *Bridge Engineering Handbook*. EE UU. CRC Press, pp. 363-399.

Honshu-Shikoku Bridge Expressway Company Limited (HSBE) (2015): Superstructure of Suspension Bridges. Disponible en: http://www.jb-honshi.co.jp/english/technology/con-sus.html

Ibsen, H. (2010). The Master Builder. First Edition. The Project Gutemberg.

Kashima, S. (2009). *Akashi Kaikyo Bridge Project*. International Seminar on Concrete Bridges. PIARC. Nanjing. China.

Larsen, A. (1993). Aerodynamic aspects of the final design of the 1624 m suspension bridge across the Great Belt, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 48 (2-3), pp. 261-285.

Norbury, K. (2012). Massive Manitowoc moves rail bridge, *Crane and Hoist Canada*. Disponible en: http://amixheavylift.com/wp-content/uploads/2012/09/Crane__Hoist_Spring_2012_with-typo-corrected4.pdf

Ostenfeld, K. H. y Andersen, E. Y. (2011). Major Bridge Projects: A Multi-disciplinary Approach, *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*. Vol. 5 (4), pp. 479-495.

Podolny, W. y Scalzi, J. B (1986). *Construction and Design of Cabled-stayed Bridges*. Second Edition. EE UU. Wiley.

Roberts, S. (2012). *Wind Wizard: Alan G. Davenport and the Art of Wind Engineering*. EE UU. Princeton University Press.

Saito et al. (2004). Skirt Suction Foundation: Application to Strait Crossings. Disponible en: http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/tc/g/pdf/22/22-6-4saito.pdf

Shaffer, M. S. P. y Windle, A. H. (1999). Fabrication and Characterization of Carbon Nanotube/Poly (vinyl alcohol) Composites, *Advanced Materials*, Vol. 11, Nº 11, pp. 937-941.

Strommen, E. (2010). *Theory of Bridge Aerodynamics*. Second Edition. Alemania. Springer.

Takeno et al. (1997). Cable Erection Technology for World's Longest Suspension Bridge: Akashi Kaikyo Bridge, *Nippon Steel Technical Report*, Nº 73. Disponible en: http://www.nssmc.com/en/tech/report/nsc/pdf/7310.pdf

Uemura et al. (2002). Design, Fabrication and Erection of the Stiffening Girder of 3rd Kurushima Kaikyo Bridge: The World's First Three-Linked Suspension Bridge with a Stiffening Box Girder of Over 1000 m Long, *Kawasaki Steel Technical Report*, Nº. 47. Disponible en: http://www.jfe-steel.co.jp/archives/en/ksc_giho/no.47/e47-065-075.pdf

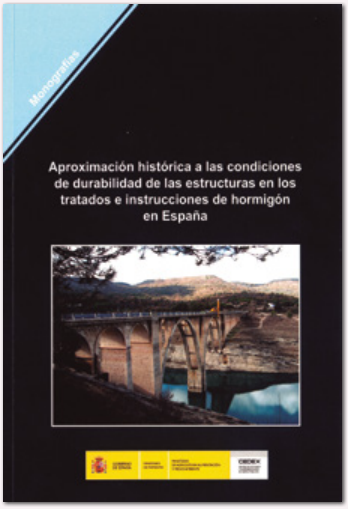
Zeris, C., Anastasakis, J. y Kyriakidis, J. (2009). Investigation of Monotonic and Cyclic Response of Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Beams, *ACI Structural Journal*, Vol. 106 (1), pp. 3-13.

Zhaoxia, J. y Pramoda, K. (2001). Dynamic mechanical behavior of melt-processed multi-walled carbon nanotube/poly (methyl methacrylate) composites, *Chemical Physics Letters*. Vol. 337 (1), pp. 43-47.

6. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores, POCTEFEX, de la Comisión Europea (Fondos FEDER) la financiación del proyecto TTIGEM, en cuyos trabajos se enmarca este artículo. Igualmente, agradece al personal de SECEGSA, entidad que junto al CEDEX ha desarrollado el proyecto TTIGEM, su estrecha colaboración y aporte de información para la realización del trabajo presentado en este artículo.

EDICIONES DEL CEDEX



Aproximación histórica a las condiciones de durabilidad de las estructuras en los tratados e instrucciones de hormigón en España
Autores: Ismael Carpintero García
Serie Monografías: M-121
ISBN: 978-84-7790-543-1
Año: 2013
P.V.P.: 20€

En el ámbito del diseño de estructuras la durabilidad es actualmente uno de los parámetros fundamentales a considerar. En el caso de las estructuras de hormigón, debido a su mucha mayor durabilidad respecto a otros materiales como la madera o la estructura metálica, esta problemática ha surgido con bastante posterioridad a su desarrollo. De este modo el hormigón estructural ha pasado de ser un material prácticamente inalterable, que era como se consideraba en sus inicios hace 100 años, a ser un material con una durabilidad limitada respecto la vida útil de la estructura.

Actualmente el mantenimiento de las estructuras es ya uno de los mayores desafíos que tenemos en la gestión de las infraestructuras y edificios. A la hora de estudiar el estado actual de una estructura de cara a su rehabilitación es necesario conocer qué criterios de diseño se consideraron en su construcción, en particular en cuanto a los parámetros que gobiernan su durabilidad. De este modo podrá plantearse con mayor eficacia los procedimientos de reparación o protección necesarios.

La presente Monografía trata de exponer cuáles han sido estos parámetros de diseño en las estructuras de hormigón armado a partir de los tratados e instrucciones de mayor difusión en España desde la introducción de esta tecnología de construcción a principios del s.XX.

Guía técnica para la implantación de biorreactores de membrana
Autores: Raquel Iglesias Esteban, Enrique Ortega de Miguel, María Adela Martínez Tarifa, Pedro Simón Andreu, Lucas Moragas Bouyat, Emilia García Fernández, Jordi Robusté Cartró, Ignasi Rodríguez-Roda Layret
Serie Manuales y Recomendaciones: R-22
ISBN: 978-84-7790-548-6
Año: 2014
P.V.P.: 25€

Esta Guía recoge de forma ordenada la experiencia y el conocimiento generado en España sobre los MBR, consiguiendo así una herramienta útil que permite a todos los actores implicados (plani_ cadores, gestores, ingenierías, operadores, etc.) tomar decisiones sobre su implantación, avanzar en la mejora del diseño y conocer las singularidades de la operación de esta tecnología. La Guía está estructurada en seis capítulos, comenzando con una introducción sobre la evolución de los MBR y un segundo capítulo con la descripción de la tecnología, donde se detallan los fundamentos del proceso, su funcionamiento, las peculiaridades de las instalaciones y la calidad del e_ uente obtenido. El tercer capítulo se dedica a la operación donde se recoge la experiencia, problemas, soluciones y recomendaciones al respecto y el cuarto capítulo, dedicado al diseño, recoge recomendaciones basadas en la experiencia de esta operación. El quinto trata sobre los costes de implantación y explotación, y en el último capítulo se establecen algunos criterios de implantación de esta tecnología.

Pedidos: Tienda Publicaciones CEDEX. C/ Alfonso XII, 3 | 28014, Madrid. Tlf.: (+34) 91 335 72 95 | Fax: (+34) 91 335 72 49 | publicaciones@cedex.es