

Enlace fijo en el Estrecho de Gibraltar. Soluciones diferentes a túnel y puente

Por LUIS DEL CAÑIZO

Se estudian las soluciones de dique, con su influencia en la salinidad del Mediterráneo y la imposibilidad de su aprovechamiento hidroeléctrico, la de puente con apoyos flotantes, túnel apoyado en el fondo, y tubo entre dos aguas, bien anclado al fondo o colgado de flotadores o trabajando como catenaria en planta y alzado, que es una idea nueva. También se comentan las soluciones mixtas más adecuadas.

INTRODUCCION

La magnitud y dificultad del enlace del estrecho de Gibraltar ha empujado a estudiar soluciones menos tradicionales, más imaginativas, ingeniosas o innovadoras, pero que en general se consideran menos realizables o practicables hoy día por razones ingenieriles, ecológicas, jurídicas o de otro tipo, pudiéndose decir que están desechadas. No obstante es útil su estudio, como término de comparación y también como especulación teórica que pudiera dar fruto en algún otro caso. Por otro lado es conveniente cuantificar distintos aspectos de cada solución tipo, que se hayan aducido como razones cualitativas para criticarlas, pero sin llegar a concretarlas o profundizar en ellas.

DIQUE

El cierre del estrecho mediante un gigantesco terraplén o dique es una solución extrema, pero la más sencilla y viable desde el punto de vista constructivo. Suponiendo una anchura en coronación de 100 m. a nivel del agua y taludes 1 : 1,5 con una longitud de 27,7 km. en el umbral S el volumen sería de 1.400 millones de m.³, es decir, un orden de magnitud mayor a las mayores obras de tierra actuales, por lo que se considera factible. El suavizar los taludes a 1 : 1,75 supone un incremento de volumen del 15 por 100, y reducir la coronación en 25 m. de ancho supone una disminución de volumen del 7 por 100. Si se supone el trazado más corto, en Punta Cires, con 14,3 km. de longitud y calados de 900 m., el volumen es de 5.900 millones de m.³.

Los materiales deben ser los de las sierras próximas, el pico San Bartolomé y Dehar Oullika, formados por margas, arcillas, areniscas y calizas, pudiendo verse en un todo uno en la parte central cubriéndolo con una capa protectora rocosa de 15 m. de espesor mínimo para mejorar la estabilidad superficial y proteger contra el movimiento del agua. El volumen de la capa protectora, suponiendo un espesor mayor, y más irregular en profundidad, alcanzaría el 15 por 100 del total. Se considera suficiente un coeficiente de seguridad de 1,25 para los taludes de una obra de este tipo. El talud podría ser más suave en los 30 m. superiores de rompiente y en la base, con cierta forma isorresistente, y uniforme en gran parte de su desarrollo.

La construcción puede plantearse con un gran parque de maquinarias, con rotopalas gigantes análogas a las empleadas en minería a cielo abierto, y con transporte por cinta con vertido empujando en punta de lanza desde ambas orillas, desde la cota + 8 m. para resguardarse del oleaje, y protegiendo lo antes posible a ambos lados con escollera, empujada desde superficie y sobre todo vertida desde barcazas, para asegurar en profundidad un espesor relativamente aproximado al deseado.

Los 8 a 12 m. superiores serían de pedraplén, con una granulometría más cerrada, para uniformar los fuertes asientos, que podrían alcanzar los 5 m. Inmediatos al frente de avance se llevarían a los lados dos muros protectores contra el oleaje, de unos 7 m. de altura, bien de escollera, o mejor, a fin de aquilatar su anchura, de hormigón, con cajones huecos prefabricados y rellenos *in situ*. El

espacio intermedio central se rellenaría en 5 m. de altura con pedraplén compactado tras varios meses para dar tiempo a que se produjera la mayor parte de los asentamientos. La última capa de escollera protectora de la zona alta del talud, de rompiente, se colocaría con grúa. Finalmente se recrecerían los muros de hormigón laterales en 5 m. de altura y 2 m. de anchura, para abrigar la zona viaria, aunque ello suprimiría la vista del mar a los viajeros.

Mediante estos muros recrecidos de hormigón laterales en 5 m. se aquilataría la anchura en coronación y se dispone de un mejor cimiento para las vías ferroviarias. Existe también la posibilidad de superponer en vertical dos tráficos, ya que la estructura en cajón correspondiente compensa el sobrecosto de material de núcleo en una franja de toda la altura. En la figura 1 se sugiere una sección tipo.

En transporte medio del material sería unos 11 km. sobre el propio dique más otros 10 km. sobre tierra. El coste unitario para el núcleo gracias a la mecanización y la magnitud de la obra, incluyendo arranque, transporte y vertido sería de unas 200 pesetas/m³, pero en cambio la escollera de protección vertida con medio flotante tendría un coste unitario superior a las 2.000 pesetas/m³, por lo que la obra ascendería a 800.000 millones de pesetas (aparte de los canales de navegación), cifra mayor a la del puente o túnel, pero no tanto como podría pensarse a primera vista gracias a la economía del núcleo y, aunque las corrientes arrastrasen el 30 por 100 de éste, el coste sólo se incrementaría un 12 por 100.

En el dique se dejarían dos canales de navegación, que entrarían en servicio antes del cierre total

del dique, y que se salvarían con sendos túneles sumergidos apoyados en el fondo o con puentes, pese al inconveniente para la circulación ferroviaria de crear un desnivel de 70 m. Para la construcción del tramo central del dique por vertido, sería necesario en la zona de un canal, estrechar la coronación al mínimo y elevarla para protegerla contra el oleaje, y posteriormente dragar el canal, cuyas dimensiones vienen condicionadas por la influencia ecológica en el Mediterráneo más que por la navegación.

Es sabido que el Mediterráneo tiene una evaporación neta media E (evaporación menos aporte de ríos y lluvias) de unos 75 cm. al año. En el estrecho de Gibraltar se produce una corriente salada profunda de salida de caudal Q_s , así como otra superficial Q_v menos salada, de entrada de agua atlántica, de modo que su diferencia compensa la evaporación neta: $Q_s + Q_v + E = 0$. La relación de los caudales medios Q_s/Q_v debe ser igual al cociente de las salinidades S_s/S_v , de ambos mares por la ley de conservación de la sal $Q_s S_s + Q_v S_v = 0$. Las salinidades actuales son $S_s = 0,03615$, para el Atlántico; $S_v = 0,03835$, para el Mediterráneo occidental y el caudal medio es de 1.245.000 m³/segundo, y viene limitado simultáneamente por dos secciones: el umbral S , que con área $A = 3,75$ km² y calado $h = 340$ m., actúa de cuello de botella para el caudal salado inferior, y la sección de Tarifa y Punta Cires, más estrecha, que actúa de cuello de botella para el caudal superior. La evaporación neta que se compensa es $E = 73.000$ m³/sg.

Al construir el dique se rompe el equilibrio existente al reducir drásticamente la salida de agua Q_s , incrementando paulatinamente la salinidad del Mediterráneo hasta que, gracias a su nue-

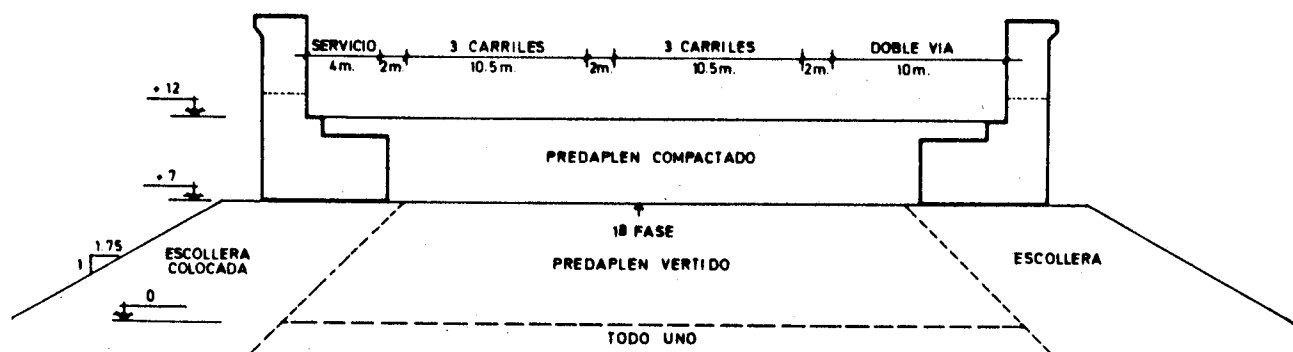


Figura 1.

va densidad, aumentase de nuevo Q_v , realcanzando el equilibrio de acuerdo con las ecuaciones:

$$Q_v = \sqrt[3]{\frac{ghA^2ES_v}{20\alpha}}$$

$$S_v = S_r + \sqrt[3]{\frac{20ES_r^2\alpha}{A^2hg}}$$

Para la solución de túnel sumergido en el fondo de los canales éstos podrían ser de 50 m. de calado y 4.000 m. de anchura cada uno, con un área de 400.000 m²; la nueva salinidad, después de un milenio, ascendería al 4,7 por 100 ($S_v = 0,0361 + 0,0109$), superior a la del mar Rojo, del 4,2 por 100, y el caudal sería $Q_v = 200.000$ m³. Para la solución de puente, los canales podrían ser de 1.500 m. de anchura y 96 m. de calado para obtener la misma salinidad, con un volumen de dagaado de 30 millones de m³. Con las mareas de 3 m. de amplitud se alcanzarían velocidades del agua en el canal de hasta diez nudos, que dificultarían la navegación. Previsiblemente la renovación de las aguas, al reducirse a la quinta parte, no afectaría a las aguas profundas, las cuales, al igual que hoy ocurre en el mar Negro, perderían su ciclo de oxigenación y ello en pocos años transformaría drásticamente la vida en ellas, afectando indirectamente también, aunque mucho menos, a las plantas y animales de la capa de los 300 m. superiores. El impacto ecológico sería enorme, imprevisible y no deseable, pero nunca catastrófico; hoy, ningún ecologista se queja de la flora y fauna del mar Negro o del mar Rojo.

Si se cerrase totalmente el dique, en medio siglo bajaría su nivel 30 m., perdiéndose la comunicación con el mar Negro, y seguiría luego bajando durante siglos hasta reducir su superficie a la mitad de los 2,5 millones de km.² actuales, alcanzando entonces una evaporación neta nula y una salinidad aproximadamente triple, del 11 por 100 (la saturación se alcanza hacia el 27 por 100, que es el caso del mar Muerto o el gran Lago Salado).

Existe la idea de aprovechar este dique para la energía hidroeléctrica, apuntada por algunos ingenieros. El salto podría actuar por la diferencia de densidades entre las aguas más o menos sala-

das, que es hoy de 1/550. Una turbina de 10 m. de diámetro, alimentada por una tubería que alcanzase los 200 m. de profundidad, tendría una potencia de sólo 450 kwat., aprovechando un caudal de 200 m³/sg., con un salto de 36 cm. de desnivel medio. Más rentable sería aprovechar el desnivel de la marea; ésta, en lugar de amortiguarse como hoy a lo largo de 50 km., tendría un descenso brusco en el canal, de modo que oscilaría sólo la orilla occidental del dique, permaneciendo con nivel constante la oriental, salvo la zona afectada por la difracción que se amortigua muy rápidamente, pues por la ley de Green la amplitud se reduciría a la tercera parte al pie del dique. Se podrían colocar turbinas reversibles a una profundidad mínima, aprovechando el desnivel de + 1,5 m. de la oscilación occidental y con el diámetro de 10 m. y un desnivel medio útil de 1 m. durante cuatro horas, en cada semimarea alcanzarían una potencia de 2.500 kwat., con un caudal de 350 m³/sg., siendo utilizables cinco mil horas al año. En otros puntos de la costa se presentan amplitudes de marea muy superiores, y permiten, además, duplicar el desnivel útil durante la mitad del tiempo, mientras que aquí no se puede afectar al nivel del Mediterráneo. La idea se basa en un desconocimiento de los fenómenos de las corrientes del estrecho de Gibraltar o en errores de concepto, pues las velocidades no se pueden elevar artificialmente como pretenden.

PUENTE SOBRE APOYOS FLOTANTES

La sustitución de una pila cimentada en el fondo por un flotador anclado a éste, en la zona de grandes profundidades, resulta ser más económica y posee, quizá, menores dificultades constructivas. El costo del flotador y los muertos o lastres de anclaje es independiente de la profundidad, y el coste de los cables es proporcional a la profundidad o poco más, mientras que el coste de la pila es proporcional al cuadrado del calado, aproximadamente.

La construcción es relativamente simple: los flotadores y los muertos se construirían en dique, se llevarían a flote al emplazamiento, lastrando y fondeando los macizos de anclaje. La realización de los anclajes empotrados en el terreno de fondo, mucho más problemática y costosa, es sin embargo hoy ya aplicada a 300 m. de profundidad

en la industria petrolífera; si los cables se unen a los lastres en la superficie, previamente a su fondeo, la operación es más fácil. La elección del sistema de anclaje, con taladro inyectado en el terreno o con macizo lastrado, dependería del coste; si el fondo es rocoso puede ser mejor lo primero, pero en tanto no se desarrolle más esta técnica submarina, quizá sea preferible el macizo de hormigón, que se puede recubrir de materiales sueltos.

El empleo de apoyos flotantes permitiría llevar el trazado del puente por la zona de calados mayores en la zona más angosta del estrecho, reduciendo la longitud de 27 km. del umbral S a 15 km.

Si se busca el mínimo de la suma de coste de tablero y cimiento, al abaratare este último permite el empleo de luces mucho menores que para el caso de cimiento fijo profundo, del orden de 250 a 500 m., previsiblemente con tableros anti-rantados en vez de colgantes, con lo que se independizaría una pila de las contiguas y se suprimiría la posible rotura total como fichas de dominó.

La navegación debería permitirse por dos canales que se salvarían con puentes de 2.000 m. de luz, o mejor mediante túnel sumergido apoyado en el fondo, a la cota -30 m. No debe olvidarse el mantener en toda la longitud las luces de 2.000 m. de puente colgante, con un trazado en la zona angosta, y menos obstáculo a la navegación, como posible alternativa.

Esta solución adolece de tres defectos: la deformabilidad de los cables de gran longitud, que sería de unos 2 m. La durabilidad de los elementos de anclaje, que puede subsanarse con la reposición periódica de los mismos. La vulnerabilidad de los cajones flotantes y, sobre todo, de sus anclajes ante el impacto de buques o submarinos y acciones de sabotaje, muy superior a la solución de cimiento fijo de gravedad. La defensa contra el choque debe basarse más en una señalización múltiple, tanto en superficie como submarina, incluso con cadenas de boyas de aviso, que mediante defensas físicas, dada la magnitud y costes de éstas, salvo en el caso de luces de 2.000 m. Es dudoso que las dificultades jurídico-políticas internacionales ante este obstáculo vulnerable y casi continuo a la navegación se vencieran con

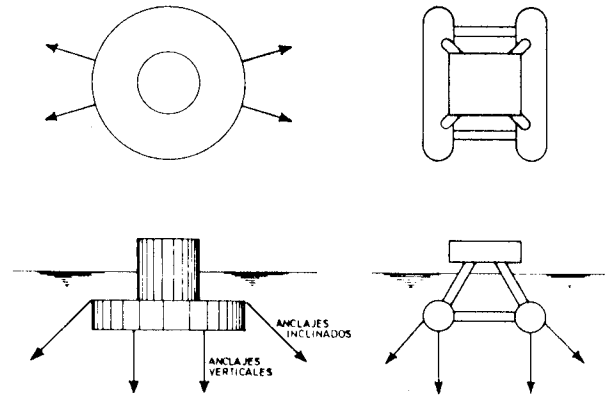


Figura 2.

dos canales de navegación. No obstante, esta solución es la que Kuesel y Blondín consideran de las más prácticas, así como Moreu.

El flotador podría ser metálico, o de hormigón armado o prensado. Debe recomendarse esto último por su mayor durabilidad, masa y menor vulnerabilidad. Aunque hoy es más económico un barco metálico que uno de hormigón, para una vida útil mucho más larga, como es la del puente, se debe escoger el hormigón. Conviene que su forma sea cilíndrica, de gran diámetro, para tener mayor estabilidad ante viento y oleaje, y de no mucha altura, para soportar menos presión en sus paredes. Podría estar formado por dos tambores, uno inferior de mayor diámetro totalmente sumergido que aportase la mayor flotabilidad, y otro cilíndrico superior donde apoyase la pila, para sufrir menos riesgo de impacto y menor efecto de las olas; deberían tener compartimentos independientes y ser visitables para su vigilancia y para retesar o sustituir los cables de anclaje. Se podría construir en dique en la bahía de Algeciras, trasladados a flote y fijados mediante los anclajes con un posicionado dinámico.

Otro tipo de apoyo propuesto es mediante dos flotadores sumergidos, de sección rectangular o circular, arriostrados entre sí mediante una triangulación, para conseguir mayor inercia gracias a su separación, y desde ellos emergerían cuatro patas que se prolongarían con la torre.

A base de alargar los flotadores tubulares sumergidos se puede llegar a la continuidad del apoyo, permitiendo luces menores del tablero, y con los anclajes y las pilas en los nudos de la celosía resultante.

ENLACE FIJO EN EL ESTRECHO DE GIBRALTAR. SOLUCIONES DIFERENTES...

Los anclajes tendrían por misión absorber los movimientos verticales del flotador causados por la marea y oleaje, y los horizontales y de giro debidos al viento, oleaje y corrientes. Se pueden disponer verticales e inclinados. Los verticales deben pretensarse sobrehundiendo el flotador de modo que se retesen o alfojen al oscilar el nivel del agua; para soportar una fuerza horizontal exigirían una inclinación con un movimiento horizontal inadmisibles.

Los anclajes inclinados pueden absorber también esfuerzos verticales, dándoles inclinaciones de 45° a 60°, pero puede ser más conveniente disponerlos simultáneamente a los verticales, y especializarlos para absorber fuerzas horizontales, con una inclinación de unos 20° y mayor longitud, pero precisando un lastre menor, y con mayor influencia de su peso propio.

Los anclajes inclinados se orientarían casi perpendicularmente al tablero del puente, pero con una pequeña componente longitudinal para absorber los esfuerzos existentes en ese sentido.

El difícil problema de la corrosión obliga a cuidar los sistemas de protección, pero de todos modos se debe prevenir la reposición a medio plazo de los cables. También pueden emplearse tirantes de hormigón pretensando en lugar de cables aislados.

Se ha realizado un predimensionamiento para cuatro casos: trazado de 27 km. en el umbral S y de 15 km. en Punta Cires, y cada uno de ellos con luces de 2 km. o de 300 m.

Se pretende que sean comparativos, pero los precios unitarios tienen un grado de incertidumbre que puede favorecer a alguna de las soluciones, por lo que el cuadro adjunto debe tomarse con bastantes reservas. Se han supuesto los siguientes costes:

El túnel sumergido con su terraplén sumergido inferior, a 15.000 millones de pesetas/kilómetro; el tablero de 2.000 m. de luz, otro tanto; el tablero de 300 m. de luz, a 6.000 millones de pesetas/kilómetro; el hormigón pretensado o armado acabado en flotadores, a 130.000 pesetas/m.³; el

TABLA

	Trazado 15 km.		Trazado 27,5 km.	
	Luz = 300 m.	Luz = 2.000 m.	Luz = 300 m.	Luz = 2.000 m.
Flotador:				
Carga en flotador (T.)	47.000	150.000	47.000	150.000
∅ × h. (m.)	75 × 12	180 × 15	75 × 12	180 × 15
Desplazamiento (m ³)	60.000	430.000	60.000	430.000
Hormigón (m ³)	15.000	105.000	15.000	105.000
Anclajes:				
Vertical (T.)	10.000	70.000	10.000	70.000
Horizontal (T. ±)	1.600	3.500	1.600	3.500
Peso cables (T.)	1.500 a 5.000	3.500 a 9.000	1.500	3.500
Lastre (m ³)	6.000	12.000	6.000	12.000
Terraplén (km.)	1	1	2,5	2,5
Viaducto (km.)	—	—	6	5
L = 300 metros (km.)	10	—	15	—
L = 2.000 metros (km.)	—	14	—	14
L = 1.000 metros (km.)	—	—	—	6
Túnel sumergido (km.)	4	—	4	—
Coste estimado (10⁹ ptas.):				
Cimiento flotante	310	210	205	140
Resto	120	170	170	290

acero en anclajes, a 1.000 pesetas/kg., y el acero en estructura, a 400 pesetas/kg. No se incluyen las posibles defensas de las pilas de 2.000 m. de luz. El encarecimiento de esta luz grande con canales de navegación y túnel sumergido para mayor facilidad aún a la navegación, encarecería en unos 50.000 mil millones de pesetas los valores de la tabla.

TUNEL SUBMARINO APOYADO EN EL FONDO

Un túnel apoyado en el fondo a lo largo de la línea de calados mínimos de umbral S posee las siguientes ventajas: no interferencia con la navegación, salvo durante la construcción; influencia ecológica casi nula; poca vulnerabilidad, salvo para un sabotaje desde el interior; limitación de la longitud en túnel a sólo 19 km. si en ambas orillas se construyen sendos diques hasta la zona de 60 m. de calado; posible limitación de la profundidad máxima a - 195 m., con lo que la pendiente máxima sería de 2,5 por 100, apta para el ferrocarril.

Sus inconvenientes son la gran extrapolación que supone respecto a los calados máximos de 30 m. en que hoy se ha utilizado esta técnica, y su coste, muy difícil de estimar, pero que probablemente rondará los 700 millones de pesetas para túnel de doble vía de ferrocarril, más túnel con cuatro carriles carreteros.

El túnel constaría de elementos prefabricados de unos 250 m. de longitud, a fin de reducir su número de juntas, formados por hormigón armado. La sección sería circular para soportar a compresión las fuertes presiones hidráulicas casi sin armadura transversal, y con un postesado longitudinal para soportar las flexiones de fondeo y de un apoyo irregular, aunque el peso sumergido casi nulo limitaría la magnitud de dichos esfuerzos. El empleo de un forro de chapa mejoraría la impermeabilidad, y permite acelerar la construcción, pues disponiendo rigidizadores y actuando como encofrado perdido se puede efectuar la botadura cuando sólo se ha hormigonado la quilla, complementado el hormigonado a flote. La impermeabilidad y durabilidad se mejorarían también con un revestimiento bituminoso.

Para obtener una flotabilidad muy ligeramente

negativa, el espesor de las paredes queda sobrado respecto a las necesidades resistentes. Se proponen dos variantes de sección tipo. Un tubo de diámetro exterior de 12 m. y espesor 1 m., apto para doble vía ferroviaria o para dos carriles carreteros y pequeños arcenes, con el segmento circular inferior de 16 m.² para ventilación. La otra variante sería un tubo de 16 m. de diámetro exterior, con espesor de 1,5 m., con dos niveles superpuestos de las circulaciones opuestas, con dos carriles en cada nivel, y con un lastrado en los laterales y en las soleras, y que, por necesidades de ventilación, podría requerir un sobredimensionamiento del diámetro o una limitación de velocidad y de densidad de tráfico pesado.

La construcción se realiza por el método tradicional (véanse los escritos de Angel Uriel o de Culverwell), transportando los elementos a flote con los extremos tapados por opérculos provisionales, y se fondearían lastrándolos, con un posicionamiento de precisión decimétrica en planta y una nivelación cuidada, lo cual es factible mediante un fondeo guiado acústico desde el módulo anterior ya colocado, y con apoyo en un saliente inferior del mismo preparado al efecto o un emboquillado en embudo, y con apoyo en dos puntos del extremo frontal opuesto que permiten un nivelado mediante gatos. Es una operación delicada pero resuelta, y que debe adaptarse para mayores profundidades y velocidades de corriente. La cama de apoyo final se puede lograr mediante inyección de arena.

La junta entre elementos admite muchas variantes. Se puede realizar mediante chapas solapadas, empernadas por buzos y calafateadas, o mediante labios de hormigón que oprimen una junta de goma. El achique del espacio entre los dos opérculos de los módulos contiguos hace que la presión del agua en la cara frontal del elemento comprima fuertemente la junta, mejorando su estanqueidad. Es usual, e imprescindible en este caso, el completar la junta provisional mediante el hormigonado sumergido de un collar con encofrado perdido. Finalmente se eliminan los dos opérculos y se completa la junta definitiva desde el interior, trabajando en seco.

El apoyo en el fondo exige una preparación y regulación de la superficie, bien mediante dragado, que en fondo arenoso puede resultar práctico,

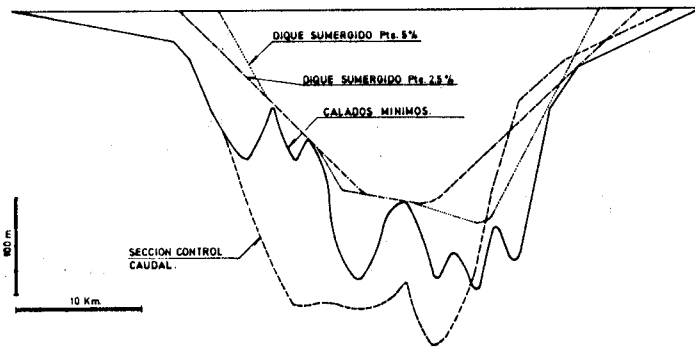


Figura 3.

o mediante terraplenado, requiriendo una precisión del orden de medio metro a un metro.

En los 9 km. centrales los calados oscilan entre 150 y 290 m., con pendientes de hasta el 15 por 100. Para regularizarlo con el mínimo de terraplenado y sólo un punto bajo se requieren rellenos de hasta 75 m. de altura y alcanzar un calado de 220 m., con pendientes de 5 por 100, con un volumen del orden de 75 millones de m.³ de pedraplén vertido desde barcaza y otros 70 desde tierra en 13 km., con 15 km. de túnel.

Si se limitan las pendientes a 2,5 por 100, disminuyendo la profundidad máxima a 195 m., se requiere un terraplenado de hasta 150 m. de altura, con un volumen de 130 millones de m.³ vertido desde barcaza, más otros 25 millones de m.³ vertido desde tierra hasta 40 m. de calado en una longitud de 9 km. (fig. 3).

Se ha supuesto un pedraplén con 50 m. de ancho de coronación para tres tubos de 12 m. paralelos, y de 100 m. de anchura a la cota cero para las vías en superficie. Posteriormente a la ubicación de los elementos se taparían con arcilla y piedra para mejorar la impermeabilidad y protegerlos contra sabotajes e impactos.

Existe la posibilidad de apoyar los 8 km. centrales sobre pilas cilíndricas verticales de hasta 150 m. de altura, cimientados entre las cotas - 280 m. y - 180 m., en lugar de colocar el terraplenado sumergido. Ello implica el fondeo de estas pilas con la preparación de su cimiento y el empleo de un gran número de ellas para limitar la luz libre a lo que resistiese el tubo a flexión. Ello constituye realmente una solución mixta de túnel apoyado en el fondo y de túnel semisumergido que se

trata a continuación, que no se recomienda por obligar a desarrollar dos técnicas distintas sin una diferencia económica apreciable.

La construcción del dique sumergido indudablemente alteraría las corrientes del estrecho; sin embargo, la sección del umbral que actúa como control o de limitación del caudal es oblicua a la línea de calados mínimos, pues debe ser perpendicular a las líneas de corriente, según se ve dibujando una malla aproximada de la red de corriente. Si la línea de calados mínimos proyecta una sección de 3,45 km.², la sección oblicua efectiva de control actual debe exceder los 3,75 km.² y alcanzar 340 m. de calado, y casi no se vería afectada por el dique en la zona central profunda, pero sí en la proximidad a la costa, donde perdería un área útil de 0,6 km.². El caudal, proporcional al área por la raíz del calado máximo, se reduciría sólo un 16 por 100, y a largo plazo la salinidad subiría paulatinamente durante un milenio del 3,83 por 100 al 4,08 por 100 en el Mediterráneo occidental, bajando entonces la reducción del caudal a menos del 11 por 100, según las ecuaciones expuestas en la solución de dique.

Realmente esta influencia sería bastante menor de la mitad, debido a que existen dos secciones simultáneas de control, y a la fuerte influencia de la aceleración de Coriolis en la aportación del caudal junto a las costas. En cualquier caso, previsiblemente no se afectarían la flora y la fauna.

TUNEL SUBMARINO FLOTANTE

El tubo sumergido entre dos aguas, con flotabilidad positiva o negativa, pero prácticamente nula, resulta atractivo porque permite eliminar las interferencias con la navegación de superficie, tener una longitud mínima y tener un desnivel mínimo en la rasante de unos 40 m. sin apenas pendientes, reduciendo así los problemas de ventilación. Su coste, de estimación muy insegura, podría ser menor a cualquier otra solución.

Esta solución debe desecharse por no existir ningún antecedente, aunque se está planteando la posibilidad de aplicar un prototipo en algún fiordo noruego, y por su gran vulnerabilidad, pues un simple taladro que permitiera su inundación al cambiar su peso sumergido arruinaría la obra en

toda su longitud. Por otro lado, las corrientes alternativas del estrecho no favorecen su aplicación en ese lugar.

La sección tipo sería circular para resistir la carga del agua. Las secciones de 12 y 16 m. de diámetro exterior indicadas para túnel apoyado en el fondo serían aquí válidas, siendo preferible la segunda por su mayor resistencia a flexión. El espesor está tan sobrado que cabe incluso el descomponerlo en dos tubos concéntricos de espesor mitad, unidos por tabiques, y con una cámara intermedia inundada, para así reducir los riesgos de perforación por impacto. A la forma circular se le podrían añadir dos suplementos no resistentes que le dieran forma de huso hidrodinámico, para reducir la presión de la corriente horizontal.

Las cargas verticales se podrían reducir a poco más que la sobrecarga viva, con cierto margen de seguridad por la imprecisión del peso propio, aunque con piezas de lastre móviles o con lastre líquido y controlando con gatos la fuerza transmitida a cada apoyo, y con dispositivos de medida permanente se podría confiar en tomar una carga máxima de cálculo menor al doble de la carga viva, unas 5 tn./ml. para dos carriles, y 10 tn./ml. para cuatro carriles. La carga horizontal podría alcanzar 1,5 tn./ml.

Los tramos podrían trabajar como biapoyados, si cada elemento prefabricado se empalma en los puntos de apoyo, o como biempotrado, si el empalme se desplaza a un 21 por 100 de la luz, de modo que la viga tuviese un voladizo respecto al apoyo siguiente. De este modo se puede llegar a luces de 250 m., siendo los cajones prefabricados de esa longitud.

En caso de flotabilidad reducida positiva, el túnel debe anclarse al fondo, conviniendo separar los anclajes entre sí lo más posible para crear una interferencia menor a la navegación submarina. Los anclajes, según se indicó al hablar de puente de apoyos flotantes, podrían ser de cables o de hormigón pretensado y sujetarse al fondo mediante taladros inyectados en roca o con macizos de lastre.

En caso de flotabilidad negativa se podría conseguir el apoyo mediante pilas sumergidas cimentadas en el fondo, pero dado el costo relativo entre viga y pila, y el gran número de pilas despro-

porcionadamente altas, hace la solución antieconómica, aún el umbral S de mayor recorrido y menor calado. Lo más recomendable es el recurrir al trazado de longitud mínima, en Punta Cires, con calados de 900 m., utilizando flotadores anclados de los que se colgase el túnel. Si los flotadores emergiesen a la superficie, podrían permitir también la ventilación desde puntos intermedios del recorrido, pero interferirían la navegación y aumentarían la vulnerabilidad y el riesgo catastrófico, por lo que es obligado desecharlo.

Los flotadores deben ser, por consiguiente, sumergidos, pero ello equivale a dar flotabilidad positiva en el propio túnel en la zona de apoyo, es decir, se podría hacer un túnel no homogéneo, con tramos de flotabilidad diferente. La flotabilidad positiva en los vanos podría ser la mitad de la sobrecarga viva, de 2 tn./ml., de modo que su flexión fuera positiva o negativa según el tráfico, pero con un valor absoluto la cuarta parte, y en la zona de anclajes la flotabilidad positiva sería mayor y suficiente para compensar incluso la sobrecarga de los vanos. Con este artificio se podrían aumentar las luces a 300 m. con igual sección de hormigón, con un pretensado longitudinal de 25 kg./cm.², y se aquilatarían los anclajes a 1.800 tn. verticales y a 500 tn. con inclinación de 20° a 30° con la horizontal, en ambos sentidos, y con una pequeña componente longitudinal al túnel, siendo las piezas de hormigón de 78 m.² de sección sumando las paredes, tabiques y forjados.

El trazado por Punta Cires tendría un dique de 1 km. en la costa española y 13,5 km. sumergidos, no debiendo situarse más al oeste para no acercarse a la zona entre Tarifa y el umbral que es hidrodinámicamente más inestable, con formación de olas internas libres con puntas en la velocidad del agua.

La construcción sería análoga en muchas fases a la descrita para el túnel apoyado en el fondo, incluyendo la conveniencia de emplear una chapa como encofrado perdido e impermeabilización, protegida por una capa bituminosa.

El punto delicado de la construcción es la realización del empalme entre dos aguas y con corrientes de varios nudos, que exige una inmovilidad relativa perfecta. Requiere el «enchufe» del módulo nuevo en el anterior, ya fijo, en unos labios y elementos preparados al efecto, mediante

ENLACE FIJO EN EL ESTRECHO DE GIBRALTAR. SOLUCIONES DIFERENTES...

un posicionamiento dinámico del cajón, similar al empleado para hacer sondeos en altamar, y una vez correctamente alineado efectuar un enganche o sujeción muy robusto. Simultáneamente, mediante un flotador reutilizable, también con posicionamiento dinámico, se tensarían los anclajes inclinados, levantando del orden de un metro respecto de su posición definitiva al collar que sujeta sus extremos, y seguidamente se aflojarían hasta establecer contacto con el cajón. Una vez sujeto por ambos extremos el cajón ante las corrientes horizontales, se procedería a efectuar la junta estanca provisional, necesariamente por un procedimiento lo más rápido y simple posible, como es el de empernado y junta de goma comprimida, que se reforzaría por la propia presión del agua con el achique del espacio existente entre ambos opérculos de los cajones. La junta definitiva hecha en seco desde el interior, debe ser también de realización rápida y sencilla, tanto a efectos de impermeabilización como de resistencia, debiendo poderse realizar con gatos, pernos, tensando cables o con otros sistemas mecánicos, completados con morteros de resinas. Seguidamente se engancharían y tensarían los cables inclinados suplementarios, y se anularía el lastre pertinente.

El costo para tubo de 16 m. de diámetro con cuatro carriles en dos niveles se estima en 250.000 millones de pesetas.

El ingeniero Mendoza propuso en 1919 un túnel sumergido suspendido de flotadores sueltos, sin anclarlos al fondo, resistiendo la fuerza horizontal a modo de funicular gigantesco, con un fuerte anclaje en los extremos. La fuerza de anclaje permitiendo una flecha horizontal de 1 km. con una luz de 13,5 km., sería de 22.000 toneladas, que podría resistir un cable de acero de alta resistencia de 60 cm. de diámetro, o el tubo antes definido de 16 m. de diámetro con paredes de hormigón de 1,5 m. de espesor, pre-tensado a 35 kg./cm².

El inconveniente, antes citado, de posible impacto de un buque con el flotador en superficie se evita suprimiendo los flotadores. Se llegaría así a un nuevo tipo, no más fantástico que el de Mendoza, y no propuesto hasta la fecha, consistente en un tubo con ligera flotabilidad negativa,

que trabajaría como funicular simultáneamente en sentido vertical y horizontal.

Para cuatro carriles, teniendo en cuenta la gran luz de 13 km., la carga vertical se puede reducir a sólo 3,5 tn./ml., pero con una flecha vertical de sólo 350 m. limitada, para que la pendiente máxima de la catenaria en las orillas no supere el 10 por 100. De este modo la tracción alcanzaría 250.000 tn., que se resistiría con 3 m.² de acero de alta resistencia incorporados al propio túnel.

Realmente, la solución consiste en extrapolar la idea de puente colgante anulando el peso muerto sumergiendo el tablero, e incluso anulando el peso propio de los cables, que en grandes luces es un elevado porcentaje de la carga total, sumergiéndolos también y compensándolos con la flotabilidad del túnel-tablero. Sin embargo, la economía queda limitada por la flecha admisible, pero se puede mejorar separando cerca de los apoyos el cable del túnel, emergiendo el cable a buscar una torre para ganar flechas y manteniendo el túnel sumergido, colgado y con pendiente más suave. Mediante este artificio se puede aumentar un 50 por 100 la flecha y la luz.

Ambas soluciones funiculares, la de Mendoza y la aquí sugerida, son técnicamente inviables por dos motivos: la velocidad del agua cambia de sentido con el ciclo de marea, por lo que tendría movimientos horizontales alternativos de cientos de metros o de, incluso, kilómetros.

El otro es que no se puede construir, pues habría que colocar el túnel sumergido de una sola vez y no empalmado elementos, al igual que en un puente colgante se trenza *in situ* el cable, precisamente por ese motivo de trabajar como catenaria; pero aquí sólo se podría construir con una «cimba» de anclajes al fondo provisionales, además de los flotadores, que se podrían eliminar después de realizar el empalme de la estructura completa entre las dos orillas.

Aparte de ello, no se concibe la aplicación de este tipo de soluciones para unas dimensiones tan gigantescas.

Podrían no ser tan disparatadas, sin embargo, para luces menores. Por ejemplo, un puente col-

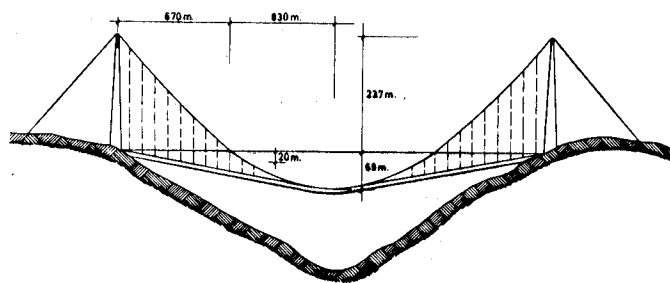


Figura 4.

gante de tablero sumergido en el estrecho de Mesina, con 3.000 m. de luz, podría tener un canal central de navegación de 1.400 m. libres con 20 m. de calado, con el cable sumergido 1.660 m., de los cuales 500 m. tendrían el peso anulado por la flotabilidad del tablero que estaría en contacto con él. El tablero tendría una pendiente del 4 por 100, alcanzando los 69 m. de profundidad, y mediante unas pilas de 237 m. se conseguiría una flecha de 306 m. (figura 4). Para 5 tm./ml. de sobrecarga bastaría un peso de cable de sólo 5 tn/ml., con una tracción de 5.000 tm. Las péndolas serían de hormigón pretensado, y habría que asegurar la protección contra la corrosión del cable principal, mediante una camisa estanca rellena de aceite. Corrientes de agua alternativas de 1,5 m/sg. se resistirían con la forma hidrodinámica del túnel-tablero con una oscilación horizontal de 13 m. La rotura de una péndola en momentos de poco tráfico no implica la ruina del tablero, y podría repararse interrumpiendo el uso hasta finalizar las obras.

SOLUCIONES MIXTAS

Existe un gran número de combinaciones posibles entre los distintos tipos. Sin embargo debe desecharse la solución de túnel entre dos aguas por su vulnerabilidad, y la del túnel subterráneo por ser difícilmente combinable con otros.

La solución de dique, reducido a los arranques del enlace junto a la costa, para zona de poco calado, es la aconsejable siempre, en mayor o menor longitud.

La solución de túnel submarino apoyado en el fondo, en zona de calado reducido a 30 m. o 40 metros, y en longitud de 1 a 3 km. próximo a cada orilla, es muy ventajosa para facilitar dos canales de navegación con el riesgo mínimo de impactos. Es una solución casi obligada para el puente con apoyos flotantes de luces reducidas y es recomendable para combinarlo con puente de apoyos fijos, pese a su sobrecosto y la pérdida de funcionalidad del desnivel a que obliga.

El puente de apoyos fijos en la zona de menor calado se podría combinar con puente de apoyos flotantes anclados al fondo en la zona central de calados mayores a 150 m., aunque obliga a la puesta a punto de las dos técnicas. Ello es factible tanto para el trazado por el umbral S como por el de longitud mínima, pese a que los apoyos fijos precisasen cimentarse sobre un talud con el 15 por 100 de pendiente.

Luis del Cañizo Perate



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1965), doctor (1971), profesor titular de Geotecnia y Cimientos (1980), Premio Nacional Fin de Carrera. Especializado en Mecánica de Suelos, ha trabajado en Entrecanales y Távora, S. A.; en Kronsa, como director técnico, y actualmente en COTAS Internacional. Fue director general de Infraestructura del Transporte y vicepresidente de SECEGSA. Ha publicado diversos artículos técnicos relativos a mecánica de suelos y cimentaciones, y una solución general del problema de las corrientes del Estrecho de Gibraltar en régimen permanente («R.O.P.», junio 1984). Publicará próximamente la interpretación de diferentes fenómenos de régimen variable.