

UN TUNEL BAJO LA RIA DE BILBAO

Por RAMON ARGÜELLES

Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

Expone el autor de este artículo las sencillas hipótesis de cálculo sobre las que se basó el estudio de esta interesante obra submarina, que figuraba incluida, desde el año 1928, en el programa de los Enlaces Ferroviarios de Bilbao.

"... No sin cierta tristeza al contemplarla definitivamente frustrada para nosotros."

La conveniencia de dar paso a la vía ancha del ferrocarril a la margen derecha de la ría de Bilbao, fue el motivo de que los componentes de la Junta de Enlaces Ferroviarios de aquella localidad idearan — allá por el año de 1928 — una solución verdaderamente interesante. Proyectaban aquellos ilustres antecesores nuestros un trazado de la nueva línea ferroviaria tal que permitiese la ejecución de la primera fase de la obra antes de que se diera entrada a las aguas en el Canal de Deusto. En una segunda etapa, transcurrido un número indeterminado de años, eludían las aguas libres, situando el cruzamiento precisamente en una zona del cauce actual, rellenada con posterioridad a la apertura del Canal a la navegación. Con tan original treta podía ejecutarse a cielo abierto la totalidad de la parte submarina del trazado, soslayando las innumerables dificultades técnicas y el elevadísimo costo que implicaría el cruce de la ría sin interrumpir la navegación y trabajando con excavaciones del orden de los 20 m. por debajo de la pleamar.

De feliz idea debemos calificar este anteproyecto de trazado submarino que posibilitaba la vieja aspiración bilbaína de dar servicio ferroviario, con la vía normal, a la otra mano del puerto y a la Vizcaya industrial y urbana que se extiende hacia el Valle de Asúa y llega hasta límites inconcebibles en el aprovechamiento de las zonas marítimas y terrestres de su abarrotada, turbia por el mineral, y entrañable ría.

* * *

Son muy diversas las soluciones que pueden adoptarse para una sección de túnel con

carga hidráulica importante. En general, hay dos tipos bastante definidos: secciones circulares, a las que dan preferencia los ingenieros norteamericanos y secciones rectangulares, por las que se inclinan los proyectistas europeos. Teóricamente la solución circular reúne condiciones más favorables por la mayor uniformidad de los esfuerzos sobre el aro del túnel, lo que reduce las flexiones. La solución rectangular ofrece la ventaja de requerir menor altura total, con la consiguiente economía en las excavaciones y, por el contrario, el inconveniente de tener que resistir fuertes momentos flectores. En todos los casos hay que prever la presencia de las subpresiones a lo largo y a lo ancho de las paredes del túnel. Por ello, nos inclinamos por la solución tubular.

* * *

Una vez construido el tubo, es aconsejable protegerle con arcilla y una solera de hormigón, que impida la hinca en el revestimiento del túnel de las anclas de los buque fondeados en el centro del canal. Estas medidas precautorias asegurarían, además, la conservación del hormigón armado, expuesto a la destructora acción química del agua del mar. La arcilla es un impermeabilizante económico que, por otra parte, asegura la estabilidad del tubo al reducir las subpresiones y dificultar la flotación, a la que también se opone, con esfuerzo de muy superior magnitud, la adherencia del hormigón con las paredes y bases de la zanja.

* * *

El diámetro interior elegido para el tubo es de 6 m., que permite el acoplamiento del gallo de la vía ancha en curva, aun previendo

los desplazamientos a que obligarían las transiciones de entrada y salida de la vía en sus enlaces con la alineación recta del túnel. Tendría, por consiguiente, esta sección capacidad para cualquier clase de circulaciones y en toda circunstancia; inclusive si se adoptara la solución, aconsejable, de vía en estuche.

* * *

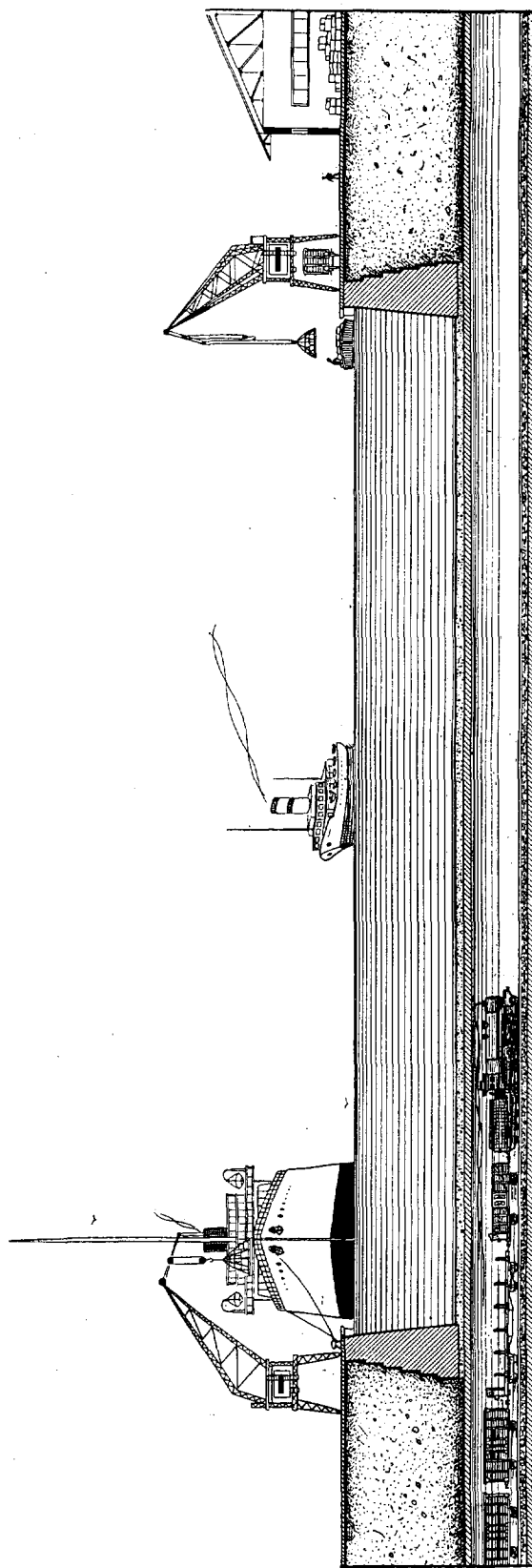
Sea por la urgencia con que tuvimos que redactar este proyecto o porque realmente existe una laguna en la literatura técnica acerca del cálculo de túneles submarinos, hubimos de desarrollar el estudio con el exclusivo auxilio de la "Mecánica Elástica" de don Alfonso Peña, nuestro Profesor en la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos. Don Alfonso era muy tolerante y yo tengo que reconocer que fui un mediano estudiante de su elemental, pero muy instructivo libro de texto, al que presté poquísima atención entonces y ahora debo gratitud.

Meditando sobre el tema, intuimos que si el tubo era muy delgado y se hallaba a profundidad considerable, actuaría como un anillo sometido a compresión por fuerzas prácticamente distribuidas con uniformidad alrededor del trasdós de la pieza.

En el cálculo de los tubos delgados con forma de bóveda rebajada, se admite que trabajan con la sencillez de un arco de dos articulaciones fijas en la base. Y se considera, asimismo, que los tubos circulares flexibles, al ceder bajo la acción vertical, transforman la carga en una fuerza horizontal que presiona contra el relleno de los costados, reduciendo sensiblemente las diferencias en los empujes que, actuando bajo idénticas condiciones, soportaría un tubo rígido. Mas a pesar de lo expuesto (y aquí quedan consignadas las ideas simplificadoras y teorías elementales que se utilizan para el cálculo de los tubos de acero corrugado, bien sean circulares o abovedados) no nos decidimos por una solución "delgada" por falta de experiencia en el tema, eligiendo la más clásica del arco de hormigón armado, con espesor apreciable.

* * *

Don Alfonso Peña, en su citada obra, analiza los comportamientos de las formas tubulares rígidas. Determina la diferencia admisible entre los radios interior y exterior, para que las tensiones originadas en el intradós y trasdós del



aro no excedan del 10 por 100 del valor medio calculado. Y establece las leyes de las flexiones de los tubos rígidos sometidos a diversas hipótesis de carga y de sustentación (1).

* * *

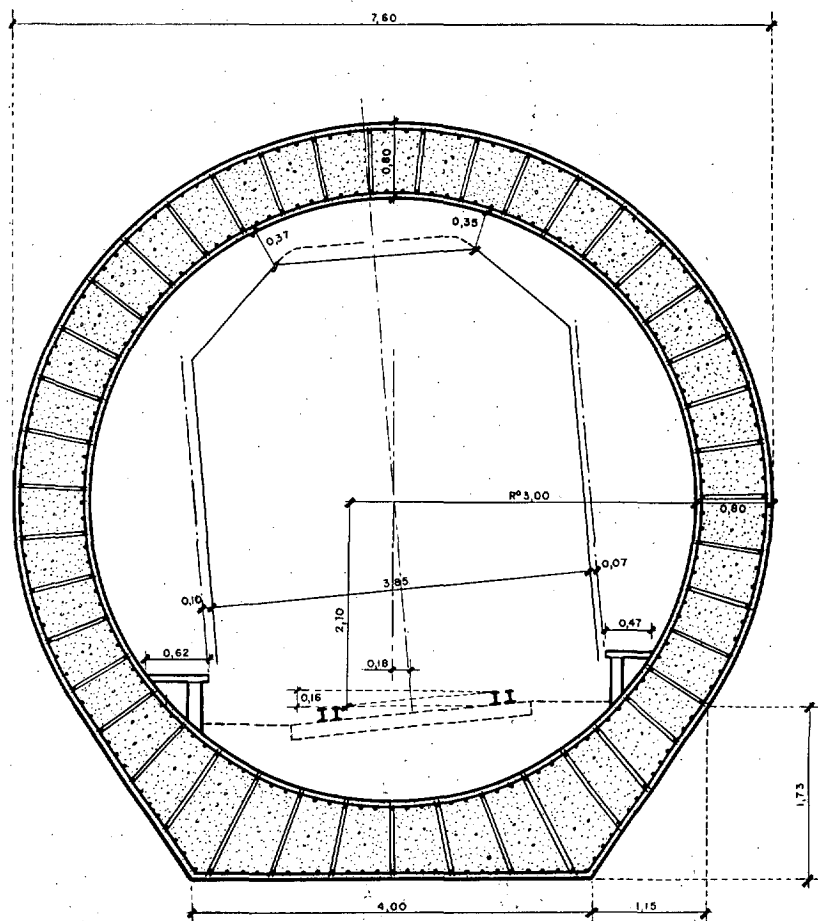
Se pueden dar condiciones de carga muy diversas. La más ajustada a la realidad sería la de considerar la parte inferior del tubo apoyada sobre el terreno natural. También podemos imaginarnos que, a través de las margas, se llegase a ejercer una subpresión en todo el contorno del túnel, por lo que resultaría el tubo totalmente comprimido; si bien, por la diferencia de altura de la lámina de agua en la clave y en el fondo, se originarían, además, flexiones aprecia-

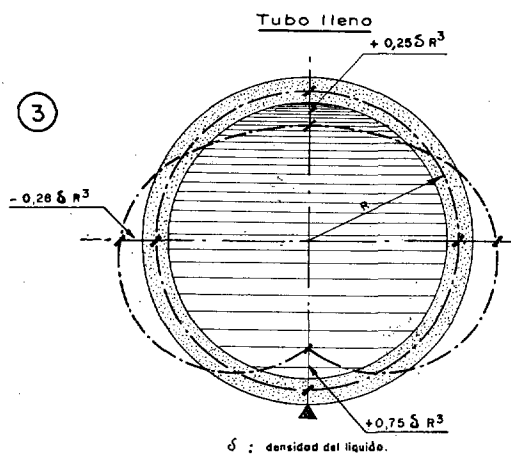
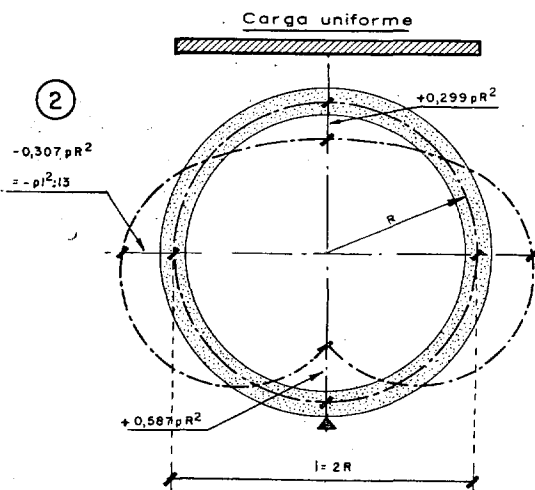
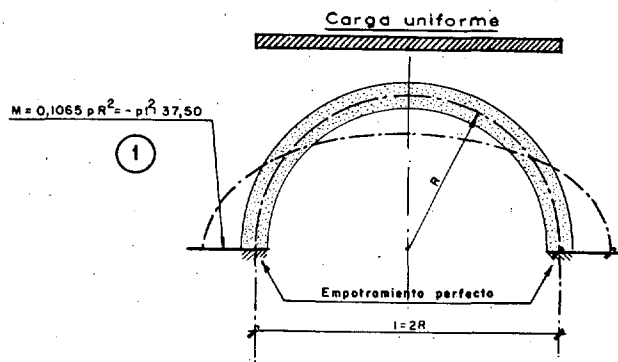
(1) La conveniencia de evitar el posible desplazamiento del tubo por flotación, nos animó a rebasar ligeramente el espesor del aro que implicaría la condición señalada por Peña.

bles. Debemos considerar, asimismo, el caso improbable de que las filtraciones llenaran totalmente el tubo antes de que se diese entrada al mar en el Canal de Deusto.

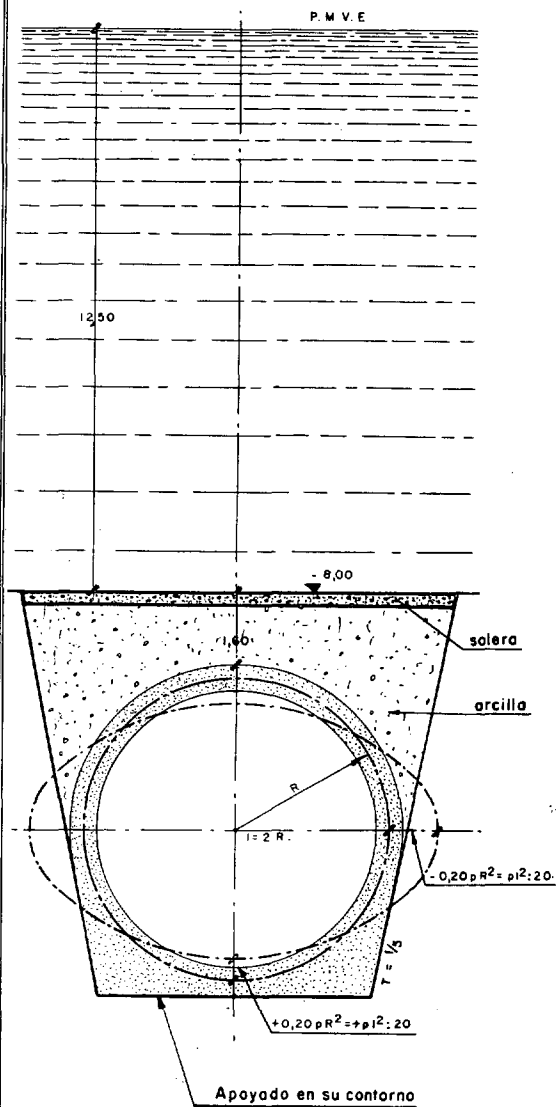
Examinaremos estas tres hipótesis de carga sobre el túnel:

a) El problema del cálculo de un tubo, apoyado el medio cilindro inferior sobre el terreno natural, lo aborda también el Profesor Peña en su ya citada obra "Mecánica Elástica". Para simplificar la solución del complejo problema que plantearía el estudio del equilibrio del terreno, Peña supone el medio tubo de arriba sustentado de modo que sea nula la deformación angular en el plano de simetría. También prescinde, en favor de la seguridad, de los empujes horizontales que provocan las fuerzas que gravitan sobre la bóveda, por ser mucho más pequeños e imprecisos en su determinación que los verticales y porque favorecen la resistencia.





Hipótesis de cálculo adoptada



④ Tubo apoyado en su contorno — Flexiones (A. Peño):
 $\frac{1}{2} p R^2 = 4 = p l^2 16$.

Bajo estos supuestos los momentos flectores en el aro oscilan entre $\pm 0,25 p \cdot R^2$.

b) Si hubiéramos admitido que la mitad superior del tubo actuaba como un arco de medio punto empotrado en sus arranques (número 1, del croquis), la flexión máxima valdría $0,1065 p \cdot R^2$; sensiblemente inferior a la obtenida por Peña para el tubo apoyado sobre su contorno. Es de observar que el túnel de techo plano, supuesto empotrado en las paredes del pórtico, soportaría una flexión de $-0,33 p \cdot R^2$; la más elevada de todas las examinadas hasta el momento.

c) En nuestro caso particular, considerando necesario que el peso propio supere al del volumen de agua desplazada, interesa que la mitad inferior tenga más masa que la estrictamente necesaria para impedir la flotación, por lo que se adopta para su contorno la sección trapezoidal de la excavación, de forma que quede perfectamente relleno el fondo de la zanja, alcanzándose así la total adherencia con el terreno natural, lo cual asegura su estabilidad, y al mismo tiempo aumenta sensiblemente la rigidez del enlace en el plano del eje horizontal que pasa por su centro. En tales condiciones, creemos que puede ser calculado el tubo como si sufriera unas flexiones que oscilasen entre los valores $\pm 0,20 \cdot p \cdot R^2$ (ver *Hipótesis de Cálculo Adoptada*, del citado croquis). Advertiremos que es frecuente, al calcular los revestimientos de los túneles, admitir el empotramiento perfecto de los hastiales en la solera, hipótesis, a nuestro juicio, más próxima a la realidad que la que, por razones de seguridad, hemos adoptado.

Se acompañan algunos gráficos que permiten seguir fácilmente los razonamientos desarrollados y el cálculo del aro, tema que, brevemente trataremos a continuación:

1. En definitiva, actuarán sobre el tubo: la carga hidráulica, la arcilla y su peso propio; o sea, $17,38 \text{ Tn./m.}^2$ (1). La compresión en un metro lineal del aro sería de $74,33 \text{ Tn.}$ y el momento flector máximo $M = 0,20 \times 17,38 \times$

(1) Se omite el detalle del elemental cálculo.

$\times 3,4^2 = \pm 40,20 \text{ m.Tn.}$ Armada la sección con 10ϕ de 18 mm. simétricos, las cargas unitarias del acero y hormigón resultarían aceptables.

2. En el supuesto de estar lleno de agua el tubo (número 3, del croquis), las flexiones en el plano horizontal tendrían el valor máximo, $M = 0,2854 \times 3,4^3 = 11,30 \text{ m.Tn.}$ Las compresiones, originadas exclusivamente por el peso propio, quedarían aliviadas por las tensiones que produce el líquido actuando en el interior.

3. De existir subpresión en todo el contorno del túnel, se puede dividir esta acción en dos partes: una, radial, uniforme, provocada por la carga máxima en el trasdós de la clave, con valor aproximado de $13,50 \text{ Tn./m.}^2$, carga que únicamente originaría compresiones. Y una acción exterior, acumulable a la expresada, pero variable, y cuyo valor oscilaría desde cero en la cumbre del aro hasta $7,60 \text{ Tn./m.}^2$ en el exterior del fondo. Esta carga provocaría flexiones de magnitud parecida, pero de signo contrario a las calculadas anteriormente para el tubo lleno. Los resultados prácticos de esta hipótesis son más favorables que los del número 1; cargas con las que, en resumen, se calculó la sección del aro de este túnel submarino.

* * *

Las aguas del mar Cantábrico invaden ya la primera parte del Canal de Deusto, y parece ser que muy pronto será éste abierto a la navegación. Mas como el túnel submarino no ha sido aún construido, habremos llegado tarde. Acaso dentro de treinta o de cuarenta años, otro compañero nuestro reciba alborozado el encargo de estudiar el paso de la vía ancha del ferrocarril a la margen derecha de la ría de Bilbao. Tendrá, con seguridad, que seguir otro derrotero o lanzarse a cruzar las aguas a pecho descubierto. Me daría por satisfecho si la publicación de este artículo en nuestra Revista sirviera para facilitar al distinguido sucesor, la modesta información técnica y el resumido antecedente histórico de los orígenes de esta singular obra de ingeniería que aquí se comenta. No sin cierta tristeza al contemplarla definitivamente frustrada para nosotros.