

## MEJORANDO LA COMPETITIVIDAD EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA:

# Túneles sumergidos

**Rob Vergoossen**  
Royal Haskoning DHV

**Hans De Wit**  
Tunnel Engineering Consultants

**Eelco Van Putten**  
Tunnel Engineering Consultants

Reproducción autorizada por la revista Noticreto # 125, de Julio -Agosto 2014. Editada por la Asociación Colombiana de Productores de Concreto - ASOCRETO.

La rápida expansión de la economía global ha incrementado la necesidad de una eficiente red de transporte internacional que se ve limitada por los estrechos marinos, grandes estuarios y rutas de navegación, que pueden incrementar los costos y tiempos del transporte. Sin embargo, las estructuras que atraviesan esos medios pueden mejorar las condiciones de transporte y aliviar la red existente de carreteras. Cuando es necesario cruzar una ruta navegable, la alternativa más evidente puede ser la construcción de un puente o de un túnel excavado, que son las opciones más familiares para los ingenieros y, por ende, las más simples. Sin embargo, para el cruce de los cuerpos de agua los túneles sumergidos son una posibilidad diferente que puede brindar una solución económica, de alta calidad y competitiva, en especial cuando hay que atravesar una ruta navegable dentro de un ambiente urbano o cuando el tránsito de embarcaciones en puertos principales exige un gran galíbo. En la última década, nuevos desarrollos e innovaciones han demostrado que el túnel sumergido puede ser una opción muy ventajosa para la comunicación entre dos costas. El túnel ferroviario submarino de Marmaray, que une a Europa con Asia en Estambul, suministró la técnica para impulsar en el Viejo Continente los túneles sumergidos, lo que fue rápidamente seguido por otros proyectos que aplican la técnica a gran escala. El ejemplo reciente más admirable es el enlace Fehmarnbelt, entre Dinamarca y Alemania, que comprende un túnel sumergido de más de 19 Km.

### DESCRIPCIÓN GENERAL

Un túnel sumergido está conformado por grandes módulos prefabricados de concreto reforzado producidos en planta, transportados a la obra e instalados bajo el agua.

Estos elementos se fabrican en grandes astilleros, en diques secos o en cuencas inundables. Posteriormente los extremos son sellados con mamparas y luego remolcados por agua hasta el lugar de su instalación final. Allí se sumergen en una zanja previamente excavada y se cimientan con trabajos adicionales, pues las tolerancias del dragado no suelen cumplir los requisitos de diseño. Estas secciones pueden ser cimentadas ya sea sobre un lecho de grava preparado antes de la inmersión o sobre un lecho de arena, que se coloca bajo ellas mientras se sostienen por soportes temporales utilizando un método de flujo de arena.

A continuación se rellena la zanja que rodea el túnel y se restituye el lecho del cuerpo de agua, cerciorándose que la parte superior del túnel se encuentre por lo menos a 1.5 m debajo del fondo original del cuerpo de agua para permitir un relleno suficiente con una capa que proteja el conducto. No obstante, en algunos casos donde lo permite el régimen hidráulico, el túnel puede sobrepasar el lecho original sobre un terraplén



Transporte de los elementos del túnel sumergido Busan Geoje, en Corea del Sur.

Foto: Tunnel Engineering Consultants.

construido bajo el agua. Como ya se mencionó, los extremos de los elementos del túnel están sellados con mamparas para conservar seco el interior, y se colocan dejando alrededor de 1 m entre módulos para crear la articulación de inmersión. Los elementos se unen instalando juntas de caucho que los sellan y vaciando el espacio entre ellos.

Cada sección del túnel se baja a su lugar definitivo después de la aplicación de un balastro provisional, que será cambiado por un concreto de nivelación cuando se haya corroborado completamente la ubicación del módulo. Realizadas estas actividades es posible emprender los acabados del túnel como la pavimentación, las instalaciones de ventilación y demás complementos.

## PERSPECTIVA HISTÓRICA

Existen dos métodos básicos para el diseño de túneles sumergidos: la americana y la europea. La principal diferencia entre ellas radica en la selección del material de construcción: la americana utiliza acero y la europea concreto, y en la elección del material a utilizar juega un papel determinante la economía local.

La historia del transporte a través de túneles sumergidos comenzó en 1910 con la construcción de un túnel ferroviario de dos carriles bajo el río Detroit entre Estados Unidos y Canadá. Los ingenieros americanos desarrollaron una tecnología que consiste en un armazón de acero (sencillo o doble) que trabaja de manera conjunta con el interior del túnel en concreto como un sistema estructural o con el concreto de nivelación utilizado. En este caso, los elementos del túnel de acero se fabrican en astilleros o en diques secos y luego son lanzados al agua, donde son provistos de concreto mientras se encuentran flotando. Para transportarlos se remolcan aprovechando su capacidad de flotación o montados en barcazas, pues el calado inicial de cada elemento puede ser de aproximadamente 2.5 m. Esta tecnología todavía se utiliza para casi todos los túneles sumergidos construidos en Estados Unidos con algunas excepciones y la más reciente es el túnel del Canal de Fort en Boston.

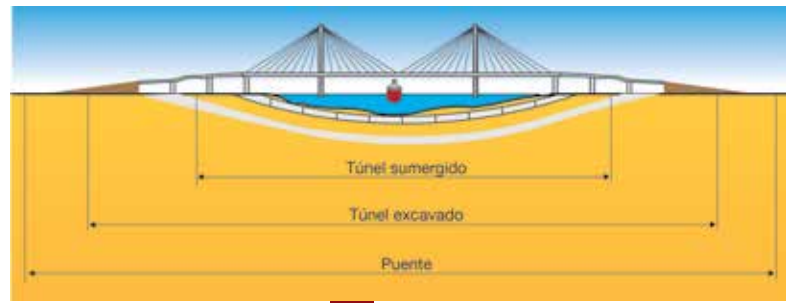
El primer túnel en concreto sumergido de Europa fue Maastunnel en Rotterdam, construido entre 1937 y 1942, que marcó el inicio de una nueva tradición en el uso de concreto en este tipo de obras. Usualmente se construyen en diques secos o en cuencas excavadas a propósito que luego se inundan para transportar los elementos por flotación, a pesar que el calado de éstas secciones casi equivale a la profundidad de la vía acuática. Por el estímulo que allí reciben, el desarrollo de las tecnologías se concentra en los Países Bajos.

## ¿TÚNEL SUMERGIDO, PUENTE O TÚNEL EXCAVADO?

Cuando hay que atravesar un cuerpo de agua que es un medio de transporte, los túneles sumergidos presentan por lo general una alternativa factible frente a los puentes o túneles excavados, a costos muy competitivos.

Los túneles sumergidos ofrecen una serie de ventajas, entre ellas:

- Su luz o longitud puede ser más corta que la de un puente o un túnel excavado, dado que los túneles sumergidos se construyen a poca profundidad.
- No necesariamente tienen que ser de sección circular, como los túneles excavados. Pueden diseñarse con casi cualquier forma transversal, haciendo al túnel sumergido particularmente atractivo para autopistas anchas y túneles multimodales.
- Tienen menos impacto sobre los medios de transporte fluviales o marítimos que los grandes puentes. Ésta condición es especialmente favorable para el acceso a puertos que requieren gálibos de 70 m.



Comparación de longitudes entre las diferentes estructuras.

Foto: Tunnel Engineering Consultants.



Fabricación de los segmentos prefabricados del túnel sumergido que hace parte del proyecto HZMB.

Foto: © Product Design & Development.



Sección prefabricada del túnel sumergido que compone el proyecto HZMB.

Foto: © Product Design & Development.

- Evitan el impacto hidráulico y los efectos de bloqueo que pueden resultar problemáticos cuando se trata de salvar grandes ríos que transportan sedimentos y acumulan obstáculos en los pilares del puente, lo que da lugar a socavación y sedimentación y a formar bancos, pequeñas islas o terraplenes en las temporadas de altos caudales.
- El diseño de túneles sumergidos puede ajustarse a cualquier alineación vertical u horizontal. Pueden construirse en suelos donde sería muy difícil y costoso perforar un túnel, como en los depósitos aluviales blandos en las grandes desembocaduras de los ríos. Además, los túneles sumergidos pueden planearse para afrontar difíciles condiciones sísmicas.
- La construcción de un túnel sumergido es, por lo general, más rápida que la de uno excavado. Esto obedece, entre otros factores, a que la perforación de un túnel es un proceso continuo en el que cualquier problema en la perforación puede retrasar todo el proyecto, mientras que la construcción de un túnel sumergido implica buen número de operaciones que pueden realizarse simultáneamente como la fabricación de elementos, el dragado y la instalación de túnel, lo que resulta en una planificación más sólida del proyecto.
- Los túneles sumergidos contribuyen al desarrollo de la región donde se va a construir, pues buena parte de los trabajos de diseño y construcción (80-90%) puede estar a cargo de empresas locales.

## ASPECTOS A EVALUAR

A menudo se dice que la construcción de los túneles sumergidos es un proceso difícil porque Muchos ingenieros no están familiarizados con esta tecnología que, además, exige operaciones especiales para no interferir la navegación en el mar o en los ríos que cruzan. Sin embargo, la técnica es menos riesgosa que la utilizada para construir un túnel excavado y sus obras pueden ser mejor controladas. Las operaciones fluviales y marítimas no plantean, en realidad, grandes dificultades: sólo requieren especial cuidado para el transporte de los elementos.

Aun así, los túneles sumergidos pueden generar impactos ambientales sobre el lecho del cuerpo de agua: por ejemplo, ante el hábitat de peces, la corriente y la turbidez del agua. La excavación de zanjas en lechos de cuerpos de agua siempre ha sido un asunto sensible para el entorno natural, pero una vez diligenciadas las autorizaciones y la planificación del aspecto ambiental solo hay que tener el cuidado de cumplir estas condiciones. Además, gracias a las mejoras de los últimos años en la tecnología de dragado es ahora posible excavar grandes volúmenes de material sin causar efectos adversos en la vida acuática. También deben tomarse precauciones al especificar las condiciones para el manejo y disposición del material de dragado. Los materiales contaminados, por ejemplo, deben eliminarse en instalaciones especiales de almacenamiento de escombros, mientras que los materiales no contaminados –cuando sea conveniente– pueden ser reutilizados como relleno, pues debido a los altos costos de la disposición de material de dragado y a las restricciones ambientales, esta reutilización es un punto de máxima atención en los proyectos. Para el túnel de la segunda vía a Hampton, en Virginia, y para la conexión de Oresund en Dinamarca se desarrolló una solución novedosa: los materiales de dragado se utilizaron como relleno para la construcción de islas artificiales. Así mismo debe tenerse cuidado con los impactos sobre la navegación, pues también puede ser necesario solicitar permisos especiales.

A veces se asume que un túnel sumergido puede resultar poco práctico en las vías de navegación altamente transitadas. Sin embargo, tales túneles se han construido con éxito en algunas vías acuáticas de gran actividad como los puertos de Rotterdam y Ámsterdam sin presentar problemas, pero manteniendo una buena comunicación con las autoridades portuarias.

## CASOS DE ESTUDIO

### Túnel Caland en Rotterdam, Holanda

El túnel Caland es un típico cruce de río, situado en una zona muy concurrida del puerto de Róterdam y con longitud total de aproximada de 1,500 m. Es de doble calzada, cada una con tres carriles y con galerías de escape.

El túnel tiene una sección sumergida de 700 m y se construyó para reemplazar un puente con un tramo abatible para dar paso a las embarcaciones, una operación que debía repetirse 8,000 veces al año.

Debido a que la vía fluvial era relativamente estrecha (unos 250 m) y el gálibo requerido era de 50 m, la opción de un puente no era buena por lo costosa ante las grandes luces que habría exigido y por la dificultad para conectarlo con la red de carreteras. Un túnel excavado tampoco era una solución eficiente, pues se requería una gruesa capa de material sobre el túnel y una sección transversal no circular, que resultaba imposible para la configuración de tres carriles; de esta manera, la longitud del túnel habría aumentado en un 50%, reflejándose considerablemente en los costos del proyecto.



Una vez que una sección de túnel se conecta a los tramos existentes, los muros de partición son removidos.

Foto: © Product Design & Development.

**TEREX TRUCKS**

**TU MEJOR ALIADO EN SITUACIONES DE PESO**

El camión fuera de carretera TEREX se mueve con toda confianza de un terreno a otro con capacidades de carga desde 25 t. a 40 t. Es de fácil mantenimiento, cabina confortable y alta productividad.



**CONOCE NUESTROS  
PLANES DE CRÉDITO  
A LARGO PLAZO**



**TA400**

Imágenes para fines ilustrativos.

**VENTA • RENTA • REFACCIONES • SERVICIO**

**AMECO**

Una llamada. Una compañía. Innumerables soluciones

Contamos con 15 sucursales en la República Mexicana 01 800 11 AMECO (26326)

**CORPORATIVO**

Autopista México - Querétaro No. 3065 - A, Col. Industrial Tlaxcolpan, C.P. 54040, Tlaxtepan, Estado de México.

Teléfono:

**(55) 8503 3500**

service@ameco.com

www.ameco.com.mx

JCB

CLARK

CATERPILLAR  
Power Solutions

TEREX TRUCKS

CASE

Linde

NATIONAL CRANE

PALFINGER

JLG

GROVE

### Cruce de Hong Kong-Zhuhai-Macao, China

En la actualidad, uno de los proyectos de infraestructura más desafiantes del mundo es el puente Hong Kong-Zhuhai-Macao (HZMB), que se encuentra en construcción en China. La sección principal cubre un tramo de 30 km de longitud fuera de costa, atravesando la desembocadura del río Perla en la frontera de Hong Kong con Macao y Zhuhai. La obra total comprende varios puentes, islas artificiales y túneles. El puente consistirá en una doble calzada con tres carriles de circulación en cada sentido. Para permitir el paso de buques el diseño incluyó puentes atirantados, pero el cruce de los principales canales de navegación, en la margen oriental del estuario del río Perla, se realizará mediante un túnel de 6,75 km de longitud de los cuales unos seis kilómetros estarán bajo el agua. La transición de los puentes con el túnel se realizará con islas artificiales de 625 m de longitud cada una.

Las condiciones de la zona favorecen la modalidad de túnel sumergido, pues un túnel excavado tendría que perforarse a gran profundidad y debería soportar grandes cargas de tierra y agua. Además, la presencia de suelos blandos en el lecho, las difíciles condiciones en alta mar y, por último, la necesidad de una vida útil de 120 años, son desafíos que deben estudiarse adecuadamente y que pueden ser muy bien tolerados por un túnel sumergido.

La selección del túnel sumergido se hizo después de cuidadosas consideraciones. La opción de puente sobre los principales canales de navegación fue rechazada porque el gálibo requerido es de unos 60 metros; se sugería un puente colgante para ambos canales, con torres de más de 100 metros de altura, que interferiría con las condiciones para el tráfico aéreo en el aeropuerto internacional de Hong Kong.

La opción de túnel excavado se estudió en detalle durante la fase de diseño conceptual. Consistiría en dos túneles perforados con diámetro exterior de 16.9 m a fin de dar cabida a un diseño de doble calzada con tres carriles cada uno. Además, para cumplir los requisitos de seguridad, cada cierta distancia se especificaron galerías de escape transversales. De estos condicionantes del diseño resultó que la alineación vertical del túnel excavado era de alrededor de -54 metros y la del túnel sumergido era de -40 metros, lo que incrementó la longitud en alrededor de 600 metros para la opción de túneles perforados, mientras que la alternativa sumergida incrementa la longitud en sólo 250 metros por el empalme con la isla artificial.

Las principales razones para adoptar el túnel sumergido como la mejor selección son los costos, los riesgos y la programación:

- Las estimaciones de costos indican que el túnel excavado sería entre 10% y 15% más costoso que el sumergido. Esto incluye las inversiones adicionales para el mantenimiento de las islas artificiales y su operación.
- En las valoraciones de riesgos, la simulación del túnel sumergido se comportó mejor que el excavado. Especialmente se suponía que los riesgos geotécnicos inherentes a las condiciones variables del terreno serían más manejables con el túnel sumergido. El gran diámetro del túnel excavado de 16.9 m combinado con la amplia variedad de suelos que se encuentran en la zona (suelos débiles y roca dura) serían grandes retos para las tuneladoras.
- Se estima que el plazo de construcción del túnel excavado tardaría diez meses más que para el túnel sumergido. Además, los riesgos de planificación (retrasos), se consideraron más grandes para el túnel excavado. **C**



Isla artificial para el empalme entre el puente y el túnel. Proyecto HZMB.

Foto: Flickr- HMC Architects.