



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

# ESTADO DEL ARTE EN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES SUBACUÁTICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

IGNACIO ANDRÉS FUENTEALBA ROBLES

PROFESOR GUÍA:  
EDGARDO GONZÁLEZ LIZAMA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JUAN CARLOS POZO ROJAS  
MATÍAS EGAÑA ERAZO

SANTIAGO DE CHILE  
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil  
POR: Ignacio Andrés Fuentealba Robles  
FECHA: 2022  
PROFESOR GUÍA: Edgardo González Lizama

## ESTADO DEL ARTE EN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES SUBACUÁTICOS

El presente trabajo de título tiene como objetivo general el desarrollo de un review acerca del estado del arte en diseño y construcción de túneles subacuáticos en el mundo. Se define como túnel subacuático a una estructura tipo túnel que conecta regiones de tierra separadas por una importante masa de agua superficial, tales como ríos navegables, estrechos, estuarios, fiordos, etc. En base a esta definición, se distinguen tres tipos de túneles subacuáticos, caracterizados por su forma estructural y por su método constructivo, los cuales son: túnel excavado, túnel sumergido y túnel flotante.

Los objetivos secundarios son establecer un contexto global en el que se insertan los tres tipos de túneles, indicando las características claves para el diseño y la construcción de éstos, e identificando los aspectos críticos necesarios a considerar durante las etapas mencionadas. También, se identifican las propuestas existentes de túneles subacuáticos y la necesidad de este tipo de estructuras a nivel nacional.

Para estas aspiraciones, en primera instancia son revisadas las guías e informes de diseño redactadas por diversas organizaciones y equipos internacionales dedicadas a la recopilación de casos o al diseño mismo de las diferentes tipologías de túneles subacuáticos. Lo mismo se realiza con los procesos constructivos. Además, se revisan estudios de diversos autores o equipos de trabajo de empresas y universidades, que analizan el comportamiento de las estructuras dadas las variaciones en sus parámetros de diseño y los casos críticos en los proyectos ya realizados. Asimismo, se ejemplifican estas características, exponiendo casos de proyectos en operación o en etapas previas. Los casos mencionados se caracterizan por ser reconocidos a nivel mundial o por presentar aspectos que ejemplifican bien las especificaciones y situaciones críticas de diseño y construcción. Finalmente, se presentan en el trabajo proyectos que se encuentran en proceso o que se han propuesto en el país, para reconocer los casos en los que se podría recurrir a estos túneles.

Se concluye de este trabajo proponiendo los factores claves a considerar para el correcto diseño y construcción de túneles subacuáticos en base al nivel de conocimiento y experiencia internacional al respecto. Se espera que este documento sirva como una base para el inicio del estudio de los túneles subacuáticos por parte de la comunidad de la ingeniería en el país.

# Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a los profesores que me apoyaron en este trabajo. A Edgardo por su compromiso, motivación y apoyo en el proceso a lo largo de este último año para la realización de la memoria. A Juan Carlos y Matías por su voluntad a ser parte de este equipo.

También quisiera agradecer a aquellos los profesores que confiaron en mi a lo largo de mi vida como estudiante y me motivaron a crecer con ganas de aprender.

Agradezco a mis amigos de la universidad por haber sido el soporte para sobrevivir estos años. Gracias por los momentos compartidos, por las caminatas entre 851 y geología, por los almuerzos y las cervezas donde los niños del yeyo, por las tardes enteras en la biblioteca “estudiando”. En particular, gracias al benja y al fedo por estar ahí desde el primer día hasta el último juntos.

También agradecer a mis amigos del colegio, que siempre me apoyaron en todo y pusieron toda su fe en mi, más de la que, creo, me corresponde. Gracias por su constante preocupación por mi y escribirme para motivarme para lograr mis objetivos. Gracias por ser parte de mi vida.

Finalmente agradecer a mi familia, que siempre me entregó amor, y siempre confió en mi. Gracias a mis padres por siempre entregarme su amor incondicional y entregarme las herramientas para poder ser la persona que soy. A mis abuelos, por enseñarme toda su experiencia, por quererme y cuidarme cada día de mi vida. A mi hermana, por haberme una mejor persona, no sería lo mismo sin ti. Los amo mucho!

# Tabla de contenido

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Introducción .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1.      | <b>Objetivos .....</b>   | <b>2</b>  |
| 1.1.1.    | Objetivo General .....   | 2         |
| 1.1.2.    | Objetivos Específicos.....   | 2         |
| 1.2.      | <b>Alcances, metodología y resultados esperados .....</b>                      | <b>3</b>  |
| 1.3.      | <b>Tipos de túneles subacuáticos.....</b>                                      | <b>3</b>  |
| 1.3.1.    | Túneles excavados bajo el fondo marino .....                                   | 4         |
| 1.3.2.    | Túneles sumergidos.....  | 5         |
| 1.3.3.    | Túneles flotantes .....  | 6         |
| <b>2.</b> | <b>Diseño y construcción por tipo de túnel.....</b>                            | <b>8</b>  |
| 2.1.      | <b>Generalidades .....</b>   | <b>8</b>  |
| 2.1.1.    | Investigación Geológica e Hidrogeológica .....                                 | 8         |
| 2.1.2.    | Investigación geotécnica .....   | 9         |
| 2.1.3.    | Investigación geofísica.....   | 9         |
| 2.1.4.    | Campaña exploratoria .....   | 9         |
| 2.1.5.    | Monitoreo .....  | 12        |
| 2.2.      | <b>Diseño y construcción de túnel excavado .....</b>                           | <b>13</b> |
| 2.2.1.    | Trazado del túnel.....   | 14        |
| 2.2.2.    | Aspectos críticos .....  | 17        |
| 2.2.3.    | Mejoramiento del terreno y control del agua .....                              | 23        |
| 2.3.      | <b>Diseño y construcción de túnel sumergido.....</b>                           | <b>25</b> |
| 2.3.1.    | Alineación .....   | 26        |
| 2.3.2.    | Diseño Transversal.....  | 28        |
| 2.3.3.    | Diseño Longitudinal.....   | 33        |
| 2.3.4.    | Espacio de Fabricación [15].....   | 37        |
| 2.3.5.    | Construcción [9].....  | 38        |
| 2.4.      | <b>Diseño y construcción de túnel flotante.....</b>                            | <b>43</b> |
| 2.4.1.    | Cargas a identificar para el diseño [21].....                                  | 45        |
| 2.4.2.    | Comportamiento hidrodinámico de túnel flotante ante oleaje irregular [22]..... | 48        |
| 2.4.3.    | Respuesta estructural ante eventos sísmicos en múltiples soportes [24] .....   | 52        |
| 2.4.4.    | Construcción [21].....   | 55        |
| 2.4.5.    | Modelo físico de túnel flotante [16].....                                      | 55        |
| <b>3.</b> | <b>Proyectos de túneles subacuáticos .....</b>                                 | <b>58</b> |
| 3.1.      | <b>Proyectos destacados.....</b>   | <b>58</b> |
| 3.1.1.    | Eurotúnel .....  | 58        |
| 3.1.2.    | Aqualine Bahía de Tokio [27].....  | 60        |
| 3.1.3.    | Túnel Marmaray [28] .....  | 62        |
| 3.1.4.    | Túnel Øresund [30, 31] .....   | 65        |
| 3.2.      | <b>Túneles en Noruega.....</b>   | <b>66</b> |
| 3.2.1.    | Túneles submarinos excavados en Noruega .....                                  | 66        |
| 3.2.2.    | Túnel Bjørvika, Ruta E18 .....   | 70        |
| 3.2.3.    | Carretera Costera, Ruta E39 [10] .....   | 71        |
| 3.3.      | <b>Otros proyectos.....</b>  | <b>72</b> |
| 3.3.1.    | Excavados .....  | 72        |
| 3.3.2.    | Sumergidos.....  | 77        |
| <b>4.</b> | <b>Propuestas en Chile .....</b>   | <b>84</b> |

|                     |   |           |
|---------------------|---|-----------|
| 4.1.                | Túnel Las Mulatas.....                  | 84        |
| 4.2.                | Túneles Ruta 7.....                     | 85        |
| 4.3.                | Ex-propuesta túnel canal de Chacao..... | 87        |
| <b>5.</b>           | <b>Conclusiones.....</b>                | <b>88</b> |
| <b>6.</b>           | <b>Bibliografía.....</b>                | <b>90</b> |
| <b>Anexos.....</b>  |   | <b>93</b> |
| <b>Anexo A.....</b> |   | <b>93</b> |
| <b>Anexo B.....</b> |   | <b>95</b> |
| <b>Anexo C.....</b> |   | <b>97</b> |
| <b>Anexo D.....</b> |   | <b>98</b> |

# 1. Introducción

Existen contextos geográficos, tanto a nivel nacional como a nivel mundial, que exigen soluciones específicas para la comunicación entre zonas separadas por grandes masas de agua superficial. Algunas de estas soluciones son el transporte marítimo, como barcazas o ferris, o bien estructuras tradicionales como puentes o túneles. Estos últimos son soluciones no superficiales que permiten el uso del espacio acuático para otros fines, además de limitar el impacto visual. Los túneles como herramientas para sortear masas de agua son un anhelo permanente de la ingeniería, desde el cruce de ríos en ámbitos urbanos, hasta el eterno sueño de unir continentes, o continentes e islas bajo el mar [1]. Uno de los ejemplos más emblemáticos es el Eurotúnel, el cual es un túnel ferroviario que conecta las costas de Inglaterra y Francia cruzando por debajo del canal de la Mancha.

En Chile las técnicas constructivas de túneles son bastante conocidas, principalmente gracias a la minería, a las centrales hidroeléctricas y a los túneles carreteros, con mayor concentración en la zona centro-norte del país. En Santiago son conocidas las técnicas debido a la construcción de las líneas de metro, contando incluso con algunos cruces subterráneos bajo el río Mapocho. Sin embargo, no se han usado túneles que permitan el transporte entre regiones separadas por importantes masas de agua, como ríos navegables (río Valdivia, por ejemplo), estuarios o fiordos. No es así en el ámbito internacional, donde se pueden encontrar diversas soluciones tipo túnel para sortear masas de agua, tanto construidas como investigadas de forma teórica. Uno de los países con mayor experiencia es Noruega, encontrándose en su costa, hasta el año 2009, más de 40 túneles excavados bajo el fondo de fiordos y mares [2]. También se pueden reconocer otros países con experiencia en estos tipos de túneles, como Dinamarca, China, Estados Unidos, Países Bajos, entre otros.

Dada la inexperiencia a nivel nacional, que se expresa de igual manera en otros países de Sudamérica, se propone esta memoria como un review del estado del arte en el diseño y la construcción de túneles destinados a sortear masas de agua, los que en términos generales, se conocen como túneles subacuáticos. El propósito de un review es resumir el estado actual de los conocimientos sobre un tema, analizando, sintetizando, e interpretando la información recopilada, de una manera significativa [3]. Cabe destacar que algunos autores utilizan el concepto de estado del arte como sinónimo del ejercicio mismo de desarrollar un review. Así por ejemplo, Guevara (2016) señala que un estado del arte es una investigación documental sobre un objeto de estudio, que admite entender y construir nuevos contextos generadores de investigación [4]. El imperante principal en el desarrollo de un estado del arte es la revisión de todos los conocimientos e investigaciones más recientes que componen el tema de estudio, de manera de establecer el estado actual, tanto en su uso como en su investigación, de este tema en particular, de manera tal que pueda convertirse en una herramienta para dar inicio al estudio del tema, desde su situación presente, por parte, no sólo de los ingenieros civiles, sino también de estudiantes de pregrado y postgrado.

La razón que motiva la realización de este trabajo de título es el aprendizaje de soluciones novedosas que permitan el transporte bajo la cota de nivel de mar o rivera, sin incurrir en la paralización de otras actividades como la navegación, y sin modificar de forma considerable el paisaje superficial, siendo una alternativa real a los puentes en costo y técnica. En base a lo indicado, en el presente trabajo de título se define a un túnel subacuático, el sujeto en estudio, como

la obra de tipo túnel que permite la conexión entre regiones de tierra separadas por una importante masa de agua superficial, y que tiene una cercanía espacial considerable a ésta. Para el caso, se evalúan los siguientes tipos de túneles subacuáticos: túnel excavado bajo el fondo marino, túnel sumergido y túnel flotante. Los tres tipos de túneles se diferencian tanto en su trazado y diseño como en su método constructivo. Se descartan túneles con infiltración de agua subterránea o por fuentes superficiales menores, dado que tienen soluciones suficientemente conocidas. A continuación (Figura 1), se presenta un esquema del trazado longitudinal de los tres túneles subacuáticos indicados.

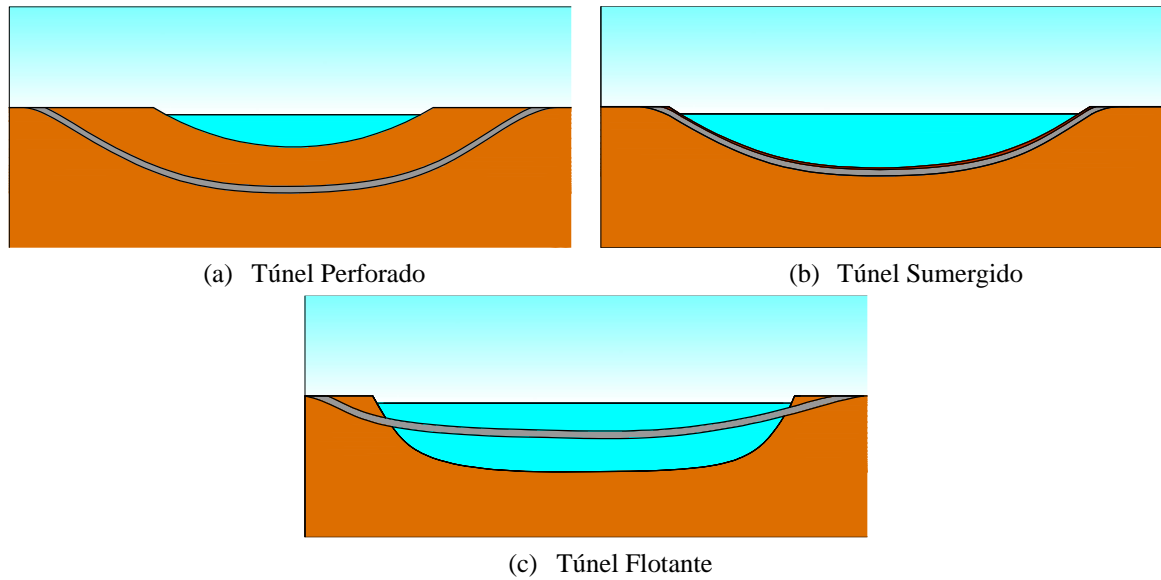


Figura 1: Esquemas de túneles subacuáticos.

Fuente: Elaboración propia.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo General

Desarrollar un análisis del estado del arte en diseño y construcción de túneles subacuáticos.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Establecer un contexto internacional de los túneles subacuáticos existentes o en desarrollo para el atravesado de masas de agua.
- Diferenciar las diversas soluciones de túneles subacuáticos existentes, en términos generales y en términos de diseño y construcción.
- Identificar propuestas existentes de túneles subacuáticos y la necesidad de éstos a nivel nacional.

## 1.2. Alcances, metodología y resultados esperados

El estudio de la bibliografía requiere de la capacidad de análisis para la identificación de información relevante y novedosa. Se deben plasmar los conceptos en el trabajo de título tanto en redacción como en citas de los diversos autores conocedores del tema. De esta manera, la metodología se basa principalmente en la lectura de la literatura existente y la capacidad de análisis para expresar la información que sea novedosa del tema.

La descripción de la solución tipo túnel subacuático para el transporte se separa según el tipo de túnel. Elementos que distinguen a cada túnel son: la composición del túnel, el diseño y el método constructivo. La identificación de cada solución describe la ingeniería básica detrás en términos de diseño y construcción.

También se propone un alcance respecto a los casos a nivel mundial. Se pueden reconocer importantes aportes de proyectos y experiencia en países escandinavos, principalmente Noruega, aunque también existe experiencia en países como Países Bajos, Japón, China, Estados Unidos, e incluso Argentina. Estos casos serán revisados y expuestos en el trabajo. Uno de los casos más representativos de túnel subacuático excavado es el Eurotúnel, que conecta Inglaterra con Francia.

Al finalizar este trabajo se espera establecer un review de la bibliografía y experiencia existente de los túneles subacuáticos, permitiendo la revisión de la información, por parte de la comunidad, de manera ordenada y coherente. De esta forma, el documento busca convertirse en un punto de partida actualizado para la investigación de los temas que se expresan en éste. Además, se busca que el trabajo realizado sirva para abrir la investigación a mayor cabalidad a futuro, y la posibilidad de nuevos proyectos de túneles subacuáticos a nivel nacional.

## 1.3. Tipos de túneles subacuáticos

En el presente trabajo de título, tal como se indica en la introducción, se define como túnel subacuático a aquel túnel que tiene estrecha relación y/o contacto con una importante masa de agua superficial. Es decir, túneles que atraviesan fuentes de agua importantes como mares, ríos navegables o estuarios. En particular, se estudian tres casos de túneles subacuáticos: excavados bajo el fondo marino, sumergidos y flotantes. Las tres soluciones tienen el mismo propósito, que es la conexión entre dos regiones de tierra para el transporte, sin intervención superficial visible en el entorno acuático, permitiendo el flujo de otros elementos como barcos.

Se analizan las tres soluciones tipo túnel por separado. Se excluyen de la investigación otras obras civiles que permiten la conexión de tierras a través de masas de agua, como puentes o combinaciones puente-túnel, aunque se mencionan algunos casos de este último.

A modo de contexto, las soluciones indicadas en este capítulo son presentadas de forma general, indicando, a grandes rasgos, el método de construcción y la relación de estos con el ambiente acuático. Para el túnel excavado bajo el fondo marino el principal problema es el ingreso o filtración de agua hacia el interior de la excavación. Para las construcciones dentro del agua, es decir túnel sumergido y túnel flotante, el principal conflicto es el equilibrio con el agua, contrarrestando las fuerzas estáticas y dinámicas generadas por el agua durante la instalación de éstos y en la condición permanente.



### 1.3.1. Túneles excavados bajo el fondo marino

La primera solución para el cruce de una fuente superficial de agua de gran envergadura es la construcción de un túnel bajo esta. Esta solución es conocida a nivel mundial, siendo el caso más representativo el Eurotúnel, el cual conecta Francia con Inglaterra por debajo del Canal de la Mancha. En la Figura 2 se observa una de las entradas de este último.

La construcción de túneles en roca o suelo es la más conocida a nivel mundial, puesto que su uso se remonta desde la antigüedad, donde el hombre ha construido diversas cavernas, túneles y galerías para el transporte de agua, extracción de minerales y fines religiosos y militares. Su evolución y mejoramiento de las técnicas ha tenido un avance considerable durante los últimos siglos, entendiéndose a mayor cabalidad al terreno (suelo o roca) como la estructura auto soportante de túnel.

Estos pueden ser construidos tanto por métodos convencionales como mecanizados (uso de tuneladora o TBM). En Chile se utilizan principalmente las construcciones de túneles mediante métodos tradicionales tanto en roca como en suelo. El uso de máquina tuneladora en Chile ha sido en casos puntuales como el acueducto Río Blanco en la mina El teniente, el túnel de exploración Sur en Los Bronces, y los proyectos hidroeléctricos de la central Chacayes, Alto Maipo y la central Los Cóndores [5].

Por lo general, la construcción de túneles bajo una fuente superficial de agua se realiza en roca, dado que se suele llegar a una profundidad tal que se superen los sedimentos del fondo marino y se establezca una cobertura de roca que permita mayor impermeabilidad y estabilidad. Se suelen utilizar métodos convencionales, como la técnica de perforación y tronadura, para túneles relativamente cortos (menores a 5 km), y se utiliza TBM cuando se trata de túneles largos, dado que la construcción es más rápida y que, para los túneles subacuáticos, no se tienen frentes de trabajo intermedios entre los extremos del túnel, lo que hace esta metodología más segura y económica. Cabe notar que su uso suele ser combinado con otros métodos de tunelación convencional, fundamentalmente en zonas que requieran cambios en el diseño y en zonas con mayores pendientes.

El agua es un elemento que usualmente complica cualquier etapa de movimiento de tierras en las obras civiles. En particular, en los túneles, el agua dificulta el avance del túnel por parte de la maquinaria y el personal, la presión de poros genera esfuerzos sobre el terreno y puede provocar desmoronamientos de éste. El agua presiona y arrastra el terreno, al producirse una excavación próxima, ya que se induce un gradiente favorable a la salida del agua. Con ello puede producirse el problema doble de que el agua acude y puede anegar a la excavación y, además, arrastra terreno de poca cohesión, haciendo inestable la excavación y, en el peor de los casos, inundando la zona excavada [1].

En la excavación de túneles tradicional es común el encuentro con filtraciones de agua, principalmente en sectores cercanos a la costa o en alta montaña, y algunas soluciones para este problema son las inyecciones de impermeabilización o depresión de la napa freática. Dado esto, es evidente que el riesgo de inundaciones no se limita a los túneles subacuáticos, sin embargo, la característica de los túneles subacuáticos es que el volumen potencial de recarga de agua es prácticamente ilimitado. Las altas presiones de poros tampoco son específicas de este tipo de túneles, pero pueden ocurrir en combinación con una pequeña profundidad de cobertura del

subsuelo bajo el agua, por lo que los gradientes de presión de poros y, en consecuencia, las fuerzas de filtración desestabilizadoras son mayores respecto a las presiones efectivas [6].

En conjunto con la TBM se pueden incluir inyectores de aire por el frente para contrarrestar el empuje hidrostático y evitar el ingreso de agua dentro del túnel. El uso de la máquina puede ser conveniente para los túneles subacuáticos, en términos constructivos, respecto a los métodos convencionales, debido a que también presenta soluciones para controlar el ingreso de agua y su uso entrega mayor seguridad.



Figura 2: Túnel perforado bajo el canal de la Mancha.

Fuente: [BBC News](#), 2014.

### 1.3.2. Túneles sumergidos

Los túneles sumergidos son utilizados hoy en día, proliferando en los últimos 100 años, principalmente en Europa, Asia y Norteamérica. A nivel sudamericano el caso más conocido es el túnel sumergido que conecta las localidades de Paraná y Santa Fé, bajo el río Paraná, Argentina. El primer túnel de este tipo se construyó en 1910, siendo éste un túnel ferroviario bajo el río Detroit entre Estados Unidos y Canadá.

Se caracterizan por ser prefabricados y emplazados sobre el fondo de la fuente superficial de agua, como ríos o estuarios, principalmente. Su colocación es por módulos de túnel que son conectados y finalmente, una vez que se coloca completamente, se cubre el túnel con un relleno de suelo. Para la correcta colocación de los módulos, la primera etapa constructiva es el dragado del fondo marino, dependiendo de la calidad del terreno, estableciendo una cama de suelo limpia y pareja, por sobre la cual se emplaza el túnel. Cada elemento del túnel se transporta al sitio correspondiente, generalmente flotando, ocasionalmente en una barcaza asistido por grúas.

Algunas de las ventajas que poseen es que pueden construirse a poca profundidad, lo cual facilita que sean más cortos y sus alineaciones más planas que las de los túneles excavados. Las secciones transversales de los túneles sumergidos son muy versátiles, por lo cual resultan especialmente adecuados para autopistas anchas y cruces de carreteras y ferrocarril. Se pueden construir en cualquier tipo de suelo, incluidos los de materiales blandos de aluvión y su

construcción suele ir acompañada de proyectos de recuperación del suelo. Se ha demostrado que es perfectamente factible realizar túneles sumergidos en zonas sísmicas [7].

Para cada módulo se deben evitar los efectos del empuje del agua por flotación, equilibrando el peso total con el referido empuje. La cantidad total de hormigón, o del material correspondiente, ha de repartirse lo más eficientemente posible a lo largo del perfil longitudinal del terreno de sustentación [8].

Para la conexión a tierra se debe construir un portal de entrada en cada extremo del túnel sumergido. Esta conexión puede ser a un túnel excavado de forma convencional o con TBM, o se puede construir un portal a zanja abierta. Cabe notar que, al no tener que llegar a grandes profundidades, el túnel sumergido es de bastante menor longitud que la solución de túnel excavado. En la Figura 3 se muestra el portal de entrada al túnel sumergido Coatzacoalcos, México.

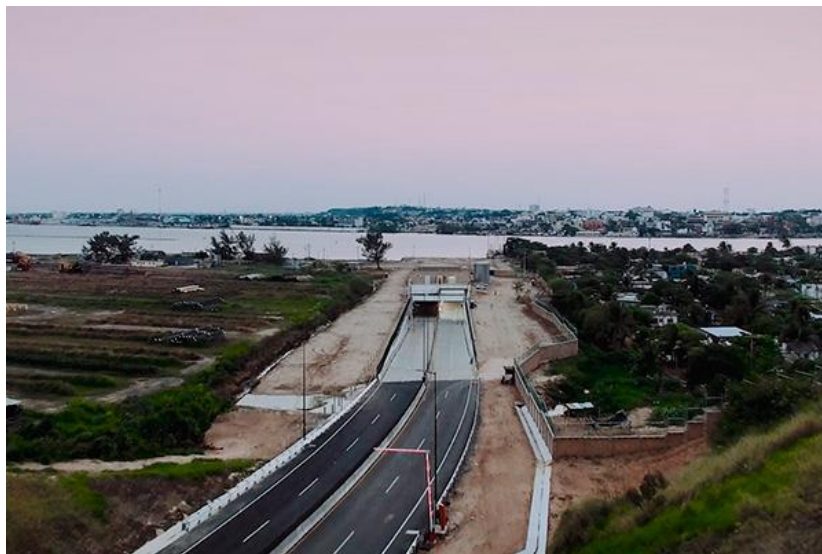


Figura 3: Túnel sumergido bajo río Coatzacoalcos (Veracruz, México).

Fuente: [Grupo FCC Construcción](#), 2017.

### 1.3.3. Túneles flotantes

Noruega es un país con un contexto geográfico que dificulta mucho la comunicación entre sus regiones debido a que posee una cantidad importante de fiordos. Esto ha promovido un uso significativo de túneles tanto excavados bajo los fiordos, siendo una de las comunidades de ingeniería con mayor experiencia en el uso de túneles subacuáticos.

La sociedad noruega de túneles ha desarrollado el estudio para el diseño de túneles sumergidos flotantes como una solución para conectar algunas rutas a través de los fiordos. La construcción de éstos consiste en una metodología similar a la de los túneles sumergidos, puesto que se construye mediante módulos prefabricados y conectados en el lugar de emplazamiento, con la diferencia de que no reposan en el fondo marino, sino que atraviesan el mar flotando, ya sea anclando cada módulo de túnel menos denso que el agua al lecho del curso de agua, o suspendiendo cada módulo de túnel más denso que el agua de una serie de pontones o boyas.

De esta forma, esta solución permite la construcción de un túnel con una alineación poco profunda en aguas extremadamente profundas, donde las alternativas son técnicamente difíciles o prohibitivamente caras. Las aplicaciones probables incluyen fiordos, canales marinos profundos y estrechos, y lagos profundos [9].

Para lograr que flote el túnel, se deben equilibrar las presiones del peso del túnel más el peso del agua con el empuje del agua, apoyado por estas soluciones de anclaje o pontones flotadores.

El proyecto que hoy en día está siendo evaluado, que consta de un tramo importante de túnel flotante (cruzando el fiordo de Sogn, Figura 4), es el de la autopista E39 en Noruega, que conecta las ciudades de Kristiansand y Trondheim, cruzando la zona costera del país [10]. Su imagen proyectada se puede observar en la Figura 5.



Figura 4: Ubicación geográfica (en rojo) de túnel flotante proyectado sobre fiordo de Sogn, proyecto Ruta E39.

Fuente: [Google Maps](#). Consulta diciembre 2021.

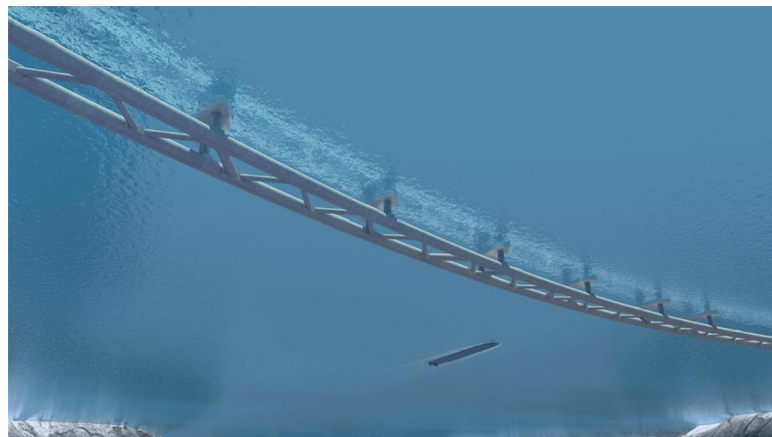


Figura 5: Proyección de túnel flotante Ruta E39 Noruega.

Fuente: [BBC News](#), 2014.

## 2. Diseño y construcción por tipo de túnel

### 2.1. Generalidades

El diseño de túneles va más allá de determinar la idoneidad estructural de las partes que lo componen. También tienen que cumplirse los requisitos prácticos de construcción para garantizar la viabilidad económica y la seguridad en terrenos con condiciones muy dispares. Para ello, el diseño de un túnel o de instalaciones subterráneas recurre a múltiples disciplinas: geología, geotecnia, ciencias ambientales, mecánica de suelos y rocas, cálculos estructurales, ingeniería eléctrica, eólica, hidráulica, vialidad, entre otras. [11]

Los distintos tipos de túneles subacuáticos se diferencian bastante en el diseño, debido no sólo a su método constructivo, sino también al trazado que corresponden, y los elementos estructurales y cargas que aplican sobre estos. Sin embargo, existen factores en común a considerar para un correcto diseño. Según indica la *International Tunneling and Underground Space Association* (ITA-AITES), el diseño de cualquier túnel recurre a la aplicación conjunta de múltiples disciplinas tales como los indicados en el párrafo anterior.

Uno de los tópicos más importantes a identificar es el terreno, en detalle, y los parámetros asociados a este. Una adecuada exploración geológica-geotécnica y una descripción detallada del terreno son importantes, ya que las condiciones del terreno pueden ser decisivas en aspectos tales como el trazado adecuado y alineación, el sistema de túnel, la forma de la sección transversal y el método de construcción. La necesidad de conocer el perfil geológico y las propiedades físico-químicas y mecánicas del terreno suele asociarse a los túneles perforados, puesto que es el mismo terreno, en conjunto con su sostenimiento, la estructura de tipo túnel, por lo que, conociendo la tipología de éste, se puede establecer el tipo de sostenimiento y las zonas de falla y filtración de agua. Esta necesidad también existe en túneles sumergidos, para estimar la capacidad de soporte a compresión del suelo sobre el cual se apoyan los elementos prefabricados del túnel, y en túneles flotantes, para establecer la capacidad del suelo para las fundaciones a las cuales se anclan los cables que sujetan los elementos del túnel, en caso de ser anclado.

#### 2.1.1. Investigación Geológica e Hidrogeológica

La investigación geológica del terreno nace con estudios de gabinete, a partir de los trazados conceptuales. De estos se deben obtener toda la información histórica disponible, tales como mapas regionales, estudios existentes, información de proyectos similares en la zona. Comprendiendo la limitada accesibilidad a los terrenos bajo el fondo marino, es probable que se cuente con poca información previa. Es por esto, que las campañas exploratorias resultan fundamentales para establecer en detalle el mapeo y perfil geológico. Este permite describir las estructuras geológicas y el estudio de zonas de falla.

Por su parte, la exploración hidrogeológica permite conocer las condiciones de agua subterránea en términos de caudal y las presiones que ejerce a lo largo del túnel. Para esto se utilizan pozos de captación y se ejecutan las mediciones y pruebas correspondientes, como la conductividad hidráulica y la prueba de presión de agua (WPT).

### 2.1.2. Investigación geotécnica

Dentro de las campañas exploratorias se requiere realizar las investigaciones y estudios geotécnicos, los cuales son un complemento de la geología y de la hidrogeología. Su objetivo es conocer las características geotécnicas del terreno, las cuales influyen en su estado natural de tensiones y su comportamiento mecánico durante su construcción y operación. Éstas intentan cuantificar las características geomecánicas del terreno por medio de diferentes parámetros. En el proceso de exploración geotécnica, es importante prestar atención a la posibilidad de encontrar arcillas expansivas provenientes de ciertas condiciones de meteorización de rocas básicas, ya que éstas al entrar en contacto con agua podrían generar deformaciones durante y luego del periodo constructivo, lo que podría constituir un riesgo a nivel de seguridad y aumento de costos en mantención [11].

### 2.1.3. Investigación geofísica

Los métodos geofísicos se utilizan para investigar áreas donde el terreno no se encuentra expuesto para determinar ciertos parámetros característicos del subsuelo y espesores de las capas. Con estos se pueden construir mapas estimativos de sedimentos y bases rocosas, o las velocidades de onda para estudios de sismicidad local. Los distintos ensayos geofísicos pueden utilizarse estudiar la estructura geológica, detección de fracturas, identificación de roca sana o meteorizada, detección de acuíferos, estimación de grados de fracturación de la roca, estimación de propiedades del terreno, entre otras características.

### 2.1.4. Campaña exploratoria

La campaña exploratoria, como se indica anteriormente, nace desde la investigación de escritorio o gabinete, que busca recopilar toda la información disponible del terreno. El segundo paso es el reconocimiento en campo, donde se realizan visitas a terreno y se ejecutan estudios para el mapeo geomorfológico, geológico e hidrogeológico de éste. Para esto se deben ejecutar levantamientos topográficos, prospecciones geofísicas, relevamientos hidrogeológicos [12].

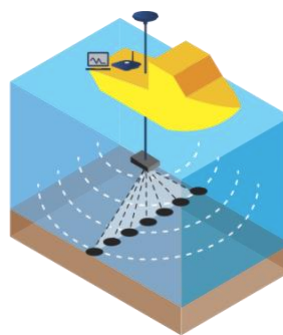
La mayor parte del área del proyecto está cubierta por agua. Por lo tanto, se requieren métodos especiales de investigación y la interpretación de los resultados de la investigación es más incierta que para los túneles convencionales.

Dentro de lo recomendable está la ejecución de una batimetría, que es, en palabras simples, un levantamiento topográfico del fondo marino. La tecnología de la batimetría funciona con una ecosonda, herramienta de medición de distancia que puede medir el tiempo de viaje de una señal acústica reflejada por el fondo o por cualquier elemento suspendido (peces, rocas, algas marinas, etc.).





(a) Bote de control Batimétrico



(b) Sistema de señal Multihaz

Figura 6: Batimetría.

Fuente: (a) [Geosoluciones](#). (b) Esquema desarrollado por [al-top topografía](#).

Uno de los ensayos típicos de prospección geofísica es la refracción sísmica, que consiste en un ensayo no destructivo de reconocimiento que permite interpretar las propiedades del terreno y la profundidad de la roca mediante el análisis de las variaciones en las velocidades de propagación de las ondas sísmicas correspondientes a las velocidades de transmisión en un medio sólido. La refracción sísmica marina produce perfiles donde las capas definidas por las velocidades de onda P se sitúan en función de la profundidad de la interfaz entre las capas diferenciales. Las ondas generadas por la fuente sísmica (pistola neumática) viajan en el sedimento y son refractadas por las diferentes capas. Un cable receptor multicanal se arrastra hacia el fondo del agua y registra las ondas de refracción (ver Figura 7).

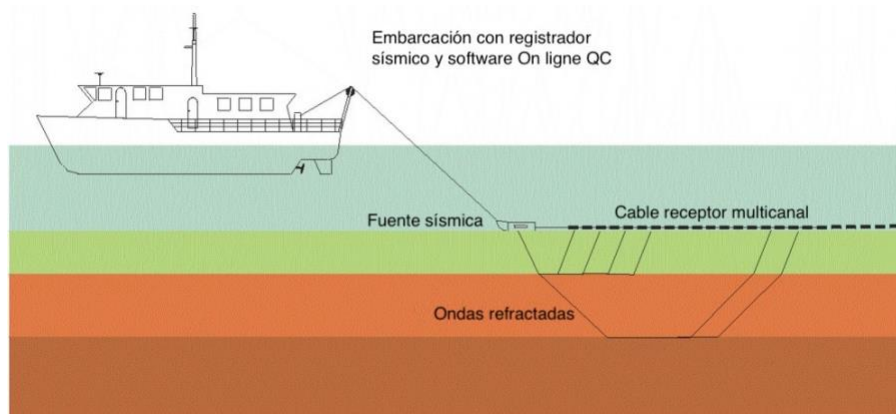


Figura 7: Ensayo de refracción sísmica en mar.

Fuente: Esquema desarrollado por [SismOcean](#).

Resulta fundamental la realización de sondajes en altamar para la recuperación de muestras. El muestreo sirve para la observación e identificación de los estratos del subsuelo. También se utilizan las muestras para los ensayos de laboratorio, tales como ensayos de carga o permeabilidad. Para este propósito, se suelen construir plataformas de distintos tipos, tanto fundadas al fondo marino, flotantes o con sistema autoelevatrices (jack-up), sobre las cuales se instalan los equipos de perforación. En algunos casos, se pueden instalar pozos que cruzan la fuente acuática, los cuales, mediante ataguías, impiden el ingreso del agua dentro, permitiendo la ejecución de más ensayos de terreno. También, se pueden aprovechar los sondajes realizados para la realización de pozos de bombeo en caso de los túneles perforados.

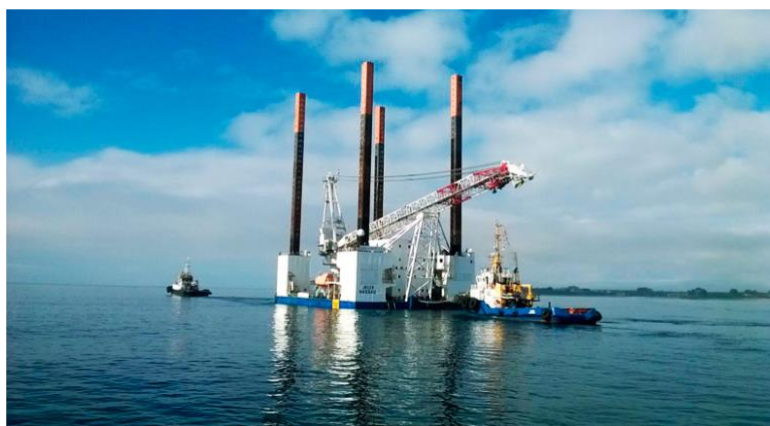


Figura 8: Plataforma Jack-Up en Canal de Chacao.

Fuente: Fotografía oficial [MOP](#), 2015.

Los equipos que se dispongan deben permitir operar en las más diversas condiciones naturales, (fluctuaciones de marea, oleajes, lechos blandos, regímenes de corrientes), además de contar con un grupo humano de elevada experiencia para tal efecto.

El grupo de trabajo n°2 de investigación de la ITA-AITES desarrolló un documento con recomendaciones respecto al nivel de detallamiento en la investigación del subsuelo del túnel (para túneles excavados y/o perforados, aunque aplica para la investigación subterránea en general) según la etapa en que se encuentra el proyecto [12]. Estas tablas se encuentran en el Anexo A.

La Asociación de Caminos Públicos de Noruega indica una recomendación del porcentaje de costos que se debiera gastar en la investigación previa del terreno en función del largo túnel, alcanzando 3-10% del costo total del proyecto para túneles subacuáticos (perforados) hasta los 10 km [13]. En el gráfico de la Figura 9 se puede observar que la pre-investigación del terreno de túneles de clase C (subacuáticos) resultan ser más caros que túneles de menor dificultad. Esto se debe al limitado acceso para la investigación, ya que la mayor parte del área del proyecto está cubierta por agua. Por lo tanto, se requieren métodos especiales de investigación, y las campañas exploratorias resultan ser más caras y, debido al movimiento marino, demandantes, lo que además puede provocar retrasos en términos de tiempo [6]. La interpretación de los resultados de la investigación es más incierta que para los túneles bajo tierra convencionales.



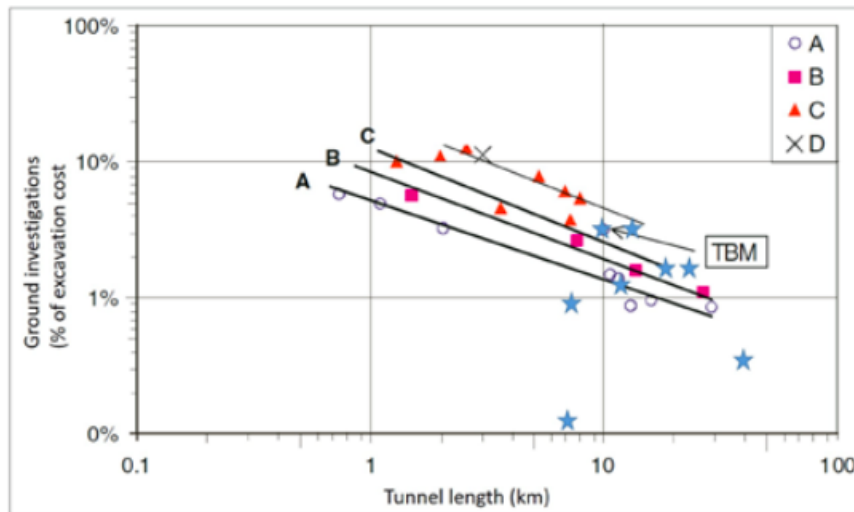


Figura 9: Cantidad/costo de investigaciones de terreno recomendado en función del largo del túnel y clases de investigación.

Fuente: Jakobsen & Babendererde, 2017 [13].

En caso de túneles perforados con tuneladora, es sabido que la planificación y la investigación previa de las condiciones del suelo son más costosas y exigentes que en túneles de perforación o excavación convencional. Esto se debe al requerimiento de mayor detallamiento de cada unidad geológica, condiciones y capacidades del suelo a lo largo de todo el trazado, debido a que el uso de la tuneladora es menos flexible que la construcción convencional. Esto se da pues no se puede adaptar la sección o ni el tipo de máquina durante el tramo perforado, no así cuando se utilizan métodos convencionales.

Evidentemente, el costo de la pre-investigación viene de la mano de la cantidad de estudios de suelo a realizar. La cantidad adecuada de estos estudios depende en gran medida de la complejidad del proyecto, el conocimiento existente sobre las condiciones del terreno, la variabilidad de las condiciones del suelo en la zona y la variabilidad del método de construcción de túneles para hacer frente a las diferentes condiciones posibles del terreno [13]. Se debe destacar que el costo de pre-investigación también depende del tipo de contrato del proyecto.

#### 2.1.5. Monitoreo

Al diseñar estructuras subacuáticas, existe un elevado grado de incertidumbre debido al enorme número de factores del terreno y medioambiente que intervienen. Por eso es necesario disponer de un sistema que permita monitorear, durante la construcción y operación, las hipótesis propuestas durante el diseño, para cualquier tipo de túnel subacuático, comprobando si las predicciones informáticas sobre su comportamiento se corresponden con la realidad. Si surgen desviaciones excesivas, se tiene que realizar un nuevo análisis de los parámetros recogidos y tomar las medidas correctivas correspondientes. También se deben detectar con antelación daños o hundimientos inminentes, permitiendo tomar, con tiempo, las medidas oportunas.

Los parámetros para monitorear son las deformaciones, tensiones y esfuerzos. Algunos instrumentos útiles pueden ser inclinómetros, extensómetros, celdas de carga, puntos de deformación ópticos 3D, estaciones GPS 3D automatizadas. Cabe notar, que el monitoreo, para los túneles subacuáticos, debe realizarse dentro del túnel, ya que resulta inviable la medición de los asentamientos en el fondo marino en simultáneo con la construcción de éstos.

## 2.2. Diseño y construcción de túnel excavado

El diseño de túneles excavados cumple con las metodologías propuestas por las diversas asociaciones de túneles a lo largo del mundo. En particular, en Chile se trabaja con el Nuevo Método Austriaco de Túneles (NATM) que es una metodología de diseño y construcción convencional de túneles que consiste en una excavación secuencial que busca maximizar la capacidad misma del terreno. Esta capacidad se conserva por un sostenimiento primario, generalmente apoyado con el uso de hormigón proyectado (shotcrete), y la posterior ejecución de un sostenimiento secundario para el uso propio del túnel.

El equipo de trabajo n°19 de la ITA-AITES desarrolló una metodología de diseño convencional general, dispuesta en la Figura 10 [14]. Este proceso puede ser igualmente utilizado, de forma general para la construcción mecanizada, considerando los escenarios respectivos del terreno para el soporte correcto.

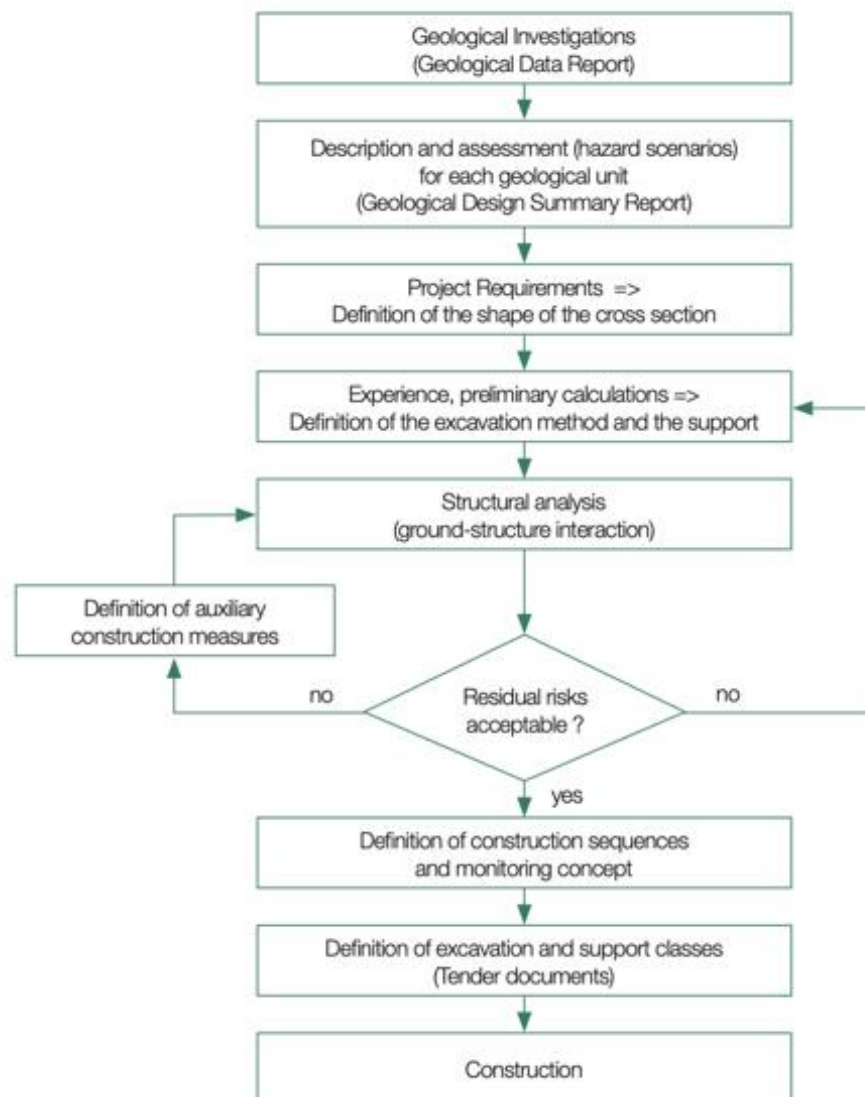


Figura 10: Etapas de diseño para la construcción convencional.

Fuente: ITA WG 19, 2009 [14].

En base a la investigación previa del suelo, se definen los distintos escenarios de cada unidad geológica a lo largo del trazado del túnel, es decir la descripción de los estratos de los suelos sedimentarios y macizo rocoso basal<sup>1</sup>, la geología estructural del macizo rocoso (dirección de las discontinuidades, fallas, estratificación, plegamientos), las condiciones hidrogeológicas en base a las permeabilidades o a las zonas de filtración, y el estado tensional del macizo previo y posterior a la excavación, sin soporte.

Con esta información, y con la obtenida de los ensayos y sondajes de la campaña exploratoria, se debe caracterizar la base de roca en base a clasificaciones de macizo rocoso tales como: RQD (Deere et al. 1967); RMR (Beniawski 1976, 1989); Q (Barton et al. 1974); GSI (Hoek et al. 1994); entre otras. En caso de realizarse la excavación en una base de suelo, se debe caracterizar en base a parámetros de suelo.

Definiendo la sección a excavar, dependiendo del tipo de excavación (convencional o mecanizada) y de los requerimientos del proyecto, en conjunto con la clasificación del macizo rocoso y la capacidad tensional de este, se define el tipo de soporte tal que se alcance un nuevo estado tensional de equilibrio.

Realizando el análisis estructural correspondiente, observando el comportamiento de la interacción suelo-estructura, se determina si el sostenimiento permite que los riesgos residuales sean aceptables o no. En caso de ser aceptables, se define la secuencia constructiva, las medidas atinentes en zonas de mayor complejidad constructiva (por ejemplo, fallas con filtración de agua) y los planes de monitoreo y riesgo.

En caso de construcción convencional en roca se utiliza excavación mediante el método de perforación y tronadura. Cuando el macizo rocoso basal tiende a ser más blando y menos abrasivo, se puede utilizar rozadora. En suelo, dependiendo de la dureza del terreno, la excavación se realiza con martillo hidráulico o retroexcavadoras. En caso de construcción mecanizada en roca se utiliza la TBM del tipo “topo”, aunque se recomienda el uso de tuneladora de doble escudo debido a que el agua puede promover el desplazamiento de algunas zonas rocosas con poca estabilidad. Cuando se utiliza tuneladora en suelo se utiliza la TBM del tipo “escudo” y se recomienda el uso de escudos de presión de tierra (EPB) para el sostenimiento de los posibles frentes inestables provocados por el ingreso del agua, además de considerar el uso de aire comprimido en el frente.

### 2.2.1. Trazado del túnel

La definición preliminar del trazado del túnel en planta depende de la necesidad propia del proyecto, es decir, de que territorios se desean conectar, de la accesibilidad (relacionado a la topografía de los portales de ingreso al túnel) y de la información previa que se tiene del terreno. Respecto al perfil longitudinal, este depende de las pendientes permisibles<sup>2</sup> y de la capacidad auto soportante del túnel, por lo que se puede establecer la profundidad del túnel a lo largo del trayecto una vez que se tienen estudiadas las unidades geológicas.

El volumen 3 del Manual de Carreteras indica cuatro tipos de clasificaciones de túneles: según ubicación (urbano o rural); según características constructivas (en suelo o en roca); según clima y altitud; según flujo vehicular, longitud y equipamiento. De acuerdo con el tipo de fuente

---

<sup>1</sup> Ver inciso 2.2.1 Trazado del túnel

<sup>2</sup> Pendientes máximas para vialidad, ver Tabla 7 en Anexo B.

acuática se pueden encontrar tanto túneles urbanos (en ciudades con ríos navegables o estuarios) como rurales (para el cruce de carreteras bajo, fiordos, estrechos).



(a) Río Támesis, ambiente urbano



(b) Fiordo Noruego, ambiente rural

Figura 11: Clasificación de túneles según su ubicación.

Fuente: (a) [Revista AS](#). (b) [National Geographic](#).

Bajo importantes masas de agua se suele situar una capa de suelo sedimentado y luego una base rocosa (Figura 12). Dado que los túneles subacuáticos excavados solicitan un medio lo menos permeable posible y requieren de una altura mínima de terreno sobre la clave para la formación del efecto arco tras la excavación, la mayoría de estos se sitúan y construyen en la base de roca. Por ende, y dadas las pendientes permisibles de acuerdo con el uso del túnel, el parámetro que definirá principalmente la longitud de un túnel submarino, es la cobertura de roca.

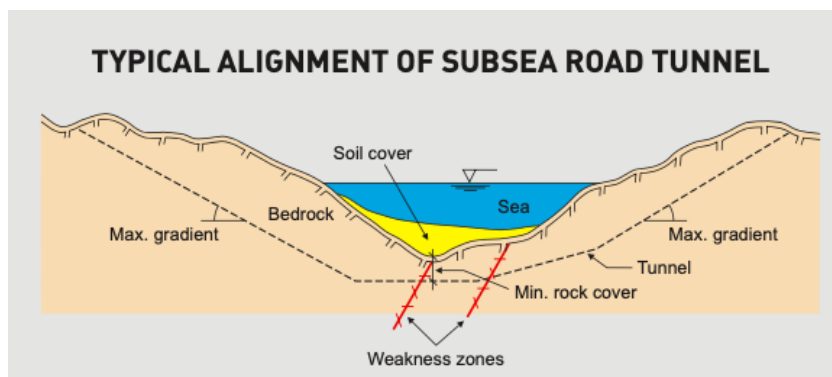


Figura 12: Alineación típica de túnel excavado bajo fondo marino

Fuente: NFF, 2009 [2].

Para minimizar el largo del túnel se debe optimizar la cobertura de la base rocosa, siendo siempre un factor clave en la planeación de proyectos de túneles subacuáticos de este tipo. Una cobertura excesiva de roca hará que el túnel sea innecesariamente largo, provocando excesivos costos de construcción, así como mayores operaciones y costos de transporte durante el tiempo de vida del proyecto. Una cobertura insuficiente, por otra parte, puede provocar severos problemas de estabilidad y un riesgo inaceptable durante la excavación, como también un gran ingreso de agua lo cual requerirá de un grouting<sup>3</sup> muy compresivo y considerable bombeo de agua. Esto puede causar serios problemas económicos, y en peor caso el riesgo de perder el control de la estabilidad [2].

<sup>3</sup> Técnica de mejoramiento de suelo de inyecciones de lechada o mortero.

Noruega es el país con mayor experiencia en túneles subacuáticos excavados en roca, debido a su geografía compuesta de una cantidad relevante de fiordos a lo largo de su costa, construyéndose más de 40 túneles de este tipo desde principios de la década de 1980. La gran mayoría de estos han sido excavados en rocas duras de origen precámbrico, mayoritariamente Gneis, como se aprecia en la Tabla 8, del Anexo B. Sin embargo, algunos de ellos han sido construidos en sectores de roca débil (metamórfica) como esquistos, filitas y pizarras. Un alto porcentaje de los túneles submarinos en Noruega cruzan zonas de debilidad en la roca o incluso fallas importantes.

Es justamente en las zonas de debilidad donde es más crítico definir el recubrimiento de roca mínimo, para establecer un recubrimiento que sea suficiente para el resto del túnel, además de que las zonas de roca de mala calidad o de fallas más grandes se suelen ubicar bajo las partes más profundas de los lechos marinos. Estas zonas suelen ser particularmente distintas al resto del macizo rocoso, pudiendo incluir suelos arenosos o arcillosos, además de presentar un mayor potencial de entrada de agua y mayores problemas para la excavación debido al carácter corrosivo de esta.

En base a la experiencia noruega en túneles subacuáticos, se han obtenido datos que permiten realizar análisis empíricos que pueden ser útiles durante la planificación de nuevos proyectos, para establecer recubrimientos de roca. En la Figura 13 se pueden apreciar las coberturas de roca utilizadas para los túneles indicados en la Tabla 8, Anexo B, respecto de la cobertura mínima estimada según la profundidad a la roca base. Queda en evidencia que existen casos de inestabilidad cuyas coberturas de roca no corresponden a coberturas cercanas a las mínimas, sino que, inclusive, han sido coberturas relativamente grandes. Estas inestabilidades se han dado principalmente por derrumbe del frente de trabajo debido a la corrosión del agua filtrada por fallas, no por inestabilidad de la roca en tensión de arco (ver Tabla 9 en Anexo B).

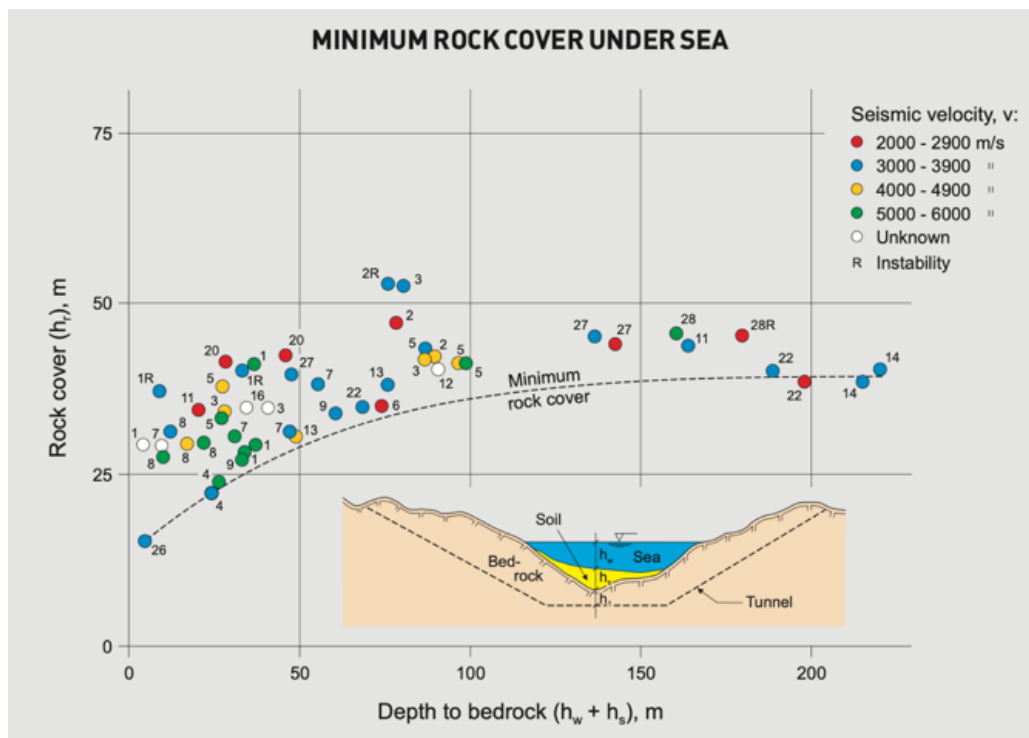


Figura 13: Cobertura de roca de túneles submarinos noruegos.

Fuente: NFF, 2009 [2].

Sin embargo, el diagrama no da ninguna indicación del nivel de seguridad (factor de seguridad) para los túneles respectivos. Hay motivos para creer que la "línea crítica" de la Figura 13 representa un nivel de seguridad relativamente alto. Así, el extremo exterior del túnel del oleoducto de Hjartøy, que lleva a tierra el oleoducto desde el fondo del mar, fue excavado sin problemas significativos en una capa de roca de solo 8 a 9 m y un depósito de agua de más de 60 m.

Según la normativa noruega (Norwegian Public Road) un recubrimiento mínimo inferior a los 50 m será aceptado siempre y cuando las prospecciones geotécnicas respalden una buena calidad del macizo rocoso. Muchos de los proyectos noruegos han sido construidos con un recubrimiento mínimo de roca menores a 30 m, y, como se mencionó, estos se calculan para tramos que corresponden a zonas de debilidad o zonas en que la velocidad de onda sísmica es menor.

Finalmente, se puede concluir que los principales puntos a considerar en la planificación del trazado de un túnel submarino son:

- Optimizar la cobertura de roca a lo largo del trazado.
- Establecer cobertura de roca mínima en zonas de debilidad. Principal cuidado con fallas distintivas y zonas de fallas, ya que causarán los mayores problemas.
- Identificación de arcillas en las fallas, puesto que podrían ser del tipo expansivas.
- Considerar niveles de seguridad relativamente altos, pues la obtención de datos confiables respecto a las filtraciones es generalmente poco factible. Para muchos proyectos estas corresponden a volúmenes similares o mayores a los encontrados en proyectos subterráneos.

### 2.2.2. Aspectos críticos

De acuerdo con Anagnostou [6], las principales características críticas asociadas a los túneles subacuáticos excavados, y que se deben tener en consideración en los proyectos, son: la accesibilidad limitada antes de la construcción, el alto potencial de daño debido a la filtración de agua y las presiones de poro relativamente altas.

Además del alto costo de las operaciones marítimas, los movimientos de los barcos o las corrientes marinas que a menudo prevalecen en los estrechos pueden causar frecuentes interrupciones en las operaciones de sondeo, lo que hace que las campañas exploratorias sean muy exigentes. Esta característica, en particular, prevalece para todo tipo de túnel subacuático.

La accesibilidad limitada no solo aumenta la incertidumbre en la fase de planificación, sino que también reduce la gama de opciones técnicas para la construcción: las obras de mejora del suelo en alta mar, por ejemplo, comparten las mismas dificultades que las campañas exploratorias y también son extremadamente costosas. Los pozos para sondeos intermedios son posibles solo en casos muy excepcionales y solo para obras de carácter limitado (Figura 14). Debido a esto, para los túneles subacuáticos excavados, el sondeo del frente de avance sistemático, que exige más tiempo durante la construcción, es a menudo indispensable.



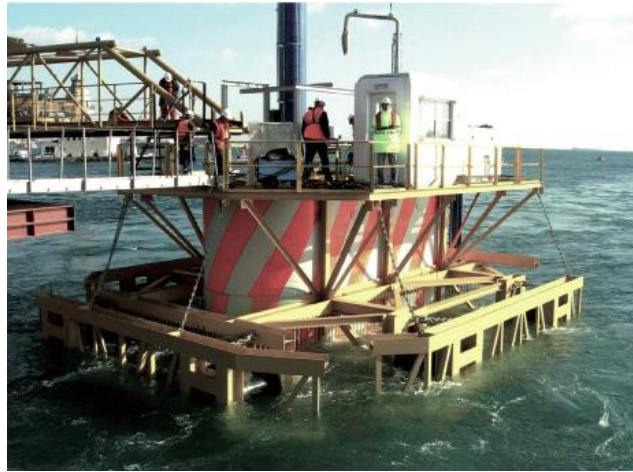


Figura 14: Caso excepcional de pozo a través del agua. Estrecho de Estambul.

Fuente: Anagnostou, 2014 [6].

El alto potencial de daño asociado con los túneles subacuáticos surge de la posibilidad de grandes afluencias de agua, lo que puede provocar desplazamiento de secciones del macizo, e incluso una inundación completa del túnel en el caso de una conexión hidráulica que se abre al fondo del mar. Eventos trágicos de este tipo han ocurrido muchas veces, como por ejemplo durante la construcción del túnel del río Támesis de Marc Brunel, el primer túnel subacuático del mundo (Figura 15).

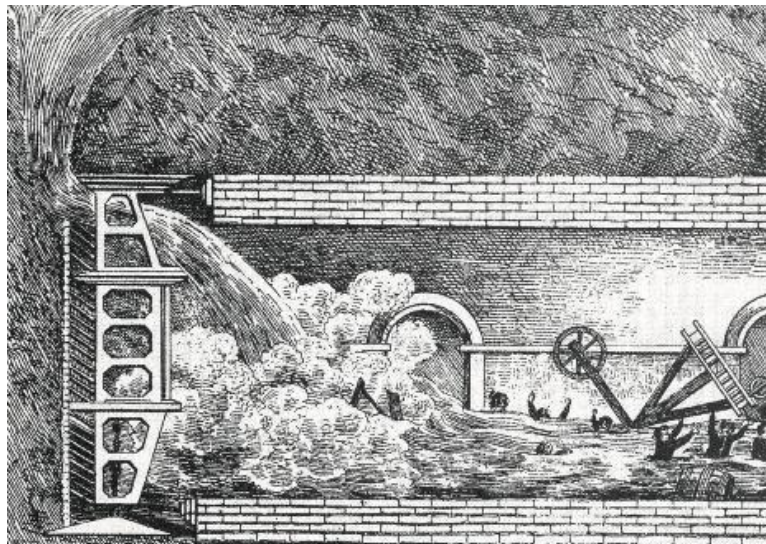


Figura 15: Inundación de túnel del Támesis.

Fuente: Anagnostou, 2014 [6].

El carácter corrosivo del agua que se filtra hacia el túnel representa problemas considerables para la excavación de éstos y el sostenimiento del macizo rocoso. La transmisividad en los macizos rocosos tiene lugar preferentemente a través de fracturas, o por conductos de mayor tamaño en rocas formados por erosión kárstica<sup>4</sup>. Las filtraciones en los macizos provienen principalmente de:

---

<sup>4</sup> Erosión producida por las corrientes de agua que escurren bajo la superficie terrestre debido a la infiltración de las aguas superficiales.

- Fallas y fracturas.
- Brechas (rocas), rellenos en fallas, zonas alteradas.
- Contactos litológicos entre rocas de permeabilidad muy diferente.
- Conductos kársticos, tubos en rocas volcánicas, etc.

En los suelos, la transmisividad está directamente relacionada con la granulometría y la presencia de determinadas estructuras sedimentarias.

La alta presión de poros no es específica de los túneles subacuáticos, sin embargo, para estos, puede ocurrir en combinación con una baja cobertura de roca. Como la diferencia de altura entre el nivel del agua y el túnel debe disiparse a una distancia menor, los gradientes de presión de poro y, en consecuencia, las fuerzas de filtración desestabilizadoras son mayores (Figura 16). Además, la pequeña profundidad de cobertura significa que la tensión efectiva y la resistencia al corte del suelo pueden ser bajas en relación con la presión de poro.

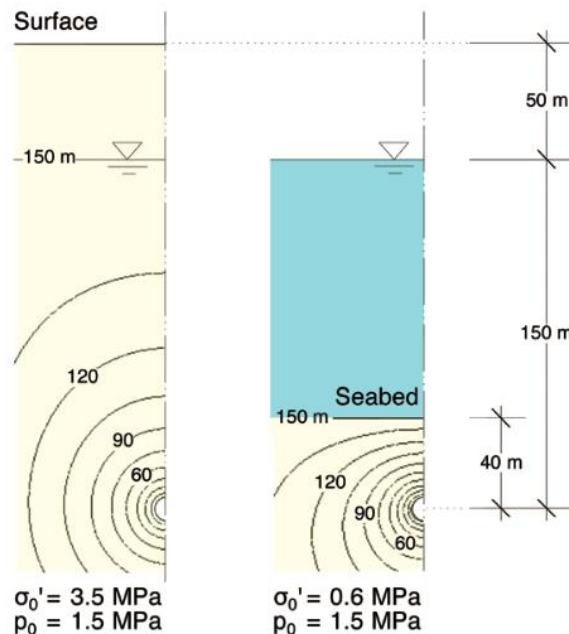


Figura 16: Las líneas de carga hidráulica, esfuerzo efectivo inicial  $\sigma_0'$  y presión de poros inicial  $p_0$  para un túnel profundo (lado izquierdo) y un túnel subacuático poco profundo (lado derecho).

Fuente: Anagnostou, 2014 [6].

Estos dos últimos aspectos críticos indicados se pueden observar en el caso del túnel ferroviario Storebælt, de doble perforación de 8 km de longitud, que conecta las islas de Sprogö y Seeland en Dinamarca. Se construyó entre 1990 y 1997, utilizando cuatro escudos EPB de 8,75 m de diámetro, en un terreno que consiste en margas fisuradas y tills glaciares, cada uno de los cuales representa aproximadamente el 50% de la alineación (Figura 17) [6].



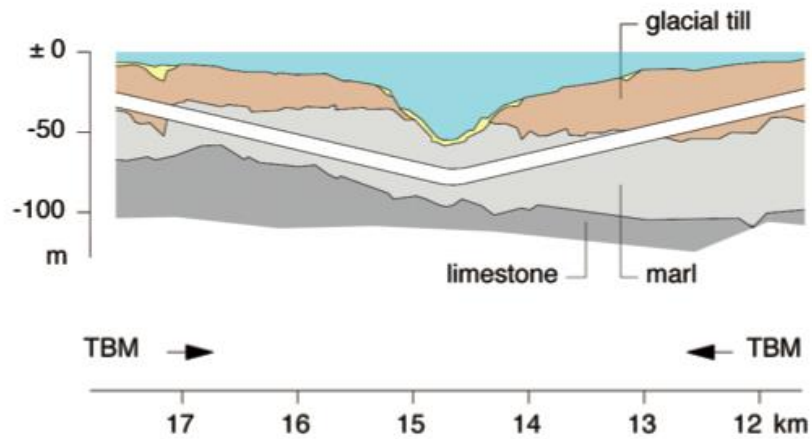


Figura 17: Perfil de túnel Storebælt.

Fuente: Anagnostou, 2014 [6].

Los tills glaciares fueron particularmente desfavorables para la construcción de túneles, ya que estos conformaron un suelo sobreconsolidado con hasta un 20% de arcilla en la parte poco profunda de la alineación y un material muy heterogéneo en la parte más profunda, lo que los hace un terreno con baja resistencia al corte y alta permeabilidad, así como alta presión hidrostática (hasta 5 bar).

Teniendo en cuenta lo anterior, el escenario de riesgo principal era un colapso del frente del túnel con la posterior expansión de una falla hasta el lecho marino. Esto se hizo evidente poco después del inicio de la excavación, ya que, en 1991, se produjo un colapso del frente que creó una conexión hidráulica con el fondo del mar. La cantidad de agua que ingresó aumentó rápidamente a 4 m<sup>3</sup>/seg y condujo a la inundación del túnel, el pozo desarrollado para la construcción de las tuneladoras en Sprogö y el túnel paralelo.

Además de este incidente, hubo varios retrasos debido a la alta abrasividad de los tills y la frecuente aparición de rocas graníticas a la cámara de trabajo de la TBM. A menudo era imposible estabilizar el frente del túnel operando el escudo EPB en modo cerrado. Cuando las dos máquinas procedentes de Seeland alcanzaron los tramos más profundos de los tills, estos problemas se volvieron tan críticos que las tuneladoras ya no podían avanzar.

Las dificultades descritas anteriormente desencadenaron investigaciones exhaustivas sobre la mecánica de la estabilización del frente con escudos EPB en las condiciones operativas no ideales específicas que prevalecen en terrenos de alta permeabilidad:

En condiciones operativas ideales (caracterizadas por suelo de grano fino y baja permeabilidad a baja presión hidrostática), el lodo excavado puede verse como un medio monofásico. La cara del túnel está soportada por la presión total en el lodo que es monitoreada por los transductores de presión en el cabezal de corte. Un lodo de grano grueso, sin embargo, es un material bifásico que consiste en granos sólidos y agua intersticial. En este caso, se debe hacer una distinción entre la presión de poros del agua y la presión en los sólidos (presión de soporte efectiva). Aunque la suma de estas dos presiones es igual a la presión total, actúan de diferentes formas: los sólidos ejercen una tensión estabilizadora directamente sobre el frente, mientras que la presión de poro es decisiva en términos del campo de carga hidráulica en el suelo por delante de la cara del túnel.

Si la presión del agua intersticial en el lodo (carga hidráulica  $h_F$  en la cámara de trabajo) es igual a la presión hidrostática in situ (elevación del nivel del mar  $h_G$ ), entonces el suelo es afectado únicamente por la fuerza de la gravedad (representada por el peso unitario sumergido  $\gamma'$  en la Figura 18). En este caso, una presión de soporte efectiva baja o una cohesión baja son suficientes para la estabilidad del frente.

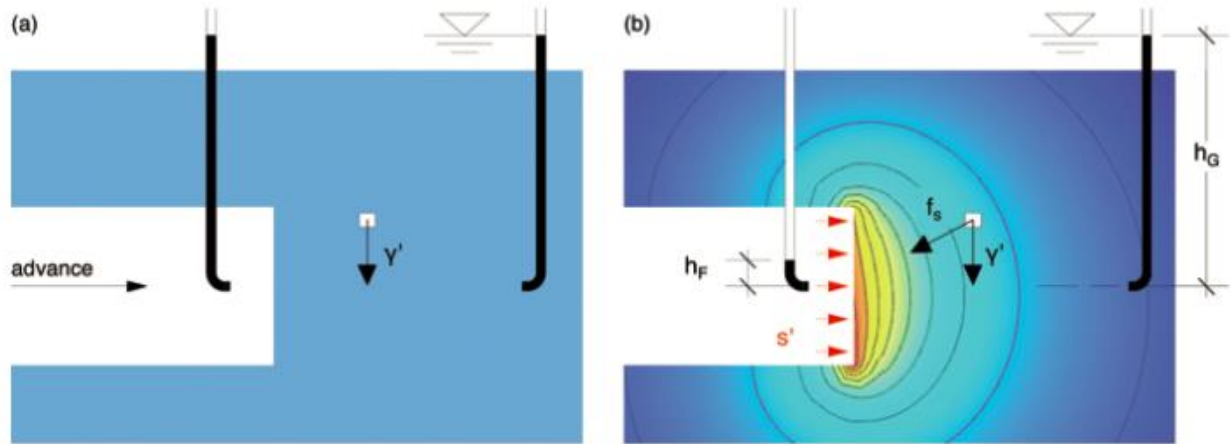


Figura 18: Fuerzas ( $\gamma'$ ,  $f_s$ ) que actúan sobre el suelo, presión de apoyo efectiva necesaria  $s'$  y curvas de nivel de la carga hidráulica  $h$ : (a) carga hidráulica en la cámara de trabajo según el nivel del mar; (b) presión atmosférica del agua.

Fuente: Anagnostou, 2014 [6].

Si, por otro lado, la carga hidráulica  $h_F$  en la cámara es más baja que la elevación del nivel del mar, entonces el agua fluirá hacia el frente del túnel, ejerciendo así fuerzas de filtración sobre el suelo. Las fuerzas de filtración  $f_s$  están orientadas perpendicularmente a las curvas de nivel. Su magnitud aumenta linealmente con el gradiente de la carga y, por lo tanto, es más alta cerca del frente del túnel. Las fuerzas de filtración son desfavorables para la estabilidad y requieren una mayor presión de soporte efectiva para que la cara sea estable. Cuanto menor sea la carga hidráulica  $h_F$  en la cámara de trabajo, mayores serán las fuerzas de filtración y, en consecuencia, mayor será la presión de apoyo efectiva necesaria.

En conclusión, la respuesta del suelo está controlada por el efecto conjunto de la presión de poro y la presión de soporte efectiva. Sin embargo, estos dos parámetros no se pueden controlar directamente en la práctica. Dependen de las características del terreno excavado, la forma en que se mezcla el terreno en la cámara de trabajo, la velocidad de rotación del tornillo sin fin y la tasa de avance de la excavación. Por lo tanto, la respuesta del suelo a la construcción de túneles por un escudo EPB depende en gran medida de una interacción compleja de factores geotécnicos y operativos.

Estos problemas operativos y geotécnicos pueden evitarse manteniendo baja la presión efectiva necesaria. Las opciones básicas a este respecto son:

- Alivio de la presión de los poros en el suelo delante de la cara, mediante un drenaje sistemático, o pozos de bombeo. En este túnel se utilizaron 43 pozos de bombeo superficiales.
- Mejoramiento del suelo mediante lechada (grouting).

- Alta carga hidráulica en la cámara de trabajo, creando un lodo de baja permeabilidad como barrera para el flujo de agua subterránea o aplicando contrapresión con bomba de pistón. Esto se realizó en Storbael permitiendo que una máquina continuara excavando en las tills y entrara en las margas estables subyacentes.

Otro caso analizado por Anagnostou es el túnel Melen 7, excavado bajo el estrecho del Bósforo en Turquía [6], que también fue construido con TBM diseñada para soportar una presión hidrostática máxima de 13,5 bar durante los periodos sin movimiento y para funcionar en modo EPB a presiones de hasta 4 bar. En la sección más profunda del alineamiento, la tuneladora operó 135 m por debajo del nivel del mar y 70 m por debajo del lecho marino, sin embargo, debido a los depósitos aluviales granulares gruesos, la capa mínima de roca fue de tan solo 35 m. Esto, en combinación con la existencia de varias fallas y diques volcánicos en el área del proyecto, implicó una mayor probabilidad de encontrar cantidades de agua muy altas o presiones en zonas de fallas o en diques que se comunican con el lecho marino. Los problemas potenciales en diques fracturados y zonas de fallas en bloques incluyen altos flujos de agua, que pueden causar dificultades en la instalación del revestimiento y la lechada radial (grouting), así como inestabilidades de la roca frente a la tuneladora, que pueden bloquear o dañar el cabezal de corte.

Debido a este riesgo, se ejecutaron pozos exploratorios perforados sistemáticamente antes de la tuneladora durante la construcción. Además, se utilizó lechada para mejorar la resistencia del macizo rocoso, lo que ayuda a hacer frente al mismo tiempo a los problemas de estabilidad mencionados anteriormente, y mantener baja la presión efectiva necesaria en el cabezal, de acuerdo con lo concluido del ejemplo anterior.

Anagnostou, tomando este ejemplo, evalúa la estabilidad de fallas con rellenos de grano fino, es decir, la discusión de los parámetros que gobiernan la estabilidad en fallas con rellenos limosos-arcillosos, con un ejemplo simplificado de una falla vertical que golpea perpendicular al eje del túnel (Figura 19). Solo se considera las condiciones no-drenadas, es decir, las condiciones que prevalecen durante la excavación continua o durante paradas breves. La suposición de condiciones a corto plazo es razonable dada la extensión limitada de las zonas de falla.

Los parámetros que gobiernan la estabilidad a corto plazo son: la resistencia al cortante sin drenaje  $S_u$  del suelo, la profundidad de cobertura, la profundidad del mar y el espesor  $d$  de la falla. Su efecto puede estimarse mediante cálculos de equilibrio límite. El diagrama de la Figura 19 muestra la presión de apoyo frontal necesaria  $s$  en función del espesor de falla  $d$  con respecto a tres secciones transversales en la sección submarina del túnel.

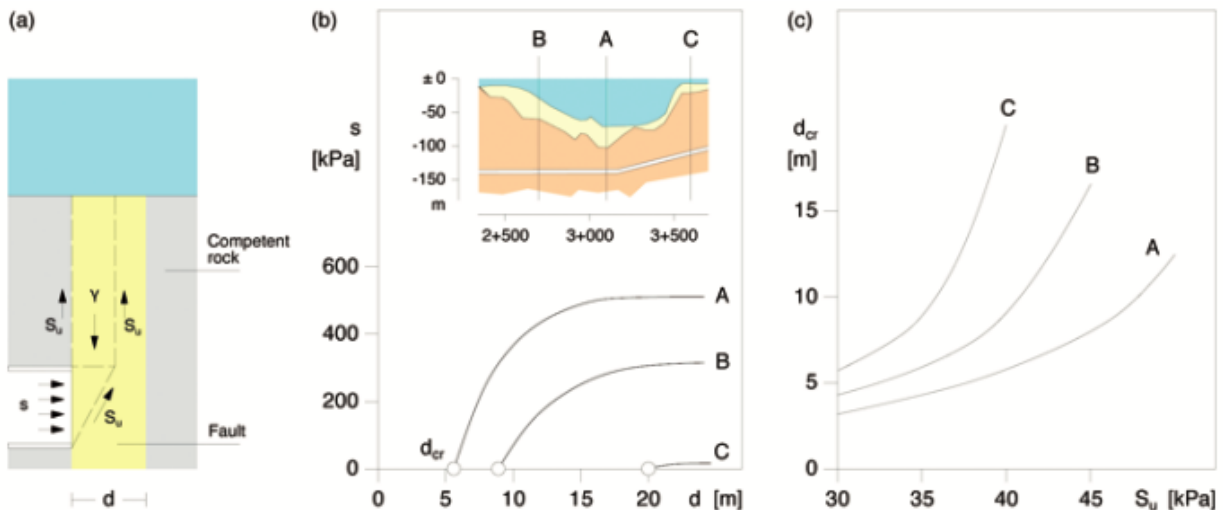


Figura 19: Túnel de Melón. (a) Esquema del problema; (b) Presión de soporte requerida  $s$  en función del espesor  $d$  de la falla (resistencia al corte sin drenaje  $S_u = 40$  kPa); (c) Espesor crítico de falla  $d_{cr}$  para un frente de túnel sin apoyo en función de la resistencia al corte sin drenaje  $S_u$ .

Fuente: Anagnostou, 2014 [6].

Se pueden sacar las siguientes conclusiones de este diagrama: Para una profundidad dada por debajo del nivel del mar, la presión necesaria de apoyo frontal depende de la profundidad de cobertura; los valores más altos corresponden a la sección transversal A en la parte central de la alineación, la que presenta menor cobertura de roca. La experiencia en la construcción de túneles indica de hecho que los tramos del túnel con la mayor presión de agua y la menor profundidad de cobertura son los más críticos. Además, cuanto más estrecha sea la falla, menor será la presión de soporte necesaria en el frente. Esto se debe al efecto estabilizador del esfuerzo cortante en la interfaz entre la falla y la roca competente.

Como puede verse en la Figura 19.b, el soporte frontal es necesario solo si el espesor de la falla  $d$  es mayor que el espesor crítico  $d_{cr}$ . La Figura 19.c muestra el espesor crítico  $d_{cr}$  de la falla en función de la resistencia al cortante sin drenaje  $S_u$  del suelo para las tres secciones transversales. Las fallas más estrechas de 2 - 3 m no presentan un problema de estabilidad incluso en la parte más profunda de la alineación y con valores de resistencia al corte extremadamente bajos. Dependiendo de la resistencia del material de la falla, las fallas más gruesas pueden necesitar soporte frontal (operación en modo cerrado), mejora del terreno mediante lechada o alivio de la presión de poros en el terreno delante de la tuneladora mediante drenaje de avanzada. Para resistencias al corte  $S_u$  superiores a 50 - 60 kPa, la cara permanecería estable sin ninguna medida.

### 2.2.3. Mejoramiento del terreno y control del agua

Tal como se indica en los ejemplos mencionados, una de las técnicas que se utilizan, no sólo para el mejoramiento y estabilización del terreno, sino también para el control de las presiones de poros sobre éste, son las inyecciones de lechada o grouting. También existen otros materiales con los que se realizan inyecciones, para cumplir diversas funciones. A grandes rasgos, existen 3 tipos de inyecciones para el mejoramiento del suelo: consolidación, impermeabilización y compensación. Los dos primeros tipos de inyecciones son los recurrentes en los túneles subacuáticos excavados.

Otra de las técnicas que se utilizan para el mejoramiento del suelo es el jet-grouting o micropilotes, que es una tecnología que utiliza una inyección radial de fluidos, a muy alta velocidad, para erosionar el terreno sustituyendo parcialmente el terreno erosionado y mezclándolo con un agente de cementación, generando estos micropilotes. Estos se pueden utilizar para consolidar el macizo del túnel o reforzar el frente de excavación.

Previo al mejoramiento de suelo se debe evaluar la permeabilidad del terreno, explorar la posible distribución de fisuras del macizo, e identificar la presencia de sales y agua, las cuales pueden afectar el resultado del tratamiento.

Respecto al control del agua, se suelen utilizar sistemas de drenaje en conjunto con técnicas o materiales de impermeabilización. Dentro de los sistemas típicos podemos encontrar:

- Implementación de un sistema de drenaje permanente con derivación de las aguas captadas.
- Control de las aguas de infiltración y disminución de la permeabilidad del subsuelo (inyecciones indicadas previamente, congelamiento del terreno).
- Revestimiento de hormigón.
- Sistemas de impermeabilización basados en el uso de membranas y elementos sintéticos de sellado de juntas. Láminas impermeables confinadas entre sostenimiento provisional y definitivo; láminas proyectables.

Respecto a los sistemas indicados, podemos clasificarlos en sistemas de drenaje abiertos (drenados) que se caracterizan por permitir la entrada controlada del agua al interior de los túneles, colectándola y conduciéndola a puntos secundarios de derivación a través de vías de escurrimiento y/o drenajes permanente; y sistemas de drenaje cerrados (no drenados) que se caracterizan por contemplar la instalación de una barrera de sellado perimetral completa del túnel, eliminando totalmente la presencia de infiltración/humedad o reduciéndola a niveles aceptables. Los túneles en Noruega se caracterizan por considerar diseño drenado o con drenaje abiertos.

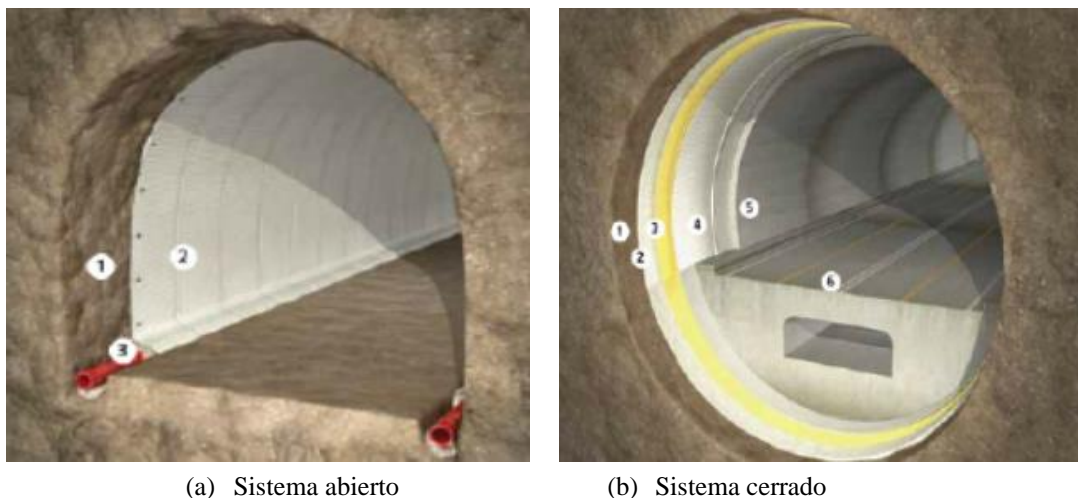


Figura 20: Sistemas de drenaje. (a) Tipo paraguas con protección perimetral, captación con tubos de drenaje laterales y/o centrales. (b) Con protección perimetral completa (túnel estanco), hormigón colado impermeable y/o sistema de membrana PVC.

Fuente: Notas curso CI5534 Construcción de Túneles, J.C. Pozo, FCFM U. de Chile.

Algunos sistemas auxiliares de control del agua son el uso de aire comprimido en los cabezales de corte de las TBM, sistemas de captación y pozos de bombeo instalados en el interior del túnel, como el utilizado hacia las etapas finales del túnel del Támesis de Brunel, o instalados desde la superficie, como es el caso de los pozos de bombeo del túnel Storebælt. Estos últimos son difíciles de ejecutar, aunque se pueden aprovechar de realizar en conjunto con los sondajes de la campaña exploratoria.

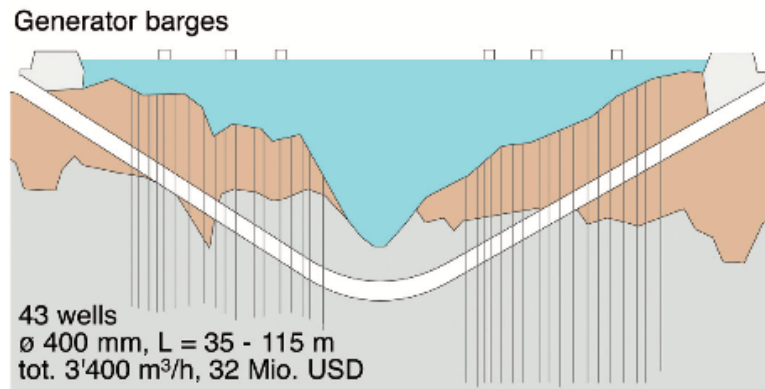


Figura 21: Alivio de presión de agua de poros a gran escala debajo del lecho marino mediante pozos de bombeo, túnel Storebælt.

Fuente: Anagnostou, 2014 [6].

### 2.3. Diseño y construcción de túnel sumergido

Los túneles sumergidos son una alternativa de túnel subacuático, utilizados en menor cantidad, pero cada vez con mayor frecuencia, a nivel mundial. Estos consisten en la colocación de módulos prefabricados de túnel en el lecho de la fuente acuática, previamente dragada si se requiere, conectándolos para la formación de un túnel continuo. Estos módulos son llevados flotando hasta el lugar de su colocación y se guían hasta el lecho. Posteriormente, se cubren con una capa de relleno para controlar su movimiento debido a las cargas externas.

Aunque los túneles sumergidos se han diseñado y construido en algunos lugares del mundo, no existen códigos especiales para estos. Los códigos estándar para estructuras de carreteras se utilizan a menudo, aunque estos códigos se relacionan con el rendimiento estructural y, en general, una exposición ambiental más severa que los túneles sumergidos. La distribución y el diseño de un túnel sumergido están muy relacionados con las oportunidades de construcción y las condiciones del sitio. A pesar de los diferentes sitios y prácticas, el objetivo es siempre el mismo: producir túneles sumergidos herméticos y duraderos [15].

La construcción de túneles sumergidos es un arte de guiar la gran fuerza natural, el agua, para realizar trabajos de ingeniería: "guiar" la flotabilidad para el transporte, "guiar" los pesos de agua para la inmersión y "guiar" la presión hidrostática para la conexión [16].

A pesar del avance de la tecnología, el conocimiento sobre el medio marino aún es limitado; el riesgo de construcción de un túnel sumergido en condiciones de alta mar es relativamente alto (ver caso de túnel Øresund, capítulo 3.1.4). Debido a esta complejidad técnica, en diseño y construcción, es que esta obra civil no es tan utilizada, aunque ha ido desarrollándose con mayor frecuencia en los últimos 50 años. Por tanto, uno de los objetivos del diseño de un túnel sumergido



es encontrar una forma de mitigar el riesgo de la construcción proponiendo el esquema y los requisitos técnicos adecuados. En consecuencia, el diseño no se basa únicamente en la alcanzar la capacidad del túnel necesaria, sino también en generar condiciones idóneas para facilitar el proyecto en su construcción y operación.

### 2.3.1. Alineación

El entorno que actúa sobre el túnel sumergido depende de la ubicación del túnel. Por lo tanto, en primer lugar, debe arreglarse la alineación del túnel. La profundidad a la que alcanzan los elementos del túnel varía, generalmente, entre los 5 y 30 m de profundidad, aunque ha llegado a profundidades cercanas a los 60 m (túnel Marmaray, Estambul). Se han proyectado túneles a mayores profundidades, aunque surge el riesgo de que a mayor profundidad, mayores presiones de agua.

La alineación del plano del túnel depende principalmente de sus dos extremos, los portales de acceso a este, como el que se proyecta en la Figura 22. Para la alineación vertical, es decir, la elevación del túnel, se deben tomar varias consideraciones. La elevación de los extremos del túnel no será ni demasiado alta ni demasiado baja. Si los extremos del túnel fueran demasiado altos, la profundidad de inmersión sería inadecuada para la conexión hidráulica del primer elemento del túnel que conecta con la estructura del terreno, además de un mayor riesgo de colisión de barcos. Si los extremos del túnel fueran demasiado bajos, el riesgo de inundación aumenta ya que una mayor cantidad de agua podría precipitarse hacia el túnel en caso de lluvia o desborde de la misma fuente acuática, además de presentar mayor presión de agua (ver Figura 23).



Figura 22: Proyección de portal de entrada túnel Fehmarnbelt, Dinamarca-Alemania.

Fuente: [El Confidencial](#), 2020.

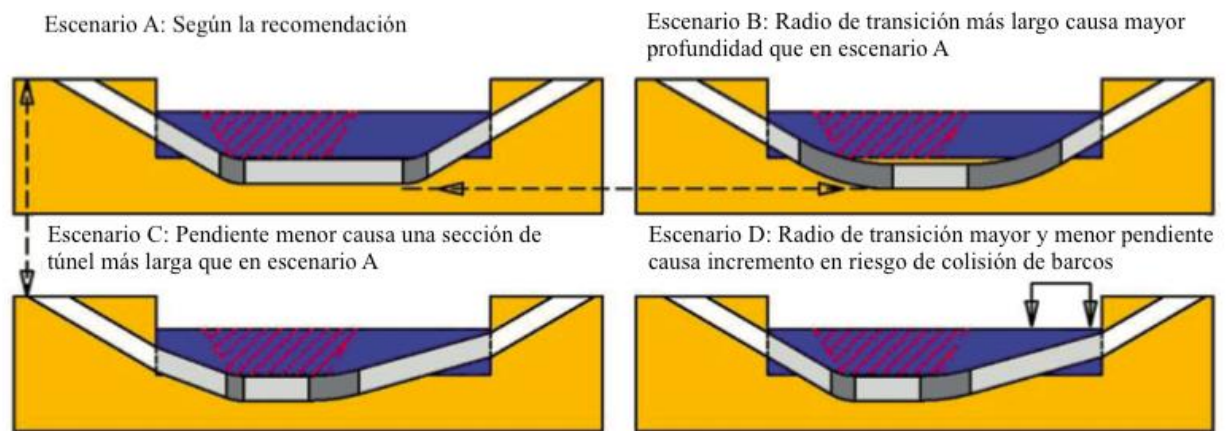


Figura 23: Imagen ilustrativa que muestra el principio de dibujo de la alineación vertical [16].

Fuente: Lin et al, 2019 [16].

Además, la elevación de la sección central del túnel depende de los requisitos de navegación de los barcos que pasan por el túnel. Una vez trazada esta alineación vertical del túnel, se ajusta el fondo marino en caso de ser necesario mediante el dragado de este, generando la trinchera que cumple con este trazado. Evidentemente, el principio para optimizar los costos y tiempos de construcción es sumergirse lo menos profundo posible, pues de esta forma, la longitud del túnel siempre será la más corta.

El entorno, dada la alineación, con el que se encontrará el túnel será relativamente fijo, por lo que se pueden definir acciones como el viento, las olas, la corriente y la profundidad del agua. En resumen, se puede realizar el diseño estructural.

El túnel sumergido consta de uno o varios elementos de túnel. Por lo tanto, el diseño del túnel sumergido es, de hecho, el diseño de los elementos del túnel. El diseño de cada elemento del túnel generalmente se distingue entre sí. Una razón es que cada elemento del túnel existe en un entorno más o menos diferente y las acciones sobre ellos son diferentes. Como se puede ver en el esquema de la Figura 24, cada elemento puede variar del otro por su alineación, los requerimientos debido a su alineación, sus necesidades constructivas o sus necesidades de servicio. De esta forma, se puede concluir que casi todos los elementos son únicos, y por lo tanto su diseño es diferenciado. Sin embargo, se debe tratar de estandarizar el diseño estructural de estos módulos de manera de abaratar los costos de construcción.



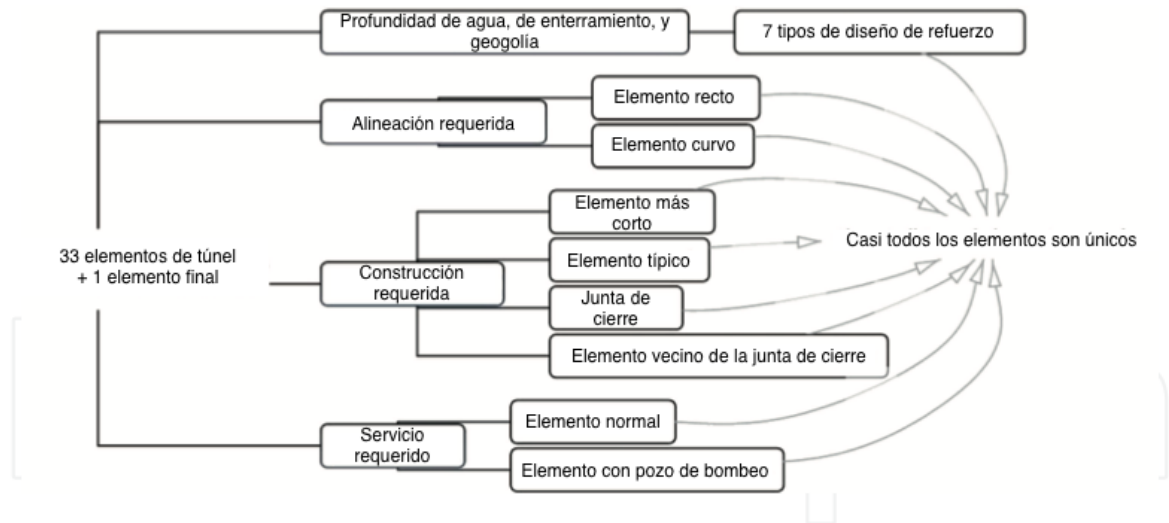


Figura 24: Singularidad del diseño del elemento de túnel sumergido en el Proyecto Island-Tunnel HZMB, China.

Fuente: Lin et al, 2019 [16].

### 2.3.2. Diseño Transversal

El diseño transversal debe satisfacer los siguientes aspectos: la resistencia estructural, el equilibrio de peso, el espacio interior y el sistema estructural (concepto compartido con el diseño longitudinal).

#### 2.3.2.1. Resistencia estructural

Las cargas más importantes son: el peso propio de la estructura, la presión del agua y la presión efectiva en el suelo circundante. La resultante total del peso propio y la presión del agua es aproximadamente nula. La distribución de estas cargas no debe depender de las deformaciones del cuerpo estructural del túnel. Sin embargo, la distribución de la presión efectiva en el suelo si depende de estas deformaciones [8].

Hay que tener precaución con el tipo de forma estructural que se utiliza. El empleo de secciones transversales más o menos rectangulares da origen a presiones en la estructura como consecuencia del peso propio y la presión del agua que se presentan aumentadas al descender bajo el agua. Las presiones en el túnel, debidas a las presiones en el terreno, crecen al aumentar la profundidad del suelo de apoyo (mayor altura de trinchera). Estas condiciones limitan, por tanto, la profundidad de ubicación del túnel.

De emplear secciones transversales circulares con espesor uniforme de muros, la carga por peso propio y la presión del agua originan, únicamente, tensiones de compresión pura en los muros del túnel. Esto puede comprobarse sencillamente. La presión del suelo circundante da lugar a la presencia de momentos flectores y esfuerzos cortantes. Estas tensiones resultan pequeñas debido a que las presiones en el suelo se ajustan entre sí en forma favorable a las deformaciones por ellas causadas en el cuerpo estructural del túnel. Como resultado de todo ello, el estado tensional no es solamente favorable, sino casi indiferente para la ubicación del túnel, en términos de profundidad del agua y la carga sobre el terreno de sustentación del túnel.

Otras cargas que se deben considerar para el diseño de los túneles sumergidos son las cargas de impacto, cargas dinámicas (sísmicas), cargas internas (se deben considerar con el peso), y cargas que puedan afectar la estructura durante su flotación, como puede ser el oleaje u otros impactos. Además, es importante comprender la resistencia a la compresión del terreno subyacente a la estructura, tal que tenga la capacidad de soporte al peso de la estructura, considerando que, una vez colocada, esta no tiende a flotar. En terrenos muy malos, se puede rellenar la trinchera con un material de mejor calidad, reemplazar el terreno actual o, en casos extremos, utilizar pilotes para el soporte del túnel.

La combinación de cargas para el cálculo de los esfuerzos sobre la estructura queda a cargo del ingeniero. Algunos factores de carga que se pueden indicar son los señalados por Saveur y Grantz [17] (ver Tabla 10 en Anexo C).

#### 2.3.2.2. Balance de peso

El balance de peso significa que el elemento del túnel puede flotar cuando se transporta y puede hundirse para su inmersión y conexión bajo el agua; esas son necesidades propias de la construcción. Además, durante el período de servicio, se debe prestar atención a garantizar un factor de seguridad adecuado contra el levantamiento del túnel, en caso de condiciones climáticas extremas.

Para evitar los efectos del empuje de flotación, el peso del túnel sumergido debe equilibrar al referido empuje. Si llamamos  $A$  al espacio interior necesario,  $\gamma$  representa la densidad, la cantidad de hormigón precisa vendrá expresada en la forma siguiente [8]:

$$\frac{A \cdot \gamma_{agua}}{\gamma_{hormigón} - \gamma_{agua}} \approx 0,7 \cdot A$$

Para procurar el razonamiento anterior, la cantidad total de hormigón debe repartirse lo más eficientemente posible a lo largo del perfil longitudinal del terreno de sustentación.

Se debe tener en cuenta que cualquier elemento que puede topar al módulo de túnel durante su transporte cuando está a flote, tales como las plataformas de construcción, pueden afectar la estabilidad durante el transporte y condicionar el flote del elemento en otra orientación.

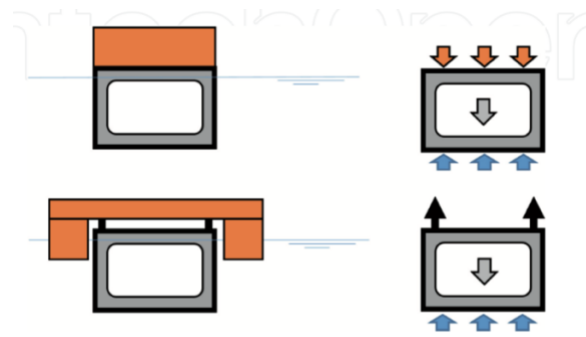


Figura 25: Las plataformas de inmersión del pontón se asientan en el elemento del túnel y reducen el francobordo<sup>5</sup> del elemento del túnel, mientras que los catamaranes o barcasas lo aumentan.

Fuente: Lin et al, 2019 [16].

Un elemento de túnel de hormigón debe poder flotar con todo el equipo de inmersión temporal a bordo. Para el hundimiento del módulo, generalmente se cuenta con tanques de agua en su interior, que al ser llenados aumentan el peso de lastre del elemento.

También se utilizan estructuras de acero para los túneles sumergidos, las cuales se complementan con hormigón (ver sistema estructural 2.3.2.4). El tipo de sistema estructural (material), dependerá de la experiencia regional. Para el caso de módulos de acero, el lastre puede ser el mismo hormigón colocado cuando el elemento se encuentra a flote. El francobordo debería ser mínimo para reducir la cantidad de lastrado permanente y temporal. El peso temporal en el fondo, con los tanques de lastre de agua llenos, debe ser suficiente. Para la condición permanente, debe garantizarse la seguridad contra el levantamiento con el lastre fijo en su lugar [17].

El factor mínimo de seguridad para la condición permanente de los túneles sumergidos a menudo se especifica como 1,10, en función de las siguientes condiciones:

1. Fuerzas de elevación:
  - Flotabilidad por el agua al máximo de densidad esperado y según el desplazamiento teórico.
  - Retraso hidráulico, si corresponde en zonas de oleaje o marea.
2. Cargas estabilizadoras:
  - El peso teórico del acero estructural, el hormigón y el acero de refuerzo (dependiendo del caso), asumiendo una densidad realista del hormigón que no superará la densidad real.
  - El hormigón de lastre fijo permanente, interior o exterior.
  - El peso de las membranas protectoras y del recubrimiento de hormigón.
  - El pavimento de la calzada, losas de calzada suspendidas o el concreto de soporte de vía fija.
3. Los factores que no se consideran estabilizadores son:
  - Sobrecarga de relleno y fricción hacia abajo.
  - El peso de los equipos mecánicos y cielos suspendidos.

<sup>5</sup> En náutica, el francobordo es la distancia medida verticalmente en el centro del elemento, desde la superficie superior de este, hasta la línea de flotación correspondiente. En simples palabras, es la altura libre del elemento sobre la cota de agua.

### 2.3.2.3. Espacio interior

El espacio interior permite estimar la flotabilidad del elemento del túnel, pero además este permite el flujo de transporte en su interior de acuerdo con los requerimientos del proyecto. El requisito de espacio interior depende del espacio libre para el tráfico (es decir, el requisito de espacio mínimo para el tráfico definido por las regulaciones/códigos pertinentes), el espacio para instalaciones interiores como ventiladores y paneles ignífugos, y el espacio adicional para acomodar las tolerancias de construcción del prefabricación e inmersión de elemento túnel.

Una de las ventajas de este tipo de túneles es que la sección transversal del elemento puede adaptarse a diversas formas, de acuerdo como sea requerido, y en combinación de materiales como el acero y el hormigón.



Figura 26: Tipos de sección de túnel sumergido utilizados.

Fuente: ITA WG 11, 1999 [9].

En la mayoría de los casos, la selección de la sección transversal típica está determinada por las preferencias basadas en la experiencia previa exitosa en la región o país específico, así como por las limitaciones del sitio local. En algunos casos, la elección depende de las instalaciones de fabricación disponibles y el costo.

Con la mayor conciencia del diseño de confort y la seguridad de la vida, se presta más atención a la ventilación y las evacuaciones, además de las necesidades básicas mencionadas anteriormente. La Figura 27 muestra tres soluciones de ventilación: la ventilación longitudinal, la ventilación semi-transversal y la ventilación transversal.

La ventilación longitudinal requiere ventiladores que aumenten la altura del túnel, lo que podría dar lugar a una cimentación más profunda y más trabajos de dragado. La ventilación transversal requiere perforaciones especiales y, por lo tanto, aumenta el ancho de la sección transversal, lo que también conduciría a un mayor volumen de dragado. La ventilación semi-transversal está en algún punto intermedio.

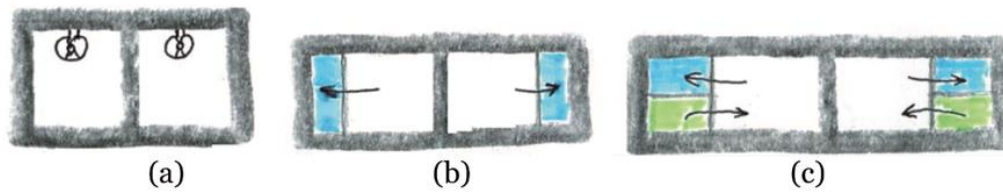


Figura 27: Soluciones de ventilación de túnel sumergido: (a) longitudinal, (b) semi-transversal y (c) transversal.

Fuente: Lin et al, 2019 [16].

#### 2.3.2.4. Sistema estructural

Como lo demuestran los registros, en los EE. UU. se suelen utilizar túneles de acero; en el noroeste Europa, túneles de hormigón; y en Japón, se aplican ambos conceptos.

Por lo general, la estructura de un túnel de acero consta de una placa de acero estructural que actúa de forma compuesta con hormigón. La placa de acero externa proporciona la barrera contra el agua. Los túneles de hormigón estructural son estructuras monolíticas en las que la mayor parte del peso final se incorpora a los componentes estructurales (ver Figura 28).

Para túneles vehiculares más grandes, la configuración habitual implica una o dos celdas principales, cada una con dos o más carriles y bermas. Debido al alto costo, las bermas en los túneles generalmente se mantienen lo más estrechas posible. Es posible que se requieran celdas adicionales para ventilación, salida de emergencia y servicios. Se evita el tráfico bidireccional en los nuevos túneles.

Para todos los túneles, una sección de forma circular es la más eficiente para la carga de presión externa, ya que la sección está en compresión. Por lo tanto, los primeros túneles, como el tipo túnel de acero de doble capa de EE. UU., eran esencialmente circulares (quizás con protección octogonal). Si se utilizan dos tubos circulares, la sección se describe como binocular. Para tubos simples, es preferible una forma circular, evitando las esquinas afiladas.

Hoy en día, la forma que se utiliza con más frecuencia para los túneles de tráfico de hormigón de celdas dobles y multicelulares es la caja rectangular, que puede tener que ensancharse con celdas adicionales para el suministro o escape de aire de ventilación y servicios. La forma de la caja se adapta mejor al espacio interior rectangular requerido para el tráfico de motor, con buena conformidad entre resistencia y peso.

También se ha desarrollado el elemento túnel sumergido tipo caja de estructura sándwich de acero-hormigón-acero. Las redes de acero entre las carcasas están dispuestas para formar celdas cerradas que se llenan individualmente con hormigón, siendo el lastre del elemento. El hormigón no está reforzado y está formulado para ser autocompactante. Las superficies internas de las carcasas de acero están reforzadas con placas y nervaduras en forma de L que también proporcionan la conexión necesaria para la acción compuesta con el hormigón interno. El hormigón interno, una vez curado, soporta cargas de compresión y también sirve para endurecer las cáscaras de acero. El hormigón no requiere de vibraciones.

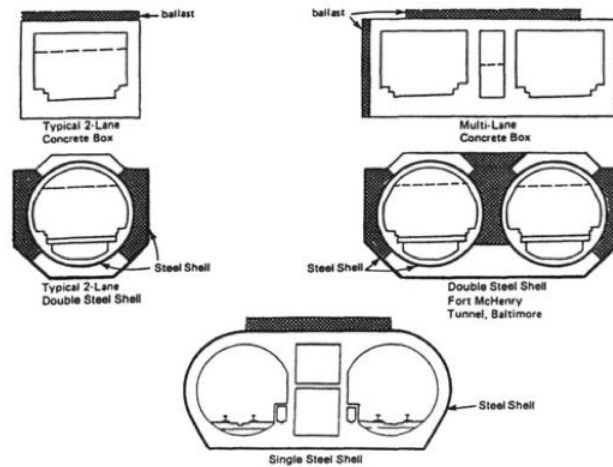


Figura 28: Sistemas estructurales típicos.

Fuente: Saveur & Grantz, 1997 [17].

### 2.3.3. Diseño Longitudinal

El diseño longitudinal debe satisfacer los siguientes aspectos: longitud del módulo y configuración de las juntas.

#### 2.3.3.1. Longitud del módulo

La longitud de los elementos del túnel determina el número de elementos de éste, dada la longitud fija total. Por un lado, el elemento de túnel más largo reduce el número total de módulos y, por tanto, reduce el número total de juntas de inmersión. Además, menos elementos de túnel significan menos tiempos de las obras de inmersión y, por lo tanto, menos riesgos de construcción. Por otro lado, cuanto más corto es el elemento del túnel, menor es el costo total de prefabricación, ya que se necesita menos área de tierra cerca del agua para la prefabricación de elementos del túnel, y menos sensible es la estructura del elemento del túnel al problema del asentamiento diferencial, de ahí el menor costo del sistema de pretensado. Lo anterior muestra que el diseño de la longitud del elemento es una cuestión de mantener un equilibrio y encontrar el óptimo [16].

Respecto a esto último, para evitar grietas importantes en elementos de hormigón, la tensión de tracción de trabajo longitudinal no debe exceder la resistencia a la tracción del material. Normalmente, este requisito puede satisfacerse en el diseño de túneles de concreto. Si es necesario, una tasa bastante pequeña de pretensado longitudinal puede aumentar sustancialmente el rango de carga permisible que causa esfuerzos de tracción, un procedimiento que se ha adoptado para varios túneles [17].

Cuando se coloca un túnel sobre terreno blando o aparecen capas compresibles, por debajo aparece una expansión en el fondo después de haber terminado el dragado de la trinchera dentro de la cual ha de colocarse el túnel. El empuje del fondo en estas condiciones se atenúa parcialmente, puesto que el túnel pesa menos que la parte original de tierras excavadas. Sin embargo, los asentamientos diferenciales permanecen casi siempre pequeños, sin que sea necesario de otros requerimientos para las normas de ejecución que el de rellenarlas en las inmediaciones del túnel uniformemente en todas las partes.

La experiencia obtenida en numerosos túneles confirma esta aseveración. Existen, naturalmente, excepciones, pues puede ocurrir que los asentamientos diferenciales esperados sean tan grandes que tengan que utilizarse métodos diferentes para mantener los cimientos dentro de ciertos límites como, por ejemplo, el empleo de pilotes para cimientos. Esta evaluación depende, no solamente de la extensión esperada del asiento diferencial, sino de la relación en que con ello se halla la rigidez del túnel en su dirección longitudinal [8].

### 2.3.3.2. Configuración de las juntas

Los túneles sumergidos deben ser absolutamente estancos. Los estándares de tasas de fuga aceptables que se exigen para túneles perforados no tienen ningún significado para túneles sumergidos. Para cumplir con esto, la construcción debe ser precisa y tomando las medidas adecuadas para el caso.

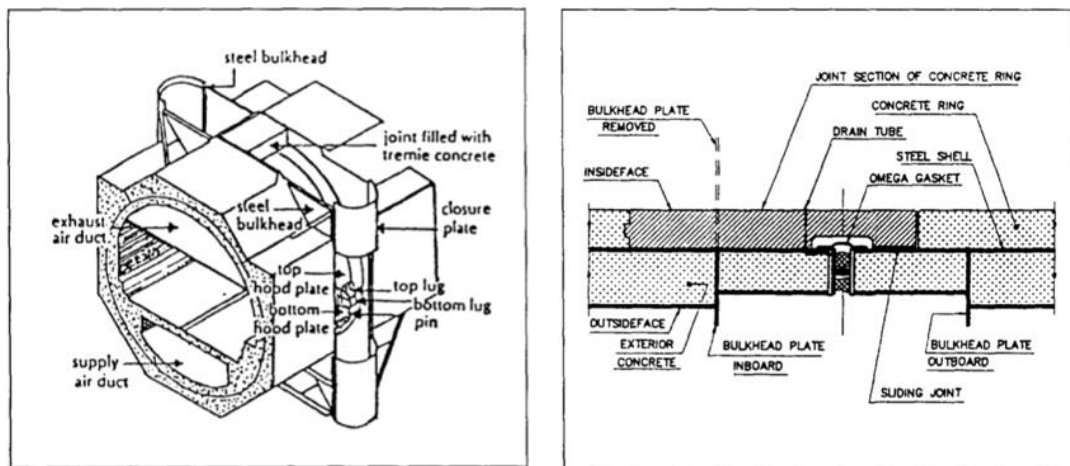
Los túneles de carcasa de acero se consiguen herméticos en virtud de la calidad de las muchas soldaduras de la carcasa realizadas en el patio de fabricación, de la calidad de las juntas in situ y la calidad de las juntas flexibles en caso de utilizarse. La estanqueidad de los túneles de hormigón depende de la calidad de las juntas (tanto de construcción como in-situ), de la ausencia de fisuras de profundidad en el hormigón y de la calidad de la impermeabilización, si se utiliza. Muchos túneles de hormigón están provistos de membranas envolventes impermeables. Además de proporcionar impermeabilidad, estas membranas a veces son necesarias para proteger el hormigón estructural contra agentes químicos agresivos.

Resulta relevante notar la importancia de las juntas de inmersión (in-situ), que deben garantizar el sellado del agua en el período de servicio del túnel teniendo en cuenta todos los escenarios desfavorables, como terremotos, asentamientos diferenciales y accidentes como barcos hundidos, además de que deben proporcionar una forma de conexión del elemento del túnel para la construcción.

Uno de los objetivos es que los túneles sumergidos tengan pocas juntas in-situ. En cuanto a la impermeabilidad, esta es una gran ventaja sobre la mayoría de los túneles excavados. Tratándose de un método constructivo que se apoya en la prefabricación de elementos, las juntas requieren especial cuidado.

Para túneles de acero, la junta de inmersión se realiza a menudo mediante un ajuste tipo bayoneta de los extremos de contacto de las carcasas interiores, que se solapan con placas soldadas a ellas en el interior. La estanqueidad temporal se consigue con el uso de hormigón (instalado mediante un tremie) entre el tubo y una ataguía formada por mamparos terminales y placas de cierre laterales (Figura 29.a) [17].

Los túneles de hormigón pueden permanecer permanentemente flexibles utilizando juntas de compresión de goma, y/o hacerse rígidas, uniendo los elementos entre sí por medio de barras pretensadas y llenando el sello de inmersión temporal con concreto. Se debe procurar rellenar las juntas con un material de la misma resistencia que los propios elementos (Figura 29.b).



(a) Junta solapada con hormigón tremie para un túnel de doble capa acero.

(b) Junta de goma con arreglo deslizando para un túnel de doble capa acero.

Figura 29: Juntas típicas para elementos de acero y/o hormigón.

Fuente: Saveur & Grantz, 1997 [17].

No obstante, los túneles de hormigón usualmente son provistos de juntas flexibles permanentes para reducir la restricción a la contracción de la temperatura y reducir la flexión. El tipo de juntas de caucho sólido que se utilizan generalmente entre las unidades de inmersión de hormigón normalmente puede proporcionar suficiente flexibilidad para este propósito sin perder su capacidad de sellado. Estas juntas de goma solo transfieren la compresión de manera efectiva. Para evitar la deformación por corte en una junta intermedia, que es deseable para la alineación y el rendimiento del sellado, se requieren remaches de corte (ver Figura 30.a).

En la mayoría de los túneles de hormigón se utiliza un tipo de junta de caucho sólido denominada junta "Gina". Se utiliza como sello temporal en la etapa de instalación y permanece como sello de compresión flexible para la etapa permanente. Las caras de los elementos del túnel están revestidas con placas de acero que se combinan como planos paralelos. La junta está sujeta por su parte trasera. Las especificaciones para las características del material y la geometría generalmente se basan en el requisito de sellado permanente incluso bajo la descompresión y relajación de la junta esperada a largo plazo. No obstante, entre dos elementos contiguos se instala una segunda barrera de caucho flexible en el espacio entre elementos (previamente drenado) atornillándola a las caras interiores de los dos elementos del túnel. La junta de goma curvada, tipo losa, a menudo denominada sello "Omega" debido a su forma, a veces se considera el sello principal. El espacio entre la junta de Gina y el sello Omega generalmente se drena hacia el interior del túnel, lo que proporciona una indicación directa del rendimiento de la junta exterior. Este tipo de junta también se puede utilizar para túneles de acero, cuando se requieren juntas flexibles.

La junta tipo Gina actúa como junta flexible bajo compresión y prácticamente puede considerarse como una bisagra en la transferencia de momento longitudinal. La deformación cortante a través de una junta está limitada por la deformación cortante permisible de la junta Omega, especialmente con respecto a sus secciones de esquina. La junta de goma exterior debe colocarse lo más posible hacia el exterior de la estructura, para mantener el hueco entre el lado y el exterior de la junta poco profundo. Esta disposición evita que el material de relleno se acumule gradualmente y obstruya el movimiento adecuado de la junta.



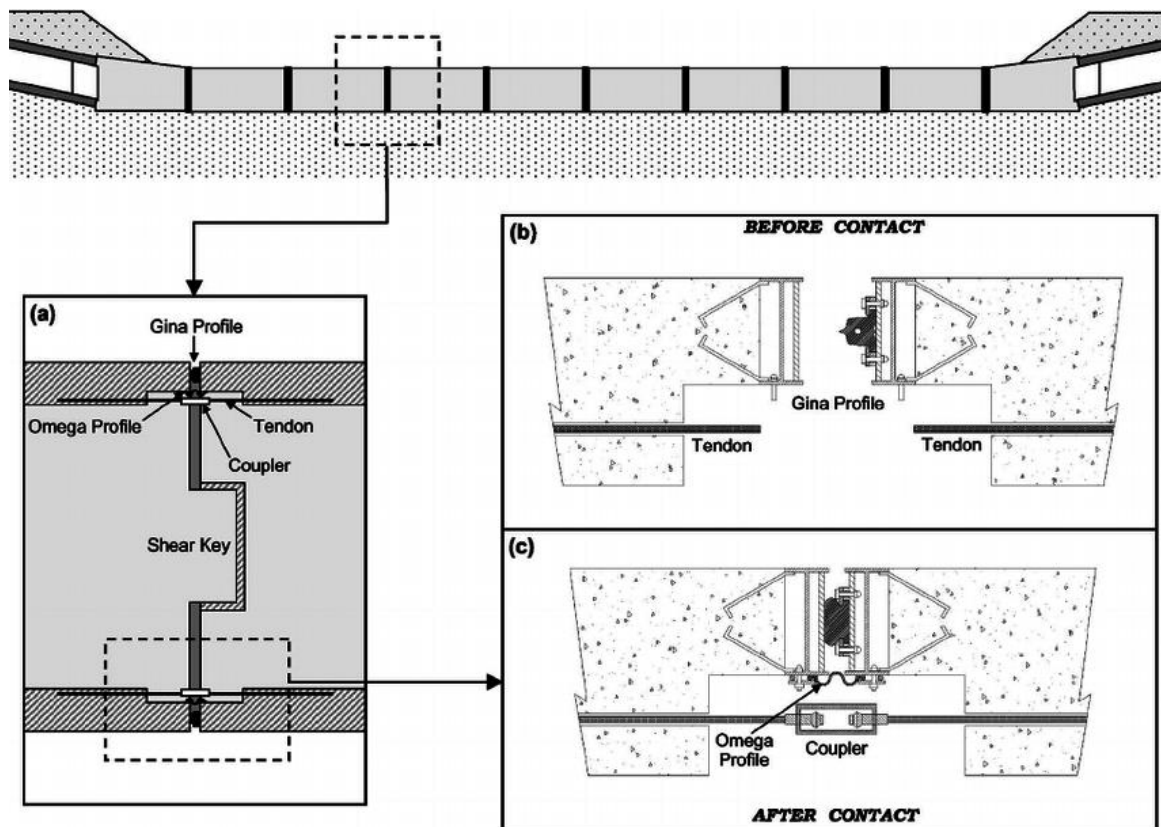


Figura 30: Junta entre módulo de hormigón típica. (a) Remache de corte. (b) Junta Gina. (c) Junta Omega.  
Fuente: Saveur & Grantz, 1997 [17].

Todas las juntas deben estar empaquetadas y bien cerradas, y todas contienen algún tipo de sello. Hay varias formas de realizar la unión final después de instalar el último elemento. La junta final no se puede hacer con la junta de compresión de goma intermedia que se utiliza en las juntas regulares, pues no habrá presión hidrostática desde el lado de cierre. El buzo coloca cuñas o espaciadores entre las caras opuestas del túnel para mantener la separación durante el drenaje. Éstas se posicionan para permanecer dentro del futuro recinto hermético temporal y mantendrán la compresión longitudinal. La junta se puede hacer monolítica o con transferencia de cizallamiento al hormigón en un lado de la junta y con una banda de PVC flexible en el otro lado.



Figura 31: Foto de la junta de inmersión de elemento de túnel en proyecto HZMB Island-tunnel, China. Cuenta con goma de junta Gina y barras para su conexión rígida. Cara del elemento sellada para su inmersión.

Fuente: Lin et al, 2019 [16].

Las juntas flexibles han respondido bien ante sismos de magnitudes leves en las zonas que no se caracterizan por ser sísmicas. Sin embargo, en dos proyectos situados en zonas sísmicas se ha tenido especial cuidado por el diseño de sus juntas flexibles, para responder bien ante terremotos en dirección longitudinal y transversal.

En Estados Unidos se desarrolló, para el túnel BART Transbay en San Francisco, una junta sísmica para permitir desplazamientos triaxiales de  $\pm 8$  cm en la dirección longitudinal y  $\pm 15$  cm en cualquier dirección en un plano vertical, manteniendo el túnel estanco. Los movimientos verticales y horizontales (transversales) se permiten por juntas de goma precomprimidas que se deslizan sobre superficie de apoyo radiales de teflón. El movimiento longitudinal lo toman juntas similares que se deslizan sobre una superficie de apoyo circunferencial de teflón. Estas respondieron bien durante el terremoto de 1989 en San Francisco [18].

En Turquía, para el túnel Marmaray en Estambul, se utilizó una junta sísmica para la conexión del túnel sumergido a tierra con un túnel perforado con TBM, dada el alto nivel de sismicidad de la región. La junta sísmica se compone principalmente de vigas principales conectadas al módulo, una junta de goma soportada sobre las vigas y una placa de revestimiento. La placa de revestimiento evita que la lechada de relleno toque la junta, lo que permite que la junta permanezca flexible. La seguridad estructural y la solidez funcional del túnel finalmente se ha confirmado durante y después de los eventos sísmicos en la ciudad [19].

#### 2.3.4. Espacio de Fabricación [15]

Una de las cuestiones del diseño es el espacio de fabricación de los módulos de túnel. La ubicación de este puede depender de las facultades que permita el proyecto. Una correcta ubicación para este espacio permite una mejor estrategia posterior para el traslado de los elementos terminados hacia su disposición, lo que se expresa en un ahorro de tiempo y menor costo.

La mayoría de los elementos de los túneles de hormigón están prefabricados dentro de diques secos especialmente contruidos a un costado de la zona a transportar los elementos. A veces, la ataguía de la estructura de la rampa de acceso (portal de entrada al túnel) se utiliza primero como cuenca para la fabricación de los elementos del túnel. El hormigón estructural suele estar completo antes del lanzamiento, y para la inmersión se utilizan tanques se agua en su interior.

Los elementos del túnel de acero a menudo se fabrican en un barco astillero. Después de que se lanza el elemento, el hormigón estructural de lastre se instala mientras el elemento está flotando para permitir su inmersión hacia su ubicación final. También se han fabricado y hormigonado parcialmente túneles de acero en diques secos.

Después del lanzamiento, los elementos completados flotan hasta su destino y se sumergen hasta la trinchera.

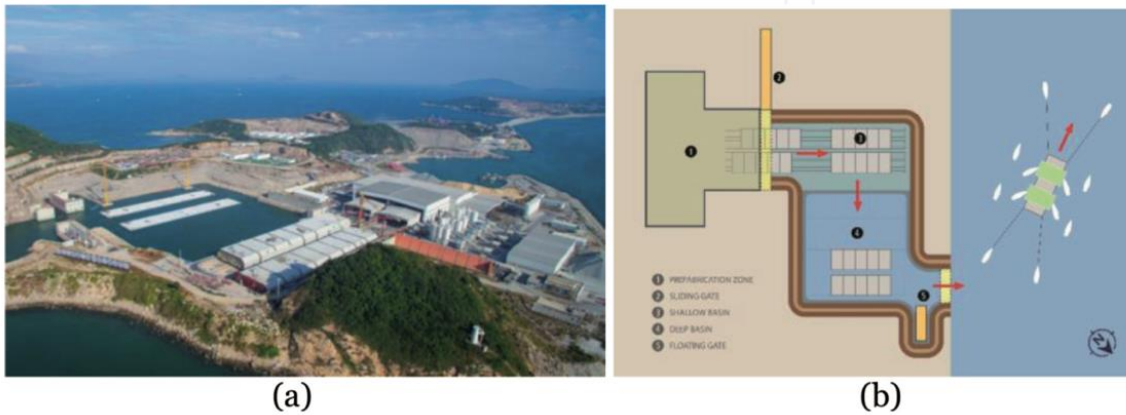


Figura 32: Fábrica de prefabricación de elemento túnel sumergido. (a) Fotografía del proyecto del túnel de la isla HZMB y (b) diseño del plano.

Fuente: Lin et al, 2019 [16].

Resulta de suma importancia establecer un espacio estratégico para la instalación del dique seco para la fabricación de los elementos. En algunas ocasiones, como se indicó antes, se puede colocar justamente donde se construirá el portal de entrada al túnel. En otras, puede ubicarse un poco más alejado de la entrada, como en la presentada en la Figura 32, o incluso ejecutarse estos trabajos en zonas lejanas a la fuente acuática. Estos últimos casos suelen ser menores debido a los costos y mayores tiempos del transporte por vías acuáticas de los elementos.

### 2.3.5. Construcción [9]

El objetivo durante la fase de construcción es principalmente asegurar que la estructura se construya según lo diseñado y que no ocurra una carga excesiva. A lo largo de este proceso se realizan ciertas pruebas a la par, tales como pruebas de presión de juntas, peso de los elementos individuales, control de la estanqueidad.

#### 2.3.5.1. Fabricación del elemento

Tal como se indica previamente, los elementos son fabricados fuera del agua, generalmente en diques secos construidos para el proyecto. Estos diques suelen construirse en un borde de la fuente acuática, dentro de esta, y son limitados mediante ataguías y bombeados del agua que hay en su interior.

Los elementos se construyen como cualquier estructura, dependiendo de su sistema estructural principal. En caso de módulos de hormigón armado, se construyen mediante el uso de moldajes. No se pueden permitir grietas ni fallas en la vibración del elemento, puesto que puede provocar filtraciones de agua una vez dentro de ésta, lo que está completamente prohibido.

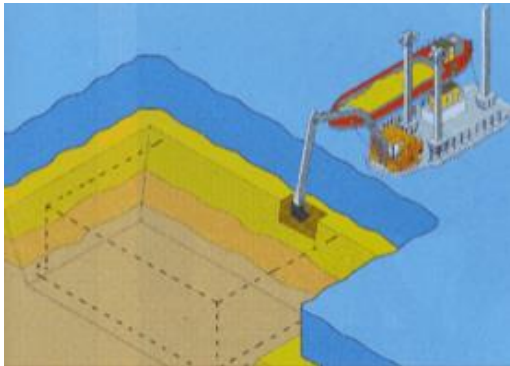


Figura 33: Etapa de construcción - Fabricación de módulos. Túnel Busan-Geoje, Corea.

Fuente: [Revista Vial](#), 2013.

### 2.3.5.2. Dragado

El dragado es la operación de excavación bajo el agua, donde se realiza la limpieza o remoción del lecho marino, consistente principalmente de rocas y sedimentos sueltos, formando una trinchera coherente con la alineación definida para el túnel. El ancho de la trinchera depende del tamaño de la sección del elemento y la altura de ésta depende de que tan cubierto por la trinchera queda el módulo. La draga puede ser del tipo excavadora o también del tipo rozadora con succión del material removido, dependiendo de la dureza del material.



(a) Esquema de dragado



(b) Foto de proceso de dragado. Puerto Manta, Ecuador.

Figura 34: Etapa de construcción - Dragado.

Fuente: (a) ITA WG 11, 1999 [9]. (b) [Mundo Marítimo](#), 2018.

Una vez dragado el terreno, se puede mejorar el suelo mediante un grouting de compactación para que tenga mayor capacidad de soporte o incluso, en casos extremos, la utilización de cimientos en ciertas zonas, aunque no suele ser necesario. También se puede colocar una capa de material de relleno y compactarla para estabilizar la trinchera.

### 2.3.5.3. Flotación y traslado

Luego de la construcción de los elementos, los diques secos se inundan para permitir el flote de estos módulos mediante la ayuda de barcazas. Para una mejor flotabilidad, se suelen utilizar pontones, que es un tipo de embarcación o casco usado como plataforma flotante, una vez que se sacan a flote fuera del dique.



Estos son trasladados sobre su ubicación final, con un cierto desplazamiento respecto a su posición en el fondo considerando todos los movimientos que pueden afectar al elemento al bajar, principalmente debido al accionar del mar.

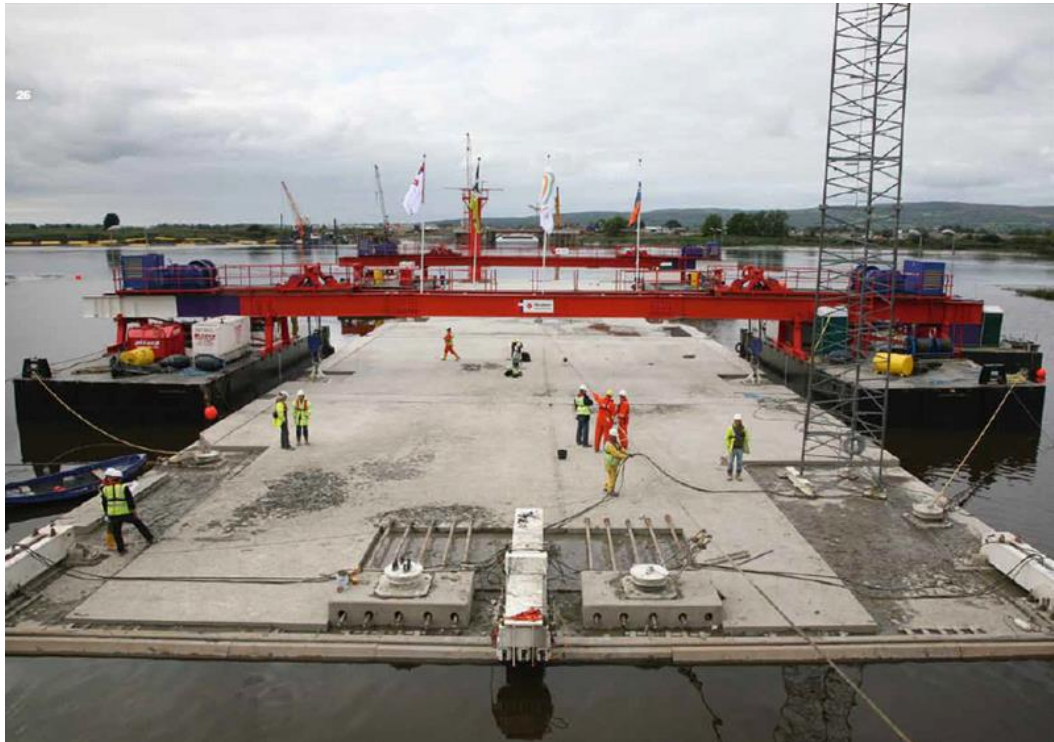


Figura 35: Etapa de construcción: Flotación y traslado de módulos. Túnel Limerick, Irlanda.

Fuente: [Revista Vial](#), 2013.

#### 2.3.5.4. Disposición del elemento

El elemento es descendido a su posición final en el fondo de la trinchera dragada, tal como se aprecia en la Figura 36, mediante la ayuda de grúas guías o elevadores marinos, montadas en los pontones. Para la inmersión se añade peso al interior del elemento mediante tanques de agua u hormigón, dependiendo del caso.

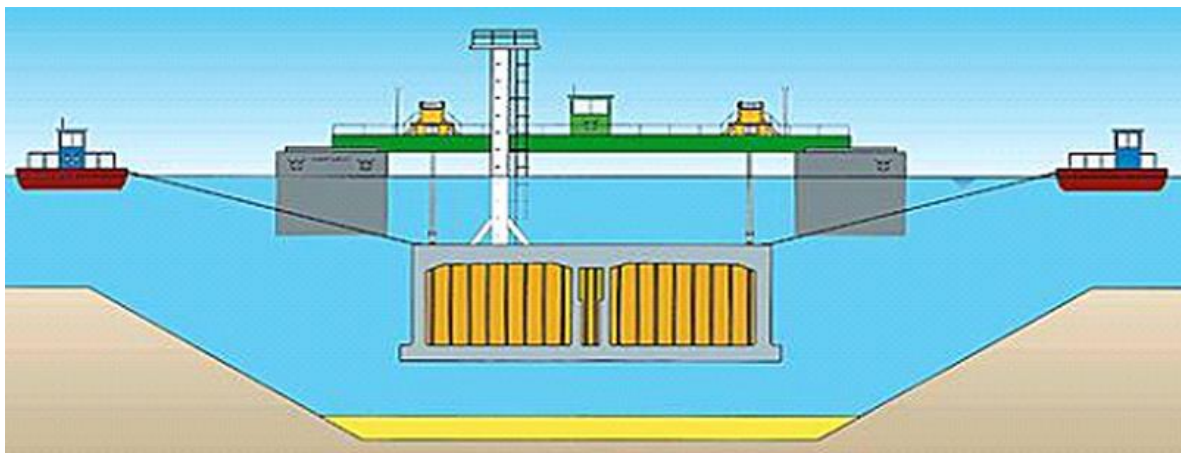
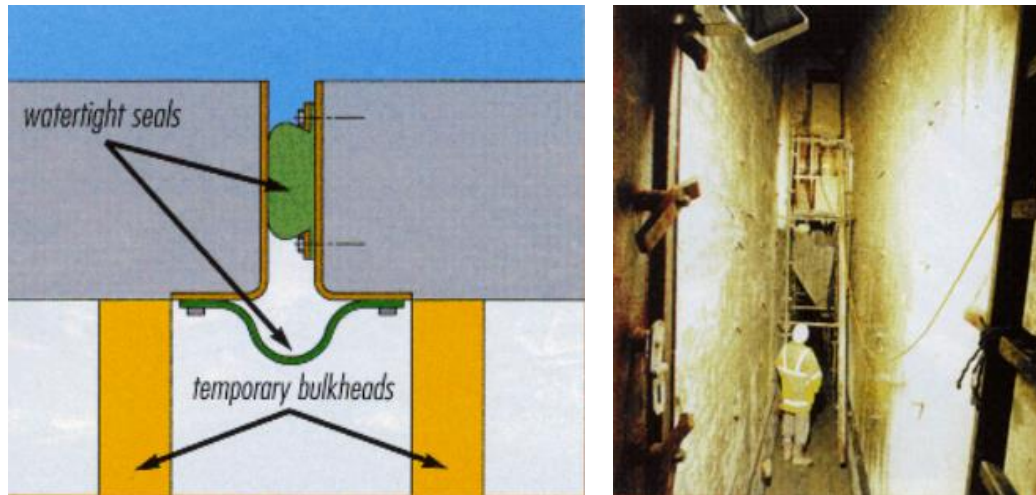


Figura 36: Etapa de construcción - Disposición del módulo.

Fuente: ITA WG 11, 1999 [9].

El nuevo elemento es posicionado contra el elemento previo, bajo el agua. Una vez que se juntan ambos elementos se bombea el agua que hay entre estos, por lo que el agua que se ubica desde el otro lado del elemento nuevo ejerce una presión contra el elemento antiguo, sellando completamente la junta entre ambos, impermeabilizando la zona entre elementos, y haciéndolo como un elemento continuo. Tal como se indica anteriormente, a veces se sellan las juntas con hormigón.



(a) Junta de goma.

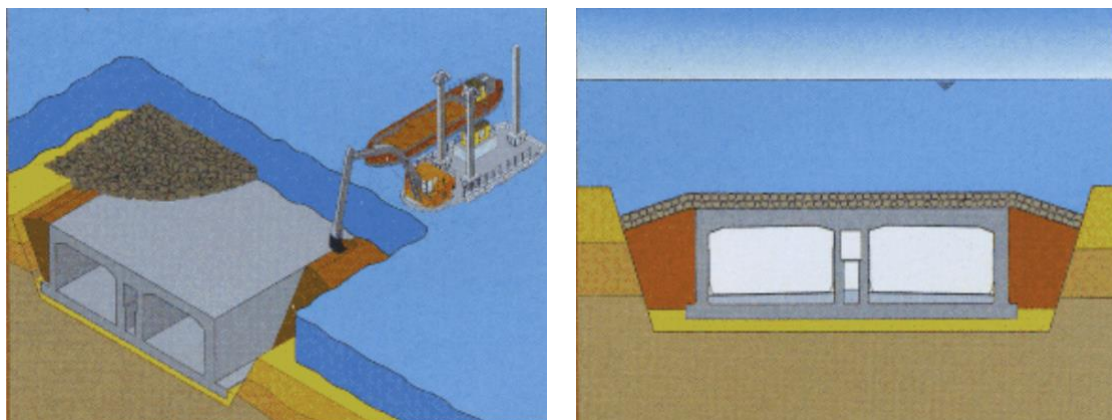
(b) Espacio entre módulos bombeado.

Figura 37: Junta de inmersión entre módulos de hormigón.

Fuente: ITA WG 11, 1999 [9].

### 2.3.5.5. Relleno

Una vez que se instalan los elementos, se va llenando con material de relleno a los costados de la trinchera, generalmente un relleno de gravas y arenas, y se cubre arriba del túnel con otro tipo de relleno, generalmente piedras o gravas cementadas, enterrando permanentemente el túnel.



(a) Esquema de relleno y cobertura.

(b) Esquema de módulo terminado.

Figura 38: Proceso de construcción - Relleno.

Fuente: ITA WG 11, 1999 [9].

Los portales de entrada al túnel pueden construirse antes, durante o después de la construcción del túnel, dependiendo de las circunstancias locales.

Una vez que se va completando el túnel (o cuando se termina en su totalidad, dependiendo de las condiciones de construcción), se retiran las cabeceras de los elementos, que cubren estos para que no les entre agua, y se realizan todas las instalaciones interiores correspondientes como cualquier túnel, para su operación.

Una de las inquietudes principales respecto a los túneles sumergidos es su capacidad sísmica, sin embargo, se ha demostrado, tanto teórica como empíricamente, que es perfectamente factible realizar túneles sumergidos en zonas sísmicas. Egeli [20] realizó un análisis dinámico del túnel sumergido en la bahía de Esmirna (Turquía), considerando los escenarios de dos terremotos: Utah Wells (2008) de magnitud 6 ML (escala de Richter) y provocado por falla normal; Costa de California (2005) de magnitud 7,2 ML y provocado por falla de cizalle. De este análisis obtuvo las siguientes conclusiones:

1. Las unidades de túneles y los suelos circundantes dentro de la zanja dragada actúan juntos para proporcionar una mejor respuesta al terremoto con un efecto amortiguador de la fuerza del terremoto.
2. Las unidades de túnel no flotan hacia la superficie del mar, sino que continúan permaneciendo dentro de la zanja dragada y aplican tensiones positivas a los cimientos durante los terremotos de diseño. Como no hay flotación, no hay necesidad de anclar el túnel al fondo de la zanja.
3. Las unidades de túnel y las juntas de inmersión (fabricadas con un material elastómero fuerte especificado) continuaron comprimidas longitudinalmente y proporcionaron un excelente nivel de estanqueidad.
4. No hubo deformaciones del suelo de riesgo (no tolerables) durante y después de los terremotos de diseño. Los desplazamientos verticales y diferenciales totales de las unidades del túnel y en los suelos circundantes estaban todos en niveles aceptables.
5. También se encontró que eran permisibles los anchos de grietas en la superficie del concreto que ocurren en las unidades del túnel, durante el inicio de los terremotos de diseño.

En base a lo expresado, se puede realizar un comparativo de ventajas y desventajas de este tipo de estructuras. Las ventajas de los túneles sumergidos son las siguientes:

- Son muy rentables para anchos grandes que tienen muchos carriles de transporte.
- Pueden aplicarse a suelos pobres del fondo marino, solo después de realizar una mejora adecuada del suelo.
- No genera molestias en la navegación ni durante ni después de la construcción.

Por el contrario, las desventajas de los túneles sumergidos son las siguientes:

- No se han utilizado túneles con profundidad de agua mayor a 60 m (túnel Marmaray en Estambul, Turquía), aunque se han planteado túneles de hasta 100 m de profundidad.

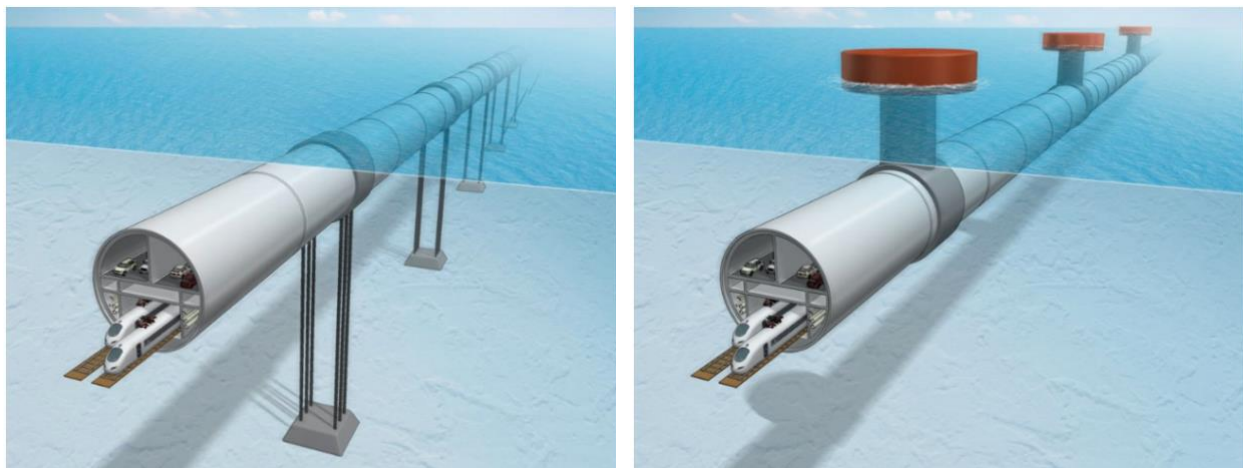
- Requieren una alineación recta o casi recta para permitir que las unidades de hormigón y las juntas de inmersión permanezcan en compresión longitudinal durante y después de los terremotos, para proporcionar una estanqueidad continua.
- No deben flotar durante la operación y sus cimientos no deben tener estados tensionales.
- Ante longitudes muy grandes se requieren pozos de ventilación intermedios que salgan a la superficie, lo que es costoso y obstaculiza el tráfico marítimo.

## 2.4. Diseño y construcción de túnel flotante

El túnel flotante o SFT (en inglés submerged floating tunnel) es una propuesta de túnel que hace el símil a un puente bajo el agua. Este túnel, al igual que el túnel sumergido, se construiría mediante elementos prefabricados, pero en lugar de apoyarse sobre el lecho marino, este se ubicaría a través del agua, flotando por ayuda de pontones flotantes o anclajes al fondo marino. Esta estructura permitiría la conexión entre dos terrenos sin el problema de la profundidad, acortando mucho más el túnel de lo que sería un túnel perforado o sumergido.

Se propuso hace un siglo, pero nunca se ha realizado debido a varias razones, como el temor a una invasión, problemas de pesca o colisión de barcos, además del temor propio de la inexperiencia. Por lo tanto, para realizar el túnel flotante se debe prestar atención a la seguridad, siendo este el aspecto más crítico del túnel. La seguridad está en conexión directa con la forma estructural y el entorno del túnel. La forma estructural puede diseñarse y desarrollarse según la voluntad del ingeniero y, por lo tanto, es el hilo conductor principal de la investigación del SFT [21]. A partir del diseño estructural se estudia el comportamiento del túnel, y se evalúa que tan seguro es.

Generalmente, la sección transversal del túnel se diseña de modo que la flotabilidad cubra el peso estructural, y luego el túnel se somete a una fuerza ascendente de empuje ejercida por el fluido. Con base en el soporte vertical, las alternativas de diseño actuales para el túnel flotante se pueden dividir en dos categorías: un concepto estabilizado con amarre (Figura 39.a), donde se ancla la estructura, que tiende a flotar, a través de cables al lecho marino; y un concepto estabilizado con pontón (Figura 39.b), que sostiene la estructura, que tiende a hundirse, con la ayuda de pontones.



(a) Túnel amarrado con anclajes.

(b) Túnel sostenido con pontón.

Figura 39: Alternativas de diseño actuales.

Fuente: Won et al, 2019 [22].



En base a la propuesta general de diseño y construcción, se pueden identificar algunas ventajas del túnel flotante [21]:

1. La pendiente longitudinal y la longitud total de SFT son mucho más cortas que las de los túneles sumergidos y subterráneos.
2. Tiene poca influencia en el medio ambiente circundante y rara vez destruye los paisajes locales.
3. El costo del SFT por unidad de longitud tiene poco que ver con su longitud total, por lo que tiene más ventajas económicas que el túnel o puente tradicional.
4. Es conveniente para instalar tuberías municipales de agua, electricidad y comunicaciones a través de estrechos, lagos y ríos dentro del túnel.

Para comprender los vínculos entre la estructura de túnel flotante y su riesgo, se requiere discretizar la forma estructural del túnel flotante en elementos y subelementos. Al cambiar un parámetro del elemento o subelemento, se puede observar cómo el cambio afecta el comportamiento estructural o la seguridad del túnel.

Lin et al. [16], muestran en la Figura 40 su comprensión de la relación entre estructura y seguridad. Esta figura puede (o debe) ampliarse aún más para cubrir la imagen completa de la comprensión de SFT antes de hacer uno real.

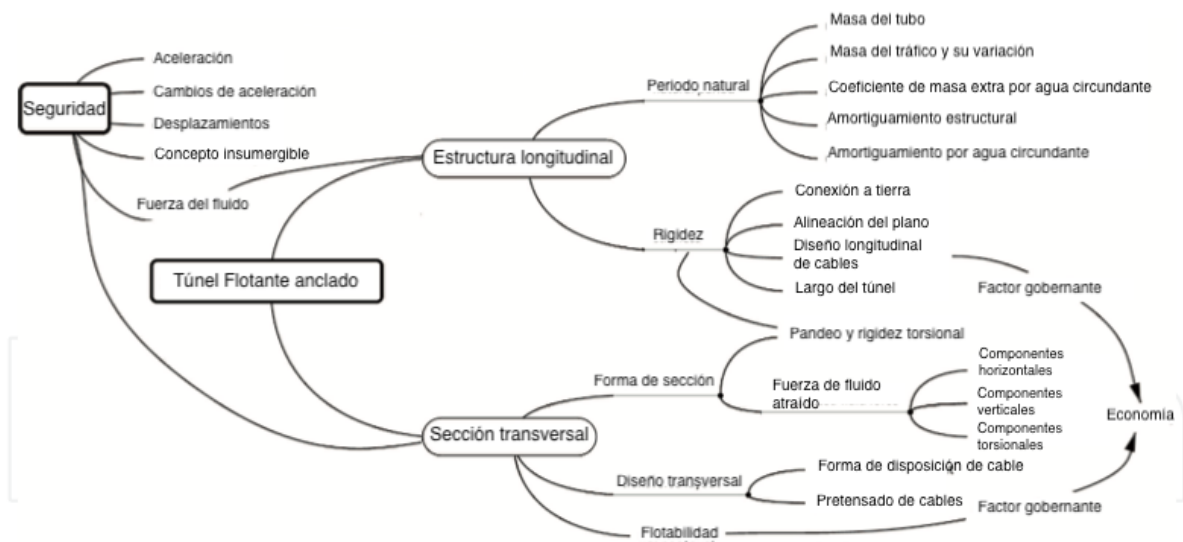


Figura 40: Discretización de relación entre elemento estructural y seguridad.

Fuente: Lin et al, 2019 [16].

Estas características del túnel flotante se relacionan unas con otras, y estas relaciones son estimables a través de modelos matemáticos. De esta forma, diversos autores se han dedicado a estudiar el comportamiento de los túneles flotantes en base a distintas configuraciones de este y ante el accionar de diversos tipos de estímulos. En este subcapítulo se revisarán algunos de los estudios.

#### 2.4.1. Cargas a identificar para el diseño [21]

Xiang & Yang (2016) indican en su estudio algunas de las cargas necesarias no-convencionales a identificar para el correcto diseño de los túneles flotantes, y el estado del arte de la investigación de estas. La estabilidad del túnel flotante depende del equilibrio entre carga muerta, carga móvil, flotabilidad y fuerza de anclaje. Además de las cargas convencionales, el túnel flotante también está sujeto a cargas ambientales, como la acción del oleaje y la corriente, que juega un papel importante en el diseño, construcción y durabilidad de la estructura. A continuación se presentan algunos de los aspectos críticos y desafíos que han promovido el estudio de estas cargas sobre la estructura:

1. La acción de las olas y la corriente que ejercen sobre el túnel produce vibraciones de acoplamiento fluido-sólido sobre la estructura o los componentes. El comportamiento y el mecanismo del túnel flotante son muy complejos bajo tales acciones. Son los puntos clave y las dificultades para el análisis de estructuras.
2. Debido a que el SFT permanece en el ambiente marino corrosivo, los materiales de los cables de anclaje y del tubo (estructura tubular que corresponde al cuerpo del túnel) son de fácil deterioro. Además, los cables de anclaje son vulnerables al daño por fatiga bajo cargas dinámicas, lo cual es una amenaza para toda la estructura. Por lo tanto, es necesario estudiar la durabilidad y el mecanismo de falla de resistencia-fatiga del túnel flotante y proponer las estrategias de solución correspondientes.
3. El tubo generalmente se sumerge a una profundidad de 20 - 30 m bajo el agua, por lo que pueden ocurrir accidentes de colisión o ataques terroristas durante su funcionamiento. Por lo tanto, resulta crítico para garantizar la seguridad operativa del SFT, evaluar el grado de seguridad requerido del SFT, reducir o evitar el riesgo de accidentes y tomar medidas razonables de escape y rescate tan pronto como sea posible después de los accidentes.
4. Sigue siendo un desafío construir cimientos en aguas de 50 - 200 m de profundidad con complejas condiciones geológicas marinas. Presentar métodos de construcción efectivos sobre la base de la tecnología de construcción existente es fundamental para la seguridad y las ventajas económicas del túnel flotante.
5. Existen muchos riesgos y factores inciertos durante la construcción y operación. Cómo reconocer y controlar estos riesgos e incertidumbres, incluido el riesgo de inversión, riesgo de diseño, riesgo de construcción, desastres naturales, eventos extremos, riesgo de gestión de operaciones, etc., tiene un importante significado teórico y de ingeniería.

A continuación se indican las principales cargas, no estabilizadoras, que se han estudiado para explorar el comportamiento y seguridad del túnel flotante:

##### 2.4.1.1. Fuerza de oleaje

En el presente, la ecuación de Morison es la principal ecuación utilizada para el cálculo de la fuerza del fluido sobre el túnel flotante. Algunas de las conclusiones que se pueden obtener de los autores son: la fuerza es, en gran parte, inercial; las propiedades del túnel flotante también tienen efectos sobre la fuerza de onda del oleaje; se debe prestar atención al efecto de la corriente de onda; se deben prestar atención al cambio en la fuerza de oleaje según la profundidad. Xiang &

Yang (2011), con el fin de considerar esto último en combinación con la ecuación de Morison, propusieron un método de integración por capas para calcular la fuerza de las olas horizontal y vertical. El esquema de cálculo se muestra en la Figura 41.

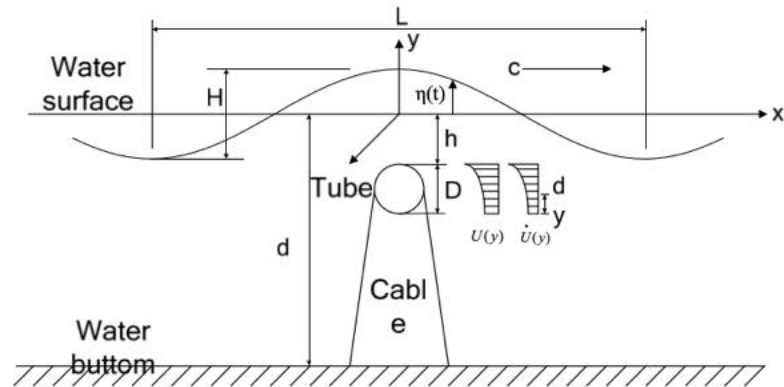


Figura 41: Cálculo de fuerza de oleaje por método de integración por capas.

Fuente: Xiang & Yang, 2016 [21].

#### 2.4.1.2. Vibración inducida por vórtice

En base a los diversos autores se han obtenido algunas conclusiones: la vibración inducida por vórtice (VIV) (ver Anexo D) se producirá en el tubo y los cables de anclaje por la acción del vórtice; cuando la frecuencia del vórtice está cerca de la frecuencia natural de la estructura o los componentes, la amplitud de la vibración aumentará bruscamente debido a la resonancia excitada por el vórtice; como principales componentes de soporte, la estabilidad de los cables de anclaje en está directamente relacionada con la seguridad del túnel.

Xiang & Yang (2012) dedujeron las ecuaciones diferenciales de movimiento del sistema de anclaje cable-tubo de acoplamiento para analizar la característica de vibración no-lineal en cinco casos de trabajo típicos y diferentes parámetros, de acuerdo con el principio de Hamilton y la ecuación de Morison. Los resultados mostraron que:

- La vibración de acoplamiento entre el cable y el tubo es obvia.
- La perturbación inicial del tubo tiene una gran influencia en la amplitud instantánea de los cables de anclaje.
- La vibración inducida por el vórtice de los cables de anclaje puede estimular la vibración paramétrica del sistema.
- La amplitud estable del sistema depende del tamaño de la fuerza excitada por el vórtice.
- El ángulo de inclinación razonable de los cables de anclaje está entre 45°~60°.

Generalmente, existen tres tipos de métodos para evitar VIV de los cables de anclaje:

1. Elegir parámetros de estructura razonables.
2. Instalación de dispositivos de amortiguación.
3. Usando un dispositivo de perturbación de flujo adicional.

### 2.4.1.3. Análisis de situación accidental

Durante la operación del túnel flotante, se producen diversas situaciones accidentales, como terremotos, colisiones provocadas por embarcaciones, pesca de arrastre y vehículos, incluso atentados terroristas. Aunque la probabilidad de que ocurra un accidente es baja, la consecuencia es muy grave. En la actualidad, el estudio de situaciones accidentales se centra principalmente en el terremoto, donde se han desarrollado diversos programas para simular la interacción fluido-estructura y suelo-estructura, y métodos para la obtención de espectros de respuesta.

Fogazzi (2000) y Di Pilato (2008) desarrollaron un programa para simular la interacción fluido-estructura y la interacción suelo-estructura, y desarrollaron un elemento de cable de gran deformación para estudiar el efecto sísmico de múltiples soportes de SFT. Xiao et al. (2010) utilizaron el método de elementos finitos para estudiar la respuesta sísmica transversal del tubo con diferentes condiciones de contorno de los revestimientos, incluido el soporte simple, fijo y elástico. Jianyun et al. (2007) estudiaron la influencia de las propiedades geológicas del fondo marino en la presión dinámica del agua (onda P) del SFT con cables rígidos. Shengnan (2008) estudió la interacción entre el tubo y el fluido bajo excitación sísmica e hizo la primera prueba experimental para estudiar la respuesta sísmica de SFT.

Chunfeng & Xiang (2013) derivaron las ecuaciones de cálculo y las condiciones de contorno del túnel flotante bajo la acción de la onda P con la ayuda de la teoría de la ecuación de onda. En su trabajo, se asume que:

- 1) El desplazamiento rígido único tiene lugar en el plano vertical del SFT, sin deformación elástica.
- 2) Solo se considera el efecto dinámico causado por el agua de mar y la masa del tubo.
- 3) También se considera la influencia del agua de mar hacia arriba y hacia abajo del túnel, la rigidez del cable de anclaje y la distancia entre el cable de anclaje.

En la actualidad, existen muy pocas investigaciones sobre la respuesta dinámica de la SFT bajo cargas de impacto. Con el método de masa equivalente, Lei (2008) obtuvo desplazamientos locales y deformaciones del tubo en el punto de impacto. Con base en la ley de conservación de la energía en la colisión elástica, Seo et al. (2013) calcularon la deformación máxima y la fuerza interna de SFT que se consideró como viga de soporte de elasticidad, comprobando los resultados mediante análisis de elementos finitos. Lee (2013) analizó la respuesta de colisión global y local del túnel flotante en diferentes ángulos de colisión, obteniendo el momento y el desplazamiento máximo de acuerdo con la ecuación de equilibrio de fuerzas y la ecuación de balance de energía.

### 2.4.1.4. Durabilidad

El ion cloruro en el agua de mar es un factor importante para la corrosión del acero y el hormigón. Para la estructura de hormigón armado ordinario, una vez que ocurre la grieta, el ion cloruro dañará seriamente las barras de acero, reducirá la capacidad de carga y acortará la vida útil. Para las estructuras con una gran inversión e influencia social, la esperanza de vida debe ser de 120-150 años. Durante el período de servicio, las estructuras deben ser reparables, convertibles, controlables y sostenibles para hacer frente a los cambios propios y ambientales. Por lo general, la vida útil de los componentes y la estructura son diferentes. Es fundamental asegurar que el componente pueda ser revisado, reemplazado, reparado y reforzado cuando su vida sea menor que la de toda la estructura.

Xiang & Yang han realizado trabajos de investigación sobre la teoría del diseño del ciclo de vida de puentes de hormigón y estrategias de mantenimiento basadas en el rendimiento en los últimos 10 años. El mecanismo de deterioro causado por la carbonización, la penetración de iones de cloro y la reacción álcali-agregado ha sido bastante estudiado y aplicado en el diseño de durabilidad estructural desde antes del 2010. Sin embargo, la investigación de la influencia del mecanismo de deterioro en la capacidad de carga última de los puentes de hormigón es relativamente insuficiente. Dado esto, realizaron los trabajos correspondientes y propusieron un modelo de predicción para la vida útil restante del puente de hormigón, siendo extrapolable para los túneles flotantes. Estos modelos de predicción se basan principalmente en fallas de durabilidad del concreto, confiabilidad y costo del ciclo de vida. Según estos estudios, se proponen las estrategias y métodos de mantenimiento correspondientes.

A continuación, se presentan dos estudios, asociados a cargas no estabilizadoras, oleaje y sísmicas, con el fin de dar a notar como se realizan y que parámetros se varían para observar el comportamiento del túnel.

#### 2.4.2. Comportamiento hidrodinámico de túnel flotante ante oleaje irregular [22]

El equipo de la división de ingeniería costera y oceánica del Instituto Coreano de Ciencia Oceánica y Tecnología estudió el comportamiento del túnel flotante en base a un modelo matemático, y variando algunos de los parámetros establecidos.

A diferencia de los modelos típicos, se analiza la factibilidad sobre un modelo de túnel flotante con cables de suspensión, donde el cuerpo principal del túnel está suspendido y sujeto por estos cables, dispuestos a intervalos regulares, que transmiten las cargas hacia un cable principal. A diferencia de los puentes colgantes convencionales, dado que el cable principal del túnel sostiene cargas por fuerzas de flotación de manera uniforme, puede ser el principal generador de tensión y controlar el comportamiento del SFT. También se tienen torres que sirven como componentes de soporte del túnel y los cables principales.

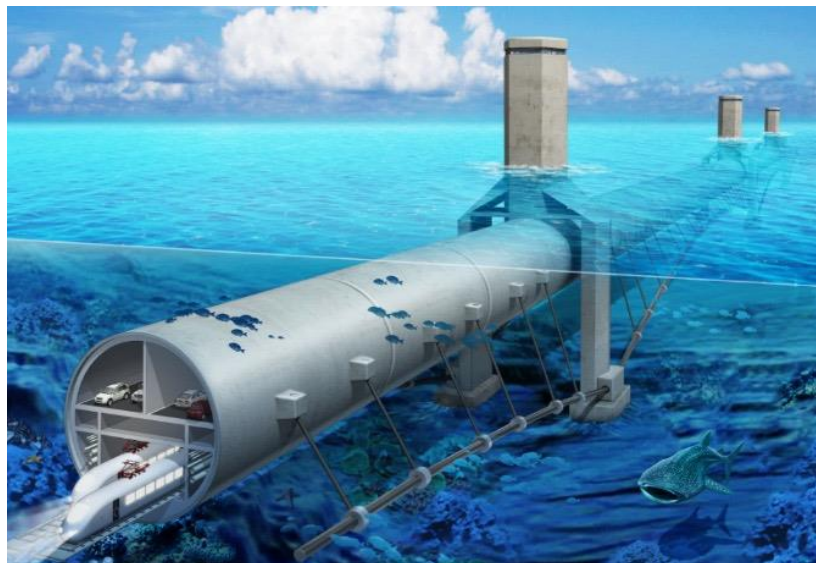


Figura 42: Concepto de diseño de túnel flotante con cables de suspensión.

Fuente: Won et al, 2019 [22].

Para este trabajo la ecuación diferencial para las cargas estáticas sobre el tubo y cables, tales como peso propio flotabilidad y corriente de marea fue calculada, y la carga dinámica de las olas fue construida siguiendo las recomendaciones del DNV-RP-C205 [23].

La fuerza hidrodinámica sobre una viga esbelta (tubo o cables) en un flujo de fluido general se puede determinar sumando las fuerzas seccionales que actúan sobre cada punto de la estructura de la viga. Generalmente, el vector de fuerza que actúa sobre la viga se puede resolver en una fuerza normal  $f_N$ , una fuerza tangencial  $f_T$  y una fuerza de loft  $f_L$  (Figura 43). Además, se producirá un momento de torsión  $m_T$  en secciones transversales no circulares.

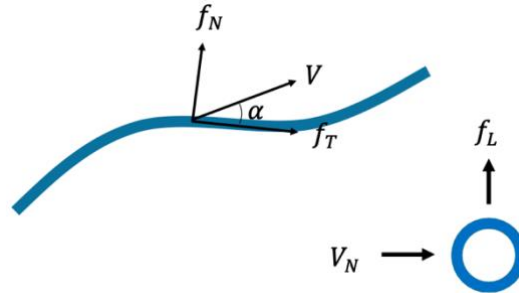
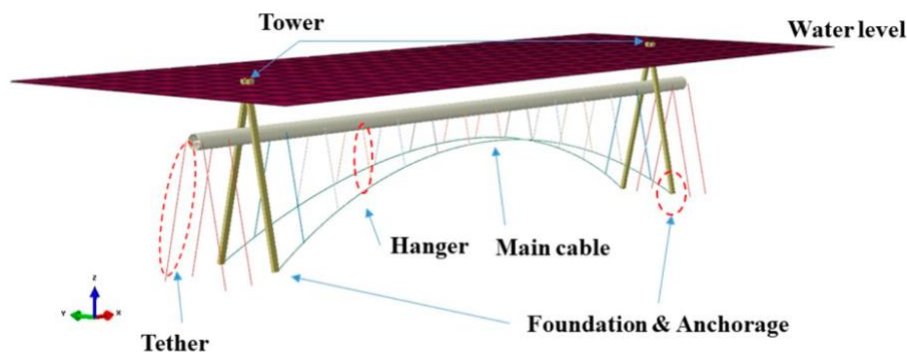


Figura 43: Fuerza hidrodinámica en un tubo.

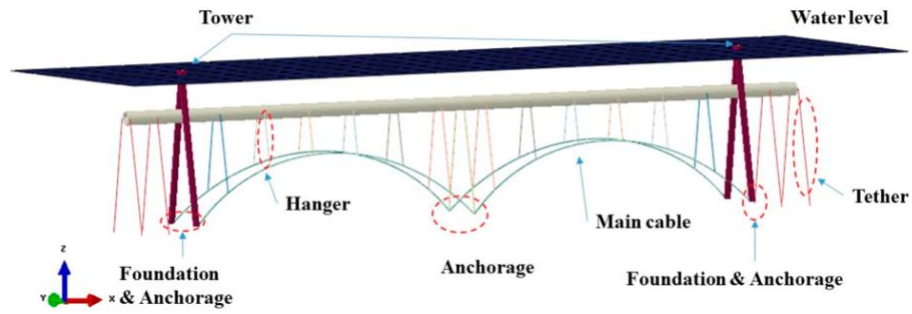
Fuente: Won et al, 2019 [22].

Para miembros de vigas estructurales delgados con dimensiones de sección transversal y planicidad insuficiente para permitir que se desprecie la inclinación de las velocidades del fluido y las aceleraciones de las partículas en la dirección de flujo normal hacia el miembro de la viga, las cargas de las olas se pueden estimar utilizando la fórmula de carga de Morison, que es la suma de una fuerza de inercia, proporcional a la aceleración, y una fuerza de arrastre, proporcional al cuadrado de la velocidad.

Para este estudio, se definen dos tipos de túnel flotante (Figura 44) con cables de suspensión: Tipo 1, que tiene torres en ambos extremos y cables principales conectados a estas, y Tipo 2, que tiene un anclaje adicional en el medio de ambas torres. Las dimensiones consideradas para ambos tipos se indican en la Figura 45.



(a) Tipo 1.



(b) Tipo 2.

Figura 44: Componentes de túnel flotante con cables de suspensión.

Fuente: Won et al, 2019 [22].

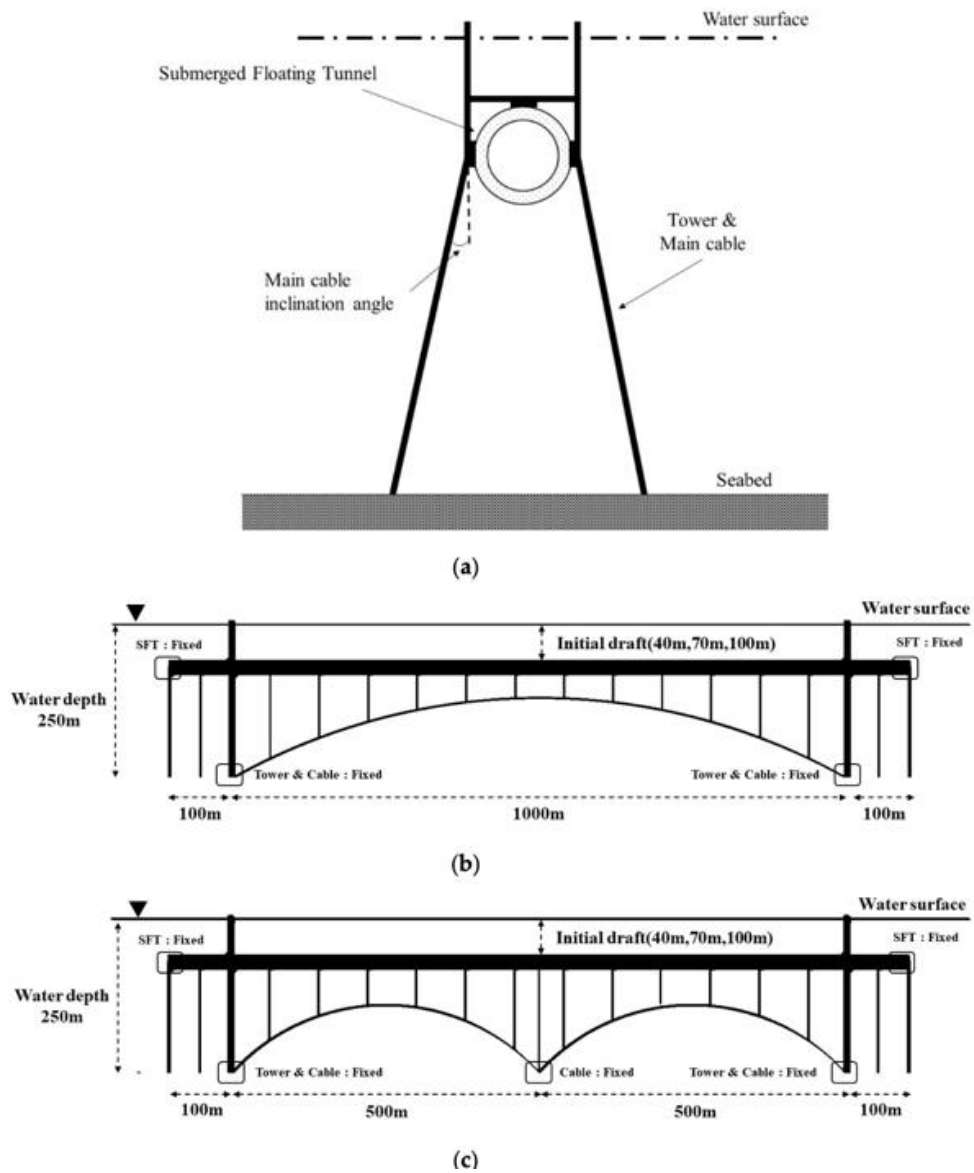


Figura 45: Túnel flotante con cables de suspensión considerado: (a) vista en sección transversal; (b) dimensiones del Tipo 1; (c) dimensiones del Tipo 2.

Fuente: Won et al, 2019 [22].

También se aplicaron al modelo condiciones geométricas y ambientales. El oleaje irregular en una serie de tiempo fue aplicado usando el espectro de JONSWAP (Hasselmann et al., 1973). Para la investigación de este modelo, se utilizó el Programa ABAQUS AQUA FE.

Para aplicar el túnel flotante en un sitio de campo, se debe controlar la deformación del sistema, incluso en condiciones de ondas extremas si los vehículos o trenes operan dentro del túnel. Los principales parámetros que se establecieron como variables para el análisis fueron: el diámetro del tubo, métodos de disposición y ángulos de disposición del cable principal, BWR (razón flotabilidad y peso), profundidad de instalación y altura de ola. Las condiciones óptimas para las variables mencionadas se obtuvieron analizando el comportamiento del túnel flotante propuesto. Aquí, la profundidad de instalación requerida para minimizar el efecto de las olas y la actividad marítima se denomina espacio libre superior.

A partir del estudio paramétrico, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Condición de las olas: a medida que aumentaba la altura significativa de las olas, aumentaba el movimiento tanto del tipo 1 como del tipo 2.
- BWR: El comportamiento del tipo 1 y del tipo 2 difirió, dependiendo del BWR. Para el tipo 2, la aceleración, la fuerza de reacción y la fuerza de sección aumentaron, ya que se produjo un movimiento negativo debido a la holgura en el  $BWR=1,1$ . Por otro lado, para el tipo 1, a medida que aumentaba el BWR (aumentaba la flotabilidad, respecto al peso), aumentaba el movimiento de elevación y la aceleración, la fuerza de reacción y la fuerza de sección proporcionalmente.
- Ángulo de inclinación de los cables principales: se observa que el comportamiento del tipo 1 y del tipo 2 difiere a medida que aumenta el ángulo de inclinación de los cables principales. En el caso del tipo 2, la aceleración, la fuerza de sección, la fuerza de reacción, etc. aumentaron a medida que aumentaba el ángulo en la dirección de acción de las olas. Por el contrario, el comportamiento del tipo 1 disminuyó a medida que aumentaba el ángulo.
- Diámetro del tubo: La aceleración, la fuerza de sección y la fuerza de reacción aumentaron a medida que crecía el diámetro del tubo en las condiciones antes mencionadas. Puede verse que el SFT con el tubo de gran diámetro es desventajoso desde el punto de vista económico y mecánico.
- Profundidad de instalación del SFT: a medida que aumentaba la profundidad de instalación del tubo, el impacto de la rotura de las olas disminuía en general y el movimiento disminuía. Sin embargo, en el caso de una profundidad de 40 m, el tipo 2 experimentó holgura y la aceleración, la fuerza de sección y la fuerza de reacción aumentaron considerablemente, lo cual es una condición que debe evitarse.
- Observaciones: en general, el tipo 2 de túnel fue superior desde el punto de vista hidrodinámico. Sin embargo, se debe realizar un análisis hidrodinámico detallado para evitar las condiciones que anteriormente producían holgura. Además, en el caso de que la aceleración sea generada por el movimiento, se debe revisar el diseño para garantizar condiciones seguras para el paso del tráfico.



### 2.4.3. Respuesta estructural ante eventos sísmicos en múltiples soportes [24]

Los túneles flotantes, a primera vista, parecen ser una solución adecuada para que los cruces de vías fluviales se realicen en zonas de alta sismicidad. De hecho, si se conciben adecuadamente las juntas estructurales colocadas en las conexiones de la costa (extremos del túnel), el movimiento del suelo puede ser transmitido al túnel principalmente por los cables, que evidentemente actúan como un filtro, debido a su intrínseca flexibilidad transversal. Además, la interacción con el agua proporciona una amortiguación adicional al movimiento de la estructura.

El equipo de trabajo de la Universidad Federico II de Nápoles (2009) evaluó la respuesta estructural de los túneles flotantes ante eventos sísmicos, mediante análisis dinámicos en el dominio del tiempo, teniendo en cuenta la excitación de múltiples soportes terrestres. Esto se determina mediante la generación de acelerogramas sintéticos, simulando el mecanismo de ruptura de fallas. Se examinan diferentes casos de estudio, que se caracterizan por la diversa disposición de los sistemas de cable. Se monitorizan los desplazamientos y tensiones que se producen en el túnel y los cables, lo que permite destacar los aspectos peculiares de la respuesta estructural.

En la Figura 46 se presentan las dimensiones consideradas para el perfil longitudinal.

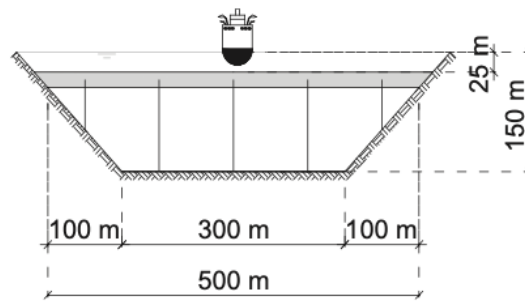


Figura 46: Perfil longitudinal de túnel y lecho marino.

Fuente: Martire et al, 2009 [24].

Se supone que el túnel está completamente realizado en acero con una sección transversal multicelular. La carcasa exterior está compuesta por dos tubos de acero concéntricos conectados mediante nervaduras de refuerzo. Internamente, las paredes de acero refuerzan y endurecen la sección transversal. Las dimensiones internas son lo suficientemente grandes como para permitir el alojamiento de dos carreteras y todas las demás instalaciones necesarias. Las cubiertas de la calzada se realizan a través de placas de acero ortotrópicas.

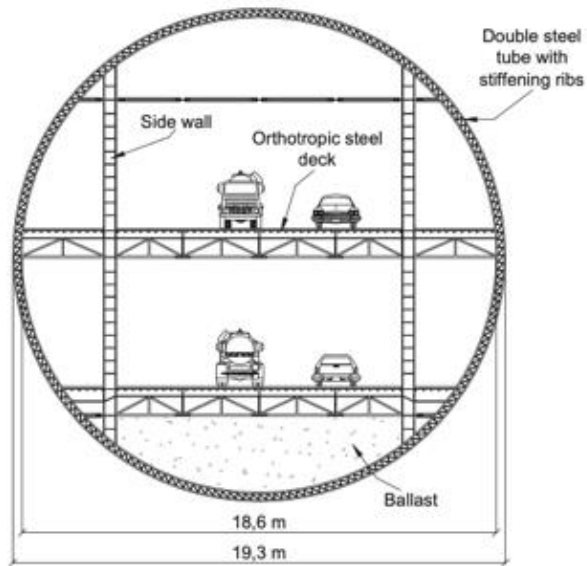
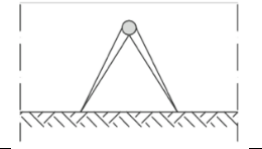


Figura 47: Esquema de sección transversal del túnel.

Fuente: Martire et al, 2009 [24].

Tabla 1: Diámetros de los sistemas de cables.

| Sistemas de cables por módulo | Sistema Tipo A | Sistema Tipo B  |
|-------------------------------|----------------|---|
|                               |                |  |
|                               | D [cm]         | D [cm]  |
| 1 (i = 100 m)                 | 31             | 40  |
| 2 (i = 50 m)                  | 22             | 28  |

Fuente: Martire et al, 2009 [24].

Se consideran dos configuraciones del sistema de anclaje: el tipo A, con cuatro cables inclinados en forma de W, y el tipo B, con dos cables verticales (Tabla 1). El sistema de tipo A se caracteriza por valores similares de rigidez horizontal y vertical, mientras que el tipo B es efectivo solo contra las deflexiones verticales del túnel. Se prueba la colocación de los cables a 50 m y 100 m entre ejes. Los diámetros de los cables adoptados en las diversas soluciones descritas anteriormente se muestran en la tabla. Cada sistema de cables se fija al fondo del mar mediante dos cimientos de seis pilotes.

Se consideran, además, dos tipos de disposición longitudinal para los sistemas de cables: el primero, llamado CW, que presenta solo sistemas de cables tipo A, mientras que el segundo es una solución híbrida, llamado CH, que presenta la alternancia de sistemas tipo A y tipo B. En la última solución, el acoplamiento de los dos sistemas de cables conduce a un menor grado de contención del túnel en el plano horizontal, si se compara con el anterior, pero es más conveniente desde el punto de vista económico.

El diseño de la conexión a la costa representa un tema crítico del diseño del túnel flotante, que involucra la interacción compleja entre el túnel flotante y los túneles excavados en tierra. En este estudio se asume que se permite el movimiento en el plano vertical y horizontal en ambos

extremos del túnel; el desplazamiento axial se libera en una de las conexiones de tierra, mientras que en el otro extremo del SFT se proporciona un dispositivo de conexión axial, compuesto por un resorte acoplado en paralelo a un amortiguador. Esto es necesario ya que el túnel es una estructura rígida en la dirección longitudinal, alcanzando así altas aceleraciones cuando es excitado por el movimiento longitudinal del suelo.

Las acciones ambientales que cargan lo túneles flotantes durante un evento sísmico son el movimiento del suelo en cada uno de los puntos donde la estructura está vinculada al suelo (es decir, en los cimientos del cable y en las conexiones de la costa), y las fuerzas hidrodinámicas debidas al movimiento relativo entre el agua y la estructura.

Se asume que el suelo está subdividido en 5 capas planas, caracterizadas por diferentes valores de densidad, velocidad de propagación de ondas longitudinales y velocidad de propagación de ondas de corte. La magnitud del evento sísmico considerado se establece en 7 Mw (magnitud de momento), lo que lleva a valores de PGA que oscilan entre 0,34 g a 0,54 g, en los diversos puntos de interés del suelo. Al comparar los espectros de respuesta de aceleración vertical en relación con el movimiento del suelo en las conexiones de la costa y el promedio, surgen diferencias significativas solo en el rango de baja frecuencia.

Las fuerzas por unidad de longitud que surgen de la interacción agua-tubo durante un evento sísmico pueden evaluarse mediante la ecuación de Morison. En base a este estudio paramétrico, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En general, las oscilaciones de los túneles flotantes durante el evento sísmico involucran varios modos de vibración, siendo el más excitado siempre el tercer modo de vibración. Vale la pena subrayar la importancia de considerar el movimiento del suelo en múltiples puntos de soportes, ya que conduce a la excitación de modos de vibración de túnel con un número par de ondas sinusoidales, que no se excitarían en caso de movimiento síncrono del suelo.
- Los valores máximos de los momentos flectores siempre se alcanzan cerca de la sección media del túnel. Los cables más tensados axialmente son los internos de los sistemas tipo A colocados en la parte central del túnel; sin embargo, nunca se alcanza el valor límite de fuerza axial de los cables.
- La disposición de los sistemas de cables CW confirma su mejor respuesta frente al movimiento horizontal del túnel, ya que los momentos flectores horizontales en el túnel alcanzan valores notablemente inferiores a los obtenidos cuando se proporciona la disposición CH.

Se necesitan más investigaciones. Se podría utilizar un enfoque de modelado más refinado para la interacción de la estructura con el agua. Además, deben tenerse en cuenta diferentes valores de longitud de cruce, profundidades del lecho marino y configuración estructural para captar sus efectos en la respuesta general de este innovador sistema.

#### 2.4.4. Construcción [21]

Además del análisis teórico, debe haber un conjunto de métodos para la construcción de un túnel flotante. Debido a que estos túneles no existen, los métodos de construcción del túnel sumergido se pueden tomar como referencia. El contenido principal de construcción del SFT se puede dividir en tres partes: fabricación de segmentos de tubo, transporte e instalación de segmentos de tubo, instalación de cables de anclaje y cimentación.

1. Fabricación de segmentos del tubo: En dique seco. El largo del elemento depende de espaciamiento entre anclajes y condiciones de transporte. El espacio interno del tubo depende de las vías, vías de escape, canales de ventilación, electricidad, etc. La precisión debe ser alta y los elementos deben ser impermeables. En caso de usar hormigón, se recomienda su reforzado con fibras. Es necesario tomar las medidas adecuadas para controlar el calor del hormigón colado de gran volumen durante su curado.
2. Transporte e instalación: se puede considerar el método de flotación y hundimiento, como el de los sumergidos, o el método de lanzamiento incremental, que significa llevar los segmentos de tubo a un deslizamiento inclinado en la orilla y usar un gato hidráulico para empujarlos al agua paso a paso. La conexión entre los segmentos de tubo por tensión de pretensado debe terminarse antes de empujar.
3. Anclaje y cimentación: Los elementos deben ser anclados a la vez que se van posicionando en su lugar. Para el método de flotación y hundimiento, los cables de anclaje pueden ser instalados directamente. A veces se usan anclas temporales o boyas para mantener estabilidad. Para el método de lanzamiento incremental se utilizan anclas temporales al principio, y una vez instalado el elemento se aplican los cables permanentes. En caso de utilizarse la solución de estabilización mediante pontones (solución menos estudiada) se requiere el descenso de los elementos hasta su posición, en conjunto con el pontón diseñado para el transporte, inmersión y condición permanente.

A pesar de la similitud con el túnel sumergido, aún hay incertezas. La conexión precisa de los segmentos de tubo es muy difícil bajo el agua, debido al entorno de oleaje y corrientes. Por otra parte, el tubo se encuentra en una etapa de voladizo durante la construcción, siendo muy vulnerable al mal tiempo de corrientes oceánicas, lo que provocará una inestabilidad generalizada. Finalmente, la vibración sostenida inducida por acciones ambientales perturbará el monitoreo y control de la alineación del túnel durante la construcción. Además, se debe tener en cuenta el riesgo de asentamiento de las fundaciones.

#### 2.4.5. Modelo físico de túnel flotante [16]

Al no existir ningún túnel flotante real, nunca se ha validado ningún modelo matemático. Por tanto, el modelo físico es fundamental. Un prototipo escalado (y simplificado) de un túnel flotante es un modelo físico y una reproducción de un modelo físico es un modelo matemático. Una vez que el modelo matemático está calibrado y validado por el modelo físico, se puede usar para predecir el comportamiento del prototipo escalando el modelo en la computadora.

Para hacer frente a la perturbación del efecto de escala, una contramedida es subdividir la prueba del modelo físico en tres etapas: la prueba del mecanismo, la prueba de los parámetros, y la prueba de validación. La prueba del mecanismo se centra en la comprensión del comportamiento

estructural para guiar la dirección de la forma estructural; por tanto, se puede despreciar la influencia del efecto de escala. En la prueba de parámetros, nos aseguramos de que la escala del modelo sea lo suficientemente grande para que los resultados de la prueba puedan usarse directamente o por extrapolación para calibrar el modelo matemático. La prueba de validación es la prueba de última etapa para la validación de los diseños generales para garantizar la solidez y la exhaustividad del sistema estructural.

Para estudiar el comportamiento estructural general en el agua y de las corrientes y las olas, Lin et al. [16], propusieron y diseñaron una prueba de modelo físico 1:50 en 2018; el modelo de tubo tiene una longitud de 24 m, con una sección circular de 25,2 cm de diámetro, lo que representa una carretera en túnel flotante de dos carriles de 1,2 km de longitud. La Figura 48 muestra el diseño del modelo de tubo. Una barra de acero está en el centro del tubo para entregar la rigidez a la flexión y está cubierta por tubo que representa el volumen. Se ubican aros de acero en el lado externo de la forma añadiendo el peso. Algunos aros se soldaron con ojales para conectarlos a cables de alambre de acero; los cables estaban conectados con resortes para simular la rigidez de los cables de amarre (anclajes). Los cables están espaciados a 3 m longitudinalmente. Ambos extremos del modelo fueron arreglados. Al establecer un modelo de referencia y alterar los parámetros estructurales como la flotabilidad neta, la disposición de los cables de amarre y las condiciones de borde, se puede observar el cambio de comportamiento estructural sujeto al cambio de estructura. Esta prueba se está preparando ahora (Figura 49) como el primer caso en el mundo. Se espera que los resultados orienten la dirección del diseño de encofrados estructurales del túnel flotante.

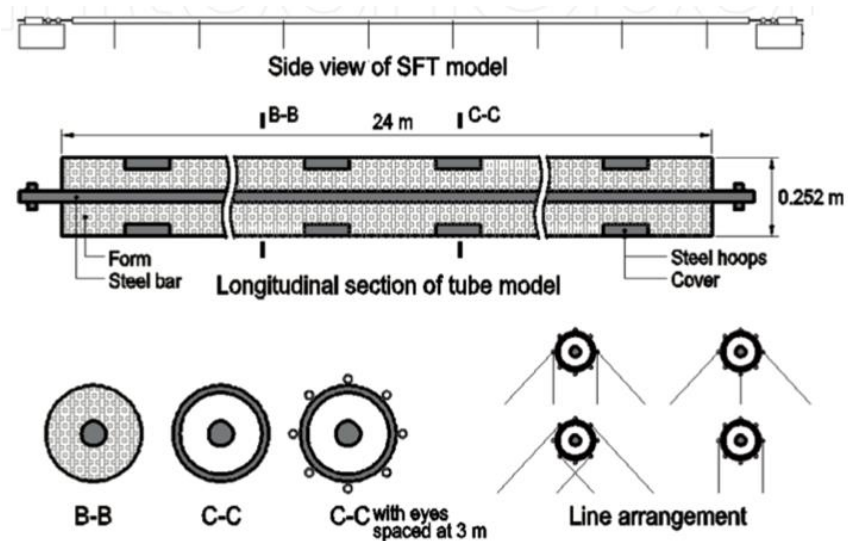


Figura 48: Dibujos esquemáticos de diseño.

Fuente: Lin et al, 2019 [16].



Figura 49: Foto de la prueba de comportamiento estructural general de túnel flotante.  
Fuente: Lin et al, 2019 [16].

## 3. Proyectos de túneles subacuáticos

### 3.1. Proyectos destacados

#### 3.1.1. Eurotúnel

El Eurotúnel o Túnel del Canal es la obra de túnel subacuático excavado más conocida a nivel mundial, construido en roca entre 1986 y 1993. El proyecto permite la conexión entre Calais en Francia y Folkestone en Reino Unido, por debajo del Canal de la Mancha, mediante tres túneles de 50,5 km de longitud: dos túneles principales de uso ferroviario, y un túnel de servicio y seguridad entre ambos, conectado mediante galerías transversales construidas a intervalos regulares. Además, cuenta con galerías de ventilación que conectan los túneles principales para liberar la ventilación producida por los trenes. Para concretar, 3,2 km estuvieron excavados en suelo francés, 38 km debajo del mar y 9,3 km en suelo británico con una profundidad de 40 a 100 m bajo del fondo marino, siendo el túnel con mayor tramo submarino en la actualidad (ver Figura 50).

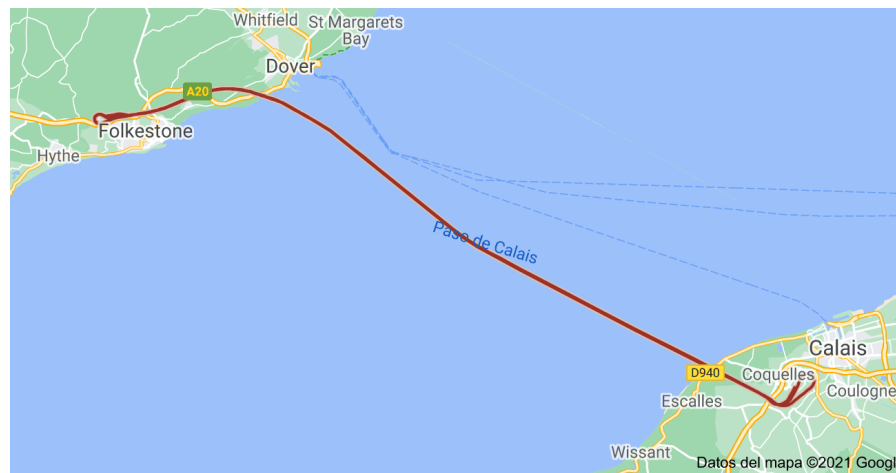


Figura 50: Trazado en planta de Eurotúnel.

Fuente: Elaboración propia.

La construcción de los túneles se realizó desde cada país encontrándose en el punto medio bajo el canal, utilizando un total de 12 máquinas tuneladoras. El sostenimiento del túnel se ejecutaba con dovelas prefabricadas de hormigón reforzado con granito [25].

El diseño y construcción de este túnel contó con 3 desafíos importantes, indicados a continuación [26]:

1. El equipo de topografía trabajó de forma conjunta con el equipo de geología para estudiar los diferentes estratos del canal de la Mancha y ver por cuál se debía construir el túnel submarino. El objetivo era encontrar un tipo de roca lo suficientemente estable para excavar y con el riesgo mínimo de inundación o incendio. Como resultado, se encontró marga calcárea o marga de tiza, un estrato impermeable, compacto y resistente ideal para la construcción del túnel (Figura 51). Sin embargo, la marga calcárea tiende a presentar muchas más fallas que los estratos más profundos determinados, por lo que es propensa a las entradas de agua.



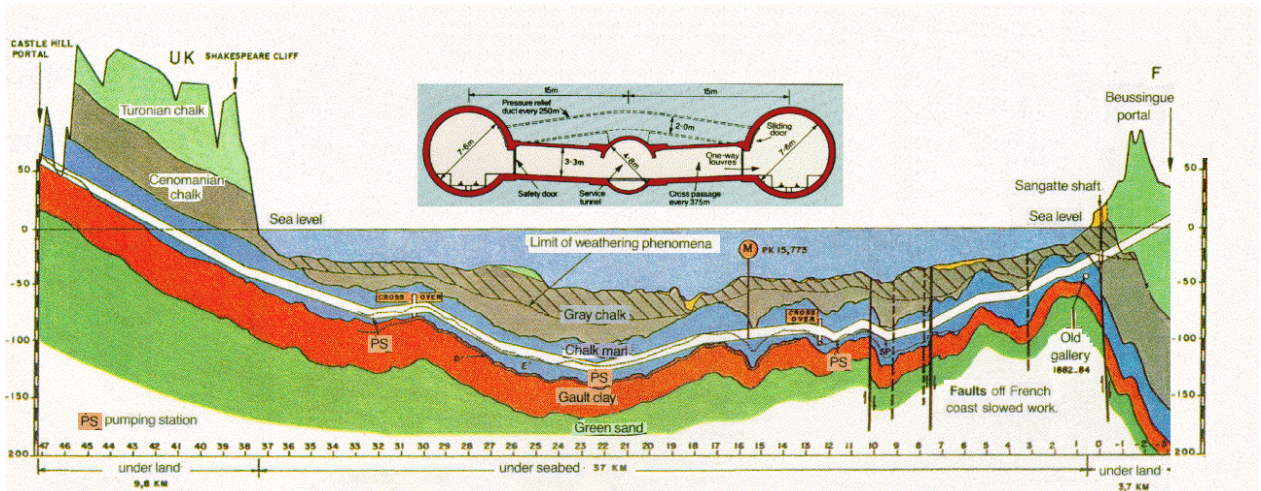


Figura 51: Perfil geológico y descripción de los túneles. Todas las obras subterráneas se construyen dentro de Chalk Marl, excepto parte de las secciones fuera del lecho marino.

Fuente: Pierre-Jean Pompée, 1995. Channel Tunnel Project Overview.

La mayor parte del Túnel del Canal de la Mancha pasa a través de margas calcáreas, gran parte de ellas con fallas, con mayor concentración en el lado francés.

2. Para poder realizar un encuentro correcto entre las máquinas tuneladoras, desde ambos lados, se debió realizar un importante trabajo de monitoreo topográfico. Para realizar las mediciones topográficas se establecieron puntos de control en superficie a lo largo de la ruta. En la superficie y con un ángulo de 360° es mucho más sencillo que hacerlo debajo del agua. Debido a que el túnel, visto desde la superficie, solo podría desplazarse de forma lateral. Bajo estas condiciones, el equipo de topografía debía trazar la trayectoria en línea recta a lo largo de los 38 km para que ambos equipos excavadores pudieran unirse en el mismo punto. Por su parte, las tuneladoras fueron guiadas por satélite y láser. Finalmente, las primeras tuneladoras de los equipos de ambos países se encontraron en el punto medio y con una desviación de apenas 35 cm. La tuneladora inglesa, que llegó primero, tuvo que ser sacrificada (fue enterrada a mayor profundidad) para el posterior paso de la tuneladora francesa hacia el lado inglés, permitiendo la continuidad del túnel.
3. Debido al importante número de fallas y las zonas de menor profundidad donde se cruzan estratos de tiza (permeable), se produjo un importante flujo de agua y una alta presión, lo cuales fueron un factor crítico para la excavación, provocando retrasos en el avance, principalmente del lado francés. Para las altas presiones de agua predichas se diseñaron máquinas de balance de presión de tierra (EPBM) para el lado francés. Además, los escudos de la cola de estas tuneladoras estaban equipados con varias filas de sellos de cepillo de alambre que presionaban contra el diámetro exterior del revestimiento del segmento de hormigón, para controlar la presión. Se colocaron líneas de lechada en la cola del escudo, lo que permitió inyectar lechada de cemento fino en el espacio anular entre el revestimiento del túnel y el suelo. Este método selló (impermeabilizó) el revestimiento del túnel a medida que avanzaban las tuneladoras. Se construyeron dos tuneladoras de doble escudo para la terminal del Reino Unido porque se pronosticaron menos entradas de agua. Finalmente, con las dovelas y el sistema de drenaje permite mantener el agua controlada para que no ingrese a los túneles.



### 3.1.2. Aqualine Bahía de Tokio [27]

El Aqualine Bahía de Tokio es un paso marino de 15,1 km de longitud que atraviesa la Bahía de Tokio para unir Kawasaki (prefectura de Kanagawa) con Kisarazu (prefectura de Chiba), en la península de Boso, reduciendo a 15 minutos el paso entre estas dos zonas de gran importancia industrial, respecto al recorrido alternativo de 100 km y que atraviesa el centro del Tokio metropolitano.

La construcción del Aqualine Bahía de Tokio se inició en 1989, después de 20 años de investigaciones, y duró nueve años. Este consiste en un túnel perforado con máquina TBM del tipo escudo de 9,5 km (el Túnel de la Bahía de Tokio) y un puente de 4,4 km de longitud desde una isla artificial hasta el aterrizaje en Kisarazu.



Figura 52: Trazado en planta túnel de Aqua-Line de Tokio, Japón.

Fuente: [Google Maps](https://www.google.com/maps). Consulta noviembre 2021.

Se trata del túnel de escudo subacuático para el tráfico de vehículos de motor con mayor diámetro del mundo. La sección transversal tiene un diámetro de 13,9 m hasta la parte exterior del revestimiento de dovelas, mientras que el diámetro interno de 11,9 m permite disponer dos carriles de circulación en cada sentido. La Aqua-Line también abarca dos islas artificiales: la isla de Kawasaki, que se encuentra a medio camino junto al túnel submarino, construida para la ventilación del túnel, y la isla de Kisarazu, donde el túnel se une al puente (Figura 53).

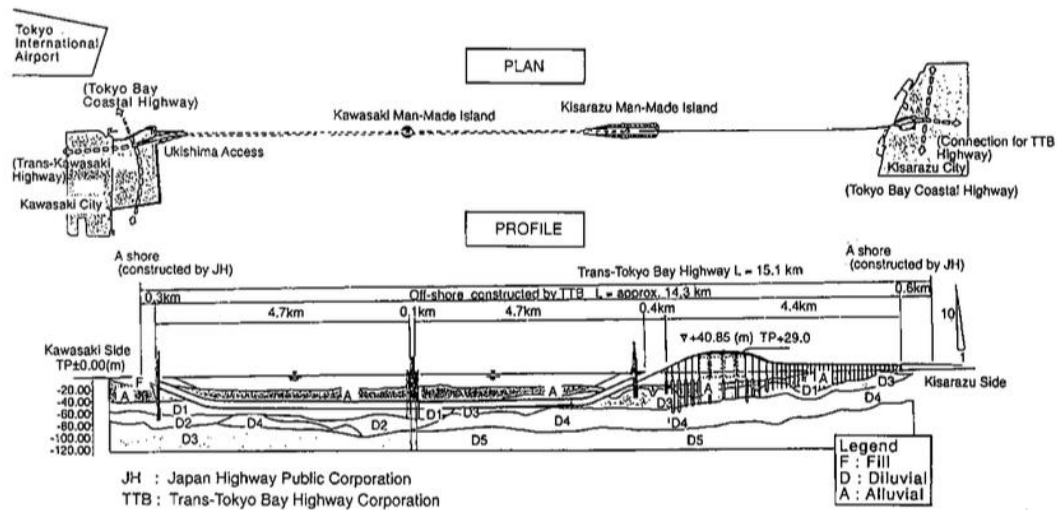


Figura 53: Plan general y perfil de autopista Trans-Tokio. Proyecto Aqua-Line Bahía de Tokio.

Fuente: Tatsuoka et al, 2000 [27].

Debido a la relativamente alta profundidad del lecho marino (hasta 30 m) y a la mala calidad del terreno, con un nivel alto de sismicidad, es que se optó por el uso de técnicas especiales para la construcción del túnel en suelo deficiente para así poder realizar la conexión al puente y evitar largos excesivos. El túnel es necesario dado el alto flujo de transporte marítimo.

Por efecto de lo anterior, se presentaron varios problemas importantes de diseño y construcción relacionados con la ingeniería geotécnica del proyecto:

1. El túnel no fue construido en la base de roca, debido a la profundidad de esta, sino fundamentalmente en suelos sedimentados. Se requirió un mejoramiento a gran escala de depósitos de arcilla blanda existentes mediante la mezcla de cemento in situ, controlando la resistencia de esta mezcla. Se usó cuatro tipos de mejoramiento del suelo mediante la mezcla de cemento, jugando un papel fundamental para resolver muchos de los problemas potenciales. Para evaluar el factor de seguridad para el estado de falla última de una masa mezclada de cemento a gran escala bajo el agua, se utilizó el análisis de estabilidad basado en el equilibrio límite utilizando la resistencia al corte residual, en lugar del método convencional de tensión permisible. En este diseño, se tomaron en cuenta los efectos de la presión de confinamiento efectiva inicial, la presión hidrostática y las condiciones de drenaje. La selección de la proporción de mezcla y el desarrollo de un método de colocación bajo el agua utilizando tubos tremie en colaboración con terraplenes construidos para esto, fueron algunas de las claves importantes para el éxito.
2. Se realizó la construcción del túnel con el diámetro más grande del mundo en sucesivos suelos rígidos mezclados de cemento y arcilla muy blanda a muy poca profundidad del lecho marino, por lo que se requirieron técnicas para contrarrestar la flotación, la alta presión de poros y el ingreso del agua para la conexión de subterránea de las máquinas. Para esto último se utilizó la técnica de congelamiento de suelo. Se realizó un cuidadoso seguimiento y control del par de corte y la velocidad de excavación en los suelos mezclados para evitar la falla. Además, se evitó la posible flotación de las dovelas mediante el uso de peso temporal de la máquina con el monitoreo de la estabilidad de la capa de suelo suprayacente.

3. El revestimiento primario fue diseñado para resistir la carga externa asegurando una alta estanqueidad y durabilidad. Se decidió construir un revestimiento secundario, que sirve como masa adicional contra el levantamiento debido a la fuerza de flotación del túnel y como protección del revestimiento primario. Además, se instaló una membrana impermeable entre los revestimientos primario y secundario, y se hizo hermética la conexión entre los segmentos adyacentes del revestimiento primario.



Figura 54: Fotografía de islas artificiales Aqua-Line Bahía de Tokio.

Fuente: [Radio Perfil](#).

### 3.1.3. Túnel Marmaray [28]

Marmaray es el sistema de transporte suburbano ferroviario de la ciudad de Estambul. La línea M3 de este sistema de metro permite el cruce bajo el canal del Bósforo, uniendo vía férrea la parte europea de la ciudad con la parte asiática. La primera parte del túnel es construida con máquina tuneladora, mientras que el tramo subacuático se conectó mediante un túnel sumergido. La construcción comenzó en 2004 y fue inaugurado en 2013. La construcción tuvo que detenerse cerca de cuatro años debido a la gran cantidad de restos arqueológicos encontrados en las estaciones de metro en construcción.

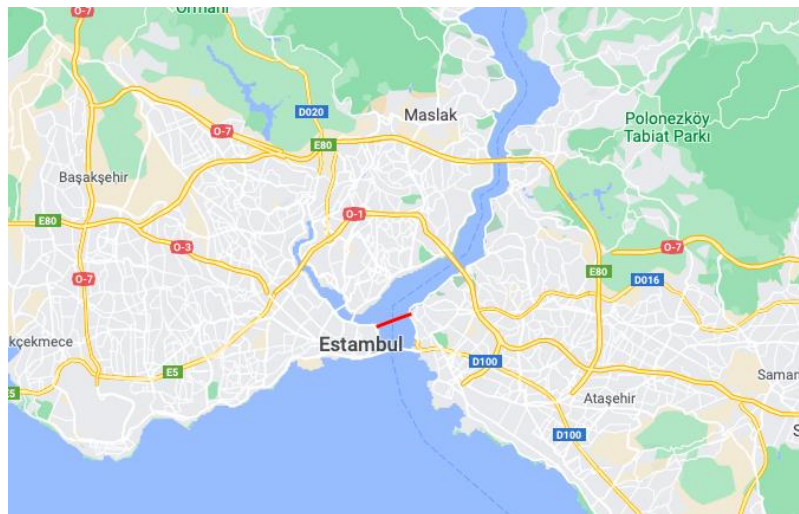


Figura 55: Trazado en planta túnel sumergido Marmaray. Estambul, Turquía.

Fuente: [Google Maps](#). Consulta noviembre 2021.

El túnel subacuático del Marmaray tiene un largo de 1,4 km aproximadamente, y es, hoy en día, el túnel sumergido más profundo (hasta 60 m) en el mundo. El túnel se compone de 11 elementos, estructurados de hormigón con una membrana de acero para hacerlos herméticos y asegurar la impermeabilidad. Estos tienen dimensiones promedio de 8,6 m de alto, 15,5 m de ancho, y un largo de 135 m, lo que sería la altura de un edificio de 40 pisos.

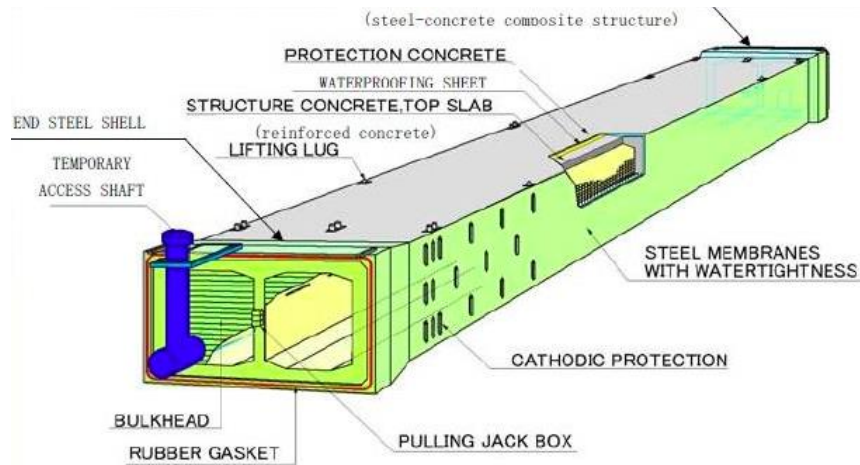


Figura 56: Elemento de túnel sumergido.

Fuente: Díaz, Blog Geotren [28].

Debido a las dimensiones del proyecto, y las condiciones ambientales y de suelo, se presentaron una serie de conflictos importantes [29].

1. La colocación de los túneles sumergidos se realiza sobre un suelo que predomina en depósitos sedimentarios. Generalmente este no es un problema, sin embargo, en este caso se encontraron zonas de suelo con potencial licuefacción, lo que podría provocar un hundimiento del túnel.<sup>6</sup> Para la solución de esta dificultad, una de las áreas tuvo que ser reemplazada por un relleno, y la otra área tuvo que ser mejorada mediante grouting de compactación.

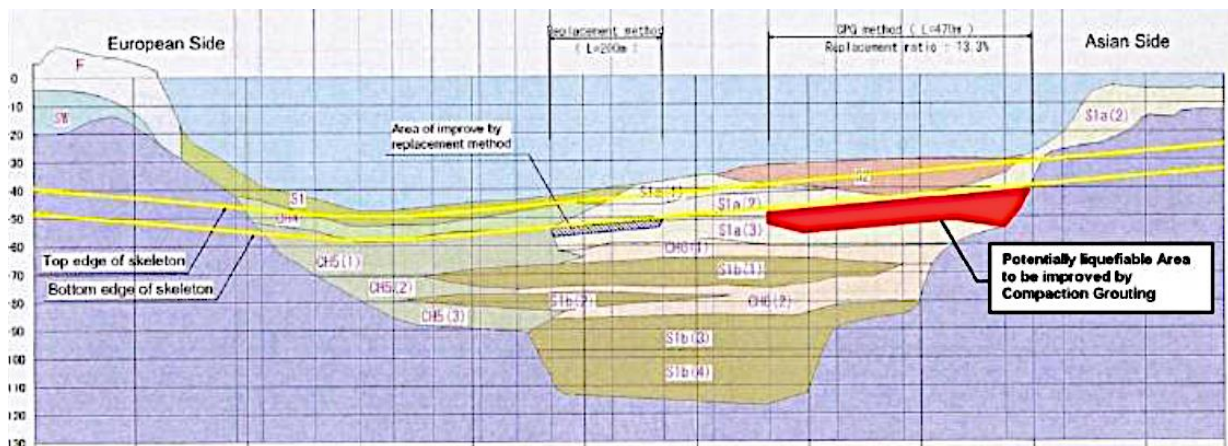


Figura 57: Perfil geológico. Trabajos de mejoramiento del suelo.

Fuente: Díaz, Blog Geotren [28].

<sup>6</sup> Se realizaron 3 campañas exploratorias y se ejecutaron 49 sondajes marinos.



2. El canal del Bósforo es un estrecho muy concurrido a nivel de transporte marino, siendo uno de los más intensos a nivel mundial, por lo que se requirió de un plan detallado para la ubicación del dique seco, y luego el transporte de los elementos a su lugar de instalación, delimitando corredores marinos para permitir el paso de mercantes por la zona.
3. El canal cuenta con corrientes muy intensas y cambiantes, complejizando toda actividad marina, en particular, el proceso de inmersión. Para este efecto, dentro de cada elemento se colocaron cinco tanques de lastre a cada lado, haciendo un total de 10, permitiendo el ingreso de agua dentro de estos. Al controlar el agua que ingresa en cada uno de los tanques, el elemento puede ser manipulado con una enorme precisión. Todo el proceso de inmersión se basa en el control del agua, con la corriente en la superficie o con el agua dentro del elemento. Una vez hecha la prueba de inmersión, no se lucha contra la corriente, sino que se sumerge el elemento alineado con la corriente superficial. Una vez que desciende hasta las capas más profundas, las nuevas corrientes lo llevan a su posición exacta.
4. La profundidad de los elementos provoca un aumento en la presión del agua sobre el elemento en todas las direcciones, alcanzando presiones de hasta 6 veces la presión atmosférica en el elemento más profundo (60 m), por lo que la construcción tuvo que ser perfecta para evitar la implosión de estos.
5. Debido al modelo de falla de la zona del mar de Mármara, se estima la ocurrencia de sismos importantes que puedan afectar al estrecho. De ocurrir un impacto de esta magnitud, podría licuar el lecho marino colapsando 1,4 km de túnel. Por ello, se decidió hacer una estructura flexible, usando juntas sísmicas especiales que le dan movimiento, con particular cuidado en la junta sísmica entre el túnel sumergido y el túnel realizado con TBM (ver configuración de las juntas 2.3.3.2). Para lograr mayor estabilidad, se rellenó el lecho marino y se reforzaron los elementos. De esta manera el túnel podrá resistir sismos hasta de 7,5 grados en la escala de Richter.

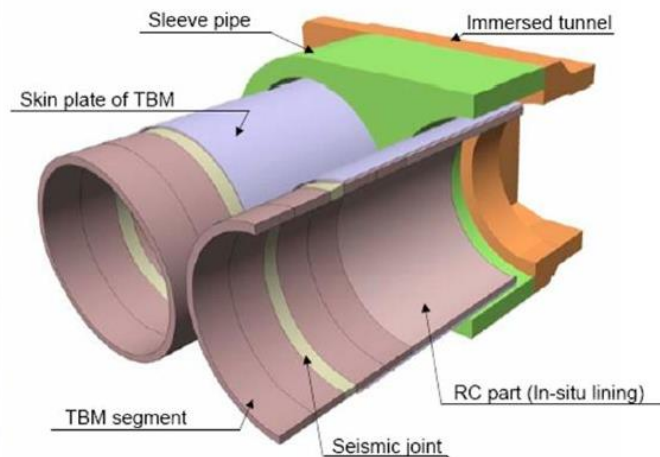


Figura 58: Junta de conexión entre túneles sumergido y subterráneo con TBM.

Fuente: Díaz, Blog Geotren [28].

### 3.1.4. Túnel Øresund [30, 31]

La Ruta internacional E20 conecta la ciudad sueca, Malmö y la capital danesa, Copenhague, mediante una estructura de puente-túnel, cruzando el estrecho de Øresund. Al igual que el Aqualine de Tokio, el puente ingresa a una isla artificial y conecta a un túnel, que, a diferencia del proyecto indicado, es un túnel sumergido. Su construcción se inició en 1995 y finalizó en 1999.



Figura 59: Trazado en planta de proyecto Øresund.

Fuente: [Google Maps](https://www.google.com/maps). Consulta noviembre 2021.

El túnel tiene un largo de 3,5 km, tramo que se convierte en el paso principal para los buques que navegan por el estrecho. Este túnel tiene la peculiaridad de tener una de las secciones más grandes construidas, debido a que cuenta con 2 secciones para la carretera, y 2 secciones para uso ferroviario. El túnel se construyó con 20 segmentos estructurados de hormigón armado, de 176 m de longitud, 38,8 m de ancho y 8,6 m de altura, ubicados en una zanja de hasta 11 m de profundidad.

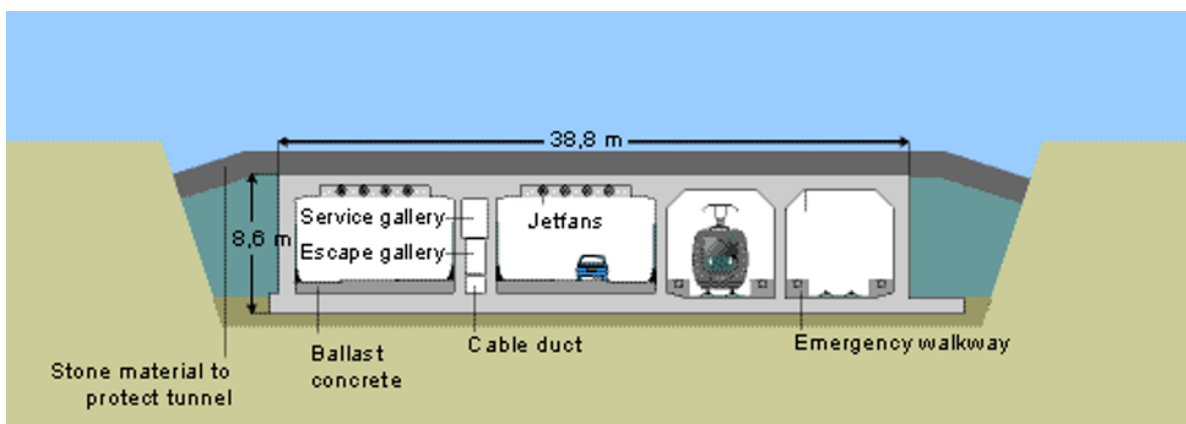


Figura 60: Dimensiones de sección del túnel.

Fuente: Blog más que ingeniería [30].

Este proyecto tuvo la necesidad de retirar una importante cantidad de roca de dragado en un ambiente marino hostil, lo que se resume en los siguientes conflictos:

1. 90% del suelo dragado se componía de una roca súper dura llamada caliza de Copenhague, por lo que se requirió de una dragadora de corte y succión especial para el proyecto.
2. El ambiente marítimo resulta de gran agresividad debido a la alta salinidad en el estrecho y a las bajas temperaturas, alcanzándose valores inferiores a 20 grados bajo cero. Ambas razones fueron motivo para realizar tratamientos al hormigón de las unidades de túnel, permitiendo ser impermeable y durable a la agresividad de las sales y la temperatura.
3. Al ser, la zona, el principal paso de las embarcaciones y el túnel no ubicarse a una gran profundidad, el diseño debía considerar la posible colisión de buques e impactos de hielo. Por esto mismo, se empleó hormigón H50, de alta resistencia.

Un dato curioso respecto al túnel es que el elemento n°13 del túnel no fue sellado correctamente en su inmersión, por lo que ingresó agua al elemento, añadiendo peso extra y haciendo ceder los cables de la guía, lo que produjo que este elemento cayera con todo el peso al fondo de la zanja. Debido a la alta resistencia de la estructura, tras el monitoreo de los buzos, se señaló que este podía ser utilizado, incluso después del golpe.

## 3.2. Túneles en Noruega

### 3.2.1. Túneles submarinos excavados en Noruega

Noruega cuenta con extensa experiencia en túneles tanto subterráneos como subacuáticos, debido a su compleja geomorfología compuesta de cadenas montañosas y un importante número de fiordos a lo largo de su territorio. A lo largo de la costa de Noruega, se han construido más de 40 túneles subacuáticos excavados desde principios de la década de 1980; 25 túneles de carretera (2 y 3 carriles), 8 túneles de oleoductos para la industria petrolera y 8 túneles para abastecimiento de agua y desagüe. Todos estos túneles han sido construidos en roca, mediante el método convencional de perforación y voladura [2].

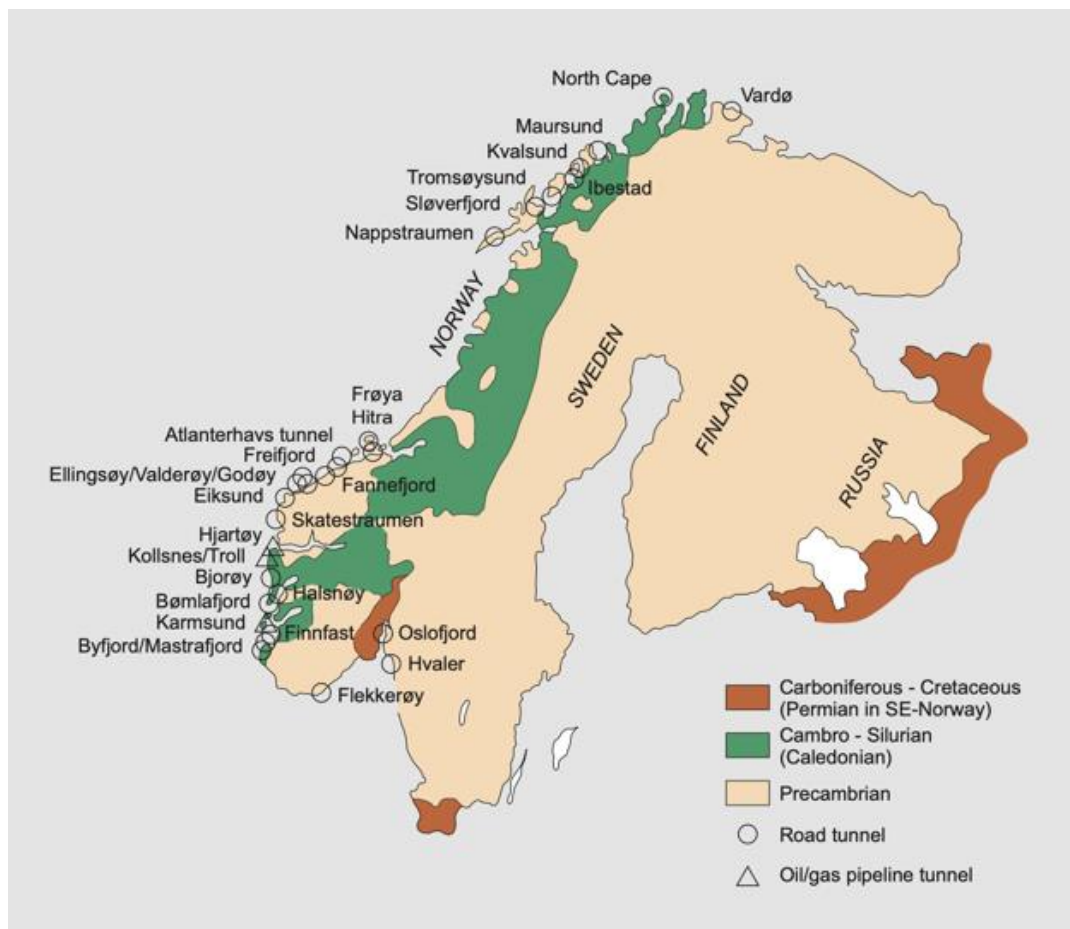


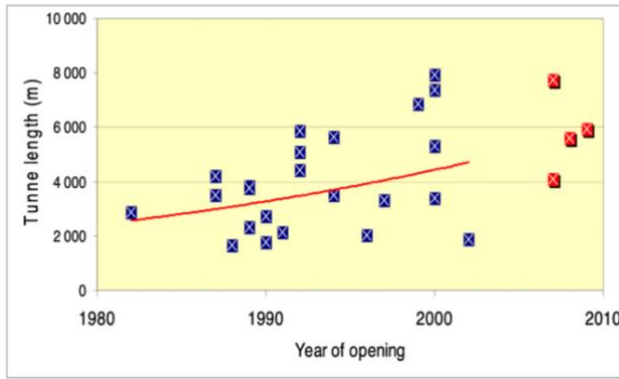
Figura 61: Túneles subacuáticos excavados en Noruega.

Fuente: NFF, 2009 [2].

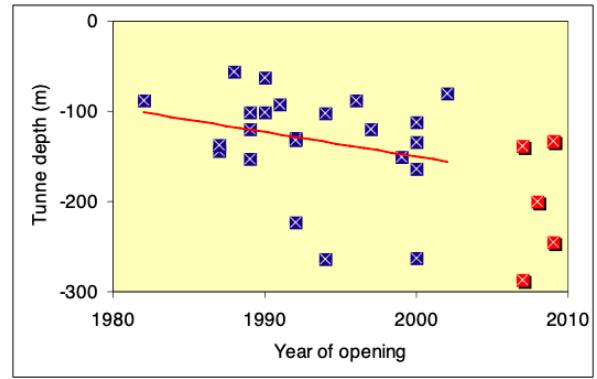
La gran mayoría de los túneles han sido excavados en rocas duras de origen precámbrico, mayoritariamente Gneis. Sin embargo, algunos de ellos han sido construidos en sectores de roca débil metamórfica. Las ubicaciones de los fiordos y estrechos se definen, a menudo, por zonas de debilidad de sedimentos y fallas regionales. Dado esto, un alto porcentaje de túneles submarinos en Noruega cruzan zonas de debilidad y fallas importantes.

A lo largo de los años, la experiencia en el país ha permitido la construcción de túneles subacuáticos más largos y profundos, alcanzándose túneles del orden de los 7 km de largo y otros del orden de 250 m bajo el nivel del mar. Se tienen los casos del túnel Bømlafjord (2000), que es un túnel subacuático de 7.860 m de largo, siendo el segundo túnel submarino *carretera* más largo del mundo. Por otra parte, el túnel Eiksund (2008) es el segundo túnel submarino más profundo a nivel mundial, alcanzando una profundidad de 287 m bajo el nivel del mar, y una longitud no menor de 7.760 m. En 2020 el túnel Ryfast supero ambos túneles carretera con un largo de 14,3 km (aunque cortado por una isla en su tramo central) y 293 m bajo el nivel del mar [32].





(a) Largo de túneles.



(b) Profundidad de túneles.

Figura 62: Variación de características de túneles submarinos noruegos con el tiempo.

Fuente: Stefanussen, 2009 [32].

Uno de los rasgos más importantes para el diseño de túneles en Noruega es la exigencia de una caracterización de suelo muy completa. Para esto, se tienen consideraciones especiales en su campaña exploratoria e investigación. Lo primero, es que se realizan sondeos con desviación predefinida, considerando que las zonas de debilidad se presentan bajo las zonas críticas de la superficie, pero siguiendo el rumbo de las discontinuidades [33].

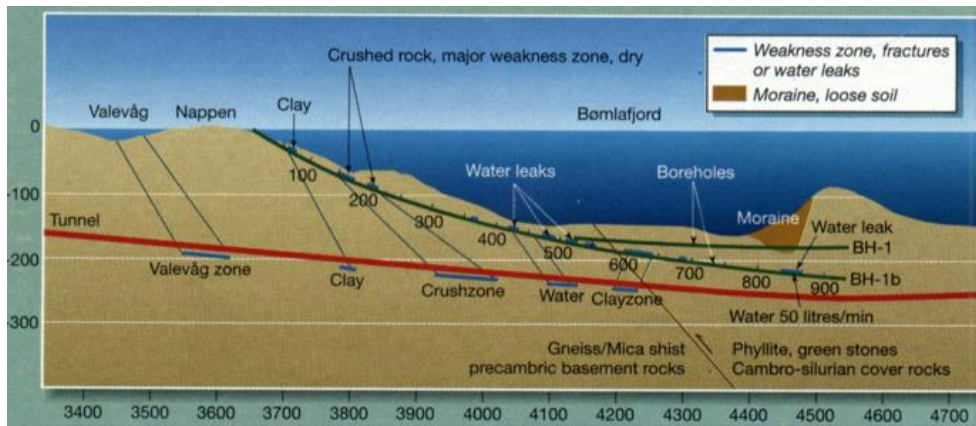


Figura 63: Perforaciones desviadas para el sondeo de túneles subacuáticos.

Fuente: Stefanussen, 2009 [33].

Otra de las características de la exploración, es que se realizan sondajes sistemáticos en el frente de avance del túnel, durante la construcción, para detectar presencia de agua, información sobre el caudal y la presión del agua, detectar fallas geológicas o situaciones complicadas. Se suelen realizar estos sondajes con las mismas barras de la máquina jumbo.

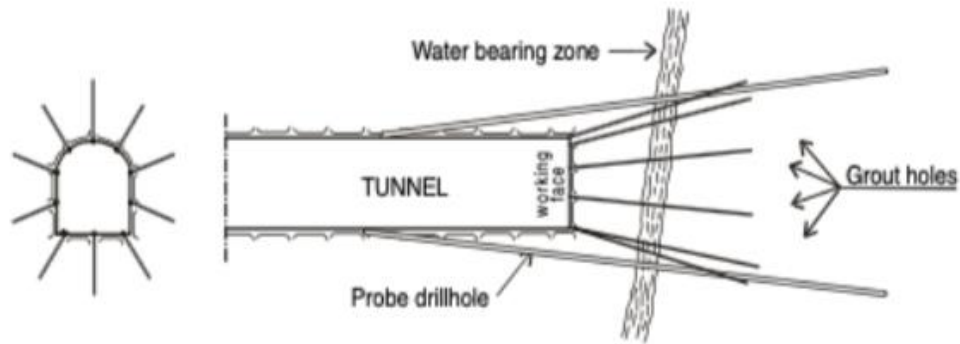


Figura 64: Esquema de sondajes en el frente de excavación y perforaciones de grouting.

Fuente: Stefanussen, 2009 [33].

La metodología constructiva noruega considera, para la fortificación de roca, el uso de un sistema flexible (pernos y shotcrete) y sistema rígido (hormigón completo prefabricado) donde sea necesario. El diseño considera condición drenada del túnel, por lo que la fortificación es diseñada para la resistencia de un caudal dinámico, permitiéndose filtraciones máximas de 30 lt/min/100m para túneles subacuáticos. El túnel debe ser drenado, es decir, que el agua se dirija a un sistema de drenaje. Se utilizan inyecciones para el control de las filtraciones de agua, y se aplican membranas y protecciones laterales para las pistas del túnel contra el agua y las heladas [33].

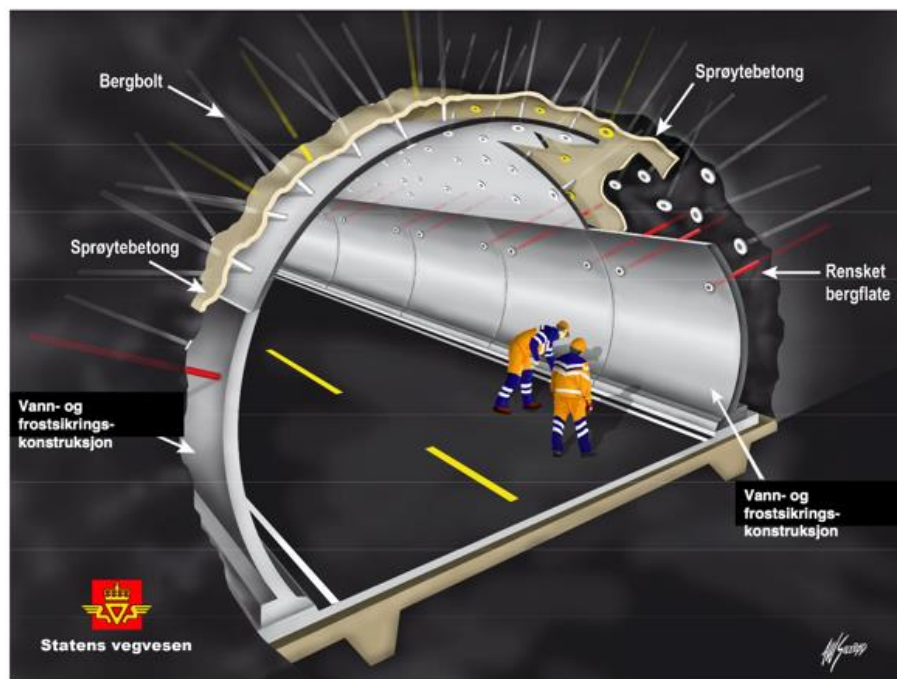


Figura 65: Sistema de drenaje abierto, diseño de túneles subacuáticos noruegos.

Fuente: Stefanussen, 2009 [33].

### 3.2.2. Túnel Bjørvika, Ruta E18

Es el primer túnel sumergido en Noruega, perteneciente a la Ruta europea E18, que conecta el centro de la capital, Oslo, bajo el estrecho Bjørvika, que es una extensión del fiordo de Oslo. Este fue construido en el año 2010. Éste es de 1.100 m de largo, donde 675 m corresponden al tramo sumergido.



Figura 66: Trazado en planta de túnel Bjørvika.

Fuente: [Google Maps](https://www.google.com/maps). Consulta diciembre 2021

Los 6 elementos del túnel son fabricados en hormigón estanco, logrado por enfriamiento durante el curado, con una sección típica de doble tubo. Se tiene la particularidad de que la sección transversal es muy variable en dimensiones debido a las vías de acceso y características internas exclusivas del proyecto: apartadero, sala técnica, cabinas telefónicas y señalización/ventilación de techo. De esta forma, la sección varía de altura entre 9,3 - 10,7 m y de ancho entre 28 - 43 m.

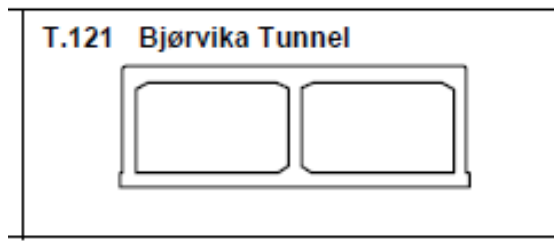


Figura 67: Sección transversal túnel.

Fuente: [Database ITA-AITES](#).

A pesar de que se cuenta con experiencia en el país, gracias a este túnel sumergido, no es una estructura que se ha utilizado en otras regiones de este. Existen otros países que han utilizado mucho más este recurso, siendo Países Bajos el que cuenta con mayor experiencia en el tema, contando al menos 30 túneles sumergidos y 10 en desarrollo (esto en el 2011), desde la década de 1940 [34]. La NPRA (Asociación de caminos públicos de Noruega) se ha enfocado fundamentalmente en la excavación de túneles, ya que las masas acuáticas a cruzar son principalmente fiordos de mayor profundidad y extensión elevada, por lo que resulta más económica esta solución.

### 3.2.3. Carretera Costera, Ruta E39 [10]

A pesar de que no se cuenta con una vasta experiencia en túneles sumergidos en Noruega, la NPRA está viendo la posibilidad de la construcción del primer túnel flotante en el mundo, que se asemeja mucho más en diseño y construcción a los sumergidos.

Tal es el caso de la Ruta E39, el proyecto vial más grande de Noruega que recorre toda la costa del país, cruzando un total de 10 fiordos. Dos de estos fiordos serán cruzados mediante túneles excavados. El más largo será el que cruza el Boknafjorden, con una longitud de 27 km, rompiendo el récord de túnel carretero submarino excavado más largo.



Figura 68: Trazado proyecto Ruta E39.

Fuente: Kvalheim, 2009 [10].

Tabla 2: Túneles submarinos a construir.

| Fiordo          | Largo (km) | Profundidad bajo el nivel del mar (m) |
|-----------------|------------|---------------------------------------|
| Romsdalsfjorden | 15,5       | 330                                   |
| Boknafjorden    | 27         | 390                                   |

Fuente: Kvalheim, 2009 [10].

Los otros 8 fiordos, a lo largo de la E39, requieren ser cruzados por otras estructuras distintas al túnel excavado, debido principalmente a la gran profundidad que presentan, con distancias no tan elevadas a cruzar (en planta). Se están considerando diferentes soluciones estructurales (y combinaciones de estas), tales como:

- Puente colgante.
- Puente flotante.
- Plataformas de patas de tensión (TLP)
- Estructuras de soporte de gravedad (GBS)
- Túnel Flotante (SFT)

Tabla 3: Fiordos a ser cruzados con construcciones alternativas.

| Fiordo          | Largo (m) | Profundidad (m) |
|-----------------|-----------|-----------------|
| Halsafjorden    | 2.000     | 5-600           |
| Julsundet       | 1.650     | 5-600           |
| Sulafjorden     | 3.800     | 500             |
| Vartdalsfjorden | 2.100     | 600             |
| Nordfjorden     | 1.400     | 500             |
| Sognefjorden    | 3.700     | 1.250           |
| Bjørnafjorden   | 5.000     | 5-600           |
| Langenuen       | 1.300     | 500             |

Fuente: Kvalheim, 2009 [10].

El caso particular del Sognefjorden, que tiene una profundidad de hasta 1.250 m, se ha analizado y considerado para la construcción del túnel flotante, que sería una opción idónea para evitar el problema de la profundidad y permitir el flujo vehicular marítimo en el volumen acuático. Esta idea está en boga hoy en día, presente en diversos artículos en internet, por lo que resulta alentador pensar que es la opción principal para el futuro paso [35]. En este caso, dada la excesiva profundidad del fiordo, resulta lógica la solución de diseño de túnel flotante estabilizado mediante pontones, pues la construcción de cimientos para anclaje a tales profundidades no sería factible.

Para asegurarse de que las nuevas construcciones que se están planeando se puedan construir finalmente, la NPRA utiliza la experiencia de la industria petrolera y marítima para garantizar la solidez de la tecnología. Actualmente se están probando varias formas de cualificar y cuantificar la estructura, y se están definiendo los criterios para su evaluación. También se están analizando los riesgos del clima extremo, los peligros naturales, las tecnologías y las colisiones de barcos. Para minimizar el riesgo y obtener los mejores parámetros de riesgo, se han iniciado grupos de expertos externos de todo el mundo.

### 3.3. Otros proyectos

#### 3.3.1. Excavados

##### 3.3.1.1. Túnel del Támesis [36]

Es el primer túnel subacuático del que se tienen registros de su construcción en el mundo, pasando por debajo del río navegable Támesis en la ciudad de Londres. Su construcción empezó en 1825 y finalizó en 1843. Otros dos intentos de cruzar el Támesis mediante un túnel ya se habían ejecutado anteriormente, pero sin éxito, debido al ingreso de agua y las malas condiciones del suelo. Originalmente para peatones, luego trenes, el túnel permanece en uso como parte del sistema ferroviario de Londres.

Para construirlo, Marc Brunel patentó un escudo de hierro fundido diseñado para ser colocado en la cara del corte, proporcionando acceso escalonado y protección para los 36 hombres que excavaban en tres filas de 12. Cada columna del escudo podía avanzar de forma independiente impulsada por gatillos hidráulicos. La superficie expuesta se revistió con ladrillos colocados en mortero y el escudo se movía hacia adelante en pasos del ancho del ladrillo.



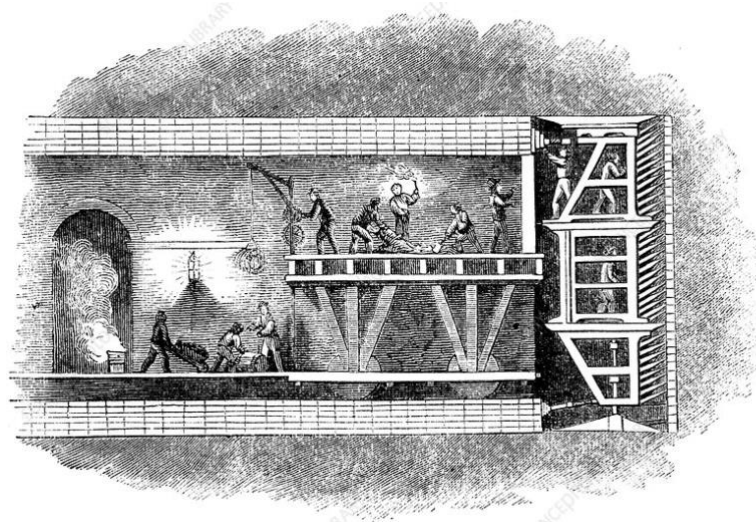


Figura 69: Esquema de Construcción del túnel del Támesis.

Fuente: [Xakata](#), 2019.

El túnel en su punto más bajo estaba a solo 4,3 m debajo del lecho del río. Se encontraron con cuatro fugas de agua importantes, que dejaron fallecidos y accidentados. Se intentaron sellar utilizando campanas de buceo y colocando sacos llenos de arcilla en la parte superior del túnel. Recién en 1840 se finalizó al primer pozo de bombeo, evitando la filtración excesiva de agua. En 1842, se construyó una nueva casa de máquinas junto a un nuevo pozo para albergar maquinaria para el drenaje del túnel.

### 3.3.1.2. Túnel Seikan [37]

El túnel Seikan, cuyo estudio y excavación se inició en 1946 y 1964, respectivamente, es una vía de acceso submarina que conecta la isla de Honshu y Hokkaido, Japón. El túnel principal se completó en 1985. La longitud total del túnel es de 53,8 km y discurre por 23 km debajo del lecho marino; la profundidad del agua alcanza un máximo de 140 m en ciertos puntos. El túnel tal como fue excavado con una sobrecarga mínima de 100 m.

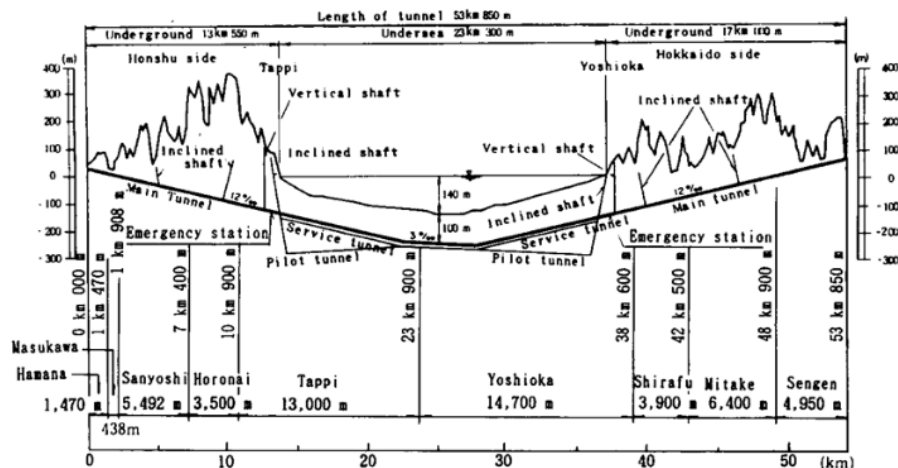


Figura 70: Perfil del túnel Seikan.

Fuente: Matsuo, 1986 [37].

No se pudo utilizar una tuneladora para la excavación porque la roca y el suelo del estrecho de Tsugaru cambiaban de una manera impredecible. Es por ello que, con grandes dificultades, se perforaron y volaron los 53 km de una zona de gran actividad sísmica, tardando 18 años en construirse. En total se utilizaron 6 secuencias de excavación distintas (variación en el posicionamiento de los explosivos) en el tramo subacuático del túnel para poder avanzar con la construcción, dependiendo de la estabilidad del respectivo tipo de roca o suelo en que se encontraban. Hoy en día, el túnel Seikan es el segundo túnel ferroviario más largo del mundo, después del San Gotardo en Suiza, y el segundo con mayor tramo bajo fondo marino, después del Eurotúnel.

### 3.3.1.3. Túnel Xiang'an [38]

El túnel conecta la ciudad de Xiang'an con la isla Xiamen, China. Tiene un largo de 6,05 km de los cuales 4,2 km se encuentran bajo el fondo marino. Se compone de 3 tubos, dos principales para el transporte vehicular y un tercero de servicio. Cuenta con dos pozos de ventilación, instalados en posiciones cercanas al mar. El nivel de máxima profundidad de agua es de 26,2 m, el espesor mínimo de roca es de 28,4 m, y el punto más bajo del túnel está a 65 m bajo el nivel del mar.

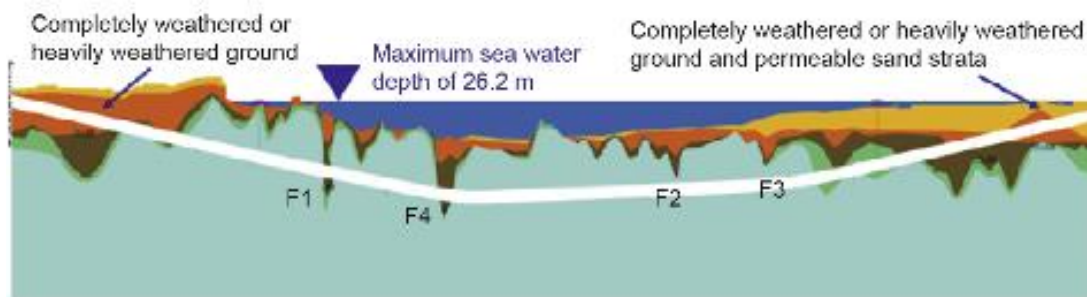


Figura 71: Perfil geológico túnel Xiang'an.

Fuente: Hong, 2019 [38].

El túnel se encuentra principalmente en roca dura levemente erosionada; sin embargo, el suelo completamente degradado en ambas orillas, los estratos de arena permeable a través de los cuales pasa la sección del túnel debajo de la playa poco profunda en el lado de Xiang'an, y los valles de sedimentos profundos completamente o muy degradados en la sección del mar, tuvieron un impacto severo en la construcción del túnel. Por lo tanto, para la sección del túnel debajo de la playa, el bombeo se realizó tanto desde el exterior del túnel como desde el interior del túnel. Para el tramo del túnel bajo el mar, se realizaron medidas técnicas como predicción geológica de avanzada (en el frente de excavación), cementación de avanzada para taponamiento de agua y consolidación a lo largo del perímetro del túnel.

### 3.3.1.4. Túnel de Taihu

El túnel de Taihu es el túnel de autopista más largo de China, alcanzando los 10,8 km de largo. Su construcción inició el 2018 y fue inaugurado en diciembre de 2021. El túnel está ubicado en la provincia de Jiangsu y pasa por debajo del lago Taihu. El túnel hace parte de la autopista Changzhou-Wuxi de 43,9 km y proporciona una alternativa a los pasajeros que se desplazan entre Shangái y Nanjing, la capital de Jiangsu.

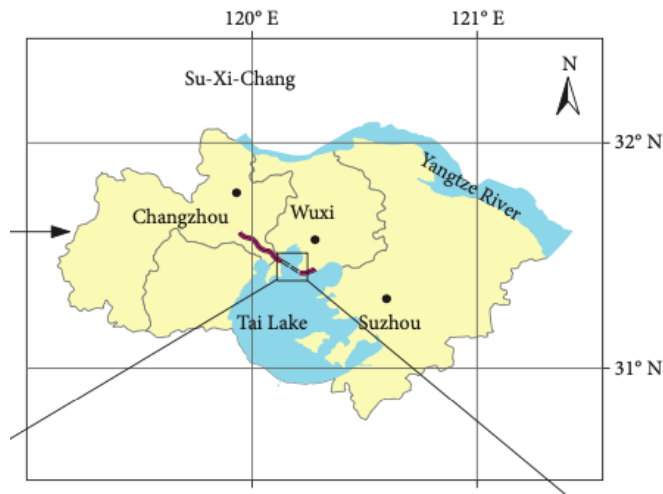


Figura 72: Trazado de túnel Taihu.

Fuente: Wu et al, 2021 [39].

Este túnel se caracteriza por utilizar una metodología de construcción distinta a las presentadas en el trabajo de título: trinchera abierta. En su forma operativa se podría considerar como un túnel subacuático similar a los túneles sumergidos, solo que no se sumergió, sino que se construyó directamente sobre el suelo, como un túnel convencional edificado con esta metodología.

En este método, se diseñó una ataguía de tablestacas de acero de doble fila (DSSP) para dividir la excavación suprayacente en varias zonas cerradas (ver Figura 73). Durante la construcción, se consideraron cuatro zonas como una unidad y se llevaron a cabo simultáneamente diferentes pasos de construcción en cada zona (excavación de la zona, compactación del terreno, elevación de la estructura, material de relleno). Por lo tanto, se estableció una línea de montaje para la excavación del túnel para acelerar la velocidad de construcción. La ventaja más distintiva de este método es que la excavación no cortó el flujo normal del agua del lago y las rutas de navegación, con un bajo impacto ambiental [39].



Figura 73: Metodología de construcción de túnel Taihu.

Fuente: Captura de video “[China’s longest underwater highway under construction](#)”, Youtube.



### 3.3.1.5. Túnel de Gibraltar

La propuesta de una infraestructura que una los continentes de África y Europa el canal de Gibraltar se originó desde el siglo XIX, sin embargo, el proyecto se empezó a estudiar recién desde 1980. Luego, en 1996 se descartó la opción de un puente y se empezó a planificar un enlace fijo subterráneo. Finalmente, el 2003 se consolidó la idea de un túnel de carácter ferroviario.

En diciembre de 2003, España y Marruecos acordaron estudiar la construcción de un túnel ferroviario submarino para conectar Tarifa, España y Punta Malabata, Marruecos. La comunicación entre ambos países para los estudios quedó a cargo de las sociedades SECEGSA y SNED, creadas para este efecto. Para el año 2005 se habían realizado más de 3.000 m de sondeos, alcanzando una cota máxima de sondeo de 325 m desde el fondo marino. La adquisición paulatina de conocimiento de la geología en la parte central del Estrecho mediante estas campañas tuvo una gran relevancia sobre la ingeniería del proyecto y confirmó la necesidad de adaptar la alternativa base a las nuevas condiciones geológicas: rebajando el trazado inicialmente previsto se podría evitar el estrato de arenas bioclásticas permeables. De esta forma, se tienen alternativas básicas de diseño, con una sección típica similar a la del Eurotúnel, con un trazado de túnel de 37,7 km, con 27,7 km bajo el mar, una profundidad marina máxima de 300 m, y con sondeos para la generación de un perfil geológico esquemático. El estrecho de Gibraltar es más susceptible a los terremotos que el canal de la Mancha, debido a que representa la fisura de las placas tectónicas Eurasia y Africana.



Figura 74: Trazado aproximado propuesto para el túnel de Gibraltar.

Fuente: Elaboración propia.

La mayor parte del túnel se encontraría en roca sedimentaria flysch. En el tramo central del alineamiento, donde el mar tiene 300 m de profundidad y la sobrecarga asciende aproximadamente a 200 m, el túnel atravesaría dos de los llamados paleocanales rellenos de brechas arcillosas de muy mala calidad (Figura 75). La muy baja resistencia y la alta deformabilidad de las brechas en combinación con altas presiones de poro de 50 bar que prevalecen en la elevación del túnel provocarían condiciones de compresión, es decir, grandes deformaciones de la abertura y desarrollo de cargas elevadas sobre el revestimiento del túnel. Esto, en combinación con la probable longitud del tramo crítico, su gran profundidad y la distancia de la costa europea y africana (todo lo cual limita las opciones de construcción) hace que cruzar las brechas sea un desafío técnico clave del proyecto [6].

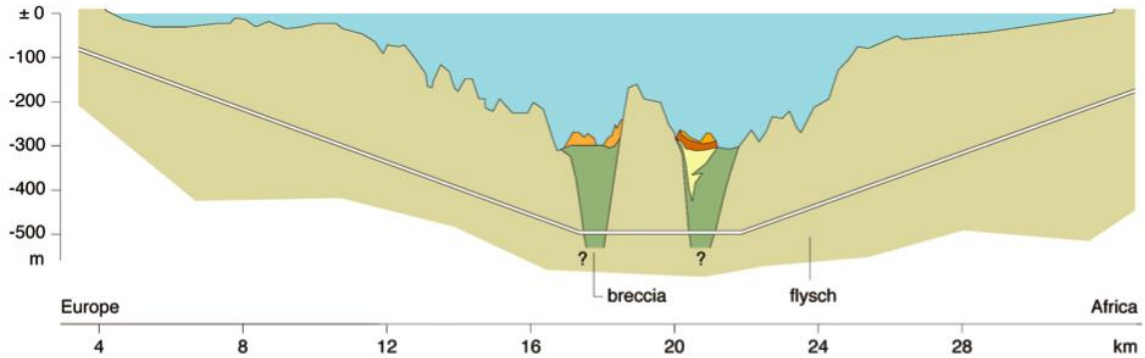


Figura 75: Perfil Longitudinal de túnel de Gibraltar.

Fuente: Anagnostou, 2014 [6].

Hoy en día el proyecto se ha estado encaminado a la obtención de una mayor cantidad de datos sobre el entorno físico del Estrecho de Gibraltar en colaboración con distintas instituciones científicas. Sin embargo, este estancamiento en el avance ha permitido que Gran Bretaña entre al juego, ya que desde su salida de la Unión Europea, los acuerdos de asociación con Marruecos han permitido las conversaciones de construcción del túnel entre Gibraltar (península de soberanía británica) y Tánger, lo que reemplazaría al proyecto hispano-marroquí.

### 3.3.2. Sumergidos

#### 3.3.2.1. Túnel Sufluvial Raúl Uranga-Carlos Sylvestre Begni [40]

Inaugurado en 1969, el túnel subfluvial, que conecta las ciudades de Paraná (provincia Entre Ríos) y Santa Fe (provincia de Santa Fe), Argentina, fue el primer túnel sumergido de Latinoamérica. Se construyó con un total de 36 tubos (circulares) prefabricados de hormigón en dique seco, alcanzando una longitud total de 2,4 km.

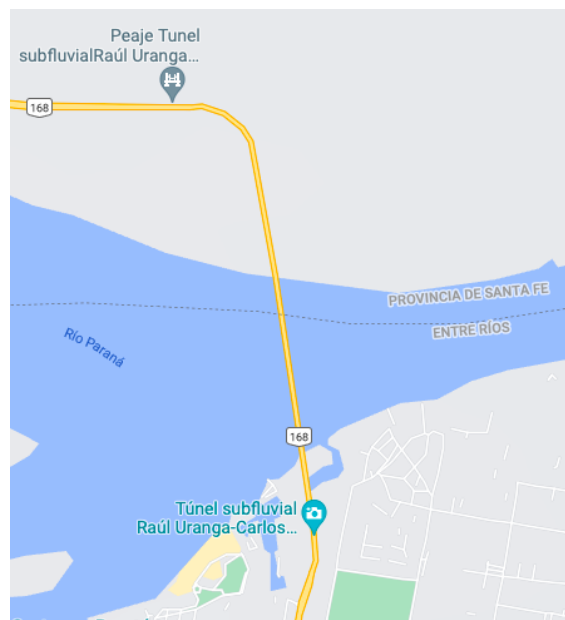


Figura 76: Trazado en planta túnel Paraná-Santa Fe.

Fuente: [Google Maps](https://www.google.com/maps). Consulta diciembre 2021

Una vez hormigonados y fraguados los módulos de túnel, se colocó en el exterior una resina poliéster con fibra de vidrio para proteger e impermeabilizar el tubo. Para la colocación de los tubos se diseñó un pontón, en Holanda, para este proyecto, conocido como “la isla flotante”. Contaba con cuatro columnas de acero de 63 m que se levantan para trasladar la estructura hasta el lugar preciso y se bajan para fijarla.

En el año 1982 se registró una crecida extraordinaria del río Paraná que produjo modificaciones en su lecho. En el tramo más profundo del río, a lo largo de 350 m, la superficie de arena fue erosionada por el paso de las aguas. La solución para preservar el recubrimiento de arena sobre los tubos y evitar futuras erosiones, fue fijar el lecho del río en la zona de emplazamiento del túnel. Para ello, se utilizó una estructura flexible tipo colchoneta, realizada con geotextil. Además se adiciona como elemento resistente cables de acero zincado en su interior ubicados en sentido transversal y longitudinal.



Figura 77: Colchoneta protectora para recubrimiento del túnel Paraná-Santa Fe.

Fuente: Aula Ciudad, 2015 [40].

### 3.3.2.2. Túnel Coatzacoalcos [41]

El túnel Coatzacoalcos es el primer túnel sumergido construido en México, y el tercero de Latinoamérica (después de los túneles de Paraná-Santa Fé y de La Habana), para la conexión del estado de Veracruz entre las ciudades de Coatzacoalcos y Allende, cruzando el río homónimo del túnel, cercano a su desembocadura en el golfo de México.

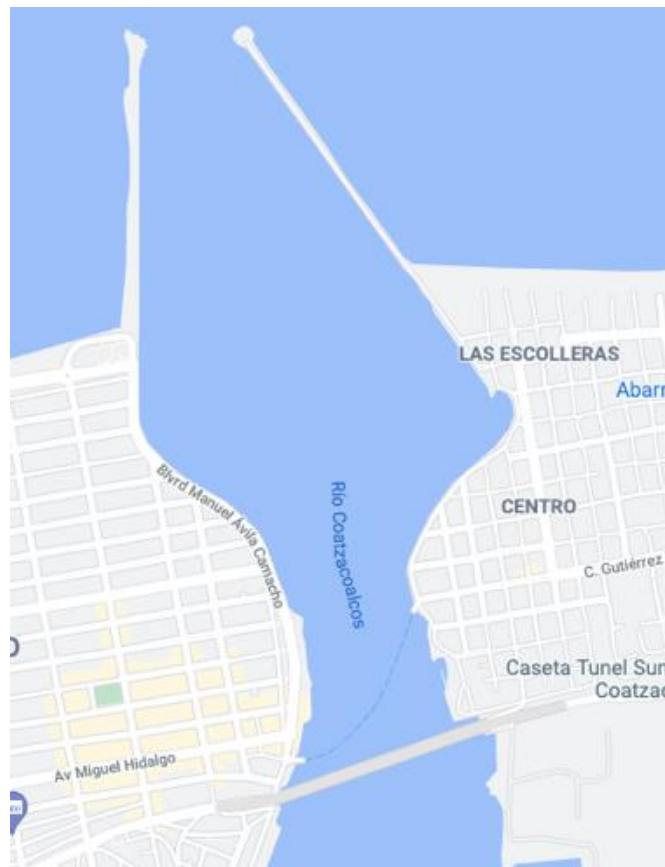


Figura 78: Trazado en planta de túnel Coatzacoalcos.  
Fuente: [Google Maps](#). Consulta diciembre 2021.

La instalación del lecho de grava y la inmersión del primer elemento (TE1) presentó un desafío ya que el pontón multipropósito y el equipo para la inmersión no se pudieron utilizar, debido a la baja altura del portal de ingreso, no pudiendo ejecutarse la conexión hidráulica del elemento. El problema se resolvió extendiendo la sección de corte y cubierta de la rampa (acceso) Allende a lo largo del espacio dispuesto para TE1, cancelando la construcción de este. Los otros cinco elementos nunca fueron renombrados; el primer elemento que se sumergió en 2013 se denominó TE2, el último elemento se denominó TE6.

La excavación y disposición del lugar de construcción de los cinco elementos fue parte del alcance del contratista principal. Su eligió la construcción de los cinco elementos paralelos al río, perpendiculares a su trazado, debido a conflictos con el espacio utilizado, siendo este un aspecto crítico en la etapa de transporte e inmersión, pues después de salir del dique seco, se requirieron remolcadores por encima de la zanja, en línea con la zanja y con su eje longitudinal perpendicular a las corrientes dominantes provenientes del río y del mar, para poder efectuar el giro de estos módulos.

Otro aspecto crítico del proceso de traslado e inmersión de los módulos es que podrían experimentar una corriente de inundación proveniente del mar, debido a la cercanía con este, a gran profundidad. Para planificar las operaciones de transporte e inmersión, se requirió un conocimiento detallado del río, por lo que se inició un programa de monitoreo de las mareas, corrientes y salinidad en el río para generar una base para los preparativos de inmersión.

El río Coatzacoalcos es un río de mareas en la estación seca (baja precipitación), y es principalmente un río de descarga tropical durante la estación húmeda (tormentas tropicales), tanto en corriente como en salinidad. Esto significa que el perfil de salinidad debido a la entrada de sal del mar depende de la temporada, las corrientes, la marea y el clima. El perfil de salinidad después de la prospección resultó ser muy variable, principalmente en la temporada de lluvias. La profundidad mínima del agua salada en el río podría cambiar en metros en cuestión de 2 horas. Por supuesto, las corrientes de refluo que se suman a la descarga del río conducen a un pico en la velocidad de la corriente. De esta forma, se concluyó que las operaciones de inmersión serían más seguras durante la estación seca.

### 3.3.2.3. 2<sup>nd</sup> Coentunnel [42]

El Segundo Coentunnel (2013) en la autopista orbital A10 alrededor de Ámsterdam fue parte del proyecto “Expansión de Capacidad del Coentunnel”, que incluye la construcción de un nuevo túnel, la mejora del Coentunnel existente (1965) y varias modificaciones a la infraestructura de conexión. El nuevo túnel consiste en cuatro módulos de hormigón, alcanzando una longitud de 714 m. Este fue construido a tan solo 13 m de distancia del primer túnel.

Los elementos del túnel se construyeron en el patio de fundición de Barendrecht (Figura 79), cerca de Rotterdam, que es propiedad del Ministerio de Infraestructura y está disponible permanentemente para la construcción de túneles sumergidos en los Países Bajos. Se utilizó encofrado tradicional. El patio de fundición de Barendrecht se encuentra a unos 150 km navegando desde el sitio del proyecto en Ámsterdam, cruzando el Mar del Norte y las esclusas del puerto de Ámsterdam.



Figura 79: Patio de fundición Barendrecht.

Fuente: Heijmans et al, 2014 [42].



En base a este proyecto se pueden identificar distintos aspectos que pudieron condicionar el resultado final, sin embargo, en base a la vasta experiencia de los Países Bajos en túneles sumergidos, fueron previstos y solucionados de buena manera.

1. En un ciclo de una semana, los elementos del túnel se remolcaron desde Barendrecht a Ámsterdam, por medio de dos remolcadores. El pretensado del túnel se diseñó considerando los esfuerzos del elemento en condiciones de oleaje durante su transporte, para soportar olas significativas de 2 m.
2. La integridad estructural del Coentunnel existente podía sufrir daños debido a las obras de construcción, del 2° Coentunnel. Estas podían ser una amenaza para la estabilidad de la cobertura de arena del túnel previo (por vibraciones) o para el equilibrio lateral de la construcción, provocando desplazamientos horizontales, posibles fallas en las juntas y fugas. Para gestionar el riesgo, se especificó que las diferencias de desplazamiento entre dos secciones adyacentes a una distancia intermedia de 30 m deberían permanecer dentro de los límites un diamante de esfuerzos y deformaciones (Figura 80). Además, el cliente exigió una medida de mitigación estructural, por ejemplo, un muro de separación.
  - Los riesgos de vibraciones durante el hincado de pilotes o paredes de tablestacas podrían reducirse fácilmente mediante un método de aplicación sin vibraciones de los pilotes y las paredes. Para el problema de estabilidad se identificaron las posibles fallas, se hizo el análisis estructural del peor de los casos (asumiendo el sistema estructural de mitigación), definido por los expertos, y con los resultados del peor caso real se compararon con las fuerzas de sección asociadas con el diamante de riesgos. Incluso en condiciones muy graves, las fuerzas de la sección (y las deformaciones asociadas) se mantuvieron muy por debajo de los valores permitidos (Figura 80).
  - Después de la evaluación de la constructibilidad, los costos y el cronograma, se eligió un sistema de paredes combinadas como medida de mitigación estructural. Los sistemas de muros combinados se componen de dos secciones principales: tablestacas de acero y pilotes rey. El pilote rey puede ser una viga de acero o un pilote de tubería. En este caso específico se eligieron pilotes de tubos de acero de 1.500 mm de diámetro.

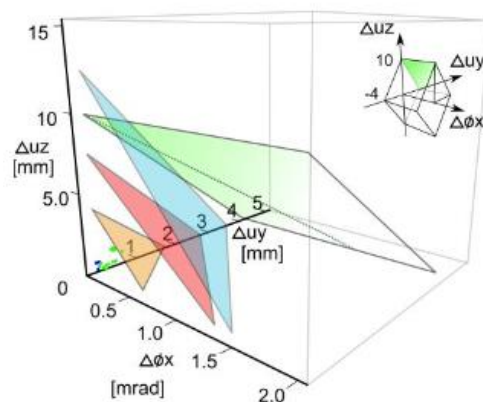


Figura 80: Comparación de deformaciones en análisis de peores casos con diamante de riesgo.

Fuente: Heijmans et al, 2014 [42].

3. El túnel da paso a tres carriles en una dirección y dos en la otra, resultando una sección transversal asimétrica. Dado esto se diseñó tal que la pared permanentemente cargada en tensión, debido a la asimetría, resistiera en términos de durabilidad y ante choques.
4. Las juntas se han provisto de llaves de corte para transferir fuerzas transversales y evitar deformaciones diferenciales. Estas fueron diseñadas para el comportamiento estructural resultante de la carga desigual en el túnel y la rigidez desigual del soporte. También fueron diseñadas para transmitir las cargas de un barco hundido, debido al alto flujo de embarcaciones en el canal. Si el peso de un barco hundido tuviera que ser transferido completamente por las llaves de corte, estas tendrían que ser extremadamente fuertes. Para evitarlo, se decidió dotar a las juntas de una capacidad de deformación adicional para este tipo de carga de emergencia, al permitir que los dientes fallasen de forma controlada.

#### 3.3.2.4. Túnel Fehmarnbelt [43]

El proyecto de túnel Fehmarnbelt, consiste en un túnel sumergido para conectar Alemania y Dinamarca, uniéndose a una ruta que conectaría las ciudades de Hamburgo y Copenhague. El túnel cruzaría el estrecho de Fehmarn, reemplazando el puente que se tuvo como primera opción para la construcción desde principios del 2000, puesto que, a pesar de ser más costoso, tendría menos implementaciones tecnológicas, menor impacto ambiental, sería independiente a las condiciones climáticas y menos riesgoso durante su construcción.



Figura 81: Trazado en planta de túnel Fehmarnbelt.

Fuente: Imagen de [Wikipedia Commons](#).

Este proyecto se va a convertir en el túnel sumergido más largo del mundo, alcanzando los 18 km de largo, con 79 elementos con el mismo tipo de sección de los del túnel Øresund. Los elementos tendrían, en promedio un largo de 217 m, 42 m de ancho y 9 m de alto. Un elemento especial se ubicará aproximadamente cada dos km de túnel, con la misma sección, pero incluyendo un piso adicional inferior (Figura 82) que contará con equipos de operación y mantenimiento. Esto significa que el túnel de Fehmarnbelt será más barato y fácil de mantener, y requerirá mucho menos hormigón, ya que los elementos estándar se pueden hacer más pequeños.



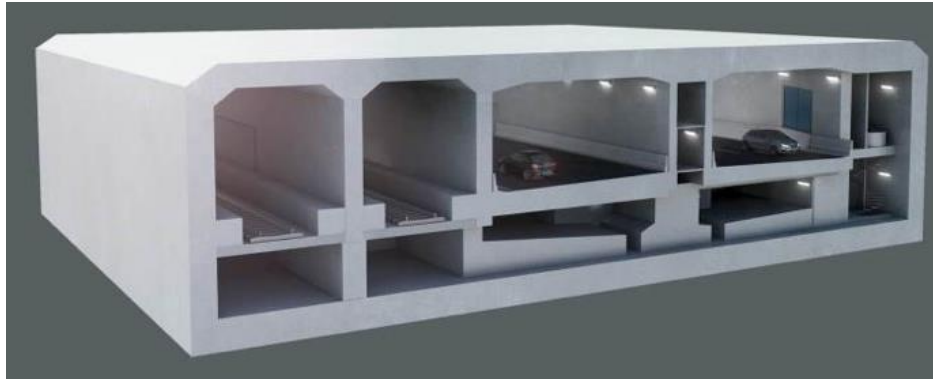


Figura 82: Elemento especial con piso adicional para el mantenimiento.

Fuente: Femern Sund-Bælt [43].

El proyecto ya se encuentra en etapa de construcción desde enero de 2021 y se espera su finalización para mediados del 2029.

## 4. Propuestas en Chile

### 4.1. Túnel Las Mulatas

Dentro de los proyectos que buscan mejorar la conectividad de la ciudad de Valdivia, se incluye la iniciativa de un túnel subfluvial, bajo el río Valdivia, para la conexión entre el sector Las Mulatas y Torobayo-Cutipay. Este sería un túnel sumergido de aproximadamente 300 m, convirtiéndose en el segundo túnel sumergido de Sudamérica, después del túnel Raúl Uranga-Carlos Sylvestre Begni, del río Paraná, Argentina.



Figura 83: Trazado en planta de proyecto de conectividad Las Mulatas y Torobayo-Cutipay.

Fuente: Egaña, 2020 [44].

La necesidad de construcción de este túnel es para permitir la conexión entre ambos sectores sin generar restricción al paso de embarcaciones, riesgos de colisión, ni impacto visual, desestimando la opción de un puente. Por otra parte, la alternativa de túnel excavado se determinó como infactible en el sector [44].



Figura 84: Foto de sector a conectar vía túnel sumergido.

Fuente: [Contracara](#), 2020.

El proyecto ha sido trabajado en el nivel central y regional por la Dirección General de Obras Públicas, la División de Vialidad Urbana y la División de Túneles. El 2020 se recibió luz verde, por parte del Ministerio de Desarrollo Social, para comenzar los estudios de ingeniería, para luego ejecutar el túnel, cuya obra no generará restricciones a la libre navegación por el río Valdivia, proyectándose además como una iniciativa en armonía con el entorno paisajístico de la capital de Los Ríos.

En diciembre de 2021 se publicó la licitación de Ingeniería básica del proyecto. Cabe señalar, que en esta etapa de diseño se desarrollará el estudio para determinar la factibilidad del proyecto de túnel subfluvial, a fin de certificar que continúa siendo económica y socialmente rentable, además de definir las dimensiones principales de la obra, para luego pasar a la fase de ingeniería de detalle. Esta etapa se extenderá por 24 meses y financiamiento proviene de fondos sectoriales del Ministerio de Obras Públicas.

#### 4.2. Túneles Ruta 7

Actualmente, se encuentran en estudio diversos proyectos de la Ruta 7 (carretera Austral) para la conexión por tierra total desde Puerto Montt hasta Puerto Yungay. Entre las localidades de Pichanco y Caleta Gonzalo se proyectan 80 km de ruta, la cual cruza los fiordos Quintupeu, Cahuelmó y Reñihue, como se observa en la Figura 85, evitando así el transbordo a través del fiordo Comau (Leptepu) [44].



Figura 85: Trazado de proyectos actuales Ruta 7.

Fuente: Egaña, 2020 [44].

Hoy en día se está evaluando como primera opción un puente para el cruce de los fiordos Quintupeu y Reñihue, y utilizar trasbordo para el Cahuelmó.

Riddell [45] propone la excavación de túneles subacuáticos bajo los fiordos Quintupeu y Cahuelmó, desde un análisis de prefactibilidad de estos. Los emplazamientos propuestos se encuentran gobernados por cuatro factores principales:

- Ubicación de la falla Liquiñe-Ofqui. Al ser una falla de rumbo el emplazamiento debe encontrarse a un costado de esta, estando soportado en un bloque continuo. Además es necesario tener resguardo con las fallas aledañas o subfallas.
- Geografía del lugar.
- Batimetrías.
- Conexión con vías terrestres.

Para el túnel por Quintupeu, se propuso un emplazamiento que considera la continuación de la carretera austral y la geomorfología de la zona. Las ventajas de este trazado son que constituye la zona más angosta del fiordo y presenta alturas batimétricas menores, por lo que se disminuye el largo del túnel.



Figura 86: Trazado de túnel Quintupeu propuesto por Riddell

Fuente: Riddell, 2011 [45].

Se estima que para Quintupeu, que constituye un fiordo más pequeño, el espesor de sedimentos podría ser entre 20 m y 30 m en la zona más angosta y entre 20 m y 50 m para zonas más profundas.

Para el túnel por Cahuelmó, que no presenta un acceso terrestre cercano actualmente, se presentaba una amplia gama de posibles trazados, la cual se ve acotada por 3 criterios principales:

- Batimetría y altimetría en el fiordo.
- Espesor del sedimento.
- Consideración de una continuidad en la carretera por tierra según topografía del terreno.



Este fiordo presenta una batimetría caracterizada por mayores profundidades que Quintupeu, que se ven acrecentadas de oeste a este, por lo que es más conveniente mantener un emplazamiento cercano al lado oeste del fiordo. Además, dada la batimetría, se esperan espesores de sedimentos de entre 40 a 100 m para menores a mayores profundidades referentes al nivel del mar respectivamente. Dado lo anterior, se optó por ubicar el trazado del túnel Cahuelmó hacia el este del fiordo. Esto implicaría la construcción de la ruta terrestre en dirección sureste.



Figura 87: Trazado de túnel Cahuelmó propuesto por Riddell.

Fuente: Riddell, 2011 [45].

De la Figura 87, se puede observar la proximidad del emplazamiento sugerido con la superficie al costado oeste del fiordo. Esto lleva a cuestionar el valor agregado de un túnel submarino en este sector, siendo que puede ser más económica y expedita la alternativa de continuar el trazado de forma terrestre bordeando el fiordo. Por otra parte, en caso de buscar la continuidad de la ruta que se proyecta actualmente, no se sugiere el uso de túnel subacuático excavado debido a la profundidad requerida que podría alcanzar valores sobre los 250 m bajo el nivel del mar.

### 4.3. Ex-propuesta túnel canal de Chacao

Por el año 2012 se propuso la opción estructural de un túnel excavado subacuático bajo el canal de Chacao para la conexión del continente a la isla grande de Chiloé. Se estimaba que la alternativa era más segura que un puente y factible tanto presupuestaria como técnicamente. Sin embargo, esta opción fue desechada por el MOP ya que, según los cálculos de la División de Desarrollo y Estudios de esa repartición, un túnel en esa zona no baja de los US\$ 1.100 millones, es decir, supera en US\$ 360 millones el tope máximo impuesto por la cartera para ser rentable socialmente (hoy se calcula que un túnel subacuático excavado por el canal podría bajar su valor hasta US\$ 800 millones). Hoy en día, el puente de nombre homónimo al canal, ya se encuentra en etapa de construcción con un 30% de avance aproximadamente y se estima estará operativo para el 2025.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se han revisado los conceptos generales de los tres tipos de túneles subacuáticos (excavados, sumergido y flotantes) y se ordenaron las recomendaciones e indicaciones principales para el diseño y la construcción de éstos, lo mismo que los aspectos críticos a considerar en cada caso. De esta forma, se establece que se cumplió con el objetivo general de esta memoria, que es la realización de un review en torno al estado del arte en diseño y construcción de túneles subacuáticos.

La descripción y análisis de los diversos proyectos investigados permite reconocer las características que más destacan al momento de desarrollar el diseño o de ejecutar la construcción de los tres tipos de túneles subacuáticos. Además, permite comprender con cuanta experiencia cuentan las naciones respecto al uso de estos, concluyendo que Noruega es el país con mayor experiencia en túneles subacuáticos excavados en roca, y que Países Bajos es el símil con los túneles sumergidos, tanto así que cuenta con instalaciones especiales ya construidas para la fabricación de los elementos que los conforman. También, los proyectos de los estrechos de Gibraltar y Fehmarn, y los de la Ruta E39, proporcionan una idea general de hacia dónde se están proyectando los túneles de los tres tipos y los niveles de complejidad que están alcanzando.

En base a la revisión de la bibliografía, apoyada por los casos entregados, se entregan una serie de conclusiones (recomendaciones) para un correcto desarrollo de las etapas indicadas.

### 1. Túneles Excavados bajo fondo marino:

- a. En caso de que se pueda, ejecutar la excavación en roca, bajo los suelos sedimentados.
- b. Ejecutar sondajes con desviación de acuerdo con la inclinación de las discontinuidades estimadas, en especial en las zonas más críticas de los trazados, que se suelen situar en los tramos de mayor profundidad del lecho marino.
- c. Definir la cobertura de roca mínima en las zonas críticas, tales como fallas, fracturas, conductos kársticos, rocas débiles o permeables como brechas (caso estrecho Gibraltar).
- d. Tomar las precauciones de mitigación en caso de arcillas en fallas debido a su expansividad.
- e. Realizar sondajes sistemáticos en el frente de avance para identificar el macizo rocoso, filtraciones de agua, etc.
- f. Liberar presión de poros mediante pozos de bombeo internos o externos al túnel, o aumentar capacidad del frente de avance mediante grouting compresivo.
- g. Para excavación convencional se recomienda diseñar con sistema abierto de drenaje y tomando las recomendaciones utilizadas en los túneles noruegos, de exploración mediante sondajes y caudales máximos de filtración.

### 2. Túneles Sumergidos:

- a. Al no poder ejecutarse sondajes de avance, se requieren sondajes marinos a lo largo del trazado.
- b. Tener cuidado en suelos de potencial licuefacción.



- c. Se recomiendan módulos prefabricados de hormigón estructural, debido a que es uno de los materiales más utilizados a nivel nacional.
- d. Utilización de juntas de goma para entregar flexibilidad, diseñando las juntas para soporte de sismos futuros.
- e. Establecer sectores de fabricación (dique seco) cercano al proyecto, para evitar transportes de largos tramos temporales (caso de Coentunnel, u otros túneles en Países Bajos).
- f. Tener precaución con la impermeabilización de los módulos tanto en su posición final como en el traslado e inmersión (evitar casos como el túnel Øresund).
- g. Se requieren de equipos especializados de buzos para los trabajos bajo el agua.

### 3. Túneles Flotantes:

- a. Se recomienda el diseño de túneles flotantes en forma de tubo circular, para que las paredes se encuentran a tracción pura y se equilibren las cargas principales.
- b. Las bases de diseño son similares a las del túnel sumergido, pero con un equilibrio permanente en otra posición.
- c. A menor diámetro menores son las aceleraciones y reacciones sobre el tubo.
- d. Optimizar la profundidad. A mayor profundidad mayores las cargas hidrostáticas. A menor profundidad se suelen encontrar mayores cargas hidrodinámicas por oleaje.
- e. El sistema de cables de anclaje o sistema de pontones también afecta las respuestas estructurales del túnel. Se recomiendan sistemas de anclajes con inclinación.
- f. Se debe permitir el movimiento longitudinal en uno de los extremos del túnel, tal como se suele hacer en puentes. Los momentos flectores ocasionados por cargas sísmicas siempre se alcanzan cerca de la sección media del túnel.
- g. La investigación del comportamiento del SFT debe continuar. Se recomienda continuar con los estudios ante impactos accidentales. También se recomienda una mayor investigación de túneles con sistema de estabilización con pontones.
- h. Se aconseja el seguimiento de los proyectos de túneles flotantes de la Ruta E39 en Noruega.

Respecto a las propuestas de proyectos presentadas en Chile, es evidente que existe la necesidad de estructuras que permitan la conexión entre terrenos divididos por importantes masas acuáticas superficiales. Estos contextos geográficos han abierto la discusión a la posibilidad de construir túneles para la conexión bajo fuentes acuáticas, principalmente viales. En particular, la propuesta de túneles bajo los fiordos de la región de Aysén nace del símil que tienen esas condiciones geográficas con los fiordos noruegos. De hecho, el trabajo de Riddell está fuertemente basado en la experiencia noruega para definir los trazados propuestos. Por su parte, el túnel del río Valdivia nace también como un análogo al túnel del río Paraná, guardando las dimensiones. Dadas las tecnologías actuales, y la mayor experiencia mundial en esta clase de túneles subacuáticos, debiera ser un túnel de una ejecución mucho más simple.

Evidentemente queda mucho más estudio para la correcta comprensión de estos túneles a nivel de ingeniería en el contexto nacional. Existen más geografías locales que pueden dar que hablar a futuro para la proyección de túneles subacuáticos (ríos navegables en regiones de Los Ríos y de Los Lagos, estuarios, fiordos magallánicos), que podrían permitir generar un país más conectado por tierra, permitiendo el transporte marítimo superficial y reduciendo el impacto visual y ambiental que generarían otras soluciones para el transporte o conectividad.

## 6. Bibliografía

- [1] C. Oteo Mazo. Septiembre, 2016. El agua y los túneles. Revista de Obras Públicas. N° 3579: 6-16.
- [2] Norwegian Tunnelling Society NFF. 2009. Publication N°18: Subsea Tunnels. Oslo, Noruega. 107p.
- [3] Formación Universitaria. Octubre, 2020. Artículos tipo review y tipo revisión bibliográfica. La Serena, Chile. SCielo. 13 (n°5).
- [4] R. Guevara Patiño. 2016. El estado del arte en la investigación. Revista Folios de Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá, Colombia. N°44: 165-179.
- [5] EMB Construcción. Diciembre, 2015. Túneles con TBM en Chile. [en línea] Revista EMB <<http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=3429&ni=tuneles-con-tbm-en-chile#>>. [Consulta: octubre 2021].
- [6] G. Anagnostou. 2014. Some Critical Aspects of Subaqueous Tunnelling. Muir Wood Lecture. Zurich, Suiza. 19p.
- [7] International Tunneling and Underground Space Association. Construcción de Túneles Subacuáticos. [en línea] <<https://tunnel.ita-aites.org/es/how-to-go-underground/construction-methods/subaquatic-tunnelling>> [Consulta: mayo 2021].
- [8] E. Stamhuis. Marzo, 1964. Túnel bajo el agua. Revista Informes de la Construcción. 16 (n° 158): 12p.
- [9] ITA WG 11 Immersed and Floating Tunnel. Mayo, 1999. Immersed Tunnels - a better way to cross waterways? ITA newsletter Tribune. 18p.
- [10] K. Kvalheim Dunham. 2016. Coastal Highway Route E39 - extreme crossings. Oslo, Noruega. Elsevier, Transportation Research Procedia. 14: 494-498.
- [11] International Tunneling and Underground Space Association. Cómo ir en subterráneo. [en línea] <<https://tunnel.ita-aites.org/es/how-to-go-underground>> [Consulta: mayo 2021].
- [12] ITA WG 2 Research. Mayo, 2015. Strategy for site investigation of tunnelling projects. ITA Report N°15. 31p.
- [13] P. D. Jakobsen & T. Babendererde. 2017. Pre-investigations for TBM tunnelling. En: Proceedings of the World Congress: Surface Challenges - Underground Solutions. Bergen, Noruega. 8p.
- [14] ITA WG 19 Conventional Tunnelling. Abril, 2009. General report on conventional tunnelling method. ITA Report N°2. 27p.
- [15] ITA WG 11 immersed and floating tunnels. Abril, 2016. An owners guide to Immersed Tunnels. ITA Report N°7. 11p.
- [16] W. Lin, M. Lin, H. Yin & X. Liu. 2019. Design of immersed tunnel and how we research submerged floating tunnel. Zhuhai, China. IntechOpen. 16p.
- [17] J. Saveur & W. Grantz. 1997. Chapter 3: Structural Design of Immersed Tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology. 12 (n° 2): 93-109.
- [18] W. Grantz, L. Tan, E. Sørensen & H. Burger. 1997. Chapter 4: Waterproofing and Maintenance. Tunnelling and Underground Space Technology. 12 (n° 2): 111-124.

- [19] T. Yamamoto, A. Tateishi & M. Tsuchiya. Agosto, 2014. Seismic design for immersed tube tunnel and its connection with TBM tunnel in Marmaray project. En: 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Estambul, Turquía. 12p.
- [20] I. Egeli & C. Gurbuz. 2017. Dynamic of an immersed tunnel in Izmir. Izmir, Turquía. pp 103-111.
- [21] Y. Xiang & Y. Yang. 2016. Challenge in design and construction of submerged floating tunnel and state-of-art. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Zheijang, Hangzhou, China. Elsevier, Procedia Engineering. 166: 53-60.
- [22] D. Won, J. Seo, S. Kim & W. S. Park. Diciembre, 2019. Hydrodynamic behavior of submerged floating tunnels with suspension cables and towers under irregular waves. Corea. Mdpi, Applied Sciences. 9 (n° 5495): 27p.
- [23] Det Norske Veritas AS (DNV). Abril, 2014. Environmental Conditions and Environmental Loads. Recommended Practice DNV-RP-C205. 182p.
- [24] G. Martire, M. Esposito, B. Faggiano, F. M. Mazzolani, R. Landolfo, A. Zollo & T. A. Stabile. 2009. The structural response of submerged floating tunnel to multi-support seismic excitations. Universidad Federico II de Nápoles, Italia. Taylor & Francis Group. pp 19-25.
- [25] C. Lent. 2004. Mega Structures - The Channel Tunnel. [Película] National Geographic Channel.
- [26] Robbins tbm. The Channel Tunnel [en línea] <<https://www.robbinstbm.com/es/projects/the-channel-tunnel/>> [Consulta: noviembre 2021].
- [27] F. Tatsuoka, K. Uchida & T. Ouchi. 2000. Geotechnical engineering aspects of Trans-Tokyo bay highway project. En: ISMR International Symposium. Melbourne, Australia. 30p.
- [28] F. Diaz Pardo. Proyecto Marmaray: Túnel Ferroviario bajo el Bósforo en Estambul. Geotren. [en línea] <<https://www.geotren.es/blog/proyecto-marmaray-tunel-ferroviario-bajo-el-bosforo-en-estambul-novedades/>> [Consulta: noviembre 2021].
- [29] Revista Construcción y Vivienda. Abril, 2021. Túnel de Marmaray, Estambul, Turquía: Una megaestructura que une Europa y Asia por debajo del mar. [en línea] <<https://www.construccionyvivienda.com/2021/04/14/tunel-de-marmaray-estambul-turquia-una-megaestructura-que-une-europa-y-asia-por-debajo-del-mar/>> [Consulta: noviembre 2021].
- [30] Blog más que ingeniería. El puente-túnel de Oresund: cambiando el mapa de Europa. [en línea] <<https://masqueingenieria.com/blog/puente-de-oresund/>> [Consulta: noviembre 2021].
- [31] 2006. Mega Estructuras: De Dinamarca a Suecia. [Película] National Geographic Channel.
- [32] W. Stefanussen. 2009. Experiencia Noruega en Proyectos Emblematicos de Túneles. Sweco. Statens Vegvesen. 25p.
- [33] W. Stefanussen. 2009. Métodos constructivos noruegos. Sweco. Statens Vegvesen. 28p.
- [34] J. Jonker & P. Jovanovic. The tunnelling industry in Holland - Revealing case study examples and lessons learnt from recent projects and the future outlook for underground construction in the region. Utrecht, Países Bajos. KIVI NIRIA TTOW. 52p.
- [35] O. Ellevset. Noviembre, 2014. Norwegian Coastal Highway Route E39. Oslo, Noruega. Statens Vegvesen. 34p.
- [36] Blog Engineering-Timelines. Thames Tunnel. [en línea] <<http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=436>> [Consulta: diciembre 2021].
- [37] S. Matsuo. 1986. An Overview of the Seikan Tunnel Prooject. Tunnelling and Underground Space Technology. n° 3/4: 323-331.

- [38] K. Hong. Diciembre, 2017. Typical Underwater Tunnels in the Mainland of China and Related Tunneling Technologies. Elsevier, Procedia Engineering. 3 (n° 6): 871-879.
- [39] J. Wu, Z. Zhou, W. Xia, H. Wang & Z. Fang. 2021. A novel excavation and construction method for an extra-long underwater tunnel in soft soils. Nanjing, China. Hindawi, Advances in Civil Engineering. 17p.
- [40] Aula Ciudad. Junio, 2015. Túnel Subfluvial. Gobierno de la Ciudad de Santa Fe, Secretaría de la Cultura. N° Fascículo 17. 39p.
- [41] G. V. P. De Rooij & A. Van Schie. 2013. Immersion Operations of the Coatzacoalcos Tunnel. Woerden, Países Bajos. Volker Construction International. 18p.
- [42] R.W.M.G. Heijmans, C. van der Vliet & F. Deurinck. 2014. The 2nd Coentunnel - Design requirements from construction and service life risks. En: Proceedings of the World Tunnel Congress: Tunnels for a better life. Foz do Iguaçu, Brasil. 8p.
- [43] Femern Sund-Bælt. The Fehmarnbelt tunnel. [en línea] <<http://femern.com/the-tunnel/fehmarbelt-tunnel/>> [Consulta: diciembre 2021].
- [44] M. Egaña. 2020. Próximos Desafíos de la División de Túneles. En: Concrete Underground, Santiago, Chile. Instituto del Cemento y del Hormigón. 35p.
- [45] G. Riddell Robles. 2011. Estudio de pre-factibilidad de túneles submarinos en fiordos de la carretera austral. Memoria de Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 109p.

# Anexos

## Anexo A

### Detallamiento de características del terreno en etapas de ingeniería [12]

Tabla 4: Recomendaciones de detallamiento de las características del terreno en la etapa de Factibilidad.

| Etapa de Proyecto       | Resultados Esperados   | Medios de Investigación   |
|-------------------------|--|---|
| Estudio de factibilidad | Mapas geológicos e hidrogeológicos.  | Mapas de topografía regional, geología, hidrogeología/agua subterránea, riesgo sísmico.   |
|                         | Mapa de riesgo natural, cuando sea apropiado.  |   |
|                         | Perfil geológico longitudinal.   | Información de estudios de campo y/o de proyectos similares.<br>Información geofísica puede proporcionar información útil.<br>Investigaciones limitadas del sitio para confirmar condiciones geológicas o del agua subterránea extremadamente críticas si es necesario. |
|                         | Perfil geotécnico y geomecánico longitudinal con la identificación cualitativa de las clases de comportamiento del suelo y la identificación de los principales peligros (con evaluación cualitativa). |   |
|                         | Preparación de registro de riesgos.  |   |

Fuente: ITA WG 2, 2015 [12].

Tabla 5: Recomendaciones de detallamiento de las características del terreno en la etapa de diseño preliminar.

| Etapa de Proyecto | Resultados Esperados   | Medios de Investigación  |
|-------------------|--|--|
| Diseño Preliminar | Perfil geológico longitudinal (1:5.000 a 1:2.000).   | Geofísica y perforaciones en los portales y pozos.   |
|                   | Perfil geotécnico y geomecánico longitudinal (1:5.000 a 1:2.000) con la caracterización cuantitativa de las clases de comportamiento de suelo e identificación de riesgos. | Perforaciones a lo largo de la alineación.<br>Fuentes de agua y monitoreo de agua.<br>Ensayos de laboratorios. |
|                   | Secciones geológicas y geotécnicas en los portales (1: 500 a 1: 200).  | Mapeo de afloramientos y superficies.  |
|                   | Pozos de acceso/ventilación de secciones geológicas y geotécnicas.   | Mediciones in situ y ensayos de permeabilidad cuando proceda.  |
|                   | Caracterización preliminar del régimen hidrogeológico.   | Galerías/pozos de exploración, si es necesario.  |
|                   | Actualización del registro de riesgos.   |  |

Fuente: ITA WG 2, 2015 [12].

Tabla 6: Recomendaciones de detallamiento de las características del terreno en la etapa de diseño detallado

| Etapa de Proyecto       | Resultados Esperados  | Medios de Investigación   |
|-------------------------|---|---|
| <b>Diseño Detallado</b> | Perfil geológico longitudinal (1:200 a 1:1.000).  | Perforaciones adicionales tanto en los portales como a lo largo de la alineación.                 |
|                         | Perfil geotécnico y geomecánico longitudinal detallado (1:2.000 a 1:1.000) con caracterización cuantitativa del comportamiento del suelo, soportes y distribución en la sección, riesgos identificados, control en la construcción. |   |
|                         | Secciones geológicas y geotécnicas en los portales, pozos y a lo largo del túnel (1:200 a 1:100).   | En casos/lugares específicos, los ensayos geofísicos pueden proveer información útil.             |
|                         | Definición del conjunto detallado de parámetro de diseño y su variabilidad.   | Excavación de secciones experimentales a lo largo de la alineación del túnel, si fuera necesario. |
|                         | Caracterización detallada del régimen hidrogeológico.   | Seguir el programa de monitoreo de fuentes de agua y agua subterránea.                            |
|                         | Actualización del registro de riesgos.  |   |
|                         | Especificaciones para investigación durante la construcción.  |   |

Fuente: ITA WG 2, 2015 [12].



## Anexo B

### Tablas para estimación de trazado de túnel excavado

Tabla 7: Pendientes máximas admisibles % para caminos (tabla 3.204.301.A Manual de Carreteras 2019).

| CATEGORIA  | VELOCIDAD DE PROYECTO (km/h) |      |    |    |    |    |    |     |     |     |
|------------|------------------------------|------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|            | ≤30                          | 40   | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| Desarrollo | 10-12                        | 10-9 | 9  | -  | -  | -  | -  | -   | -   | -   |
| Local      | -                            | 9    | 9  | 8  | 8  | -  | -  | -   | -   | -   |
| Colector   | -                            | -    | -  | 8  | 8  | 8  | -  | -   | -   | -   |
| Primario   | -                            | -    | -  | -  | -  | 6  | 5  | 4,5 | -   | -   |
| Autorrutas | -                            | -    | -  | -  | -  | 6  | 5  | 4,5 | -   | -   |
| Autopistas | -                            | -    | -  | -  | -  | 5  | -  | 4,5 | -   | 4   |

Fuente: Manual de carreteras 2019, MOP.

Tabla 8: Túneles subacuáticos en Noruega. Cobertura mínima de roca y nivel marino más bajo.

| No. | Proyecto            | Completado | Tipo de roca principal                  | Sección Transversal m <sup>2</sup> | Largo km  | Cobertura de roca mínima m | Nivel de mar más profundo m |
|-----|---------------------|------------|---|------------------------------------|-----------|----------------------------|-----------------------------|
| 1   | Vardø               | 1981       | Shale, sandstone                        | 53                                 | 2,6       | 28                         | 68                          |
|     | Karmsund (Statpipe) | 1984       | Greenstone, sandstone, phyllite, gneiss | 27                                 | 4,7       | 58                         | 180                         |
|     | Hjartøy (Oseberg)   | 1986       | Gneiss                                  | 26                                 | 2,3       | 26                         | 110                         |
| 2   | Ellingsøy           | 1987       | Gneiss                                  | 68                                 | 3,5       | 42                         | 140                         |
| 3   | Valderøy            | 1987       | Gneiss                                  | 68                                 | 4,2       | 34                         | 137                         |
| 4   | Kvalsund            | 1988       | Gneiss                                  | 43                                 | 1,6       | 23                         | 56                          |
| 5   | Godøy               | 1989       | Gneiss                                  | 52                                 | 3,8       | 33                         | 153                         |
| 6   | Hvaler              | 1989       | Gneiss                                  | 45                                 | 3,8       | 35                         | 121                         |
| 7   | Flekkerøy           | 1989       | Gneiss                                  | 46                                 | 2,3       | 29                         | 101                         |
| 8   | Nappstraumen        | 1990       | Gneiss                                  | 55                                 | 1,8       | 27                         | 63                          |
| 9   | Fannefjord          | 1990       | Gneiss                                  | 54                                 | 2,7       | 28                         | 100                         |
| 11  | Byfjord             | 1992       | Phyllite                                | 70                                 | 5,8       | 34                         | 223                         |
| 13  | Freifjord           | 1992       | Gneiss                                  | 70                                 | 5,2       | 30                         | 100                         |
|     | Kollsnes (troll)    | 1994       | Gneiss                                  | 45 - 70                            | 3,8       | 7 (at piercing)            | 180                         |
| 14  | Hitra               | 1994       | Gneiss                                  | 70                                 | 5,6       | 38                         | 264                         |
| 15  | Tromsøysund         | 1994       | Gneiss                                  | 2 x 60                             | 3,4       | 45                         | 101                         |
| 16  | Bjørøy              | 1996       | Gneiss                                  | 53                                 | 2,0       | 35                         | 82                          |
| 18  | North Cape          | 1999       | Shale, sandstone                        | 50                                 | 6,8       | 49                         | 212                         |
| 19  | Oslofjord           | 2000       | Gneiss                                  | 79                                 | 7,2       | 32                         | 130                         |
| 20  | Frøya               | 2000       | Gneiss                                  | 52                                 | 5,2       | 41                         | 157                         |
| 22  | Bømlafjord          | 2000       | Greenstone, gneiss, phyllite            | 74                                 | 7,9       | 35                         | 260                         |
| 24  | Eiksund             | 2007       | Gneiss, gabbro, limestone               | 71                                 | 7,8       | 50                         | 287                         |
| 26  | Nordåsstraumen      | 2008       | Gneiss                                  | 2 x 74                             | 2,6       | 15                         | 19                          |
| 27  | Finnfast            | 2009       | Gneiss, amphibolite                     | 50                                 | 5,7 + 1,5 | 44                         | 150                         |
| 28  | Atlantehavs tunnel  | 2009       | Gneiss                                  | 71                                 | 5,7       | 45                         | 249                         |

Fuente: NFF, 2009 [2].

Tabla 9: Túneles noruegos que presentaron inestabilidad.

| TÚNEL      | SECCIÓN<br>TRANSVERSAL<br>m <sup>2</sup> | PROFUNDIDAD<br>DE AGUA<br>m | COBERTURA<br>DE ROCA<br>m | COMENTARIOS                       |
|------------|--|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Vollsfjord | 16                                       | 14                          | 40                        | Colapso tras inundación           |
| Vardø      | 53                                       | 10                          | 35                        | Derrumbe en el frente             |
| Vardø      | 53                                       | 20                          | 45                        | Derrumbe en el frente             |
| Ellingsøy  | 68                                       | 70                          | 45                        | Derrumbe en el frente             |
| Karmsund   | 27                                       | 80                          | 55                        | Derrumbe evitado                  |
| Slemmestad | 10                                       | 50                          | 35                        | Roca suelta/tendencia al derrumbe |

Fuente: NFF, 2009 [2].

## Anexo C

### Factores de carga para cálculo de solicitaciones sobre túneles sumergidos

Tabla 10: Indicación de incrementos de tensión permisibles o factores de carga para combinaciones de carga para túneles sumergidos.

| Factor de Resistencia (S) o Factor de Carga (F)   | Tipo de Estructura                                   |  |  |
|---|--|--|--|
|   | I (S): Túnel de tráfico de armazón de acero (U.S.A.) | II (S): Túnel de hormigón reforzado con membrana impermeable (Japón) | III (F): Túnel de tráfico de hormigón reforzado (Países Bajos) |
| <b>A. CARGA BASE</b><br>Combinación desfavorable de:<br>- Carga muerta<br>- Material de relleno<br>- Sobrecarga y carga viva<br>- Presión lateral de terreno<br>- Presión de agua con nivel de agua bajo a medio alto   | 1,00   | 1,00   | 1,50*  |
| <b>B. FACTOR DE TENSIÓN TOTAL POR LA COMBINACIÓN DE CARGA BASAL CON CUALQUIERA DE LAS SIGUIENTES:</b><br>B1. Nivel de agua extremadamente alto<br>B2. Ancla suelta o en arrastre<br>B3. Carga de barco hundido<br>B4. Restricciones de temperatura<br>B5. Asentamientos diferenciales<br>B6. Restricciones de temperatura y asentamientos diferenciales<br>B7. Explosión interna<br>B8. Terremoto, asentamientos diferenciales<br>B9. Terremoto, restricciones de temperatura, asentamientos diferenciales<br>B10. Condición de levantamiento | 1,25<br>1,25<br>1,25<br>-<br>-<br>-<br>-<br>-<br>-   | 1,00<br>1,30**<br>1,15<br>1,50<br>1,65<br>1,30                       | 1,50***<br>-<br>-<br>1,00<br>-<br>-                            |
| NOTA: Un guión indica que es sabido que este aspecto no se revisa o no es crítico<br>* Se refiere a la práctica holandesa: el factor de carga utilizado para el estado límite último es 1,70, reducido por el factor material incorporado<br>** El factor 1.30 también incluye la condición de nivel de agua extremadamente alta<br>*** $1,40 \cdot A + 1,15 \cdot B1$  |  |  |  |

Fuente: Saveur & Grantz, 1997 [17].

## Anexo D

### Vibraciones inducidas por vórtice

En dinámica de fluidos, las vibraciones inducidas por vórtices (VIV) son movimientos inducidos en cuerpos que interactúan con un flujo de fluido externo, producidos por irregularidades periódicas en este flujo.

Dado que los fluidos reales siempre presentan algo de viscosidad, el flujo alrededor del cilindro se ralentizará mientras se encuentre en contacto con su superficie, formando la llamada capa límite. En algún momento, sin embargo, esa capa puede separarse del cuerpo debido a su excesiva curvatura. Luego se forma un vórtice, cambiando la distribución de la presión a lo largo de la superficie. Cuando el vórtice no se forma simétricamente alrededor del cuerpo (con respecto a su plano medio), diferentes fuerzas de elevación se desarrollan en cada lado del cuerpo, lo que lleva a un movimiento transversal al flujo.

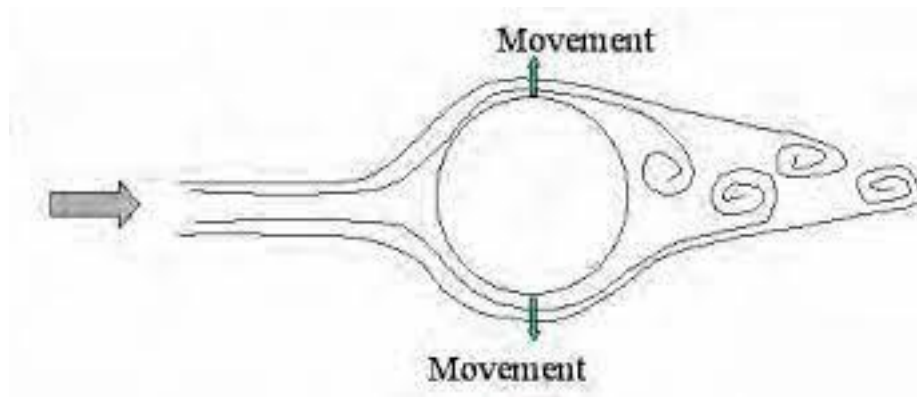


Figura 88: Efecto de formación de vórtices y movimiento debido a estos.

Fuente: [Hmong wiki](#).