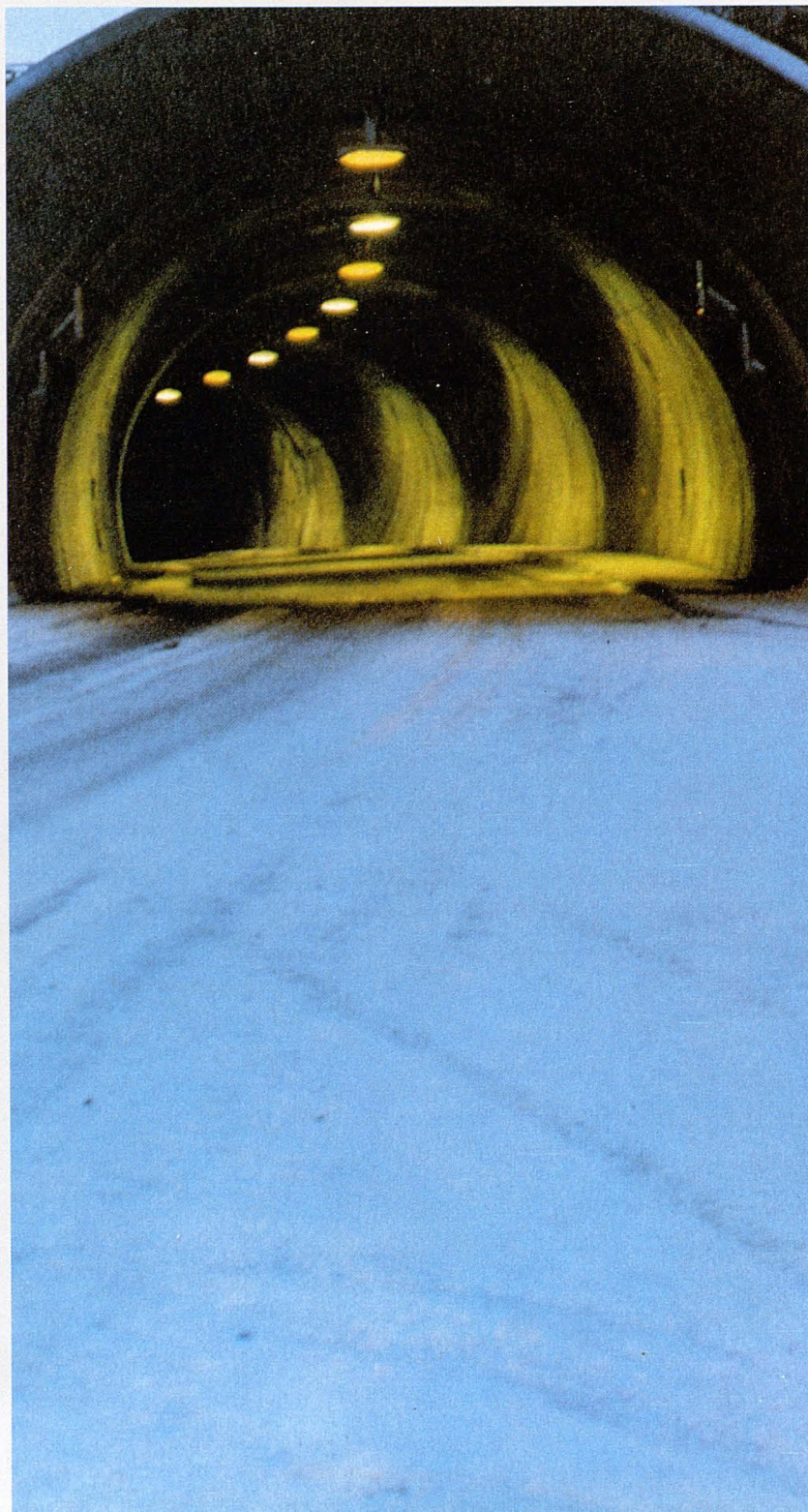


ESPAIS

REVISTA DEL DEPARTAMENT DE POLÍTICA TERRITORIAL I OBRES PÚBLIQUES

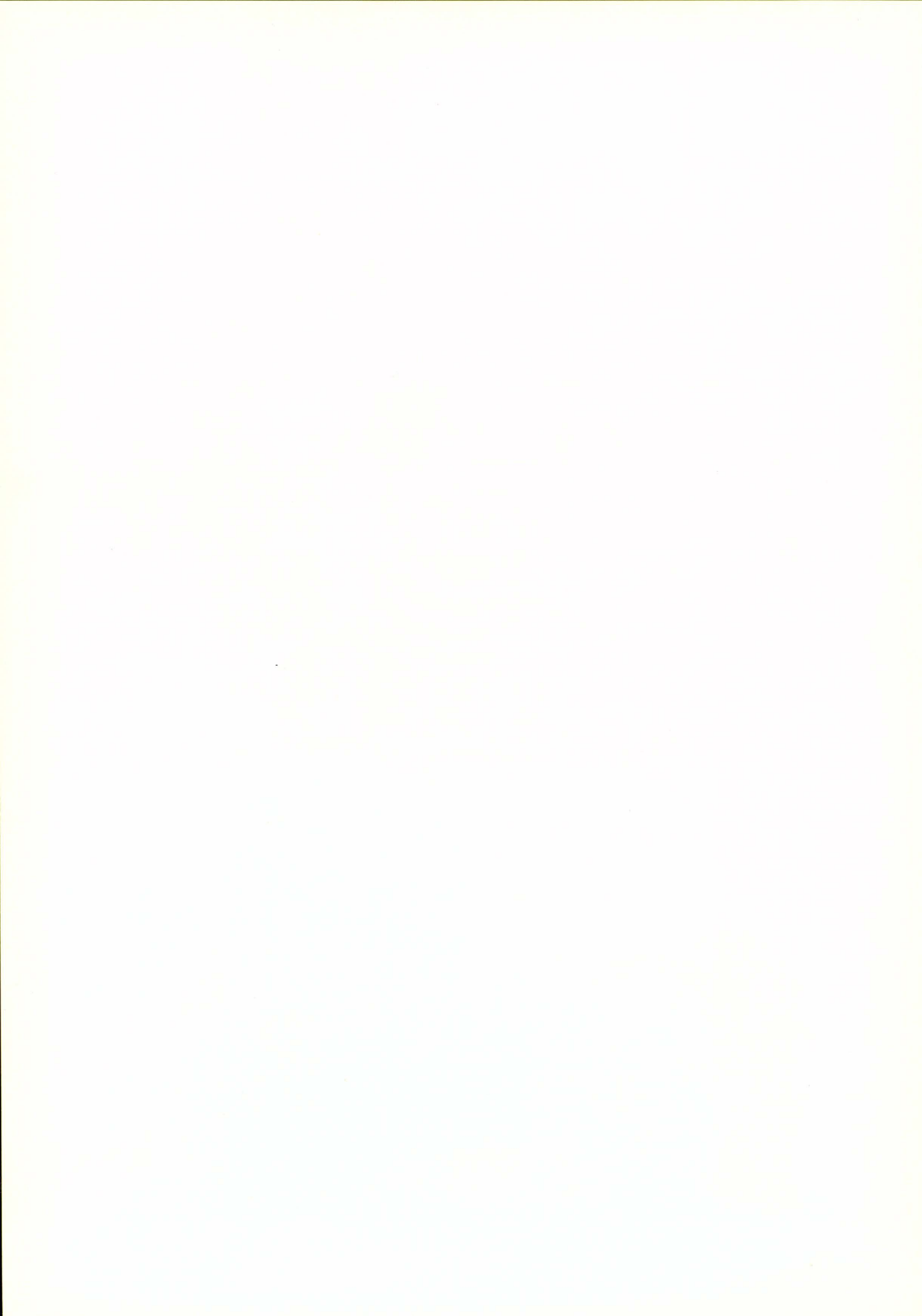
Los sorprendentes
túneles submarinos
de carretera noruegos
José Antonio Juncà

SEPARATA
EN CASTELLANO



Generalitat de Catalunya
Departament de
Política Territorial i Obres
Públiques

Núm. 28
març-abril
1991



Maestros en ingeniería subterránea, tienen actualmente en servicio casi 30 km de carreteras perforadas bajo el mar

Los sorprendentes túneles submarinos de carretera noruegos

José Antonio Juncà Ubierna

DR. INGENIERO DE CAMINOS

Noruega es, por lo que se refiere a túneles, uno de los países líderes indiscutibles, tanto por la cantidad y calidad de sus obras subterráneas como por su desarrollo tecnológico; líder mundial en número de túneles por habitante, mantiene un fuerte ritmo de construcción de nuevas infraestructuras bajo tierra.

Rasgos característicos de la ingeniería subterránea noruega son: la gran variedad tipológica de sus túneles y estructuras excavadas en roca; la aplicación de técnicas de construcción a bajo coste, logrando aunar de forma eficaz las técnicas más modernas tecnológicas con el perfeccionamiento y el dominio de sistemas consagrados, como el de perforación con explosivos en el que son maestros.

Noruega cuenta con 700 túneles de ferrocarril, más de 5.000 km de túneles hidráulicos, y otros 650 túneles de carretera, que suponen 450 km, de los que el de mayor longitud es el de Steigen en Norland, con 8.040 m, abierto al tráfico rodado en 1989.

Pero en cuanto a túneles submarinos de carretera, los noruegos han pasado a ser, en cuestión de diez años, auténticos especialistas.

En la actualidad están en servicio diez túneles de estas características, que representan 28,5 km de carreteras perforadas bajo el mar.

Como ha escrito el Dr. Kaare Flaate, en el caso noruego "la geografía es un desafío". El transporte marítimo ha jugado siempre un papel fundamental; sin embargo, el desarrollo de la red de carreteras ha ido superando barreras muy diversas, desde montañas hasta profundos fiordos, mediante la construcción de túneles, de puentes y de conexiones por ferrys que, en todo caso, suponen un corte en el trazado de la red vial y son un modo de transporte lento. Por ello, los norue-

gos, que en su mayoría viven en la zona costera, demandan pasos permanentes -disponibles de forma ininterrumpida las veinticuatro horas del día- para cruzar estrechos y fiordos, que proporcionan una mayor libertad y flexibilidad en el transporte, y redundan en una mejora sustancial en la calidad de vida. Esta situación ha llevado a la búsqueda de soluciones satisfactorias; en ocasiones, la solución mejor ha sido la construcción de túneles submarinos de carretera.

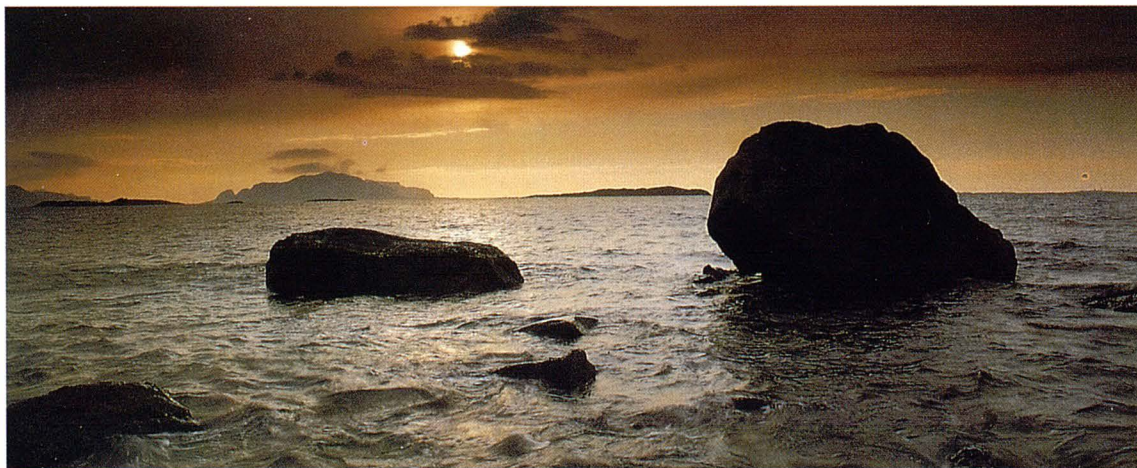
NOTA: La información recogida en este artículo es el resultado de la investigación realizada "in situ" por el propio autor, completada asimismo con otros datos obtenidos en su participación en el "Segundo Simposio sobre Cruce de Estrechos" celebrado en Trondheim (Noruega) en junio de 1990.

Eliminar los ferrys

En la actualidad funcionan en Noruega unas 160 conexiones mediante ferry, con una longitud total, sumando sus recorridos, de 2.400 km.

Una de las prioridades de la Administración noruega es substituir estas conexiones por enlaces fijos, sean puentes, tubos sumergidos o túneles submarinos. La solución estructural más idónea y económica puede ser una u otra, según las características geomé-

CONTINUA PAG. 5



EL CAMINO DEL NORTE

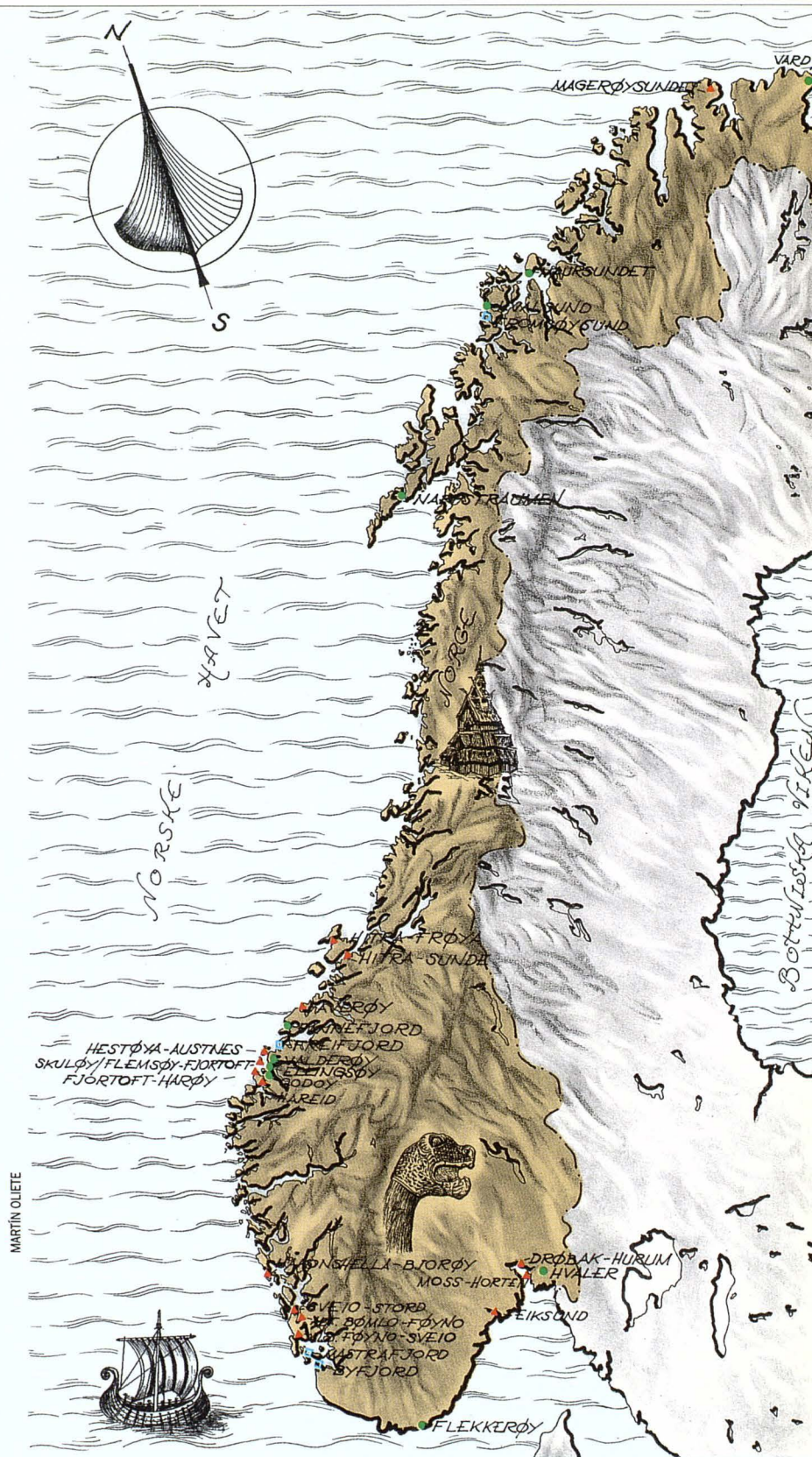
Noruega, originariamente Nordweg, "el camino del norte", de 324.000 km², en la parte occidental de Escandinavia, cuenta con 4,2 millones de habitantes y una densidad de población de 12,8 hab/km², la segunda más baja de Europa. Noruega, fiordos, raíces vikingas, sol de medianoche, leyendas de trolls,... y túneles en todas sus modalidades.

El 50% de su superficie consiste en roca viva, mientras sólo un 2,8% es terreno cultivado.

La peculiar forma alargada de su territorio, que se estrecha conforme supera el círculo polar ártico, y su tortuosa costa, pueden sintetizarse con unos pocos datos clave: la máxima distancia norte-sur es aproximadamente de 1.752 km, la anchura mínima llega a reducirse hasta los 6,3 km y la línea costera, excluyendo los fiordos, mide 2.650 km.

Su geología

La costa noruega está constituida por roca metamórfica de 1.700 millones de años de antigüedad, buena para perforar. El país está dividido en zonas fracturadas paralelas y perpendiculares a lo largo de la línea costera, que han formado, por efecto de la erosión, fiordos y montañas. En el desarrollo de la costa también se localizan fallas, algunas de las cuales han de ser atravesadas, inevitablemente, por los túneles submarinos, que han de superar toda una gama de formaciones geológicas que va desde la roca sana, como el gneis precámbrico, hasta la filita menos competente, los esquistos, de baja calidad, y las pizarras.



Noruega. Mapa de situación que indica la posición de los principales túneles submarinos de carretera.

- túneles en servicio
- túneles en construcción
- ▲ túneles en proyecto

tricas del fiordo o estrecho a salvar, su anchura y profundidad, y la geología de la zona.

Antes de la perforación del túnel de Vardø, el paso de estrechos en Noruega se resolvía tradicionalmente mediante la solución puente o el establecimiento de conexiones con ferrys; sin embargo, Vardø incorpora en 1979 una nueva dimensión en el cruce de estrechos; tras él, otros túneles carreteros submarinos se han ido perforando en los lechos rocosos más o menos fracturados de los fiordos.

Resulta de gran importancia la experiencia acumulada en las sucesivas obras, tanto en lo relativo a condiciones técnicas, como a costes de construcción, que se han reducido considerablemente en los últimos años.

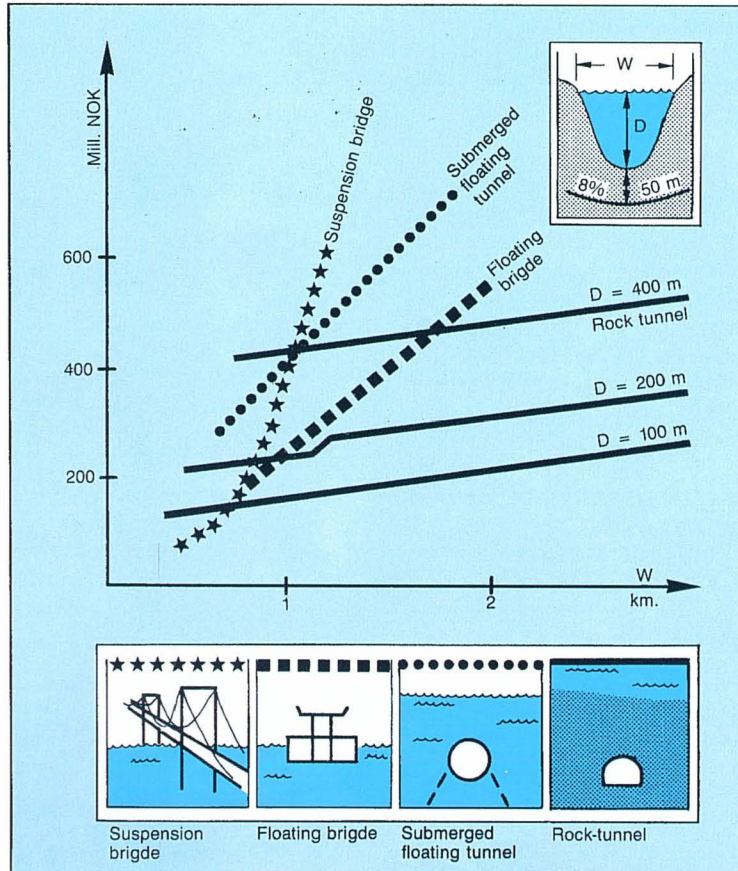
Procedimiento noruego para la perforación de túneles submarinos: Alta tecnología a bajo coste

Reconocimientos "in situ"

Si bien los estudios y reconocimientos previos resultan básicos antes de construir un túnel, su necesidad es aún mayor en el caso de los túneles submarinos, que exigen que sean más completos y exhaustivos; si para un túnel convencional no rebasan el 1% del coste total de excavación y sostenimiento, los estudios previos para los túneles submarinos pueden representar hasta un 5% de los costes totales.

Los reconocimientos geológicos y geofísicos previos son decisivos para determinar el emplazamiento definitivo y traza del túnel. En primer lugar se lleva a cabo un estudio de viabilidad que incluye visitar la zona, analizar las descripciones geológicas existentes, cartografía y fotogrametría; el procedimiento general de estudios a efectuar incluye el trazado de líneas batimétricas, perfiles acústicos, mediciones de refracción sísmica y sondeos exploratorios.

Resulta también fundamental, dado que las excavaciones ha-



Coste de diversas soluciones técnicas según la anchura del fiordo (W) y la profundidad del agua (D).

brán de efectuarse bajo la presión del agua, disponer de información precisa sobre las condiciones geológicas del subsuelo, tales como el recubrimiento, el espesor de la roca por encima de la clave del túnel, la configuración del macizo rocoso y la calidad de la roca, y la localización de zonas de fractura y diaclasas.

Uno de los reconocimientos más eficaces es el de sísmica de refracción, técnica de prospección sísmica que utiliza y recoge las ondas refractadas, de manera que permite realizar modelos tridimensionales del área a atravesar por el túnel y proporcionan el espesor de cobertura rocosa, incluídas las capas superiores subhorizontales de roca fracturada y meteorizada.

En ocasiones se han realizado mediciones sísmicas mediante "cross-hole", ensayo consistente en la determinación de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas entre elementos genera-

dores y receptores, dato muy útil que proporciona una buena indicación del grado de complejidad y nivel de costes del proyecto, ya que sus valores dan idea de la calidad mayor o menor del macizo rocoso. Así, valores superiores a 4.000 m/s corresponden a roca de buena calidad; entre 3 y 4.000, roca aceptable; cifras por debajo de 3.000 m/s indican la presencia de roca de mala calidad mientras que las zonas fracturadas y arcillosas se detectan con velocidades bajas, inferiores a 2.500. En la actualidad se investigan nuevos métodos de prospección que proporcionen información, cada vez más precisa, sobre diaclasado, fracturación, filtraciones y contenido de arcilla en la roca.

Método constructivo

La mejor tradición noruega en el arte de la construcción de túneles incluye la perforación con ex-

plosivos y el uso selectivo de los elementos de revestimiento y sostenimiento, de forma que se aproveche al máximo la capacidad autoportante de la roca.

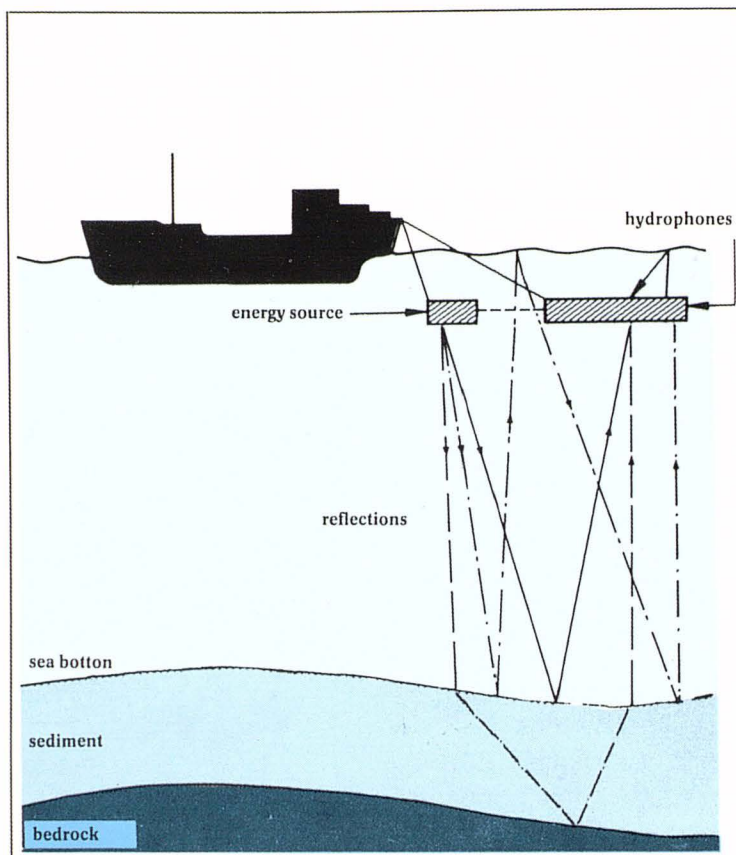
Los túneles submarinos de carretera noruegos se construyen sin revestir, salvo en aquellos tramos donde la roca exige revestimiento de hormigón in situ o bien la aplicación de hormigón proyectado, a veces reforzado con fibra de acero. El sistema de sostenimiento más empleado es mediante bulones de anclaje. La precisión en la ejecución de la técnica del recorte ha permitido reducir el número de elementos de sostenimiento y refuerzo de la roca. Sólo el perfilado y el bulonado en bóveda se aplican en toda la longitud del túnel para prevenir desprendimientos.

La perforación de túneles submarinos carreteros no difiere sustancialmente de los convencionales, si bien presenta importantes peculiaridades.

El túnel submarino viene acompañado de una característica fundamental, el agua, que exige mayores precauciones al determinar el trazado, en especial al definir la mínima cobertura de roca en clave del túnel y a la detección de fisuras y vías de agua en el macizo a excavar; para ello se practican sondeos horizontales o ligeramente inclinados de 20-30 m en el frente de ataque, realizando allí donde proceda inyecciones a alta presión para sellar las grietas y evitar la inundación de la excavación.

El volumen de inyección aplicado, en los túneles submarinos carreteros construídos hasta la fecha, ha sido de unos cien kilogramos por metro lineal de túnel, como media; la excepción ha sido el túnel de Gødoy, con 400 kg/ml de inyecciones.

Para prevenir filtraciones en la bóveda del túnel se instalan, donde es preciso, elementos de revestimiento aislante mediante placas de polietileno expandido, PE, y en ocasiones de aluminio, que a la vez sirven de protección contra el hielo.



Principio para la determinación de perfiles acústicos (esquema)

En Noruega se sigue la filosofía de "proyecta conforme avanza", que significa adoptar un procedimiento constructivo flexible y de múltiples recursos, que se aplica según las condiciones que surjan a medida que avanzan los trabajos, y que supone un ajuste continuo, metro a metro de perforación de túnel, dependiendo de la calidad de la roca encontrada, de su fisuración y de la presencia de agua.

Características y elementos del túnel submarino de carretera tipo

La política noruega en este campo es clara y pragmática: las condiciones geográficas del país exigen la construcción de multitud de túneles en la red de carreteras, por lo que se ha optado por unas especificaciones de proyecto prudentes.

En base a la experiencia de los primeros túneles de este tipo, la Dirección Nacional de Carreteras de Noruega -Stantens Vegvesen- ha establecido especificaciones de diseño que han de tenerse en cuenta en futuras obras de estas características.

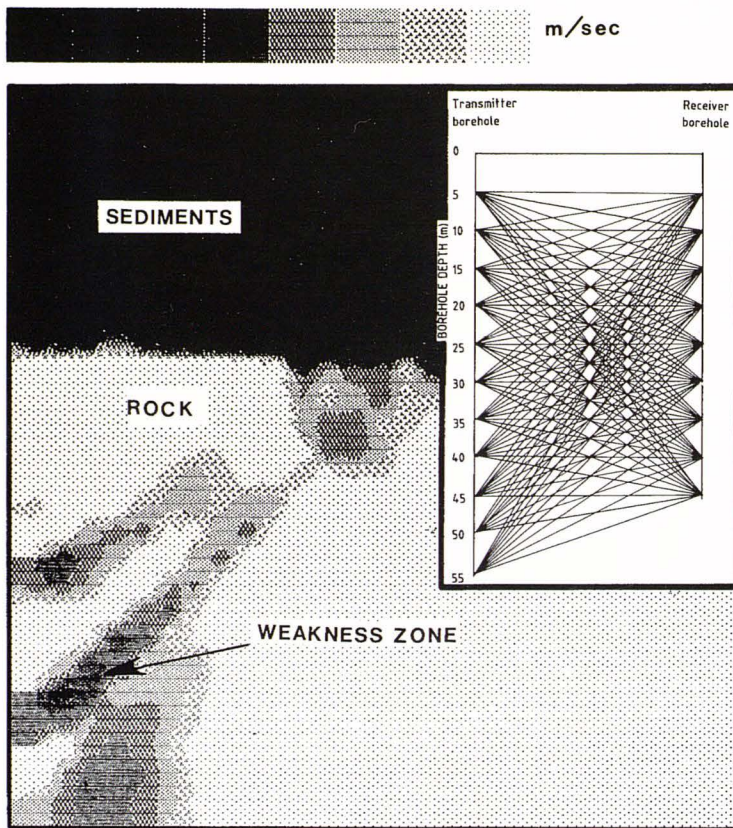
Uno de los parámetros más discutidos es el de la pendiente longitudinal máxima -tanto ascendente como descendente- habiéndose determinado valores de hasta un 10% para un flujo inferior a 1.500 vehículos/año y del 8% para tráficos entre 1.500 y 5.000.

El perfil longitudinal típico de un túnel submarino de carretera se caracteriza por su pendiente longitudinal máxima, la longitud total, la profundidad máxima respecto al nivel del mar y su mínima cobertura de roca

El parámetro que define fundamentalmente la longitud del túnel submarino es la cobertura mínima

Tomographic plot

2900 3100 3300 3500 3700 3900 4100 4300 4500



Dibujo tomográfico de la distribución de velocidades de propagación de ondas sísmicas bajo una importante depresión rellena de arcilla.

Perforando taladros para inyección de sellado de filtraciones en el frente de ataque.



de roca. Si se adopta una cobertura en exceso conservadora, el resultado será un importante sobrecoste por incremento en la longitud del túnel. Así para un túnel típico de 50 m² y pendiente máxima del 8%, una reducción de tan sólo 1 m en la cobertura puede suponer una disminución de costes de 140.000 \$. Por contra, si la roca es de mala calidad y la cobertura escasa, el resultado conllevará, muy probablemente, la aparición de importantes problemas de estabilidad y filtraciones importantes de agua.

El espesor de roca entre el fondo marino y la clave del túnel es generalmente superior a 50 m, con un espesor mínimo en torno a los 30 m.

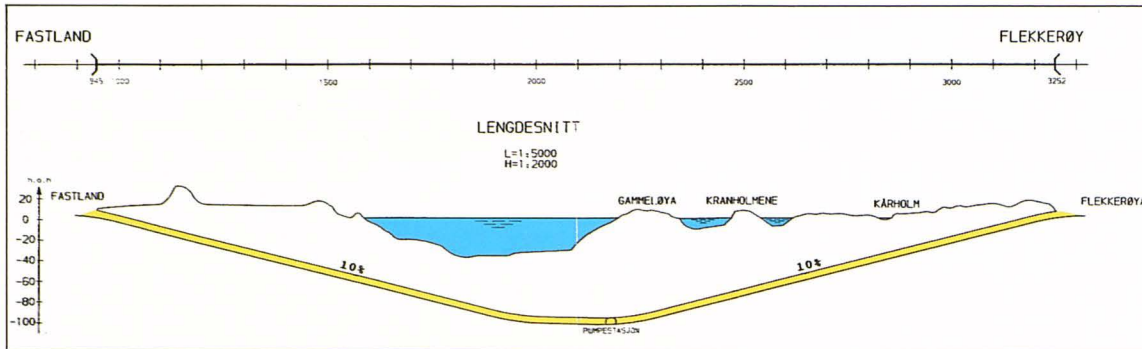
La sección transversal del túnel puede constar de dos o tres carriles, según el tráfico previsto. En general, los flujos son bajos por lo que predomina la sección de dos carriles, de unos 50 m².

Ahora bien, la elección del número de carriles también depende de consideraciones relativas a la seguridad en la circulación y a las posibilidades de evacuación en caso de emergencia.

Entre las instalaciones básicas de este tipo de túnel destaca la estación de bombeo cuyo objetivo es evacuar el agua de infiltración; consta de una batería de bombas, generalmente tres y de un depósito de seguridad y regulación construido en el punto más bajo del tú-

Instalación de láminas impermeabilizantes de PE.





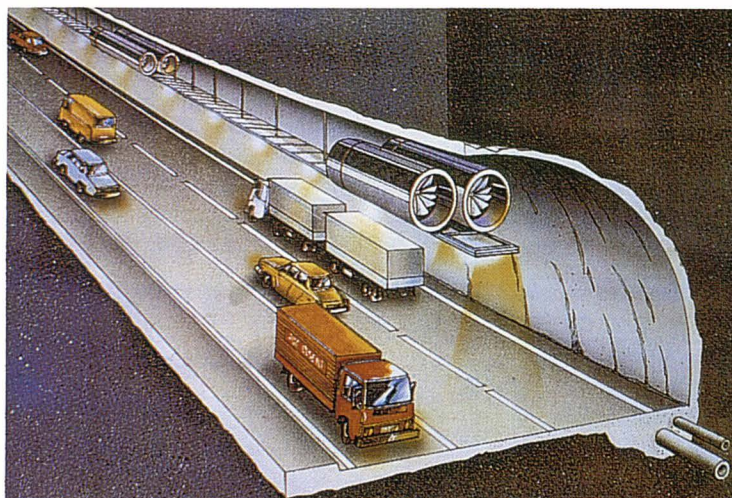
Perfil longitudinal. Túnel de FLEKKERØY.

nel para almacenamiento del agua ingresada en el túnel con una capacidad de 2-3 días.

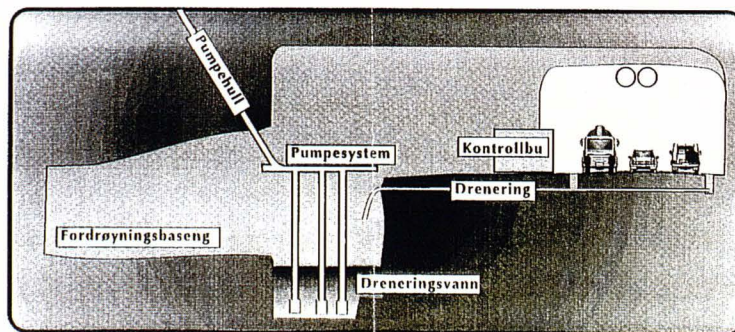
Estos túneles submarinos de carretera, ventilados longitudinalmente, se proyectan de forma que se comporten estructuralmente como una construcción drenada. Con todo, se ha realizado un importante esfuerzo por reducir el caudal del agua de infiltración, hasta lograr valores aceptables para su evacuación mediante bombeo, en torno a los 300 litros/minuto por km de túnel.

Para disminuir los costes de la explotación y el mantenimiento se hace necesario coordinar el uso de las instalaciones de iluminación, ventilación y bombeo.

Un problema que se ha planteado en la operación de alguno de estos túneles ha sido el de la formación de algas; esto ha ocurrido en los túneles de Vardø, Valderøy y Hvaler y no se ha podido establecer, en principio, relación alguna entre el tipo de roca y el crecimiento de algas. Sin embargo, no se han detectado hasta ahora problemas de corrosión ni de deterioro de los elementos y materiales de revestimiento y contención de la roca.



Perspectiva sección túnel de BYFJORD, RENNFEST.



Esquema de la estación de bombeo. Túnel de FREIFJORD, KRIFAST.

Costes

Noruega ha demostrado con éxito que puede ahorrarse una buena parte del coste de construcción de túneles carreteros en roca si se emplean las técnicas adecuadas y si los costosos revestimientos de hormigón son evitados en su mayor parte.

Se ha experimentado una considerable reducción en los costes de construcción de los túneles submarinos de carretera noruegos; así, mientras el primero de los perforados, el de Vardø, supuso un coste total de 13.000 \$USA/m, uno de los más recientes, el de Flekkerøy,

ha costado 5.300 \$USA/m, con una reducción superior al 50%.

El coste medio actual por metro, para un túnel de dos carriles de sección en torno a los 50 m², varía entre 5.000 y 6.600 \$USA. La evolución descendente ha sido paralela en cuanto a los costes de instalación.

Tabla 1
Túneles noruegos submarinos de carretera en servicio

Túnel	año apertura	longitud (m)	profundidad máxima (m)	pendiente máxima (%)	sección trans. (m ²)	filtrac. agua (l/min)	min. cobertura roca (m)	coste en millones coronas noruegas (MNOK)
Vardø	1982	2.620	-88	8,0	46	400	35	
Ellingsøy	1987	3.481	-140	8,5	68	310	17	414
Valderøy	1987	4.176	-137	8,0	68	300	17	
Kvalsund	1988	1.530	-56	8,0	43	250	20	
Godøy	1989	3.835	-153	10,0	48	300	24	140
Flekkerøy	1989	2.321	-101	10,0	49,5	200	30	85
Hualer	1989	3.755	-120	10,0	45	200	35	150
Nappstraumen	1990	1.780	-60	8,0	55	250	28	60
Maurusundet	1990	2.300	-93	10	43			
Fannefjord	1990	2.743	-100	9,0	43	380	28	80

1 DÓLAR USA equivale aproximadamente a 6 coronas noruegas (NOK)
Coste en millones de coronas noruegas (MNOK)

Túneles en Servicio

VARDØ

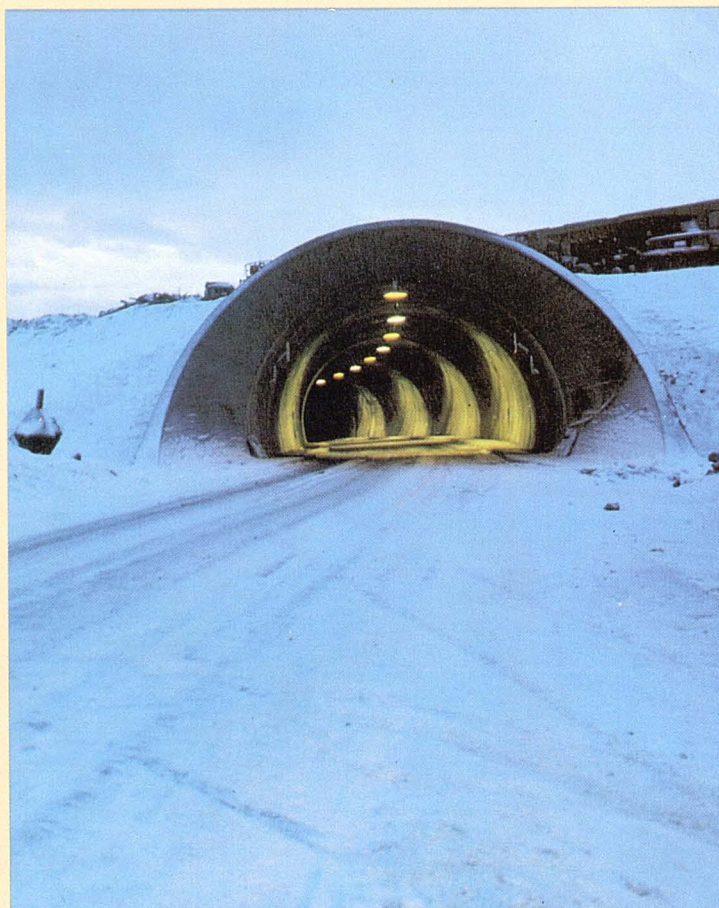
El primer túnel submarino de carretera noruego, situado más al norte que ningún otro del mundo, conecta, desde diciembre de 1982, la isla de Vardø, en la que viven más de 4.000 personas, con tierra firme. Sus 2.800 metros de longitud atraviesan areniscas y pizarras poco metamorfizadas, estando revestidos 600 metros con hormigón proyectado in situ.

Los trabajos se iniciaron en junio de 1979 en el extremo de Vardø, isla situada en la entrada del fiordo Varanger en el punto más oriental del país. A comienzos de 1980 se emprendieron las obras desde Svartnes, registrándose un avance medio semanal de 17 m en cada frente de ataque.

Comparado con los túneles submarinos perforados con posterioridad, si bien Vardø es el que registra mayores filtraciones, es el túnel en que menos inyecciones se han practicado. Durante su construcción se produjeron dos hundimientos en el frente de trabajo que hubo de sellarse con hormigón para restablecer condiciones estables. Para proteger el túnel del agua y el hielo se utilizaron láminas dobles de aluminio con aislamiento.

Las boquillas tienen en cada extremo una longitud de 100 metros; siendo su misión de resistencia, proteger la carretera de posibles desprendimientos y avalanchas.

El proyecto y construcción del túnel de Vardø fué totalmente financiado por el Estado.



Túnel de VARDØ. Portal este.

TÚNELES EN EL ÁREA DE ÅLESUND

La comarca de Giske está formada por las islas de Godøy, Giske, Valderøy y Vigra y cuenta con una población de 6.200 personas. En 1985 el Parlamento noruego aprobó la ejecución del proyecto, adoptando la solución túnel -más económica

que la alternativa de puente inicialmente considerada- que habrá de realizarse con financiación privada.

En torno a Ålesund, primero se perforaron los túneles de Ellingsøy y Valderøy, emprendiéndose después los trabajos para el túnel de Godøy. Su construcción

marca una etapa decisiva en cuanto al impulso de este tipo de obras debido a los muy diversos métodos puestos a punto. Destacan las facetas siguientes:

- mediciones sistemáticas por sísmica de refracción en rejilla para la optimización de la traza del túnel.

- uso extensivo de sondeos de reconocimiento por delante del frente de ataque.

- período de ejecución muy corto debido a que el trabajo de instalaciones y equipamiento se realizó a continuación del de perforación y antes del cale.

- mantenimiento eficaz, inspección y revisión de la maquinaria, operación realizada de forma sistemática una vez por semana.

Los dos túneles englobados en la primera fase fueron construidos en el tiempo record de 21 meses, desde enero de 1.986 hasta octubre de 1.987, lográndose completar los trabajos con 15 meses de adelanto respecto a la fecha prevista.

Esta primera fase estableció un enlace fijo entre Ålesund y su aeropuerto, situado en la isla de Vigra, mediante dos túneles submarinos, que totalizan 7,7 km, y un puente.

La sección transversal de los túneles de Ellingsøy y Valderøy es de 68 m², con tres carriles, salvo en el tramo central horizontal de 500 m del segundo de estos túneles, que pudo reducirse a 47 m² y dos carriles. Statens Vegvesen ha dirigido las obras, siendo responsable del proyecto, supervisión y control de las condiciones técnicas y económicas de los trabajos; el principal contratista fue Selmer Furuholmen.

A finales de 1.987 se inician las obras del tercer túnel submarino en la zona, enlazando las islas de Giske y Godøy, de 3,8 km de longitud; la excavación se avanzó desde las dos boquillas, produciéndose el cale a los trece meses de iniciarse las obras; tres meses después el túnel entra en servicio.

El principal factor de encarecimiento de este túnel se debió al notable volumen de inyecciones; con todo, el coste por metro de túnel construido fue un 30% inferior al de los dos primeros túneles.

El volumen total de excavación en los tres túneles fué de 730.000 m², lo que da idea de la envergadura del proyecto. De ellos, el más profundo es el de Godøy, a -153 m.

A destacar por su funcionalidad y acertado diseño estético la estación de peaje ubicada en la isla de Ellingsøy.

KVALSUND

Situado al noroeste de la ciudad de Tromsø, este túnel de 1.530 m, enlaza las islas de Ringvassøy y Kvaløya bajo el estrecho de Kvalsundet, siendo su profundidad máxima 56 m, con una cobertura mínima de roca de 20 m; su pendiente máxima es del 8% y la sección transversal de 43 m².

Las obras se iniciaron en junio de 1987, terminando 14 meses más tarde;

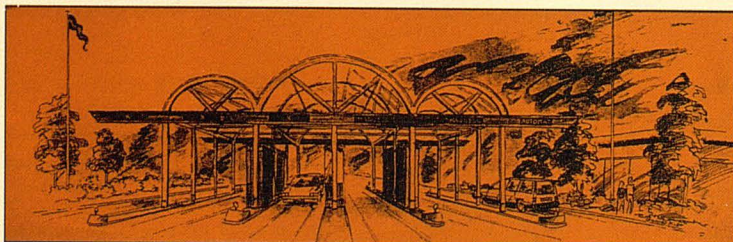


Esquema - Perspectiva túneles en el área de ÅLESUND.



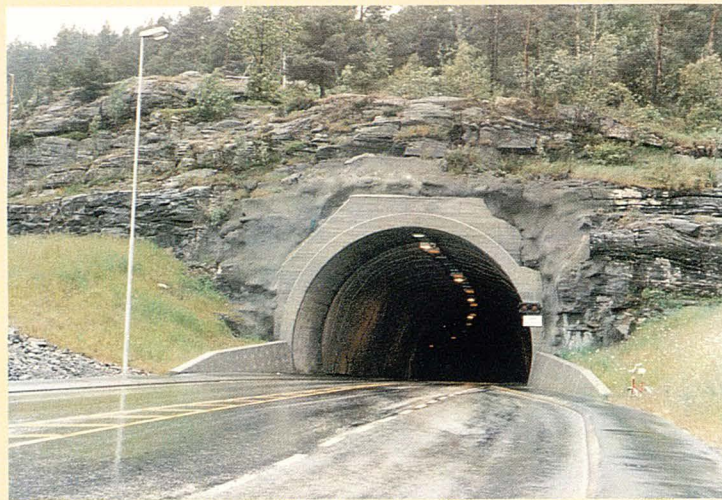
El autor del artículo junto al portal oeste del túnel de GODØY.

Croquis de la Estación de Peaje de ELLINGSØY.

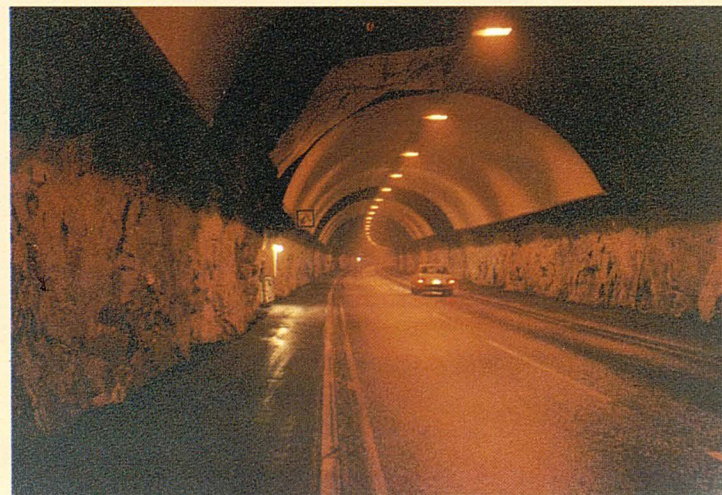




Túnel de KVALSUND en construcción.



Túnel de FLEKKERØY. Portal sur.



Interior del Túnel de FLEKKERØY.

unos 800 m de túnel, se perforaron bajo el mar mediante explosivos, extrayéndose 85.000 m³ de gneis granítico.

Muy estudiado es el dispositivo de drenaje y evacuación de agua infiltrada. Debido a la situación del túnel en el norte de Noruega, hubo de preverse tanto la posible entrada en el interior de la galería de grandes cantidades de nieve derretida en primavera como del agua filtrada a través de la roca.

La estación de bombeo cuenta con cuatro bombas, con capacidad de 2.200 litros/min; si fallasen simultáneamente, se ha construido un depósito capaz de almacenar durante 160 horas un caudal de 250 litros/min antes de que el túnel se inundase.

La roca perforada es de tan buena calidad que, salvo un corto tramo revestido con hormigón, sólo ha sido preciso instalar placas de sellado e impermeabilización para prevención de heladas y conducir el agua hasta el depósito inferior a través de zanjas.

La construcción de este túnel apenas ha presentado problemas, no ha necesitado aplicar inyecciones y sólo han tenido que aplicarse 0,3 m³/ml de hormigón proyectado, el 50% del previsto en proyecto.

FLEKKERØY

Sus 2.321 m de longitud conectan tierra firme cerca de Kristiansand S con la bella isla residencial Flekkerøy, que cuenta con 1.600 habitantes.

Las obras comenzaron, primero desde la isla, en agosto de 1988, y un mes después desde tierra firme; la perforación con explosivos se realizó desde ambos extremos produciéndose el cale a mediados de marzo de 1989, unas seis semanas antes de lo programado.

El túnel, en su mayor parte sin revestir, tiene una sección transversal de diseño de 49 m², siendo la pendiente máxima del 10% en cada extremo.

La geología de la zona consiste básicamente en gneis granítico con resistencia a la compresión de 1.500 MPa y anfíbolita con 2.000 MPa. La zona más comprometida fué la del gneis al contener multitud de pequeñas fisuras rellenas de arcilla; aquí hubo que aplicar hormigón proyectado de 8 cm de espesor inmediatamente después de la perforación, empleando bulones de anclaje para coser las fisuras mayores. La cobertura de roca sobre el túnel oscila entre un mínimo de 30 m hasta 100 m bajo las islas.

Aunque la previsión de filtraciones era un tanto alarmante, en la práctica se redujo a sólo 200 litros/minuto, siendo el túnel submarino de carretera más seco de los construidos hasta ahora.



Interior del túnel de FLEKKERØY.



Túnel de HVALER. Portal sur.

El estrecho de NAPP. Perspectiva.



Inaugurado oficialmente el 15 de agosto de 1.989, la intensidad media diaria prevista es de tan sólo 750 vehículos.

HVALER

Este túnel se ha construido en una área turística salpicada de islas situada a 120 km de Oslo al sudoeste del país, cerca de la frontera con Suecia; los trabajos comenzaron el 1 de febrero de 1988, se encontraron los dos frentes de avance el 15 de abril de 1989, y entró en servicio el 2 de octubre de 1989. Su longitud es de 3.755 m, con una profundidad máxima bajo el mar de 120 m y una cobertura mínima de roca de 35 m. Su sección transversal es de 45 m² y la máxima pendiente longitudinal del 10% con un flujo máximo de agua de infiltración de 200 litros/min. Hay que destacar dentro de la fase de reconocimientos previos, la utilización de un barco-sonda, el "Bucen-taur", que proporcionó una excelente plataforma para el reconocimiento de la zona fallada bajo el estrecho de Løperen mediante sondeos verticales. La experiencia resultó positiva ya que ni la corriente ni la navegación causaron ninguna dificultad, al tiempo que las operaciones de sondeo en cubierta fueron satisfactorias. La perforación mediante explosivos atravesó gneis rojo -conocido localmente como granito de Iddefjords- siendo el ciclo completo de perforación y voladura de aproximadamente 5 horas, de las que 3 corresponden a la carga de explosivos y voladura.

La proyección de hormigón se ejecutó con jumbos, reforzándose con fibras de acero de 30 mm de longitud -mucho más largas de lo normal, 18 mm-, que fueron añadidas a la mezcla en una proporción de 60 kg/m³.

En los tramos de zonas diaclasadas se revistió la sección completa mediante hormigonado in situ; a tal fin, la empresa contratista diseñó sus propios encofrados móviles de acero, dotados de cuatro articulaciones para facilitar el montaje y desmontaje, que permitía el desplazamiento y el accionamiento desde una pala cargada sobre ruedas.

NAPPSTRAUMEN

Este túnel de 1.780 m de longitud, la mitad de ellos bajo el mar, fué abierto al tráfico el 11 de julio de 1990, constituyendo un gran acontecimiento en las islas Lofoten y en toda la provincia de Nordland.

Las obras de perforación se llevaron a cabo a gran ritmo, trabajándose 20 horas al día, con avances de 12 metros diarios logrados mediante tres voladuras empleando cada una 450 kg de explosivos para cada una. En las primeras rondas surgieron problemas debido a la fisuración de la roca y al fuerte gradiente térmico; la



Logotipo conmemorativo de la apertura del túnel de NAPPSTRAUMEN.



Túnel de FANNEFJORD. Portal del lado de BOLSØY.

galería se perforó desde ambos extremos, trabajando 20 hombres de forma permanente en cada frente. Se han extraído 100.000 m³ de roca y gravilla.

Para la detección de vías de agua se realizaban sondeos de reconocimiento en el frente de avance, de 10 a 15 m de longitud; caso de interceptarse filtraciones se practicaban inyecciones de mortero de cemento a 60 kg/cm² de presión.

Su pendiente máxima es del 8% en am-

bos extremos, su punto más profundo se encuentra 60 m bajo el nivel del mar y la mínima cobertura de roca es de 28 m. No se tuvo que hormigonar "in situ" ningún tramo del túnel, y se aplicaron 9,6 m³/ml de hormigón proyectado, un 25% menos de lo previsto.

La sección transversal es de 55 m², con dos carriles de autopista y aceras. Su entrada en servicio elimina el ferry entre Lilleide y Napp.

MAURSUNDET

Construido en la provincia de Troms, no lejos de la ciudad de Tromsø, Maursundet es uno de los más recientes túneles submarinos de carretera que ha entrado en servicio. La longitud total del túnel es de 2.300 m y su profundidad máxima, bajo el mar, de 93 m. Su sección transversal es de 43 m², con dos carriles, y una pendiente máxima en ambos extremos del 10%.

La inauguración de esta importante obra civil tuvo lugar el 6 de julio de 1990, tras 20 meses de trabajos.

FANNEFJORD

El décimo túnel submarino carretero operativo en Noruega fué abierto al tráfico el 20 de diciembre de 1990, enlazando a través de sus 2.743 m, la isla de Bolsøya con la bahía de Lergrovika; el proyecto completo de la carretera Skåla, de 9,3 km de longitud, no se inaugurará hasta el 7 de junio de 1991.

El túnel, de 100 m de profundidad máxima, tiene una sección transversal de 43 m² y una pendiente máxima del 9%; tras atravesar una zona de gneis cuarzoso bastante fisurada, que requirió alta densidad de bulonado, el túnel se adentra en hornablenda de mucha mejor calidad; entre ambos tipos de roca, la galería hubo de superar una difícil zona de transición en terreno blando que exigió hormigonado in situ a sección plena en una longitud de 127 m. La mínima cobertura de roca es de 28 m.

Las obras de perforación comenzaron el 18 de octubre de 1989 produciéndose el cale del túnel el 11 de julio de 1990. La excavación de 150.000 m³ de roca y la instalación de 14.670 bulones de anclaje; se pusieron en obra 3.320 m³ de hormigón en 200 m de túnel así como en las boquillas, y se aplicaron 2.876 m³ de hormigón proyectado reforzado con malla de acero.

Además de su sistema de iluminación, el túnel cuenta con una ventilación longitudinal mediante ocho ventiladores que entran en funcionamiento de forma automática cuando los indicadores de CO y NO₂ rebasan los valores admisibles.

Dispone de tres ensanchamientos de calzada para estacionamiento en caso de avería y cada 250 m se han instalado puestos de SOS, dispositivos contra incendios y teléfono de emergencia, así como semáforos en las entradas del túnel.

La apertura del túnel ha permitido suprimir una línea de ferry, siendo el importe del peaje inferior a la tarifa del transbordador.

Tabla 2

Túneles noruegos submarinos de carretera en construcción

Túnel	año previsto de apertura	longitud (m)	profundidad máxima (m)	pendiente máxima (%)	sección trans. (m ²)	máx. cobertura roca (m)	coste en millones coronas noruegas (MNOK)
Freifjord	1992	5.200	-130	9,0	70/54	35	270
Byfjord	1992	5.830	-223	8,0	70	45	
Mastrafjord	1992	4.390	-132	8,0	70	40	
Tromsøysund	1995	3.500	-102	8,0	43 x 2 túnels		260

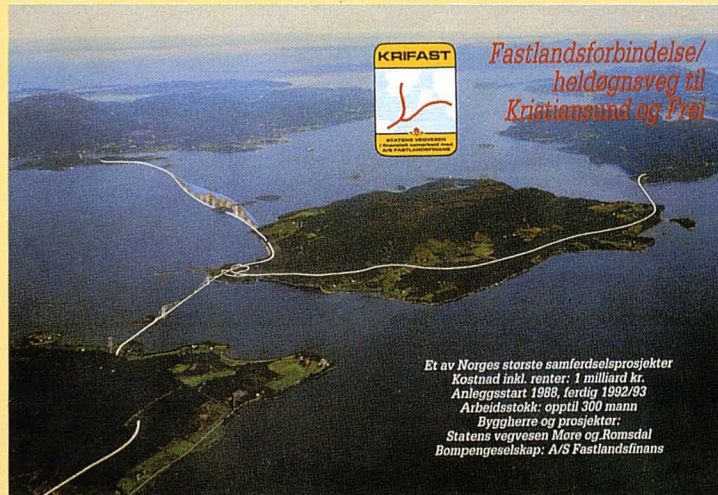
Túneles en Construcción

PROYECTO KRIFAST

Permitirá conectar las islas de Kristiansund y Frei a tierra firme, siendo uno de los proyectos noruegos más ambiciosos en este campo.

Iniciado en 1988, está prevista su finalización en 1992, con un coste total del proyecto completo, incluidos los gastos financieros, de 1.200 MNOK.

Proyecto KRIFAST: túnel submarino y dos puentes. Perspectiva.



Statens vegvesen Rogaland



Entre las obras singulares incluidas en Krifast destaca el túnel submarino de Freifjord, de 5,1 km de longitud, cuya pendiente máxima será del 9%, y una sección transversal variable entre 70 y 54 m², según el tramo conste de 3 o 2 carriles de circulación; su profundidad máxima será de 130 m siendo la cobertura mínima de roca de 35 m. Los 310.000 m³ de roca extraída se emplearán para construir nuevas carreteras en Frei y Bergsøy. El coste del túnel será de 270 MNOK.

Se adoptarán múltiples medidas de seguridad para una correcta operación del túnel, cuya sala de control funcionará 24 horas al día.

Krifast incluye además la construcción de dos puentes. Uno de ellos será el puente de suspensión más largo de Noruega mientras que el otro se convertirá en el primer puente sobre pontones sin anclajes laterales del mundo.

**Túnel de FREIFJORD en construcción.
KRIFAST.**

**Proyecto RENNFAST: dos túneles
submarinos.
Perspectiva.**



El proyecto, que comprende la construcción de 25 km de carreteras en Frei y Bergsøy, proporcionará nuevas posibilidades de desarrollo a Kristiansund y a su entorno permitiendo suprimir tres conexiones por ferry.

PROYECTO RENNFASST

Este importante proyecto, en fase de construcción desde enero de 1990, permitirá la conexión en 1992 entre Rennsøy y tierra firme mediante 19 km de nuevas carreteras, más de la mitad de ellas en túnel submarino. En efecto, las obras incluyen la perforación de dos túneles bajo el mar: el de Byfjord, de 5,8 km y el de Mastrafjord, con 4,4 km.

En este proyecto los reconocimientos previos fueron intensos, partiendo de amplios corredores y diversas alternativas,

que en sucesivas etapas de los análisis geofísicos se fueron reduciendo tanto en superficie como en número. Los túneles tendrán tres carriles de circulación, con una pendiente máxima del 8%. 2,1 km del túnel de Byfjord se construyen por debajo del mar, atravesando filitas a una profundidad máxima de 223 m; la cobertura mínima de roca es de 45 m aproximadamente.

En el túnel de Mastrafjord, 1,4 km pasan bajo el mar con una profundidad máxima de 132 m. Está siendo perforado en un macizo de gneis, buena roca para perforar. La mínima cobertura rocosa del túnel es de unos 40 m.

La presencia en ambos túneles de un estrato de morrena glaciar entre el fondo marino y la roca profunda a perforar, facilita la impermeabilidad del macizo. El coste estimado del proyecto es de 850 MNOK.

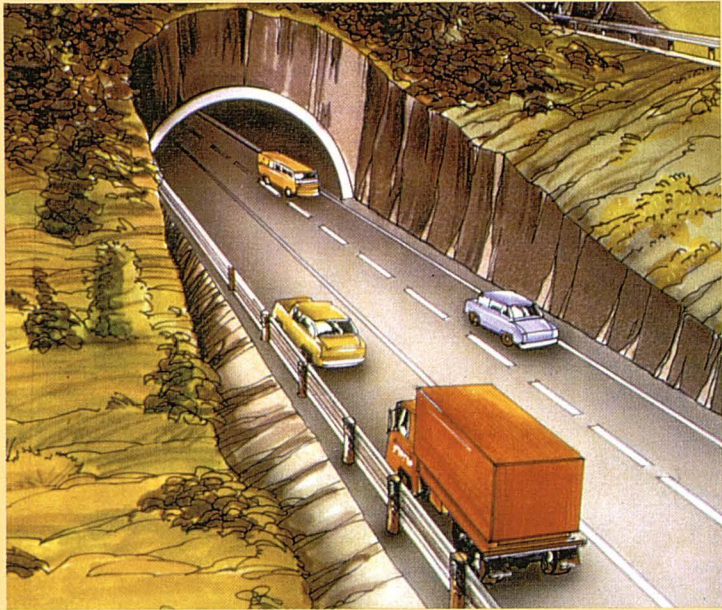
TROMSØYSUND

Este túnel, ya en construcción, de 3,5 km de longitud atraviesa el estrecho que le da nombre y forma parte del Plan de Transporte para Tromsø aprobado en enero de 1989 y que supone llevar a cabo un conjunto coordinado de medidas que mejorarán de forma sustancial tanto el tráfico como el medio ambiente en la zona. Además del túnel submarino de Tromsøysund el Plan prevé la construcción del túnel de Breivika de 2 km de longitud así como de una horquilla subterránea de otros 2 km de longitud bajo el centro de la ciudad.

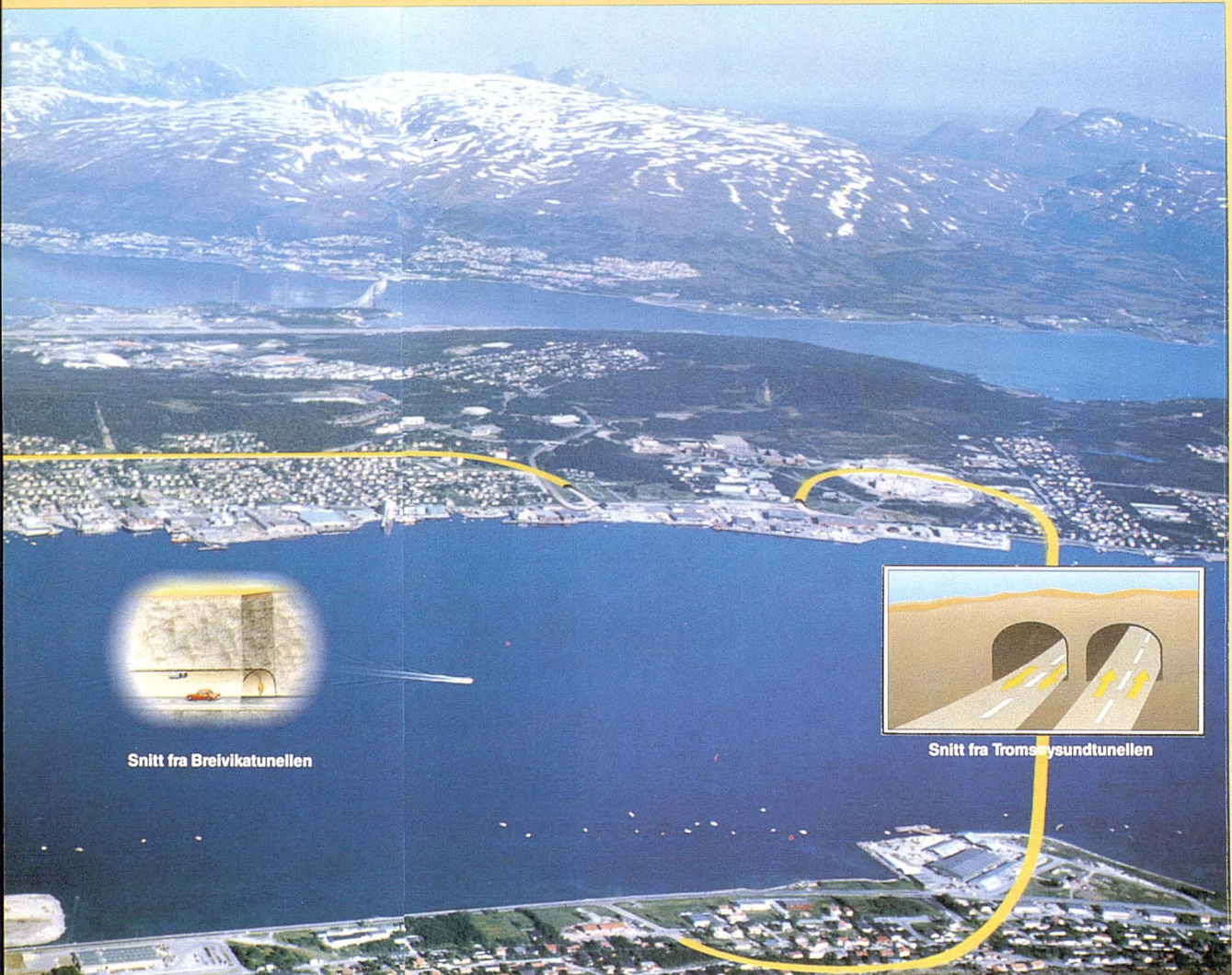
El túnel de Tromsøysund constará finalmente de dos tubos con dos carriles cada uno, siendo la mínima cobertura rocosa de unos 40 metros.



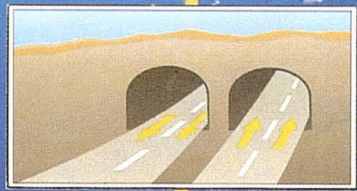
Recreación del portal del túnel de BYFJORD.



Túneles en el área de TROMSØ.
Panorámica.



Snitt fra Brevikatuellen



Snitt fra Tromsøysundtunnelen

Tabla 3
Túneles noruegos submarinos de carretera en proyecto

Túnel	longitud (m)	profundidad máxima (m)
Magerøysundet (Fátima)	6.600	210
Averøy	5.850	245
Hareid	13.000	630
Eiksund	6.500	315
Hitra-Frøya	4.800	155
Hitra-Sunde	5.650	275
Bømlo (Føyno-Sveio)	7.800	275
Drøbak-Hurum (Oslofjord)	7.400	130
Moss-Horten (Oslofjord)	14.000	300
Hestøya-Austnes	3.450	120
Skuløy/Flemsøy-Fjortoft	4.000	130
Fjortoft-Harøy	3.300	126
Hakonshella-Bjørøy	1.860	88

Túneles en fase de proyecto

Son múltiples los túneles submarinos de carretera noruegos en fase de proyecto y pendientes de su aprobación para el inicio de las obras. A continuación se incluyen datos de alguno de ellos, a título de ejemplo.

* El proyecto **Fátima** tiene como principales objetivos mejorar la accesibilidad a la isla de Magerøya e incrementar el tráfico turístico hacia el Cabo Norte. Constituye el proyecto de comunicación más importante emprendido en la provincia de Finnmark, y supone la construcción de 28 km de carreteras de los que casi 11 se-

rán en túnel, uno de ellos submarino con una longitud de 6,8 km. Según el Programa Estatal de Carreteras para el período 1990-93, el Proyecto Fátima se comenzaría en 1992-93, con un período de construcción previsto de cuatro años.

El túnel submarino tendrá su punto más profundo a 210 m bajo el nivel del mar, una pendiente máxima del 7,2% y una sección transversal neta de 44 m².

Fátima reemplazará la conexión por ferry entre Kåfjord en tierra firme y Storbukt en la isla de Magerøya. El enlace fijo tendrá un importante impacto en el comercio y en la generación de viajes en la zona.

Hay que resaltar el estudio realizado sobre la incidencia del Proyecto Fátima en el entorno y en el paisaje.

* Otro importante túnel en proyecto es el de **Averøy** que enlazará bajo el mar Øksenvåg y Kristiansund; su longitud será de 5.850 m, con una profundidad máxima de 245 m bajo el fiordo de Bremsnes, y pendiente máxima del 10%; el granito a atravesar presenta pocas zonas fisuradas.

* Para perforar el fiordo de Oslo se han proyectado túneles submarinos de carretera: el túnel entre Drøbak y Hurum,



proyecto controvertido que ha levantado una fuerte polémica desfavorable a la opción puente en base a consideraciones de impacto visual en el paisaje; el túnel tendría 7.400 m de longitud, con una profundidad máxima de 130 m.

Más al sur, el túnel que enlazaría Moss y Horten, con 14 km de longitud sería el mayor de todos los túneles submarinos de carretera en proyecto; su profundidad máxima sería de 300 m.

* El proyecto de carretera de Nordøy, para enlazar los municipios de Nordøyane/Haram y Sandøy, requiere la construcción de tres túneles submarinos, que con una longitud total de casi 11 km y una profundidad máxima bajo el nivel del mar de 130 m, supone la excavación de 500.000 m² de roca.

* La conexión triangular en Sunnhordland facilitará un enlace fijo entre las islas de Stord, Bømlo y Fitjar, y de éstas con tierra firme, en Sveio; se trata de un tramo vital de la autopista de la costa a través del sudoeste de Noruega. La zona constituye un archipiélago único, por lo que se ha prestado especial atención a la conservación de la naturaleza y al entorno. El proyecto incluye la construcción



de un túnel submarino de 7,8 km de longitud y tres carriles bajo el fiordo de Bømlo. El comienzo de las obras está previsto para 1992 estimándose un plazo de ejecución de tres años y medio.

Pero sin duda el proyecto más ambicioso en carretera, que reta los límites tecnológicos disponibles, es el del túnel de Ha Reid, no sólo por su longitud -13 km-, sino muy especialmente por su profundidad: 630 m bajo el nivel del mar.

FATIMA: Enlace fijo hasta MAJERØYA.
Panorámica.

Túnel BØMLO - SVEIO.
Perspectiva.



Túneles cada vez más largos y más profundos

Como tendencia de futuro, se planean túneles submarinos cada vez más largos y más profundos. Habrá que prestar atención especial a factores como la reducción de los costes de construcción y mantenimiento, y considerar más en detalle las condiciones de tráfico.

Los túneles submarinos de carretera tienden a generalizarse en Noruega; las cifras lo demuestran: 10 túneles en servicio, en total 28,5 km, 4 en construcción, que una vez completos añadirán otros 19 km de carreteras bajo el mar y múltiples proyectos que podrán hacerse realidad en el curso de la presente década. No resultaría demasiado aventurado pensar en más de 100 km de túneles submarinos carreteros en Noruega al inicio del siglo XXI.

JA. J □

Agradecimientos

Mi especial agradecimiento a Arne Grønhaug, uno de los mejores expertos noruegos en el arte de los túneles, extensivo al Dr. Kaare Flaate, Jon Krokeborg, Prof. Einar Broch, Lene Mürer, Knut Engdahl, Tor Geir Espedal, Torleif Haugvalstad así como el Sr. Arne Aasheim, Consejero de la Embajada de Noruega en España.

Bibliografía

- BEITNES, ANDERS; SELJESETH, ERLING.
"Godøy subsea road tunnel-Cost effective solutions for a low-traffic". Strait Crossings. Trondheim. 1990.
- BEITNES, A; BLINDHEIM, O.T.
"Sub-sea rock tunnels. Preinvestigation and tunnelling processes".
- BLINDHEIM, O.T.; ØVSTEDAL, E.
"Water control in subsea road tunnels in rock". Strait Crossings. Trondheim. 1990.
- DAHLØ, TORE S.; NILSEN, BJØM.
"Stability and rock cover of Norwegian hard sub-sea tunnels". Strait Crossings. Trondheim. 1990.
- FLAATE, KAARE.
"Norwegian fjord crossings- why and how". Norwegian Road Research Laboratory. Veglaboratoriet. Meddelelse nr.60.
- FURSTRAND, KÅRE; MÜRER, LENE; GUSTAVSEN, KJELL.
"FATIMA-The effect of a strait crossing to North Cape". Strait Crossings. Trondheim. 1990.
- GRØNHAUG, ARNE.
"Low cost road tunnel developments in Norway". Norwegian Road Research Laboratory. Veglaboratoriet. Meddelelse nr.55.
- JUNCÀ UBIERNA, JOSÉ ANTONIO.
"Historia y Estética de los túneles". Doctoral Thesis. Universidad Politécnica de Madrid, 1988.
- JUNCÀ UBIERNA, JOSÉ ANTONIO
"Historical and aesthetic parameters in strait crossings' evaluation". Strait Crossings. Trondheim. 1990.
- NILSEN, BJØRN; MAAGE, MAGNE; DAHLØ, TORE S.; HAMMER, TOR ARNE; SMEPLASS, SVERRRE.
"Undersea tunnels in Norway: a state of the art review". Tunnels & Tunnelling, September, 1988.
- LEIN, MAGNE.
"The Oslofjord crossing: Heavy environmentalist opposition". Strait Crossings. Trondheim. 1990.
- NAKKEN, ROLF.
"Planning principles for strait crossing as sub sea tunnels". Strait Crossings. Trondheim. 1990.
- RYGG, NILS; FRYDENLUND, TOR ERIK.
"Hvaler sub-sea rock tunnel - Use of drillship for investigating fault zone". Strait Crossings. Trondheim. 1990.
- ØVSTEDAL, ERIK; MELBY, KARL.
"Future desing of sub-sea road tunnels based on cost and technical experience". Strait Crossings. Trondheim. 1990.