

ARTÍCULO TÉCNICO

El proyecto INELFE: microtúneles para responder a los nuevos desafíos climáticos y energéticos

Jean-Armel ALLIOTTE

Adjunto a la Dirección de Proyecto, BESSAC
Saint-Jory, Francia

Mathieu GRISELAIN

Director de Proyecto, BESSAC
Saint-Jory, Francia

Pascal MOLINER

Director Comercial, BESSAC
Saint-Jory, Francia

Resumen

El crecimiento demográfico, la urbanización, la transición energética y los nuevos usos digitales están impulsando con fuerza la demanda de redes de toda índole, en particular en el ámbito marino (*offshore*). Estas infraestructuras deben cruzar la franja costera para conectarse en tierra, lo que exige obras complejas y respetuosas con el medio ambiente. Entre las técnicas disponibles, el microtuneleo se impone como una solución preferente: permite atravesar zonas sensibles sin impacto en superficie, en longitudes que pueden superar el kilómetro, y se adapta a condiciones geológicas muy diversas, ofreciendo una clara ventaja frente a la perforación dirigida.

Las redes implicadas son múltiples: cables de telecomunicaciones (el 99 % de los intercambios mundiales; crecimiento de > 25 % anual), cables eléctricos para eólica marina (+10 % anual), oleoductos y gasoductos (incluidos proyectos para CO₂ e hidrógeno), así como redes hidráulicas (saneamiento, desalación, refrigeración de centrales nucleares, etc.). Las costas arenosas —un tercio del litoral mundial— plantean retos específicos: erosión, zonas protegidas y ausencia de cohesión del terreno. El microtuneleo responde a estas restricciones mediante una organización de obra específica y técnicas avanzadas de lubricación.

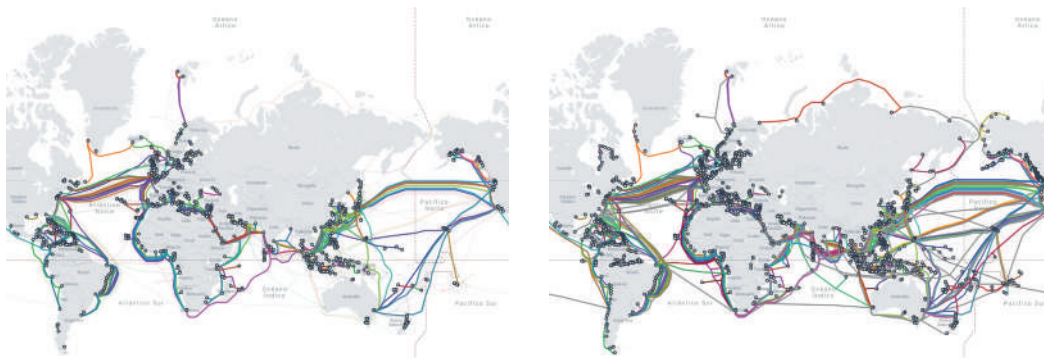
El proyecto INELFE (INterconexión ELéctrica Francia-España) ilustra bien esta pertinencia: se ejecutaron tres microtúneles de 1.2 a 1.35 km bajo el Océano Atlántico, agrupando los cables y cumpliendo normas ambientales estrictas. Este logro confirma el papel estratégico del microtúnel para las infraestructuras *offshore* en plena expansión.

1. Introducción

Tanto para acompañar el aumento demográfico y la urbanización como para habilitar nuevos usos y descarbonizar la economía, las necesidades de equipamiento en redes de todo tipo se intensifican en todo el mundo. Entre ellas, las redes marinas que deben franquear la línea de costa para su conexión a tierra, están creciendo de forma acelerada.

Dado el endurecimiento general de las normas ambientales y la sensibilidad intrínseca de estas redes, sus galerías técnicas se han convertido en obras de alta complejidad técnica.

La técnica del microtúnel aparece cada vez más como una de las más adecuadas para este tipo de proyectos, pues permite integrar múltiples condicionantes: emplazamientos terrestres protegidos, longitudes de obra importantes —que pueden superar el kilómetro— para atravesar sin impacto la zona de rompiente y los ecosistemas submarinos frágiles... Además, es aplicable en un abanico geológico muy amplio, lo que le confiere una clara ventaja frente a la perforación dirigida.



◀ Figura 1. Mapa global de cables submarinos de telecomunicaciones 2015-2025.

El proyecto INELFE de interconexión eléctrica entre Francia y España es un excelente ejemplo reciente en el Golfo de Vizcaya. Se excavaron bajo el Océano Atlántico tres galerías técnicas de longitud excepcional para los cables de esta nueva infraestructura estratégica: obras respetuosas, con condicionantes ambientales exigentes y resilientes frente a eventos climáticos extremos.

2. Redes offshore en rápido desarrollo

2.1 Cables de telecomunicaciones

Los cables submarinos de telecomunicaciones transportan el 99 % del tráfico mundial de datos. En comparación, el intercambio por satélite es marginal.

El volumen de datos crece de forma exponencial —más del 25 % anual en promedio en los últimos diez años (según datos de Cisco)— impulsado, en primer lugar, por la externalización del almacenamiento y del cómputo (*cloud*) y, más recientemente, por el auge de la inteligencia artificial generativa.

Este crecimiento se traduce en fuertes inversiones tanto en centros de datos y capacidad de cómputo como en las infraestructuras de transporte, principalmente cables submarinos. La evolución del mapa de cables 2015–2025 da una idea de la rapidez con la que se expande esta red.

2.2 Cables eléctricos

El despliegue de las energías renovables multiplica las necesidades de transporte eléctrico en el mar. La más inmediata es la conexión a red de los parques eólicos marinos, cuya potencia instalada crece a un ritmo promedio del 10 % anual a escala global.

Además, la intermitencia de la solar y la eólica exige desarrollar interconexiones eléctricas que suavicen las variaciones de generación en amplias regiones. A menudo se opta por interconexiones submarinas, ya que simplifican los trámites en zonas densamente pobladas, como ilustra INELFE entre Francia y España. Asimismo, surgen proyectos ambiciosos para enlazar directamente grandes polos de generación renovable con centros de consumo lejanos, como X-Links (Marruecos-Reino Unido) o Sun Cable (Australia-Singapur).

Cada nuevo cable *offshore* instalado requiere de al menos una galería técnica, lo que abre una perspectiva muy favorable para nuestro sector. Además, el microtuneleo permite optimizar estos cruces: es posible agrupar varios cables en un solo microtúnel —ajustando su diámetro— y así mutualizar la galería.

2.3 Oleoductos y gasoductos

Aunque la producción mundial de crudo se ha estabilizado en la última década, se mantiene gracias al desarrollo de nuevos yacimientos que suelen requerir un oleoducto desde las plataformas de extracción hasta tierra, donde se ubican los almacenamientos. Estas necesidades siguen alimentando el mercado de galerías técnicas.

Las demandas de gasoductos son aún más dinámicas: por un lado, la producción mundial continúa creciendo (+20 % en diez años) y, por otro, las sanciones internacionales a Rusia y las presiones estadounidenses reorientan los flujos, creando nuevas oportunidades para ciertos actores.

Además, están emergiendo gasoductos vinculados a la descarbonización, especialmente en Europa. Algunos están pensados para transportar CO₂ hacia su almacenamiento en formaciones geológicas profundas (por ejemplo, Portos y Aramis

en Países Bajos). Otros se proyectan para hidrógeno, como el corredor europeo HyMed de hidrógeno verde, que incluye el proyecto BarMar para unir por mar Barcelona y Marsella.

2.4 Redes hidráulicas

Estas redes —generalmente de saneamiento y pluviales— son de mayor diámetro y a menudo constituidas por el propio microtúnel. En su extremo aguas abajo, las galerías técnicas corresponden a los emisarios submarinos de estaciones depuradoras situadas en la costa.

Existen otras redes hidráulicas de creciente demanda orientadas al mar. En primer lugar, las tomas y descargas de las plantas desaladoras de agua de mar en regiones con estrés hídrico. Con una capacidad de tratamiento mundial cercana a 100 millones de m³/día, este sector podría crecer alrededor del 10 % en los próximos años, no solo en Oriente Medio o en regiones áridas como el Magreb o Australia, sino también en países con enormes necesidades de agua dulce, como India. Cada planta requiere de una o varias tomas de agua en mar y de uno o varios emisarios con difusores para diluir corrientes de mayor salinidad.

El relanzamiento de la energía nuclear en numerosos países, para reducir la dependencia de los hidrocarburos, también genera necesidades de emisarios de refrigeración: túneles de ~5 m de diámetro con difusores situados a más de un kilómetro de la costa (por ejemplo, proyectos EPR en Penly y Gravelines, Francia).

3. Retos específicos de las costas arenosas

3.1 Sensibilidad a la erosión

Aproximadamente un tercio de las costas mundiales libres de hielo son arenosas. En Francia metropolitana la proporción es similar, por lo que numerosos cruces de redes se ubicarán en este tipo de litoral con problemáticas propias. Entre un cuarto y un tercio de estas costas retroceden por la erosión, lo que podría acelerarse con la elevación del nivel del mar.

Las administraciones públicas afrontan estos retos; Francia no es la excepción. Destaca, por ejemplo, la política de adquisición de suelo del Conservatorio del Litoral desde hace 50 años, destinada a frenar la urbanización costera, preservar ecosistemas litorales y gestionar la evolución de la línea de costa —por ejemplo, favoreciendo la fijación de dunas mediante vegetación.

Para los cruces, esto implica obras robustas y a suficiente profundidad para no quedar al descubierto por el retroceso de la costa. Además, ciertas áreas no son accesibles, lo que descarta el uso de zanjas. En tales casos, se recurre a la perforación dirigida o al microtuneleo.

3.2 Protección ambiental

Otros niveles de protección son reglamentarios, ya sea a través de reservas naturales o de redes de protección nacionales/europeas, con restricciones a las actividades humanas y seguimiento por autoridades competentes.

Simétricamente, los retos de protección y evolución del litoral conciernen tanto a la parte terrestre como a la marina. La banda de mar próxima a la costa es rica en biodiversidad específica; por ello, resulta ventajoso atravesarla en subterráneo y emerger mar adentro, en zonas más estables, evitando la franja intermareal particularmente sensible.

Además de estas protecciones geográficas, la normativa sobre impactos se ha endurecido: la protección de los mamíferos marinos durante los trabajos, el control de la turbidez y de la cantidad/calidad de las aguas y de lodos vertidos, entre otros.

Si bien aquí se cita el caso francés, se observan protecciones similares en muchos países, con marcos administrativos exigentes para gestionar los impactos de los grandes proyectos, que deben ser ejemplares en todas partes.

3.3 Particularidades de excavar en arena

Las consideraciones anteriores explican por qué las técnicas sin zanja son la opción preferida para cruzar costas arenosas protegidas. La arena ofrece ventajas e inconvenientes.

Entre sus ventajas: es un material homogéneo y competente; una red instalada en arena queda bien asentada y es poco sensible a asentamientos diferenciales o al flujo del terreno. Además, es un material suelto de excavación relativamente fácil.

Entre sus inconvenientes: carece de cohesión y es muy permeable. Es preciso extremar la estabilización de perforaciones y, en general, de las obras. En perforación dirigida, el reto es la estabilidad de la perforación, en particular entre la perforación progresiva hasta el diámetro definitivo y el entubado final.

En microtuneleo, la ausencia de cohesión, unida a la alta fricción del terreno, hace crítica la gestión de la convergencia y la lubricación para evitar que el terreno se cierre sobre el tubo e inmovilice el avance. Asimismo, exige una buena estabilidad del frente para no sobreexcavar ni generar cavidades que provoquen daños en superficie en zonas estrictamente protegidas.

4. CASO PARTICULAR DEL PROYECTO INELFE

4.1 Interés del proyecto

Hasta 2015, la capacidad de interconexión eléctrica entre Francia y la península ibérica era de 1,400 MW. La puesta en servicio en octubre de 2015 de la interconexión Baixas-Santa Llogaia, en los Pirineos catalanes —también bajo INELFE— permitió duplicarla a 2,800 MW. La colaboración prosigue en el Golfo de Vizcaya para elevarla a 5,000 MW mediante dos enlaces submarinos de corriente continua en muy alta tensión.

Dado que el mix energético español descansa ampliamente en fuentes renovables intermitentes —más de 60 GW instalados en eólica y fotovoltaica— poder exportar al sistema europeo el excedente cuando las condiciones meteorológicas son favorables resulta crucial para la rentabilidad de las inversiones. A la inversa, cuando faltan viento y sol, la generación hidráulica y térmica no siempre compensa, por lo que la posibilidad de importar energía desde Francia es igualmente importante.



▲ Figura 2. Trazo esquemático (fuente: INELFE).

4.2 Paso por el Gouf (cañón submarino) de Capbreton (costa suroeste de Francia)

A la altura de Capbreton existe un profundo valle submarino —el Gouf— formado por la separación de las placas europea e ibérica y por la erosión del río Adour durante periodos glaciares. Los estudios previos de RTE (Red de Transporte de Electricidad) revelaron que sus laderas eran demasiado inestables para tender el cable por su interior. Hubo que desviar el trazado por tierra creando un bucle de 27 km alrededor de Capbreton y Hossegor.

Se necesitaron, por tanto, dos galerías técnicas adicionales: una en Capbreton, al sur del Gouf, y otra en Seignosse, al norte, además de las galerías técnicas inicialmente previstas: Lemoniz (cerca de Bilbao) y Le Porge (a la altura de Burdeos, en la costa atlántica).

4.3 Mutualización de las galerías técnicas

Inicialmente se propuso perforación dirigida —siete perforaciones por galería técnica— para dos líneas formadas cada una por dos cables eléctricos y un cable de fibra óptica, más una perforación de reserva. Durante la licitación para la parte francesa, la solución evolucionó hacia un único microtúnel por galería técnica, compartido por ambas líneas.

Esta opción resultó la más pertinente por viabilidad, dada la geología y la longitud de las obras. Aportaba además la ventaja de reducir el tamaño de la instalación para el cruce la franja costera protegida, concentrándolo todo en un túnel de 2.3 m de diámetro interior.

4.4 Restricciones de implantación de los sitios

Cada emplazamiento (pozos de lanzamiento desde los que se empujan los microtúneles) se sitúa en el límite de zonas de alta protección. La figura 3 a continuación muestra el sitio de trabajo de Seignosse, delimitado con líneas punteadas rojas, y las áreas bajo la protección del Conservatorio del Litoral (en azul), Natura 2000 (en amarillo) y las Áreas Naturales de Interés ecológico, faunístico y florístico (ZNIEFF) tipo II (en verde).

Los otros sitios están en situaciones comparables. Las superficies autorizadas se delimitaron con precisión por ecólogos, siguiendo el estudio de impacto y considerando la presencia de especies vegetales protegidas. En Seignosse, por ejemplo, se dispuso de menos de 4,000 m² para el pozo de lanzamiento, oficinas, acopio de tubos, instalaciones de desarenado, zona de giro de camiones e instalaciones de tratamiento de agua.

4.5 Longitud de los tiros

El punto de partida venía determinado por las limitaciones anteriores, y el punto de llegada por la batimetría: situar la boca del túnel, donde el

fondo marino alcanza -12 m respecto al nivel de bajamar extrema, manteniendo 3 m de recubrimiento.

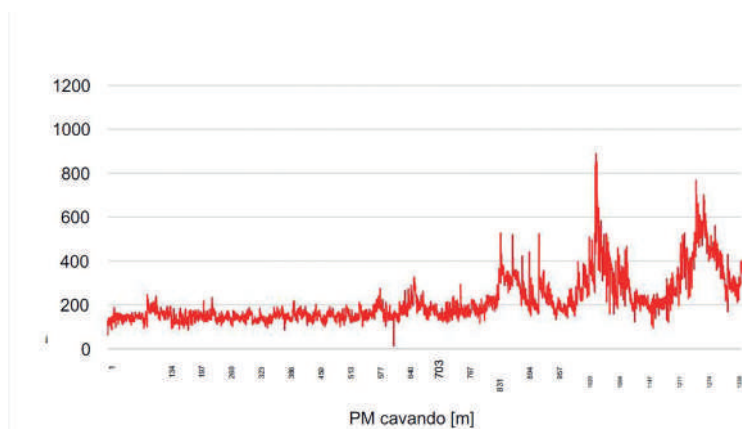
Para alcanzar ese punto, las longitudes fueron: 1,290 m en Le Porge, 1,355 m en Seignosse y 1,200 m en Capbreton. Con ello, la empresa constructora batió dos veces el récord de Francia de empuje más largo en 2024 y 2025.

▼ Tabla 1. Características geométricas y rendimiento del guiado de los tiros en offshore.

		Unidades	Le Porge	Seignosse	Capbreton
Longitud del tiro		m	1,290	1,355	1,200
Pendiente máxima		%	11	5	10
Curvatura máxima	horizontal	m	10,000	-	3,000
	vertical	m	2,500	5,000	3,000
Desviación horizontal	final	cm	7.6	2.5	0.6
	máxima	cm	13.5	15.6	23.7
Desviación vertical	final	cm	2.7	4.0	3.0
	máxima	cm	7.6	12.2	19.0



▲ Figura 3. Implantación del sitio de trabajo Seignosse y regímenes de protección (Fuente: geoportail.fr).



▲ Figura 4. Fuerza de empuje ejercida por los gatos hidráulicos desde el pozo de arranque - Seignosse.

5. Un éxito técnico

5.1 Control de la geometría

El guiado adoptado en los tres tiros offshore de INELFE fue por objetivo activo en la MTBM (Micro TBM), observado por una estación total situada -70 m por detrás en el túnel.

Algunos controles topográficos intermedios sirvieron para verificar la correcta calibración y realizar pequeños ajustes. Con este sistema, los extremos de salida se ubicaron a menos de 10 cm de su posición teórica a más de un kilómetro del punto de partida. Las desviaciones máximas respecto al perfil teórico se registraron en las curvas, siempre por debajo de 25 cm. En comparación, la tolerancia típica de una perforación dirigida de esta longitud es del orden de 10 m.

5.2 Control de la convergencia

Los tubos de empuje estaban dimensionados para 1,800 t de carga. Se podían instalar hasta seis gatos hidráulicos de 300 t en fondo del pozo de arranque. En la práctica, bastaron cuatro. En un terreno arenoso sin cohesión, el objetivo era limitar las paradas, durante las cuales el terreno se cierra sobre el tubo. La organización de la obra respondió a esta exigencia con turnos 24/7. La fuerza máxima registrada fue de 890 t.

Además, los microtúneles tenían estaciones de empuje intermedias aproximadamente cada 100 m, concebidas como solución de emergencia para reanudar el avance tras una parada prolongada.

La buena lubricación del espacio anular fue la otra medida clave para controlar la convergencia y la fricción. Se realizaba una primera inyección, a caudal constante, alrededor de la cabeza de corte, y se desplegaba una nueva línea de inyección cada 500 m con cajas de válvulas distribuidas a lo largo del túnel para garantizar un llenado homogéneo del espacio anular.

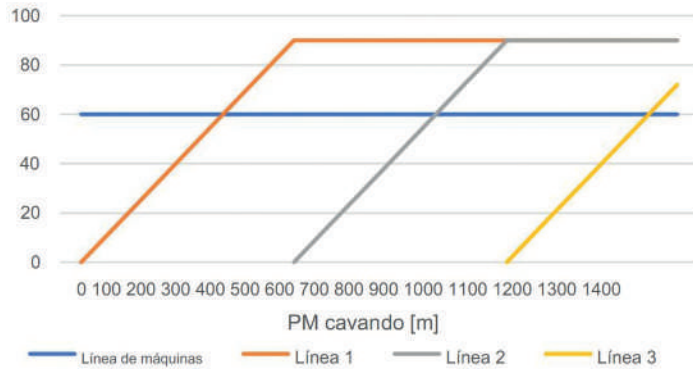
5.3 Control de impactos

Un proyecto tan emblemático, ubicado en zonas de alto valor ecológico y con oposición local, estuvo sometido a una intensa supervisión (DDTM, OFB, ecólogo de RTE, asociaciones ecologistas en comité de seguimiento convocado por la Prefectura, DREAL).

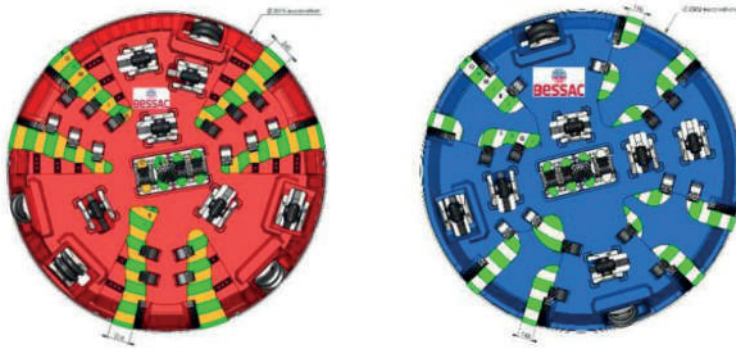
Los productos utilizados en lodos de perforación y lubricación estaban en la lista PLONOR (por sus siglas en inglés *Pose Little Or No Risk to the environment*, que significa "presentan poco o ningún riesgo para el medio ambiente"). Las aguas de escorrentía y los lodos neutralizados se trataron *in situ* con seguimiento de pH y MES, comunicado a la DDTM antes del vertido.

Asimismo, un dron sobrevolaba a diario el eje del túnel para descartar alteraciones en la duna o la playa. Se eligieron ruedas de corte "cerradas" para reducir el riesgo de cavidades; los discos de las dos tuneladoras presentaban aperturas del 16 % y 13 %, respectivamente.

Por otra parte, el recubrimiento de 3 m en la boca del túnel evitó la descarga de lodos al mar: las conducciones de dragado y la cámara de abatimiento se purgaron con agua antes del dragado para recuperar la máquina. Esto supone una ventaja clara frente a la perforación dirigida, que puede perder grandes volúmenes de lodo durante la fase de perforación.



▲ Figura 5. Lubricación del espacio anular durante la excavación.



▲ Figura 6. Vista de las dos ruedas de corte.

▼ Tabla 2. Datos de producción.

	Unidades	Le Porge	Seignosse	Capbreton
Longitud del tiro	m	1,290	1,355	1,200
Número de días de excavación	%	74	67	60
Rendimiento industrial por día	m	17.5	20.1	19.9
Mejor jornada	m	45.6	44.6	40.4
Avance instantáneo promedio	mm/min	65	56	68

5.4 Control de la planeación

El éxito del proyecto pasaba también por cumplir el plazo. Por un lado, porque un rendimiento insuficiente aumentaba el riesgo de cierre del terreno; por otro, por restricciones del programa: desalojo de obra en verano (zona turística) y ventanas de oleaje favorable para la fase marítima.

Los rendimientos de los tres tiros fueron bastante homogéneos —reflejo de la homogeneidad del terreno—. Con una media de 20 m/día, el calendario se cumplió. Ello supuso una exigente logística en emplazamientos reducidos: los flujos combinados de tubos y desalojo de arenas producto de la excavación rondaron las 1,000 t/día en días laborables.

5.5 Equipamiento de los microtúneles

Al ser obras mutualizadas, se instalaron en cada túnel 5 conductos continuos de PEAD (Polietileno de Alta Densidad.) de Ø 450 mm y 2 de Ø 200 mm. En Capbreton y Seignosse no había longitud suficiente para prefabricar en superficie un “fajo” completo.

La solución consistió en montar bastidores de aluminio en el interior del túnel y tender las conducciones tirándolas con cuerdas devueltas por poleas fijadas en la placa de cierre del extremo marino antes de la puesta en agua. Dos puestos de soldadura en tierra, alineados con la boca del túnel, permitieron avanzar a razón de un tubo de 12 m/h por línea. Dos malacates en los pozos de lanzamiento tiraban de cada línea tras el enfriamiento de las soldaduras.

Esta solución era visitable en todo momento y no requería medios marítimos. En una solución de perforación dirigida habría sido necesaria una conducción completamente ensamblada —en tierra o por mar— con operaciones condicionadas por ventanas meteorológicas.

Durante el tendido de los PEAD, se ensayó con éxito el uso de perros robots para no exponer personal al riesgo de rotura de cuerdas, se trató de robots teledirigidos con cámaras orientables que acompañaban las cabezas de tiro dentro del túnel, informando al operador del malacate y detectando anomalías antes de causar daños en conductos o soportes.

6. Conclusiones

Los trabajos de la empresa constructora en el proyecto INELFE demuestran que el microtúnel es una solución eficaz para cruzar litorales sensibles y posibilitar la instalación de redes estratégicas.

La ejecución de estas tres galerías técnicas en la costa francesa evidenció los puntos fuertes de la solución: cumplimiento de estrictas exigencias ambientales, control de plazos, posibilidad de mutualizar galerías técnicas cuando intervienen varias redes y construcción de obras resilientes.

La longitud excepcional de los tiros en arena exigió métodos innovadores —en particular, en

la lubricación del espacio anular, parámetro clave del éxito— así como un sistema de guiado poco habitual en microtuneleo.

A pesar de la longitud de los tiros y del alto nivel de restricciones, la obra es un verdadero éxito, que confirma la pertinencia del microtúnel para este tipo de infraestructuras en plena expansión a escala mundial.



▲ Figura 7. Perro robot en el túnel mientras se tiraban las fundas.

7. Referencias

Agence International de l'Énergie - www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/

Agence Internationale de l'Énergie - IEA Annual Report 2024 France

INELFE - www.inelfe.eu/fr/presentation-inelfe

Les Échos - www.lesechos.fr/monde/europe/coup-denvoi-du-projet-dhydrogene-vert-entre-barcelone-et-marseille-1887774

Nature - Reported values of global and regional occurrences of sandy shorelines and percentages of chronic erosion and accretion

Secrétariat d'État chargé de la mer Observatoire du trait de côte - www.mer.gouv.fr/adaptation-des-territoires-aux-evolutions-du-littoral

submarinemap.com

Suncable - www.suncable.energy/our-projects

X-Links - xlinks.co/morocco-uk-power-project



IMPERMEABILIZACIÓN DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS



+20

AÑOS DE EXPERENCIA

+50 km

TÚNELES IMPERMEABILIZADOS

+60

TÚNELES IMPERMEABILIZADOS

+800 mil m²

DE SISTEMAS INSTALADOS



PROYECTOS GEOSINTÉTICOS



PROYECTOS DE IMPERMEABILIZACIÓN



AGUA Y MEDIO AMBIENTE



TERMOFUSIÓN DE TUBERÍAS



CONSTRUCCIÓN Y SERVICIOS