

CIUDAD Y TERRITORIO

ESTUDIOS TERRITORIALES

ISSN(P): 1133-4762; ISSN(E): 2659-3254

Vol. LII, Nº 206, invierno 2020

Págs. 739-752

<https://doi.org/10.37230/CyTET.2020.206.02>

CC BY-NC 4.0



La geotecnia como factor condicionante en grandes infraestructuras. El enlace fijo Europa-África

Francisco Javier MANZANO-DIOSDADO⁽¹⁾Francisco LAMAS-FERNÁNDEZ⁽²⁾José Miguel AZAÑÓN-HERNÁNDEZ⁽³⁾⁽¹⁾Sergeyco Andalucía S. L.⁽²⁾Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Granada.⁽³⁾Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada.

RESUMEN: El estrecho de Gibraltar es la zona de mayor cercanía entre el continente europeo y el africano. Desde tiempos remotos las diferentes civilizaciones que han habitado el sur de la península ibérica y el norte del Magreb, han planteado la posibilidad de construir un enlace fijo entre ambos continentes. Este futuro enlace tendría una importancia muy relevante en el desarrollo, tanto del Campo de Gibraltar como del Norte de Marruecos. Este desarrollo será un auténtico revulsivo para una zona especialmente deprimida con importantes implicaciones socioeconómicas y de ordenación del territorio. Sin embargo, el diseño de esta infraestructura plantea una serie de problemas. El Estrecho de Gibraltar presenta una fisiografía muy abrupta, con fosas de grandes profundidades. Además, la geología juega un papel determinante, toda vez que el proyecto se sitúa en un límite entre dos placas tectónicas en las que, además, existen materiales de una especial complejidad (brechas de los paleocanales). En la actualidad, la viabilidad de esta infraestructura está en el aire debido a los condicionantes geotécnicos que imponen los materiales que se han de atravesar.

PALABRAS CLAVE: Estrecho de Gibraltar; Geología; Túnel; Infraestructura; Desarrollo económico; Brechas.

Recibido: 31.07.2019; Revisado: 03.11.2020

Correo electrónico: manzanodiosdado@ugr.es; Nº ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1019-6786>;Correo electrónico: flamas@ugr.es; Nº ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8459-3602>;Correo electrónico: jazanon@ugr.es; Nº ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7834-5816>

Los autores agradecen los comentarios y sugerencias realizados por los evaluadores anónimos, que han contribuido a mejorar y enriquecer el manuscrito original.

¹ Los autores quieren agradecer el apoyo prestado para la redacción del presente artículo a las Autoridades portuarias de Algeciras, Málaga y Almería mediante la cesión de datos propios, además del apoyo brindado por la empresa SERGEYCO Andalucía. Así mismo, agradecer a la sociedad SECEGSA el acceso a su base de datos.

Geotechnics as a conditioning factor in large infrastructures. The link Europe–Africa

ABSTRACT: Gibraltar Strait is the area where Europa and Africa are nearest. Since ancient times, different inhabitant civilisations in Iberian peninsulae and North Magreb have thought building a fixed link among both continents. This future link could have a relevant importance in the area development both in Campo de Gibraltar and North Marroco. This development would mean a real revulsive for a depressed area with important socioeconomic and spatial planning implications. But this infrastructure design poses a serie of important problems. Gibraltar Strait has a rough physiography with very deep trenches. At last, geology plays an important role in this Project, as it is placed in a plate tectonic boundary and especially complex materials exist in the area (paleochannels breccias), too. Today, the Project viability is not guaranteed due to the geotechnical conditions imposed by the materials to be crossed.

KEYWORDS: Gibraltar Strait; Geology; Tunnel; Infraestructure; Economical development; Breccias.

1. Introducción

El Estrecho de Gibraltar es una zona de gran interés estratégico por su posición geográfica entre Europa y África, además de ser un punto clave en las rutas marítimas entre el Atlántico y el Mediterráneo. No en vano, el Estrecho de Gibraltar es la segunda ruta marítima más transitada del mundo, siendo paso obligado en la conexión de los países ribereños del mediterráneo con los países atlánticos y asiáticos. Además, es el punto donde más cerca se encuentran el continente africano y el europeo lo que lo convierte en el camino natural para el tránsito entre uno y otro continente por vía marítima (Fig. 1).

A nivel de la movilidad entre el Sur de Europa y el norte de África, en la actualidad cada año se mueven a través del Estrecho de Gibraltar más de 6 millones de personas en barco entre ambas orillas (Fuente: consulta a las Autoridades portuarias de Algeciras, Málaga y Almería). El tráfico en el principal puerto (el de Algeciras) ha tenido una tendencia en general alcista (Fig. 1) hasta rozar los 6 millones de pasajeros en el año 2018 y la previsión es que continúe aumentando en el futuro más cercano.

En este escenario, la posibilidad de disponer de un enlace fijo entre Europa y África por el Estrecho de Gibraltar parece obvio que presentaría una serie de ventajas innegables y han hecho de este proyecto una prioridad para los gobiernos de España y Marruecos.

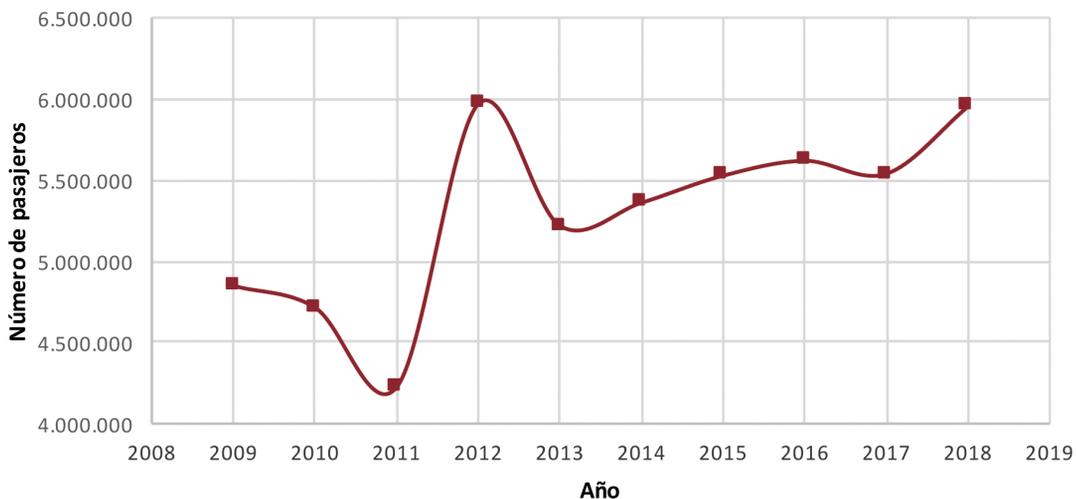


Fig. 1/ Evolución del número de pasajeros en el puerto de Algeciras.

Fuente: AUTORIDAD PORTUARIA DE LA BAHÍA DE ALGECIRAS.

Esta importancia quedó plasmada por la parte española al ser esta infraestructura incluida en el Plan Estratégico de Infraestructuras y transportes de España 2005-2020. Además, en la VIII Conferencia de Ministros de Transporte del Mediterráneo, desarrollada en Lisboa el 22 de octubre de 2014, los ministros de transportes decidieron incorporar el enlace fijo entre España y Marruecos como uno de los proyectos a los que las comisiones técnicas dedicarán un seguimiento semestral, resaltando así su compromiso con el proyecto (MINISTERIO DE FOMENTO, 2014).



FIG. 2/ **Vista del Estrecho de Gibraltar y el mediterráneo occidental.**

Fuente: NASA.

La puesta en explotación de esta infraestructura reduciría la demanda de transporte marítimo de pasajeros y vehículos, sustituyéndolo por un tráfico ferroviario, mucho más efectivo y menos contaminante que el marítimo, con la consiguiente reducción en la huella de carbono, ayudando así a cumplir el objetivo de reducción de emisiones planteado para nuestro país para el año 2050 por el Consejo Europeo de octubre de 2014. Pero, además, un enlace fijo permitiría de manera fácil absorber un aumento en la demanda del tráfico (FIG 3), sin necesidad de aumentar las infraestructuras que serían necesarias para aumentar el tráfico marítimo (mayor número de atraques, mayor número de buques, mayor superficie de áreas de espera y embarque, etc.).

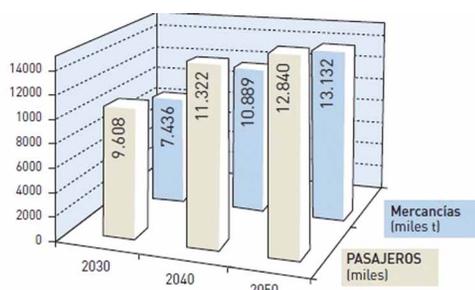


FIG. 3/ **Evolución prevista del tráfico de pasajeros y mercancías que existiría a través del futuro túnel.**

Fuente: SECEGSA (Sociedad Española de Estudios para la Comunicación Fija a través del Estrecho de Gibraltar S.A.).

Además, la existencia de un enlace fijo permitiría evitar la actual situación de incomunicación que las ciudades autónomas españolas en el Norte de África (muy especialmente Ceuta) sufren cuando las condiciones meteorológicas obligan al cierre de los puertos. La existencia de un enlace fijo, permitiría en estas situaciones mantener el tráfico entre ambas orillas con independencia de las condiciones climatológicas y, además, hacerlo en un tiempo sensiblemente menor que el tránsito marítimo (ALASTRUÉ, 2014). Además, esta reducción del tiempo de tránsito facilitará la existencia de trabajadores fronterizos que residan en una orilla y trabajen en la opuesta lo que redundaría en una potencial mayor movilidad de trabajadores entre ambos continentes.

Pero el desarrollo de esta infraestructura no solo traerá mejoras en las comunicaciones propiamente dichas, si no que será todo un revulsivo socioeconómico para ambos países y muy especialmente en la zona del Campo de Gibraltar. Toda la red de Alta velocidad de Marruecos ha sido diseñada pensando en la futura conexión con la red española (Ruiz, 2015) y el desarrollo de los corredores central y mediterráneo en España cuentan con esa futura interconexión como parte fundamental de los mismos (CONSEJERÍA FOMENTO Y VIVIENDA, 2013). Además, el enlace fijo permitiría una conexión rápida y fiable entre los dos mayores puertos del mediterráneo occidental (Puerto de Algeciras y Tánger Med), con la mejora en la intermodalidad que esto conllevaría. A este respecto, cabe recordar que el área de la Bahía de Algeciras está declarada como nodo logístico de primer nivel en el *Plan Funcional del área logística de interés autonómico de la Bahía de Algeciras* (CONSEJERÍA DE FOMENTO Y VIVIENDA, 2015), si bien en la actualidad esta intermodalidad es más teórica que práctica debido a la falta de infraestructuras que lo hagan posible. Se han desarrollado y actualmente existen dos grandes Zonas logísticas en la Bahía de Algeciras que se encuentran prácticamente sin actividad (el Área Logística Bahía de Algeciras. Sector El Fresno y Sector San Roque). Por ello, la puesta en servicio del enlace fijo como parte fundamental de la conexión entre la Red Transeuropea con la futura Red Transmediterránea podría suponer un acelerador del desarrollo local, convirtiendo la región del Estrecho de Gibraltar en un importante *Hub* intercontinental (ALASTRUÉ, 2014; NACIONES UNIDAS, 2013).

Respecto al impacto económico que esta infraestructura puede llegar a tener, la sociedad estatal SECEGSA ha evaluado el efecto que el desarrollo y puesta en funcionamiento de dicha infraestructura tendría en diversos países sobre el Índice de Desarrollo Humano (IDH) como indicador socio-económico. Este podría elevarse en un

4.28 % en Mauritania, un 1.97% en Marruecos, un 1.75 % en Túnez y un 0.88% en Libia (ALASTRUÉ, 2014). En un contexto de desarrollo económico en el continente africano, la existencia de esta infraestructura situará a la Unión Europea (y muy especialmente a España) en una posición privilegiada frente a otras economías ya presentes en el continente (como China, Japón, India o Brasil).

Pero no sólo económico será el impacto que esta infraestructura tendrá, si no que se convertirá en un auténtico modelador del territorio por sí misma. Se ha observado cómo la puesta en funcionamiento de líneas de Alta Velocidad Ferroviaria (AVF) no ha variado sustancialmente la posición de las grandes regiones metropolitanas, a la vez que sí lo ha hecho con las ciudades intermedias, no sólo de aquellas que dan servicio a la infraestructura si no también del resto (UREÑA & al. 2012). Por ejemplo, las ciudades de Lille en Francia y Zaragoza, Córdoba o Valladolid en España se han visto notablemente beneficiadas de la puesta en funcionamiento de la AVF (ALONSO & BELLET, 2009). Además, la AVF funciona como un elemento estructurante del territorio por sí misma (BELLET & al. 2010), efecto que puede producirse en una zona tan deprimida socio económicamente como el Campo de Gibraltar. Sin duda, la construcción y puesta en servicio de esta infraestructura supondrá un revulsivo en lo que a ordenación del territorio se supone en las zonas afectadas a ambos lados del Estrecho.

Por último, el aumento de los intercambios comerciales entre Europa y África debidos a la nueva infraestructura no será del todo simétrico si no que tendrá una mayor incidencia en el sentido Sur-Norte que, a la inversa, lo cual potenciará un cierto equilibrio entre ambas, lo que puede redundar a largo plazo en una mayor estabilidad en la zona (ALASTRUÉ, 2014). Esta estabilización del Magreb tiene importantísimas connotaciones desde el punto de vista estratégico y de seguridad para la Unión Europea en tanto que estabilizaría su frontera exterior sur, disminuyendo en el futuro el tráfico de migrantes hacia sus costas.

Sin embargo, la posición geoestratégica de esta infraestructura hace que no se pueda tratar sólo en términos socio económicos sin tener en cuenta los retos de seguridad que plantea (Ruiz, 2015). Este nuevo paso supone la creación de un paso fronterizo terrestre actualmente inexistente. Además, al tratarse de una frontera con un país externo a la Unión Europea, supone la necesidad de diseñar nuevas infraestructuras y dotarlas de los medios necesarios para el control migratorio y de fronteras. Esto implica la

necesidad de tomar decisiones y alcanzar acuerdos con el Reino de Marruecos acerca del estatus jurídico y competencial en el interior del propio túnel si bien el ejemplo del túnel entre Francia y Reino Unido suponen un antecedente que podría facilitar esta toma de decisiones. Respecto del control de flujos migratorios, la construcción del túnel supondrá sin duda un alivio en los pasos fronterizos actuales si bien será necesario implementar sistemas de control en el nuevo paso fronterizo.

2. El enlace fijo (reseña histórica y descripción de la propuesta actual)

El Estrecho de Gibraltar ha sido siempre un accidente geográfico de importancia que ha llamado la atención a escritores y personalidades de las diferentes épocas. Autores griegos y romanos identificaban éste como el límite del territorio conocido a partir del cual comenzaba el océano sin explorar. Así, en esta zona se desarrollan las leyendas de las *Hespérides*, *Perseo* o *Hércules* (incluida la separación de Europa y África y la formación de las dos *columnas de Hércules* a ambos lados del estrecho).

La primera evidencia escrita de la que se tiene constancia en la que se habla de un enlace fijo entre Europa y África por el Estrecho de Gibraltar data del año 957 y corresponde al célebre polígrafo y viajero musulmán Al-Masudi (VELASCO, 2016). En esta obra denominada *Las Praderas del Oro*, se señala claramente que las informaciones no son de primera mano y se habla de la hipotética existencia de un puente que unía España y el Magreb. Ese puente mitológico supuestamente se encontraba construido por piedras y ladrillos cocidos con grandes pilas apoyadas sobre roca firme. Este puente supuestamente permitía el paso de caravanas entre uno y otro país.

Más adelante, Chems-ed-Din Dimasqui (1256 – 1327) escribió su *Cosmografía* en varios tomos. En el décimo tomo se habla de España y en éste, se habla del puente que intentó construirse para unir ambas orillas del Estrecho (FIG. 4). Este puente “tenía un largo de 18 millas, con 70 arcos y 72 macizos a manera de pilares...” (VELASCO, 2016). El diseño del hipotético puente resulta, visto desde nuestra perspectiva actual, muy adelantado a su fecha. Se habla de una construcción simultánea en ambas orillas para encontrarse en el centro del estrecho ambas construcciones. Además, se habla de la construcción de un rompeolas para la protección mediante escollera de los dos estribos del supuesto puente, si bien no se dan muchos datos de este detalle.



a) St.-Pét. et L. omettent les mots renfermés en parenthèses.

Fig. 4/ Descripción del puente y del proceso constructivo según Dimasqui.

Fuente: VELASCO, 2016.



Fig. 5/ Primera noticia en prensa del futuro túnel.

Fuente: ECO DEL PROGRESO, 1872.

Respecto de la cimentación, se habla de grandes cercos de madera rellenos de piedra y argamasa que se apoyarían en el lecho marino. Según este escrito, la obra quedó interrumpida durante un año y se reanudó hasta su completa ejecución al año siguiente, si bien:

“Cuando esta obra llegó a su término, el mar deshizo todas las construcciones irrumpiendo e inundando todas las zonas”.

Actualmente, con los condicionantes existente en el Estrecho (profundidad, corrientes, etc.) no cabe pensar que esta descripción se refiriese a una construcción real sino más bien a una idea o proyecto de la época que nunca llegase a ponerse en práctica y que forman parte de las leyendas orientales de la época. Remontándonos ya a épocas más cercanas, la cercanía entre un continente y el otro, junto con los avances técnicos crecientes tras la revolución industrial, hizo que ya en 1869 se plantease firmemente la posibilidad de proyectar y construir un enlace fijo entre ambos (VELASCO, 2016). Ese año, el francés Charles de Villedeuil planteó la posibilidad de construir un túnel que uniese África

y Europa bajo el Estrecho de Gibraltar. Esta primera idea quedó inicialmente frustrada por el estallido de las Guerras Carlistas y la inestabilidad económica y social del país. Más adelante, esa primera idea fue presentada en sociedad en 1872, quedando la noticia recogida en la prensa de la época (Fig. 5).

Durante la primera mitad del siglo xx, se hicieron diversas propuestas para el enlace con muy diversa tipología estructural, desde un túnel excavado (Jevenois en 1927 e Ibáñez de Ibero en 1952), un túnel sumergido (Gallego Herrera en 1929) o un puente suspendido de diversas tipologías (Peña Boeuf en 1956) (Fig. 6).

En el año 1972, el Ministerio de Obras Públicas de España crea una comisión para el estudio de la viabilidad del proyecto y en 1979 se firma el acuerdo entre los reinos de España y Marruecos que posibilita en 1980 la creación de dos sociedades públicas: la Sociedad Española para la Comunicación Fija a través del Estrecho de Gibraltar (SECEGSA) en España y la Société Nationale d'Études du Déroit de Gibraltar (SNED) en Marruecos (VILLAREAL, 2018).



Fig. 6/ Boceto del posible puente colgante sobre el Estrecho de Gibraltar propuesto por Peña Boeuf.

Fuente: VELASCO, 2016.

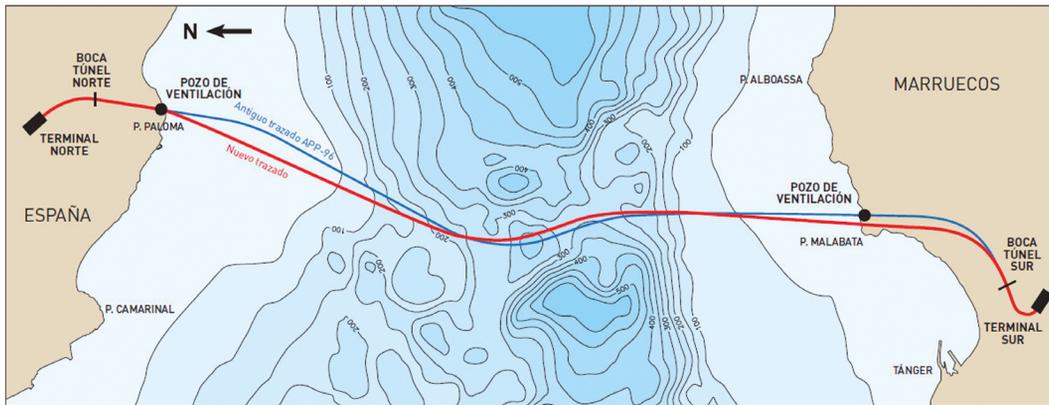


Fig. 7/ Trazado de la solución base propuesta en la actualidad.

Fuente: SECEGSA.

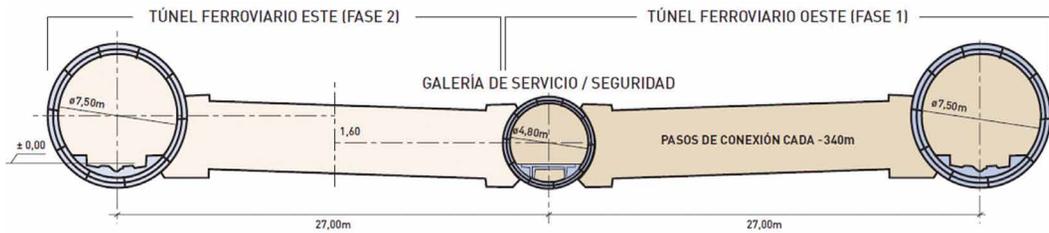


Fig. 8/ Sección transversal en la fase final.

Fuente: SECEGSA, 2013.

En el año 1996, de entre todas las opciones analizadas se eligió como solución base la de un túnel ferroviario excavado bajo el fondo marino (SECEGSA, 1996). Inicialmente el proyecto consistiría en un único túnel ferroviario de vía única con 7.5 m de diámetro que estaría conectado con una galería de servicio de menor dimensión (4.80 m). En una segunda fase se construiría un segundo túnel ferroviario de las mismas dimensiones que el primero que, de la misma manera, funcionaría en dirección única (Figs. 7 y 8). Esta opción se eligió por ser la más económica y viable desde un punto de vista constructivo (SECEGSA, 1996), si bien la compleja geología del estrecho hace que actualmente falte información desde un punto de vista geológico-geotécnico para la completa definición del proyecto definitivo e incluso para terminar de establecer su viabilidad.

Es tal la repercusión que esta infraestructura tiene, no sólo para los países del norte de África y los del Sur de Europa, si no a nivel mundial, que es el único proyecto de infraestructura internacional seguido de forma permanente por el Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas (ECOSOC). A este respecto, dicho informe pone

de manifiesto la importancia, no sólo económica, sino estratégica y geo-política de una infraestructura de este tipo. Primero porque permitiría el desarrollo de la conectividad ferroviaria de alta velocidad entre ambos continentes y segundo porque supondría un importante impulso económico para la región (entendiendo la región como las zonas más cercanas a la infraestructura a ambos lados del estrecho).

Sin embargo, el proyecto del túnel también está acechado por una serie de riesgos e incertidumbres de manera importante hasta el extremo de dudarse de su viabilidad en muchas ocasiones (debate que aún no ha quedado cerrado en firme). El enlace fijo no sólo une dos continentes desde el punto de vista geográfico, sino que también supone un enlace entre la placa tectónica Euroasiática y la Africana. Esto tiene serias implicaciones desde el punto de vista geotécnico sobre el futuro enlace puesto que las deformaciones que se puedan producir en el contacto entre ambas placas deberían ser absorbidas por la futura infraestructura.

Este límite entre placas se ha considerado habitualmente como un límite transformante asociado

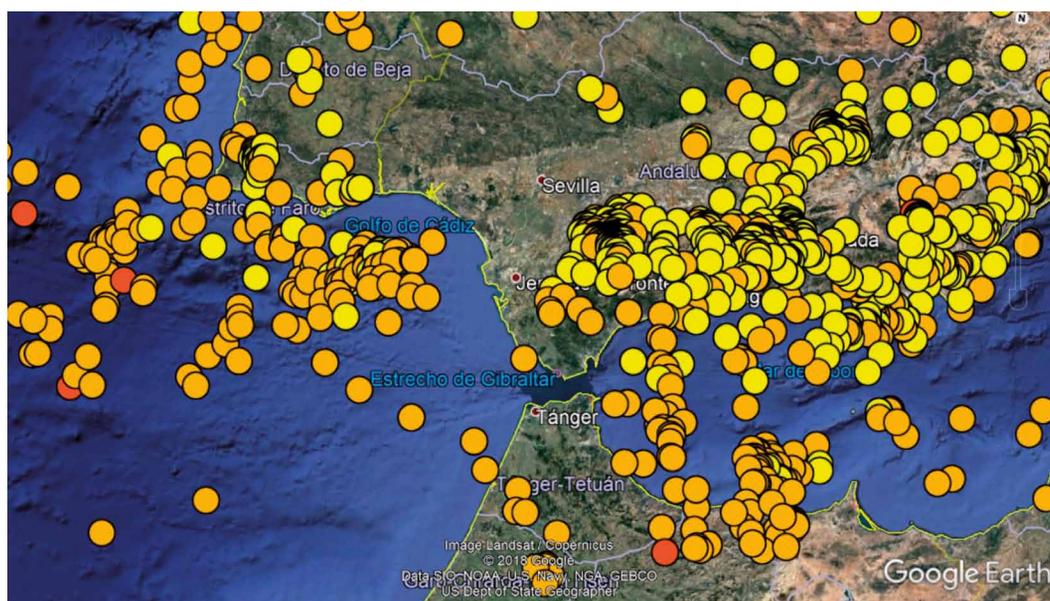


FIG. 9/ Terremotos registrados en los últimos 10 años.

Fuente: IGN.

a la dorsal atlántica tras la formación del orógeno alpino con una cierta convergencia en la dirección NO-SE. Sin embargo, esta interpretación está en revisión debido al análisis de datos recientes. En la actualidad, se contempla la posibilidad de que una nueva zona de subducción esté desarrollándose frente a las costas portuguesas (DUARTE & al., 2019). En esta zona se ha detectado una delaminación de la corteza oceánica con una importante zona de serpentización que podría ser el estadio inicial de la formación de una nueva zona de subducción. Por otro lado, en el interior del mediterráneo también son conocidos eventos sísmicos de cierta consideración como el que produjo varias decenas de heridos en Melilla en el año 2016. Este seísmo se asoció a una falla hasta entonces desconocida situada en el Mar de Alborán (GALINDO-ZALDÍVAR & al, 2018) si bien son numerosos los eventos sísmicos de menor intensidad que se producen cada año en esta área. Sin embargo, y pese a lo que pudiese pensarse a priori, el área del Estrecho de Gibraltar es una zona relativamente tranquila en lo que a movimientos sísmicos se refiere. En la FIG. 9 se muestran los terremotos registrados por parte del Instituto Geográfico Nacional en los últimos 10 años (periodo 2009-2019). Como puede observarse en la figura, no se ha registrado un solo movimiento sísmico en el área en este periodo, en contraposición con lo ocurrido en la zona del golfo de Cádiz o en el propio mar de Alborán. Sin embargo, estas dos zonas con una clara alta

actividad sísmica suponen a la vez un reto para el proyecto debido a la posibilidad de generar tsunamis de cierta importancia.

El 1 de noviembre de 1755, se produjo un fuerte terremoto frente a la costa de Lisboa (Portugal) que dejó la ciudad seriamente dañada. Pero no fue tanta la devastación producida por el propio terremoto si no la posterior destrucción debida al tsunami que este generó. Este tsunami se dejó sentir en toda la costa atlántica de la península ibérica e incluso en la costa atlántica marroquí (GÓMEZ, 1992), causando grandes daños en varios municipios de la provincia de Cádiz y Huelva fundamentalmente (algunos tan alejados de la costa como Jerez de la Frontera). Este fenómeno no se trata de un hecho aislado, sino que se ha encontrado en el registro estratigráfico diversos eventos similares a lo largo de la costa atlántica. Adicionalmente, en el istmo arenoso que une el propio Peón de Gibraltar con la Península Ibérica se han detectado en el registro estratigráfico facies sedimentarias claramente asociadas a eventos de tipo tsunamis. (RODRÍGUEZ & al., 2011). En este registro se comprueba que se alcanzaron alturas de olas por encima de los cinco metros mostrando que en el pasado esta zona ha registrado fenómenos de este tipo y que por tanto se trata de un riesgo cierto para el área que deberá ser analizado y tenido en cuenta en el diseño definitivo del futuro enlace.

3. Condicionantes geotécnicos

La construcción de grandes obras de infraestructura siempre está condicionada por una gran cantidad de factores de muy diversa naturaleza. Los condicionantes económicos son quizá los más obvios, pero factores sociales, geo-políticos y geológicos pueden condicionar el diseño y la ejecución de los grandes proyectos de infraestructuras. En un caso como el del enlace fijo, sin duda la mayor obra de ingeniería planteada en los últimos tiempos, los factores de tipo geológicos y geotécnicos pasan a tener un carácter prevalente debido a la complejidad técnica que llevan aparejados.

A la hora de caracterizar desde el punto de vista geológico-geotécnico los terrenos que atravesará esta infraestructura, se han realizado numerosas investigaciones (MUÑIZ & al., 2012; MUÑIZ, 2015). Dichos trabajos, recopilados y analizados por Muñiz en 2015, incluyen trabajos realizados en tierra tanto en la orilla española como en la marroquí, así como una serie de campañas de reconocimientos marinos realizadas en el Estrecho de Gibraltar. Además, en la orilla española se perforó en 1995 una galería experimental en una zona especialmente elegida para que se atravesara las principales unidades geológicas que previsiblemente atravesará el túnel cuando se ejecute (MARTÍN RUIZ, M., 1997).

Las primeras investigaciones realizadas (fundamentalmente geofísicas y con tomas de muestras superficiales) confirmaron la continuidad bajo el Estrecho de las formaciones litológicas detectadas en tierra. En estas investigaciones, se comprobó que los materiales que atravesaría el túnel serían en su mayor parte las unidades del complejo de *flyschs* (unidad Algeciras, Bolonia, Almarchal, etc). Estas unidades están formadas por rocas fundamentalmente detríticas de edad cretácico a Mioceno inferior que desde el punto de vista estructural están dispuestas en una serie de cabalgamientos apilados y posteriormente

replegados (CRESPO BLANC & al., 2007). Este tipo de disposición representa un antiguo prisma de acreción actualmente inactivo.

Para ahondar en el conocimiento de la naturaleza de estas unidades, así como facilitar la realización de ensayos sin los sobrecostes propios de los ensayos marinos, SECEGSA perforó una galería experimental a la altura del p.k. 87+200 de la N-340, en los alrededores de Tarifa (FIG. 10). Se seleccionó su ubicación por permitir intersectar las principales unidades (Ud. Algeciras, Almarchal y Bolonia) que se atravesarán durante la perforación del túnel en el menor espacio posible, además de atravesar una falla de cierto interés geotécnico.

En general, todas las unidades muestran una alternancia más o menos rítmica de niveles blandos de carácter pelítico (argilitas) con niveles mucho más competentes (fundamentalmente margas, areniscas calcáreas y calcarenitas). Estos materiales muestran una marcada anisotropía (PERUCHO & al., 2012), con mayor resistencia en el sentido perpendicular de los planos de estratificación que en el sentido paralelo. En general, estos materiales presentan una elevada resistencia y una baja deformabilidad en condiciones de ensayo triaxial (FIG. 11).

Sobre estos materiales existe un razonable grado de conocimiento, aunque está previsto que sucesivas campañas de ensayos ahonden en su caracterización. Sin embargo, hay otro tipo de materiales que van a condicionar fuertemente el diseño del túnel y que están peor caracterizadas: las brechas que rellenan los paleocanales.

Durante los reconocimientos geofísicos iniciales realizados en la traza del futuro túnel, se detectó la existencia de dos paleocanales de importante profundidad que cruzan transversalmente la traza del futuro túnel. Estos paleocanales se interpretan que se formaron como consecuencia de la erosión Este-Oeste de los materiales de tipo flysch durante la inundación del mediterráneo en el Plioceno.

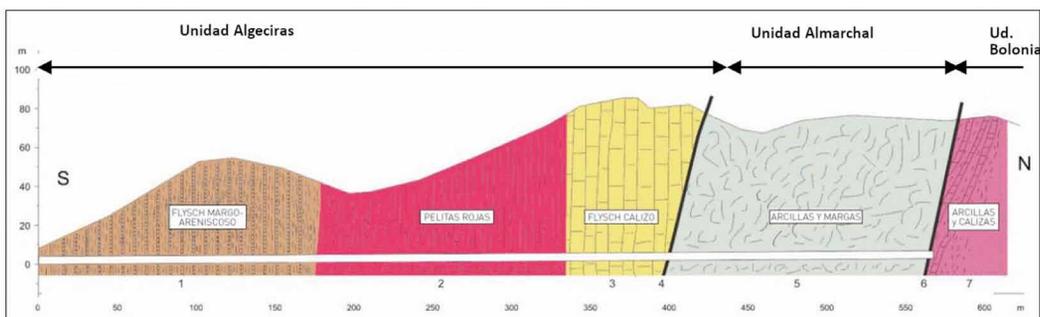


FIG. 10/ Sección transversal esquemática de la galería experimental de Tarifa.

Fuente: MUÑIZ, 2015.

Muestra	γ_d (KN/m ³)	w (%)	Sr (%)	σ_3 (MPa)	σ_{rotura} (MPa)	E_1 (MPa)	E_3 (MPa)	ν
6942-I	24,28	1,27	28,6	3,0	42,5	5400	8670	0,22
6942-II	25,02	1,09	33,6	6,1	62,2	6450	8620	0,14
6943-IV	24,84	1,21	34,3	9,0	81,5	7415	9340	0,18
6943-V	24,73	1,22	33,0	12,1	88,1	8145	10570	0,30
6952-I	23,09	5,71	87,8	3,0	11,3	1160	-	-
6952-II	23,58	4,98	88,5	6,0	18,0	2110	-	-
6952-IV	23,00	5,06	75,8	12,0	18,0	2695	-	-

γ_d = Peso específico seco; w = humedad; Sr = grado de saturación; σ_3 = Presión de confinamiento; σ_{rotura} = Tensión máxima en el momento de la rotura; E_1 = Módulo elástico en la dirección vertical; E_3 = Módulo elástico en la dirección horizontal; ν = Coeficiente de Poisson

FIG. 11/ Resultados de ensayos triaxiales sobre muestras representativas provenientes de sondeos realizados en la galería experimental de Tarifa.

Fuente: Adaptado de PERUCHO & al., 2012.

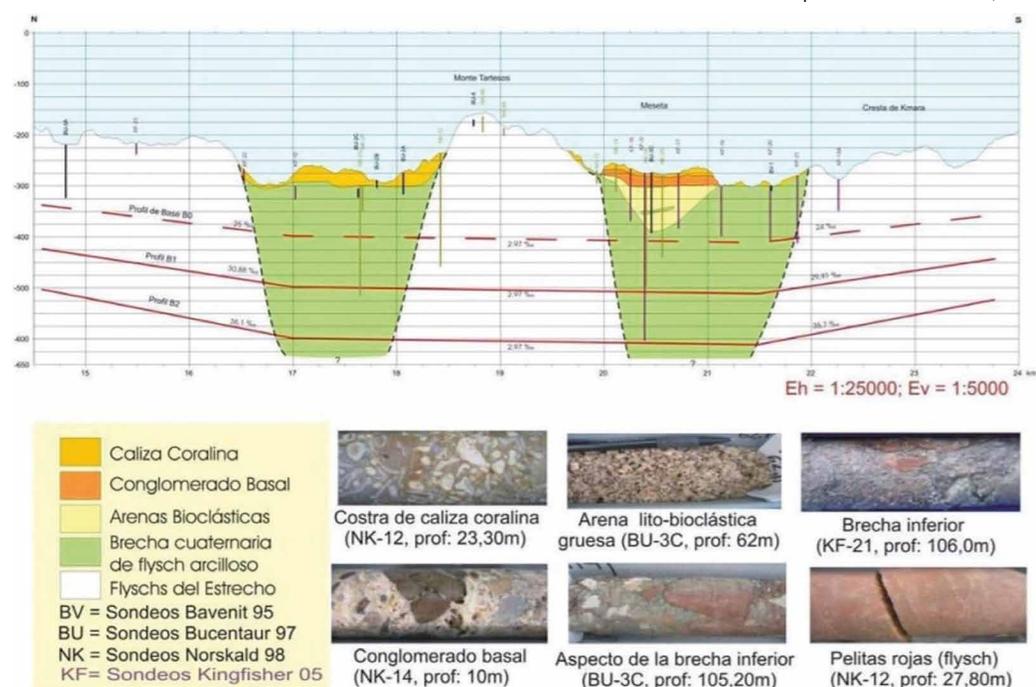


FIG. 12/ Detalle litologías reconocidas en los paleocanales detectados.

Fuente: SANDOVAL & al., 2011.

Los dos paleocanales se disponen aproximadamente paralelos, dejando entre ellos un afloramiento de *flysch* denominado Monte Tartesos. Estos abruptos canales erosivos se fueron rellenando inicialmente por una importante cantidad de brechas arcillosas debido al colapso de los escarpes generados junto con la aportación de materiales más lejanos. Con posterioridad, se sucedió una nueva etapa erosiva que labró un surco en el paleocanal más meridional que se fue rellenando por arenas bioclásticas y en determinadas zonas un conglomerado basal. Este conglomerado lito-bioclástico y matriz-soportado,

presenta clastos formados por distintas litologías de tipo *flysch*, predominando las areniscas de tamaño de grano fino. Por último, en ambos paleocanales, una vez instaurado un régimen favorable en el estrecho, se desarrolló una importante actividad biogénica que se tradujo en importantes acumulaciones de calizas bioclásticas coralinas de tipo litohermos (ESTERAS & al., 2000). En lo que se refiere al volumen total de las diferentes litologías presentes en los paleocanales, sin duda la mayor importancia la presentan las brechas arcillosas por ser el material predominante en ambos paleocanales (FIG. 12).

Desde el punto de vista litológico, se trata de brechas polimícticas de color gris-verdoso y marrón-rojizo formadas por clastos fundamentalmente argilíticos pertenecientes a las diferentes unidades de los Flysch aflorantes en el entorno. El tamaño de esos clastos es muy variable, desde milimétrico hasta grandes bloques de tamaño superior al metro. Los clastos argilíticos de color rojizo son por lo general angulosos e irregulares con una alta variabilidad de tamaños. Por su parte, los cantos argilíticos de color grisáceo tiene formas similares a paralelepípedos debido a la estratificación y diaclasado de los materiales de los que proceden (flysch cretácicos y paleocenos). Esta heterometría junto con el elevado porcentaje de matriz arcillosa provoca un empaquetamiento muy denso. Esto, junto al elevado porcentaje de humedad hace que las muestras presenten una cohesión relativamente alta incluso en ausencia de un material cementante.

Estos materiales, debido a su propia génesis, presentan una estructura caótica en la que apenas es reconocible ninguna estratificación. Tan solo en algunos niveles se puede observar una cierta imbricación. Lo que sí se ha distinguido en las muestras procedentes de los sondeos son superficies de deslizamiento estriadas, sobre todo en el contacto de grandes bloques con la matriz arcillosa. Esto se ha interpretado como superficies propias de depósitos de avalancha como los que se suponen formaron el relleno de los dos paleocanales.

Estos rellenos de los paleocanales suponen un desafío determinante para el proyecto, a pesar de suponer tan solo un 6 % de la extensión total del túnel (Muñiz, 2015). En la actualidad, el grado de conocimiento de sus propiedades es limitado y los resultados obtenidos son poco representativos. Se sabe que son materiales poco consolidados, sin un cemento que le dote de una elevada consistencia. Presentan valores muy variables de cohesión en los ensayos realizados (entre 50 y 200 kPa) y ángulos de rozamientos bajos (entre 12 y 18°). Además, son materiales que presentan una baja permeabilidad, del orden de 10^{-10} – 10^{-11} m/s (Muñiz, 2015) llegando a obtenerse valores de 10-12 m/s en las últimas muestras ensayadas, por lo que difícilmente se pueden plantear soluciones basadas en el drenaje total del frente de excavación para mejorar sus propiedades de cara al sostenimiento del túnel.

Sin embargo, a pesar de los ensayos realizados sobre estos materiales, aún quedan importantes incógnitas sobre los mismos. La cantidad de ensayos realizados sobre estos materiales son mucho menores que sobre el resto de litologías presentes en la traza. Esto se debe a la gran dificultad para realizar ensayos en estos materiales. Por un lado, para poder tomar muestras para los

posteriores ensayos de laboratorio, es necesario realizar sondeos en mitad del estrecho, a profundidades superiores a los 200 m y con importantes corrientes. Además, estas corrientes tienen sentido contrario a diferentes profundidades, lo que hace que el tren de varillas para la perforación se deforme hasta romperse en numerosas ocasiones. Esto se consiguió solucionar parcialmente con el diseño de revestimientos con formas hidrodinámicas para minimizar el efecto de las corrientes (ANAGNOSTOU, 2014), pero sigue siendo una limitación importante. Por otro lado, la zona es frecuentemente azotada por temporales tanto de levante como de poniente, lo que hace difícil mantener el barco de perforación en el mismo punto durante todo el tiempo que durase la ejecución de los sondeos. A esto hay que sumarle el intenso tráfico de embarcaciones de todo tipo que cruzan a diario el Estrecho de Gibraltar, con un valor medio de 300 embarcaciones por día (Fuente: datos propios Autoridad Bahía de Algeciras). Por todo ello, también fue necesario el diseño de elementos que permitiesen la continuación de sondeos (re-entrada) una vez que hubiesen tenido que ser temporalmente abortados.

Pero los ensayos de laboratorio sobre estos materiales también son especialmente complejos. Dado que la presión de poro va a ser un factor determinante en el comportamiento mecánico de estos materiales debido a su baja permeabilidad, los ensayos realizados sobre estos niveles brechoides son ensayos triaxiales de tipo consolidado drenado (CD) y consolidados sin drenaje (CU) (ANAGNOSTOU, 2014). Estos ensayos, debido a la baja permeabilidad de las muestras necesita de periodos de 4-8 semanas para cada uno de los ensayos. Por otro lado, la preparación de muestras representativas no es sencillo debido a la existencia de inclusiones duras de tamaño grava (o incluso mayores) en una matriz blanda, lo que dificulta sobremanera el tallado de las muestras para su posterior ensayo. Para realizar los ensayos triaxiales sobre estas muestras, se diseñó un equipo específico que permitiese simular las condiciones reales en las que estos suelos se encuentran (muy alta presión de poro y elevada tensión efectiva).

La aparición de estos dos paleocanales ha supuesto incluso la puesta en duda de la viabilidad del proyecto. Por un lado, se desconoce la profundidad máxima que alcanzan estos paleocanales ya que los sondeos realizados no han logrado alcanzar su base. En cualquier caso, las profundidades conocidas son tales que obligarían al futuro túnel a atravesar estos materiales dada la imposibilidad de ejecutar el túnel a mayor profundidad. Por otro lado, los parámetros geomecánicos que se conocen hasta el momento muestran

un material de muy difícil sostenimiento para la ejecución del túnel. Estos, son materiales altamente deformables, que además se encuentran sometidos a una elevada presión de poro. En los modelos numéricos analizados, la respuesta del comportamiento a corto plazo de estos materiales (equivalente al comportamiento que se producirá en el frente de excavación del túnel), muestra importantes convergencias. Incluso para importantes presiones de sostenimiento (1-2 MPa), se estiman convergencias del 15-20 % (ANAGNOSTOU, 2014). En el caso de una excavación mediante tuneladora (opción más razonable con los medios actuales), esto puede suponer diferentes problemas durante la construcción del túnel, desde la inmovilización de la tuneladora debido a la alta deformabilidad de estos materiales a la inundación total o parcial del mismo. Técnicas como el drenaje en avance del frente del túnel podrían mejorar este comportamiento si bien la baja permeabilidad de estos materiales podría hacer inviable este tipo de técnicas dado el elevado plazo que sería necesario mantener estas medidas para conseguir un cierto grado de drenaje (PLIEGO, 2005).

A esto hay que sumar que las incertidumbres acerca de los parámetros geomecánicos de estos materiales son muy importantes y que la dificultad para realizar sondeos sobre ellos es casi insalvable con los medios técnicos de los que se dispone en la actualidad.

Por todo ello, las dos sociedades estatales encargadas del proyecto (SECEGSA y SNED) están estudiando las alternativas para aumentar el grado de conocimiento de estos materiales, tal y como queda recogido en el acta de sesiones E/2017/21 del Consejo Económico y Social de Naciones Unidas. De entre todas las técnicas de muestreo estudiadas, se está planteando la posibilidad de realizar una galería experimental desde el lado marroquí para alcanzar el Paleocanal Sur y, una vez alcanzado poder realizar muestreos y ensayos sobre estos materiales. Es un sistema caro pero que permitiría tener información de primera mano del comportamiento real de estos terrenos. Además, en septiembre de 2017, SECEGSA, SNED y la empresa Herrenknecht firmaron un convenio para estudiar la factibilidad de desarrollar un primer diseño de tuneladora para el proyecto del túnel.

4. Conclusiones

Los grandes proyectos ingenieriles están siempre rodeados de una serie de condicionantes y limitaciones de muy diversa índole. El túnel que se proyecta construir bajo el Estrecho de Gibraltar es sin duda la mayor obra de ingeniería planteada

a nivel mundial. La futura construcción de esta infraestructura supondría una revolución tanto económica como socio política en ambas orillas, por lo que se plantea como una obra de primer nivel por entidades como el consejo económico y social de la ONU o la propia Unión Europea.

Sin embargo, esta infraestructura presenta una serie de factores que van a condicionar su devenir futuro. Por un lado, están los condicionantes geopolíticos y estratégicos que supone una infraestructura que a la postre unirá dos países y dos continentes (nuevo paso fronterizo, problemas competenciales, etc.). Por otro lado, el estrecho de Gibraltar es una zona con una fisiografía compleja en la que se alcanzan profundidades muy importantes (del orden de 300 m en la zona del umbral, siendo incluso mayor en otras zonas) lo que ha hecho decantarse hasta el momento por la opción túnel frente a la opción puente. Pero a pesar de todas estas dificultades, el mayor condicionante en este proyecto es la compleja geología que el túnel deberá atravesar. La existencia de materiales complejos como los *flysch* del campo de Gibraltar sobre los que aparecen dos paleocauces con propiedades geomecánicas aún más desfavorables y complejas van a condicionar de manera decisiva el proyecto. En la actualidad se tiene razonablemente bien caracterizados los materiales de tipo *flysch* (aunque son necesarias nuevas investigaciones) pero no así los rellenos de los dos paleocauces (brechas arcillosas poco consolidadas). Los materiales de tipo *flysch* son fundamentalmente alternancias de materiales detríticos gruesos (areniscas), pelitas y margas que presentan una elevada consistencia y deformabilidades en general bajas. Por su parte, los materiales de tipo brecha, representan una escasa extensión en el global del proyecto, si bien su influencia a la postre va a resultar decisiva. A partir de los ensayos realizados, se ha comprobado que se trata de materiales relativamente blandos y poco consolidados con valores de cohesión en general bajos y muy variables (entre 50 y 200 kPa) y ángulos de rozamiento muy bajos (inferiores a 18°). Además, hay que tener en cuenta que se trata de materiales de muy baja permeabilidad (10^{-10} – 10^{-11} m/s). Esto representa un problema a la hora de diseñar los sostenimientos del futuro túnel. La baja permeabilidad y la alta deformabilidad junto con la elevada presión de poro que se prevé encontrar en la zona de los paleocanales originará importantes convergencias durante la construcción del túnel con las técnicas constructivas actuales.

Más allá de consideraciones económicas, geopolíticas o sociales, será la caracterización de estos materiales la que definirá si un proyecto de esta magnitud es o no viable desde el punto de vista técnico. En la actualidad se ha planteado la construcción de una galería experimental desde la

orilla marroquí para poder realizar una exhaustiva investigación sobre estos materiales que permita definir con mayor precisión los parámetros que a la postre permitan caracterizar desde el punto de vista geomecánico estos terrenos. A la vez, SECEGSA y SNED han firmado un acuerdo de colaboración con una empresa especialista (*Herrenknecht*) para que esta estudie la viabilidad de diseñar una tuneladora capaz de afrontar el proyecto en estas particulares y complejas condiciones.

Bibliografía

- ALASTRUÉ, A. (2014): El proyecto del enlace fijo Europa-África y sus impactos en el área Euromediterránea. En *Euro-Mediterranean Services Congress*.
- ALONSO, M. P. & BELLET, C. (2009): El tren de alta velocidad y el proyecto urbano. Un nuevo ferrocarril para la Zaragoza del tercer milenio, en *Scripta Nova*. En *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias sociales*, XIII (281). Universidad de Barcelona.
- ANAGNOSTOU, G. (2014): Some Critical Aspects Of Subaqueous Tunnelling. En *World tunnel congress*. Iguassu Falls, Brazil, May 9-15, 2014.
- BELLET, C. (2002): El impacto espacial de la implantación del tren de alta velocidad en el medio urbano, en *Revista de Geografía. Universitat de Barcelona*, 1: 55-77.
- BELLET, C & ALONSO, P & CASELLAS, A (2010): «Infraestructuras de transporte y territorio. Los efectos estructurantes de la llegada del tren de alta velocidad en España», en *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 52: 143-163.
- CONSEJERÍA DE FOMENTO Y VIVIENDA DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA (2013): Acuerdo sobre los corredores ferroviarios europeos como motor de desarrollo y empleo en Andalucía. En *comunicado de prensa*.
- (2015): Orden de 23 de enero de 2015, por la que se aprueba el Plan Funcional del Área Logística de Interés Autonómico de la Bahía de Algeciras. En *BOJA* 20, 67
- CRESPO BLANC, A. & al. (2007): Acreción miocena del dominio suribérico y del complejo de los flyschs (Arco de Gibraltar): Una revisión a partir de las propuestas de V. GARCÍA-DUEÑAS. En *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 20(3-4), 135-152.
- DUARTE, J. & al. (2019): Delamination of oceanic lithosphere in SW Iberia: a key for subduction initiation? En *Geophysical Research Abstracts* Vol. 21, EGU2019-6001.
- ESTERAS, M. & al. (2000): Evolución morfológica y estratigráfica plio-cuaternaria del Umbral de Camarinal (Estrecho de Gibraltar) basada en sondeos marinos. En *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13 (3-4):539-550.
- GALINDO-ZALDIVAR & al. (2018): Imaging the Growth of recent faults: The case of 2016-2017 Seismic Sequence Sea Bottom Deformation in the Alboran Sea (Western Mediterranean). En *Geophysical Research abstracts* Vol. 21, EGU2019-6001, 2019 EGU General Assembly.
- GOMEZ, J.S. (1992): Tsunamis on the southwest coast of the Iberian Peninsula. En *Revista de Geophysics*, 48 (1), pp. 9-19.
- MARTÍN RUIZ, M. (1997): Estudio geotécnico de los materiales afectados por la galería experimental de Tarifa. En *Informe técnico*.
- MINISTERIO DE FOMENTO (2014): Nota de prensa Conferencia de Ministros de Transporte del Mediterráneo Occidental. En *Gabinete de prensa del Ministerio de Fomento*.
- MUÑIZ & al. (2012): Correlación entre la deformabilidad de la Unidad de Algeciras, estudiada mediante técnicas presiométricas, y sus características geomecánicas. SEMSIG (Ed.), En *Cimentaciones y excavaciones profundas. 9º Simposio nacional de ingeniería geotécnica* (pp. 619-628). Sevilla.
- MUÑIZ, M (2015): Unidades geotécnicas del futuro enlace fijo a través del Estrecho de Gibraltar: Recopilación de datos históricos, caracterización geotécnica y modelización de ensayos presiométricos en medio anisótropo. En *Tesis doctoral Universidad Complutense*.
- NACIONES UNIDAS, CONSEJO ECONÓMICO Y SOCIAL (2013): Project for a Europe-Africa fixed link through the Strait of Gibraltar: report on activities carried out during the period 2006-2013 and programme proposed for the period 2013-2015, Génova 1-26. Disponible en: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=E/2013/21
- PERUCHO & al. (2012): Caracterización geotécnica de diversas formaciones anisótropas de la Unidad de Algeciras mediante ensayos de laboratorio. Resistencia y deformabilidad en diferentes direcciones. SEMSIG (Ed.), En *Cimentaciones y excavaciones profundas. 9º Simposio nacional de ingeniería geotécnica* (pp. 647-665). Sevilla.
- PLIEGO, J. (2005): Open session - The Gibraltar Strait tunnel. An overview of the study process. En *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 558-569.
- RODRÍGUEZ, J. & al. (2011): The recorded evidence of AD 1755 Atlantic tsunami on the Gibraltar coast. En *Journal of Iberian Geology* 37 (2) 2011: 177-193
- RUIZ, F. (2015): El futuro túnel del estrecho de Gibraltar. Un Reto tecnológico y de seguridad. En *Instituto Español de Estudios Estratégicos*, 114/2015.
- SANDOVAL & al. (2011): Proyecto de túnel ferroviario a través del estrecho de Gibraltar. En *Revista de Estudios Tarifeños ALJARANDA*, 80, pp 20-34.
- SECEGSA (1996): Enlace fijo del Estrecho de Gibraltar. Vol. 1 - Medio físico, 118 pp. *Informe técnico*. Madrid.
- (2013): Proyecto de Túnel Ferroviario a través del Estrecho de Gibraltar. *Comunicación de prensa*. Madrid
- UREÑA & al. (2012): El análisis de red en las ciudades intermedias sobre líneas de Alta Velocidad Ferroviaria. En *Ciudad y territorio: Estudios territoriales*, 173. 483-498.
- VELASCO, C. (2016): *Historia documental de los proyectos de enlace fijo del Estrecho de Gibraltar*. Madrid, España, SECEGSA.
- VILLAREAL, A. (2018): Llevan 37 años planeando el túnel submarino que nos unirá a Marruecos: "Aún nos queda". *El Confidencial*. Disponible en: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/ciencia/2018-09-09/tunel-estrecho-gibraltar-37-anos-secegsa_1612683/