

Las investigaciones geotécnicas para enlace fijo entre Europa y Africa a través del Estrecho de Gibraltar

Por SANTIAGO URIEL ROMERO
y JOSE MANUEL SERRANO HERRERO

La subsistencia del hombre se ha apoyado y ha necesitado de la tierra. En la relación hombre-terreno, la Geotecnia juega un papel, que si en el pasado fue artesanal hoy en día presenta un alto grado de tecnificación sustentada sobre una base científica, ambas en pleno desarrollo. La búsqueda y almacenamiento de materias primas; la seguridad y defensa frente a la inclemencia de la naturaleza o del propio hombre; el mayor respeto por la limpieza ambiental y la mejor calidad física de las obras; el aprovechamiento de entornos y materiales que pueden ahora calificarse de mediocres, las comunicaciones rápidas, etcétera, suponen una continua extrapolación a las circunstancias actuales, que se reflejará también en los problemas geotécnicos. El enlace entre Europa y Africa, a través del Estrecho de Gibraltar será, sin duda, una obra que requiere un paso hacia adelante en la ingeniería civil. En algunas de las soluciones, cuya viabilidad se estudia actualmente, la extrapolación o novedad en relación con las realizaciones existentes piden también importantes innovaciones en el campo de la técnica, incluida la Geotecnia. Otras soluciones, aunque más conocidas, exigirán una seguridad en su diseño y construcción debida a las circunstancias marítimas en las que está inmersa. Y esta mayor seguridad no debe reflejarse en un simple sobredimensionamiento de la práctica actual, sino que debe sustentarse en un mayor conocimiento físico del comportamiento hombre-terreno.

En este contexto se encuadran los comentarios que siguen a continuación sobre la investigación geotécnica del enlace, cuya necesaria brevedad impide una justificación y un detalle de los múltiples aspectos de los estudios que sería conveniente realizar.

LAS INVESTIGACIONES GEOTECNICAS PARA UN TUNEL SUBTERRANEO

La conveniencia de unas investigaciones preliminares

La solución de un túnel subterráneo es una obra excepcional. Si bien su magnitud global no supone una extrapolación sobre las conexiones submarinas en construcción, como el túnel Seikan en Japón, o sobre la ya firmemente proyectada, como el túnel a través del Canal de la Mancha, el caso del Estrecho de Gibraltar pre-

senta algunos rasgos particulares que requieren una atención y un planteamiento especiales. Son dos los puntos en que se basa tal opinión. En primer lugar la profundidad máxima del mar en el centro del Estrecho, unos 300 m., con la consiguiente eventualidad de problemas hidrológicos de muy diversa índole. En segundo lugar la geología del Arco de Gibraltar, resultado de complicados movimientos tectónicos no aclarados todavía. Fallas, plegamientos, corrimientos y hundimientos se entremezclan en secuencia y cinemática de difícil ordenación. Tal circunstancia conduce a una problemática defini-

ción tanto geológica, como geotécnica de los terrenos posiblemente afectados por las perforaciones, en especial en el tramo submarino, lo cual influye de una forma decisiva en la estrategia, no sólo del proyecto y construcción de la propia obra, sino también de las investigaciones previas para la redacción de los mismos.

Asentada la viabilidad del túnel se plantea el alcance que debe darse a las investigaciones y estudios previos, tanto a los geológicos entendidos por tal el establecimiento de la definición estructural e identificación de las formaciones, como a los geotécnicos, que pretenden cuantificar el comportamiento de los terrenos en relación con las obras subterráneas, y con los métodos operativos, como pasos previos para el diseño y la construcción.

En relación con los estudios geológicos no existen por lo general posturas discordantes. En una obra de la importancia de la que nos ocupa, el límite de tales estudios viene marcado por la desesperanza de obtener más información que pudiera mejorar el trazado del túnel en planta o alzado. La relación entre el coste de la prospección adicional y la calidad de los datos con ésta obtenidos es el único tema opinable.

La divergencia de opiniones es más acusada en lo que respecta a las investigaciones previas de tipo geotécnico. Si bien existe una gama continua de posibles actuaciones como reflejo de un amplio abanico de enjuiciamientos, se podría condensar en tres las posturas sobre este tema, expuestas hasta ahora por los expertos.

- a) La de aquellos que opinan que, comprobada la factibilidad con una campaña de investigación geológica relativamente modesta, la complicación estratigráfica no quedará suficientemente aclarada sino con la consecución de las obras, y que los métodos constructivos, o el diseño de la sección transversal, deben irse adaptando según la experiencia que se vaya obteniendo durante la misma. Proponen, por tanto, que la obra se inicie íntegramente a partir de unas premisas geológicas que permitan establecer una primera morfología general de la obra.
- b) Otro grupo se inclina por completar la

investigación geológica y realizar las experimentaciones geotécnicas y constructivas en una galería previa, que después podía quedar incorporada al enlace definitivo como galería de servicio o utilizarlo para el paso de instalaciones diferentes de la ferroviaria. Este túnel piloto debería construirse con la máxima longitud que permitiera la logística general de la obra, condicionada principalmente por los problemas de ventilación en los tramos submarinos.

- c) Finalmente, la tercera postura se concreta en la construcción, previamente a las actuaciones indicadas en a) o b), o como primera fase de las mismas, de tramos experimentales que acoten algunas de las variables que intervienen en el proyecto y en la realización de la obra. Estos tramos, no obstante, son sólo aconsejables y posiblemente rentables cuando se cumplan dos condiciones:

- Que, por su carácter necesariamente puntual, los terrenos ensayados sean representativos de una parte importante entre las que se espera encontrar a lo largo de la obra, tanto por su tipo como por su estado.
- Que la experimentación proporcione unos resultados que puedan suponer una mejora en las previsiones para el proyecto y la construcción, e incluso en los términos de contratación de la obra.

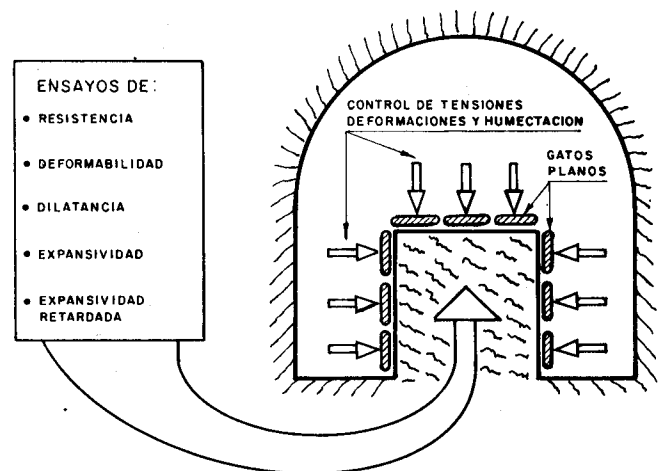


Fig. 1.—Esquema de ensayos mecánicos *in situ*.

El panorama actual de la geología del Estrecho aboga probablemente por esta última postura. Las formaciones en las que transcurrirá el tunel tienen un dominio arcilloso, y dentro de éste, son las arcillas preconsolidadas y fisuradas del Almarchal las más representativas y abundantes. Tal tipo de terreno merece la pena ser investigado previamente mediante tramos de prueba. No existe, en España, obras subterráneas abiertas en la arcilla del Almarchal que permita hacerse una idea de su comportamiento en los contornos de un túnel profundo, y tal comportamiento puede situarse dentro de un amplio abanico de posibilidades cuyo esclarecimiento, siquiera sea parcial, beneficiará todos los aspectos de la futura obra. La elevada plasticidad de algunos tramos del Almarchal (más del 130 % de límite líquido), unido a su alto grado de fisuración hacen presumibles problemas de estabilidad y expansibilidad, cuya delimitación previa es áltamente interesante.

El resto de las formaciones tipo Flysch presentará con toda probabilidad menos problemas, en lo que respecta a la estabilidad y empujes sobre el revestimiento, aunque los derivados de los entornos hidrogeológicos pueden ser más agudos. Pero estos últimos son poco experimentables «a priori», pues son las condiciones locales las que configuran la transmisividad general.

En resumen, creemos que la postura c) es la más idónea, si la planificación general del Enlace permite disponer del tiempo que se precisa para la realización de los tramos experimentales. En cualquier caso son convenientes los estudios, que después se indican, en la primera etapa de la obra. En ellos sólo es interesante analizar el comportamiento de la arcilla del Almarchal, o de las Facinas, etc.

El planeamiento que ahora se comenta debe ser considerado como un marco general en el que se encuadran las investigaciones. Es evidente que a medida que éstas vayan progresando, y con ellas el conocimiento geológico-geotécnico, es casi seguro una revisión que la acomode a las nuevas circunstancias.

Antecedentes

La experimentación a gran escala, como etapa previa a la construcción de la obra definitiva, ha sido el paso obligado en los proyectos de importancia, como los de Seikan y el Canal de la Mancha.

En el Seikan, las secciones de los túneles experimentales fueron dos, que se situaron a uno y otro lado del Estrecho de Tsugaru. En el lado Tappi, al final de la galería inclinada de acceso al túnel piloto, y el lado Yoshiuka, a unos tres kilómetros del comienzo del mismo (véase fig. 2). Fueron construidos y experimentados entre 1964 y 1972.

Para el Canal de la Mancha se han realizado dos tramos experimentales: uno en el lado inglés y otro en el francés. En ambos se han aprovechado pozos y túneles preexistentes como acceso o como apoyo de las mediciones de deformaciones.

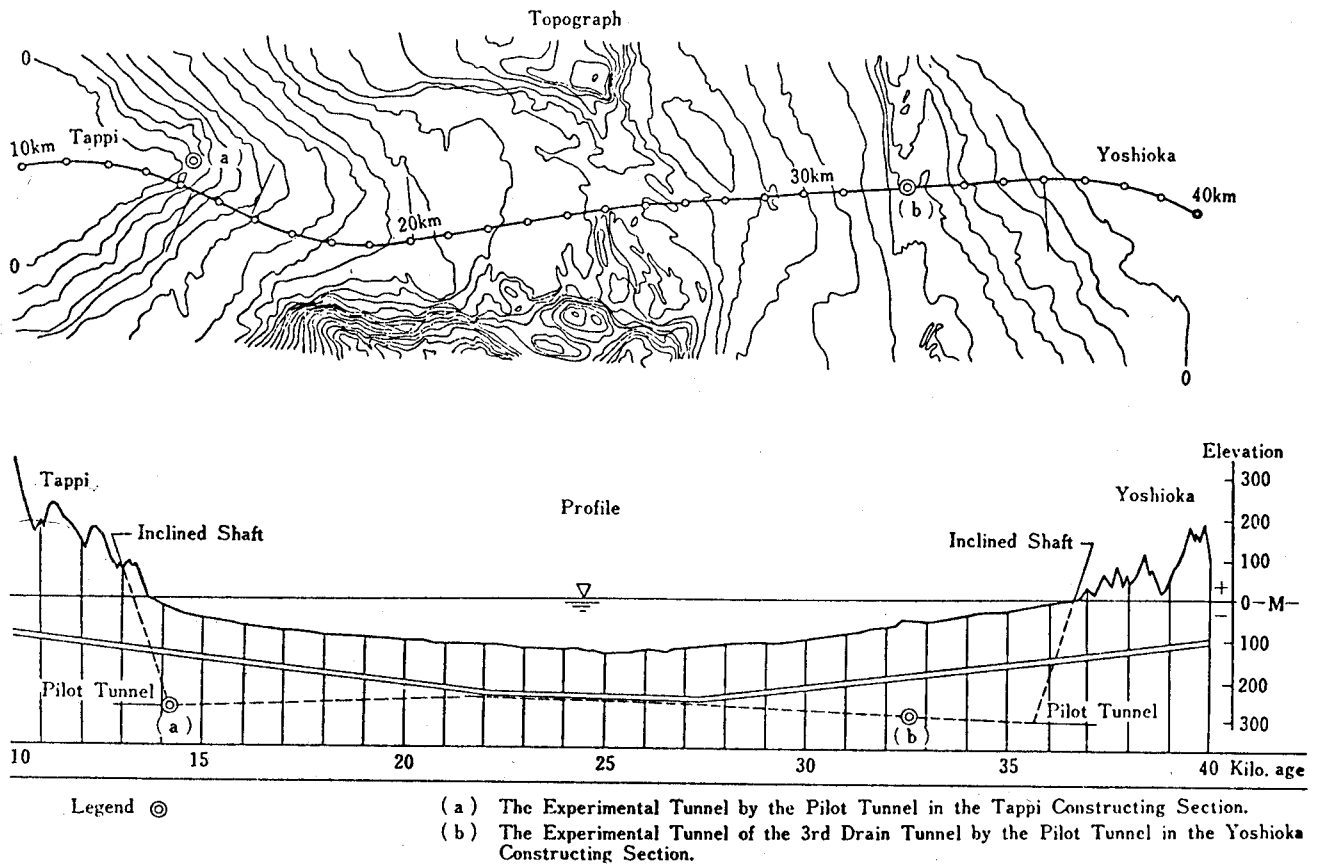
En Inglaterra, la intersección del antiguo túnel del «Coronel Beaumont» con la nueva obra proporcionó una oportunidad única para colocar una instrumentación por delante de un tramo de prueba, excavado con un topo de 5,27 m., similar al previsto para la construcción (véase fig. 3).

En el lado francés, y a partir de los viejos pozos de Sangatte, de unos 5 m. de diámetro, se abrieron dos galerías de experimentación: la baja en la creta azul, en donde discurrirá la mayor parte del túnel proyectado, y la alta en la creta gris, más alterada, del Cenomaniense medio (fig. 4).

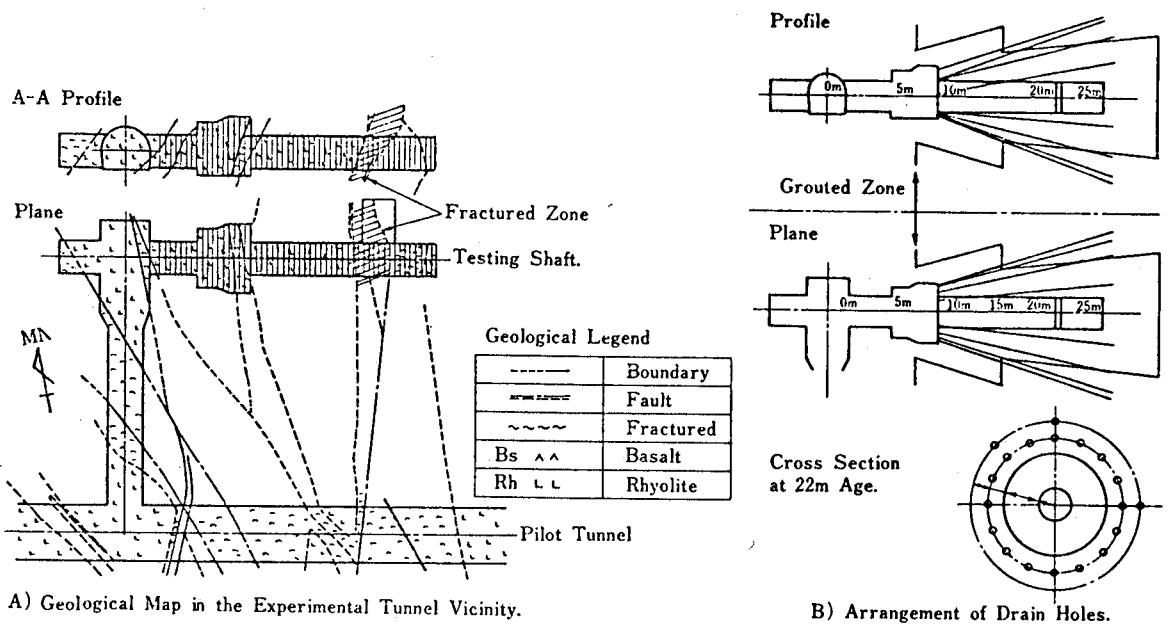
En todos estos tramos se realizaron las clásicas pruebas para la determinación de los parámetros de resistencia y deformabilidad de la roca, tensiones naturales del terreno, deformaciones y presiones del terreno y revestimiento, influjo del diámetro del túnel, etcétera.

Orientación general de las investigaciones

En cinco grandes áreas puede dividirse la investigación geotécnica general de un túnel de la importancia del cruce del Estrecho.

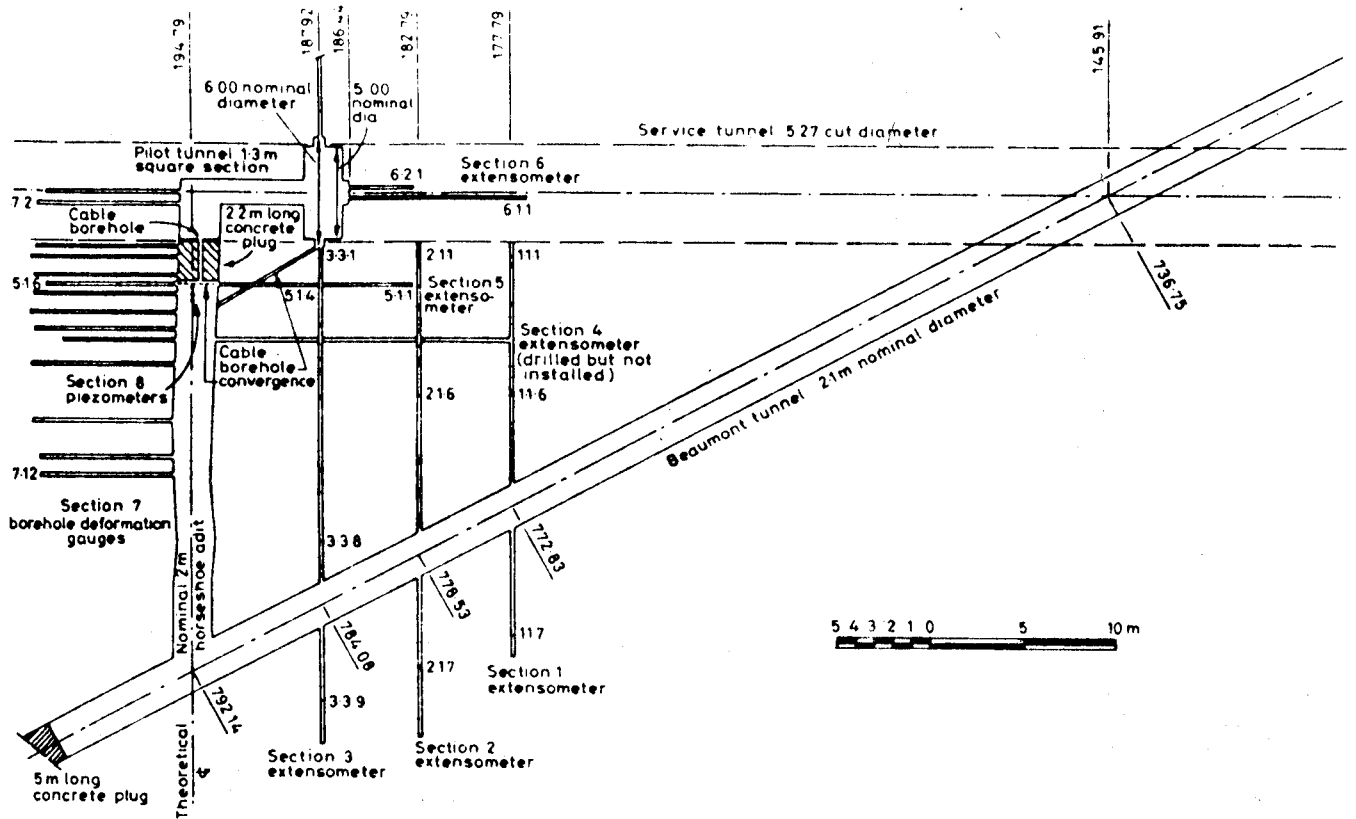


Topograph of the middle of the Seikan Tunnel and location of the experimental tunnel

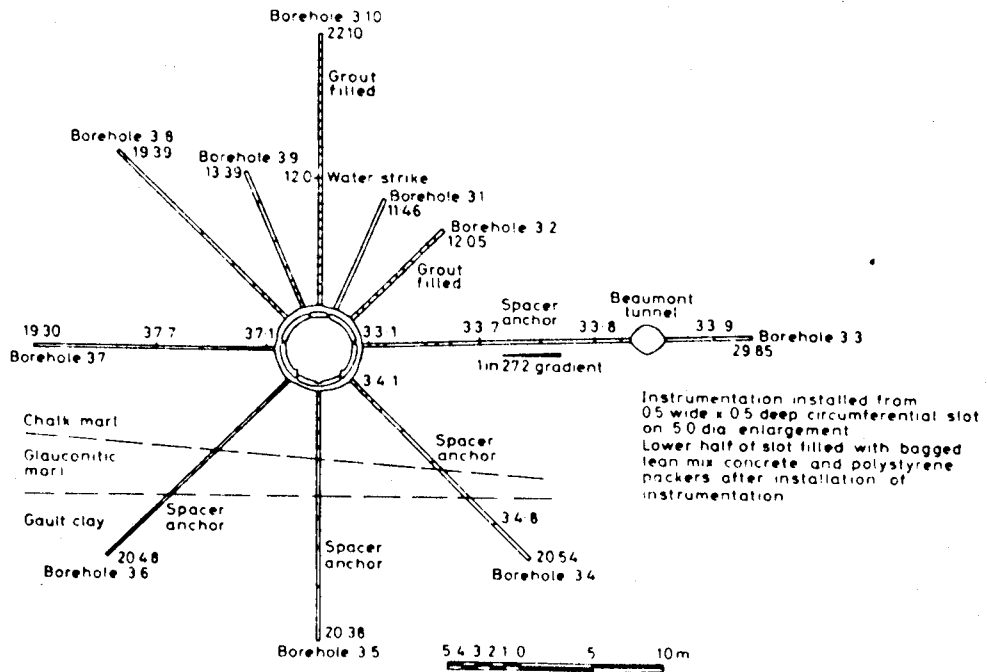


Experimental tunnel by the pilot tunnel in the Tappi constructing section

Fig. 2.—Túnel Seikan. Tramos experimentales.



General layout of instrumentation at Beaumont junction



Radial multi-point borehole extensometers from annulus section 3

Fig. 3.—Túnel Canal de la Mancha. Tramo experimental lado inglés.

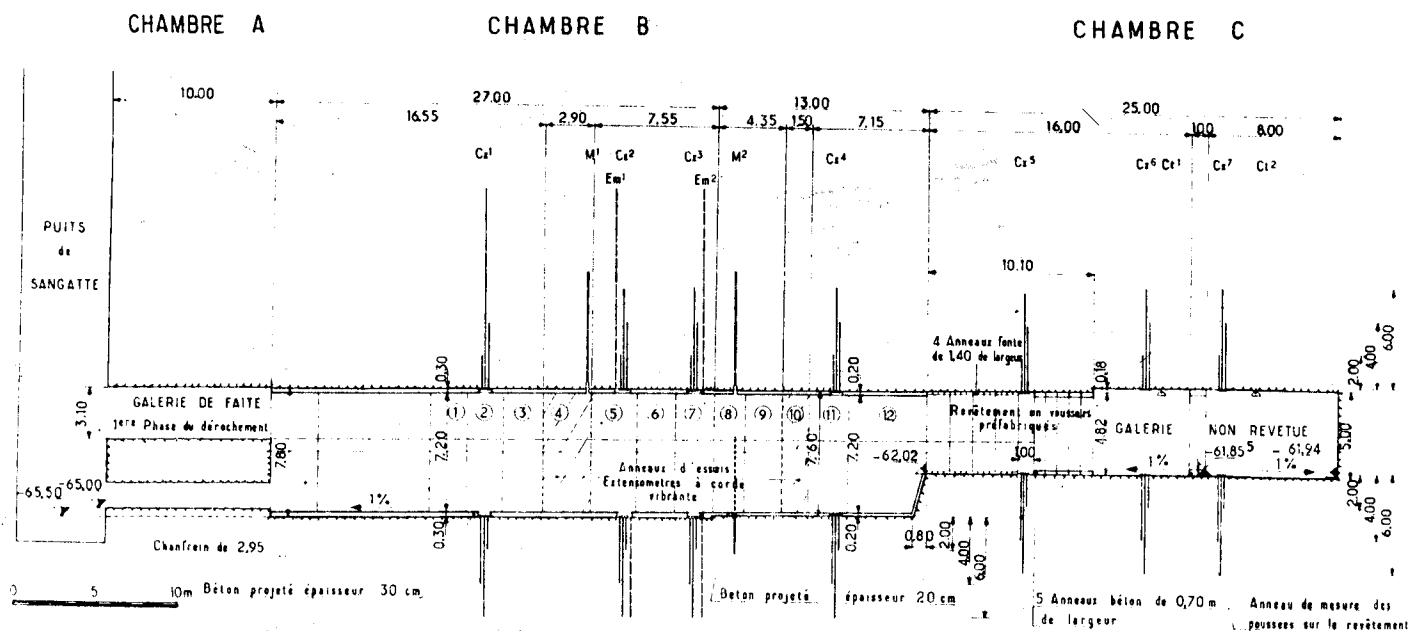


Fig. 4.—Canal de la Mancha. Tramo experimental lado francés.

1. Los ensayos de identificación o búsqueda de propiedades índice que permiten reconocer una muestra, y clarificarla dentro de la gama de suelos y rocas que se esperan a lo largo de la traza.
2. Determinación de las propiedades intrínsecas, como resistencia, deformabilidad, expansividad, alterabilidad, etcétera.
3. Conocimiento del estado natural del medio rocoso. Fisuración, densidad, tensiones primarias, estados del agua intersticial, etcétera.
4. El influjo geométrico de la obra. Diámetro y deformación de los túneles, movimientos inducidos en el terreno, variaciones de humedad y presión, etcétera.
5. Métodos constructivos, en sus muy diversos aspectos, incluidos los métodos de reconocimiento previo durante la construcción. Comportamiento global terreno-obra.

En el corto espacio de este artículo no es posible presentar un análisis pormenorizado de las motivaciones, condicionantes y enlaces de tales investigaciones. Pero sí es conveniente subrayar un aspecto, en relación con los beneficios que se pueden obtener con las investigaciones.

Cuando se efectúa, en un tramo de un túnel,

bien experimental, bien de la obra definitiva, una investigación global sobre el influjo de las diversas condiciones en el resultado final, los ensayos y mediciones que se llevan a cabo, en casos importantes, suelen ser:

- Determinación de las tensiones primarias por alguno de los múltiples métodos existentes al respecto.
- Tomas de muestras inalteradas, para su análisis en laboratorio.
- Ensayos «in situ», tales como ensayos de carga sobre placa, sísmica o microsísmica, ensayos de presión radial, en cámara hidráulica o mediante gatos, etc. Son raros los ensayos de resistencia «in situ».
- Medición de movimientos del terreno, tales como la convergencia de las paredes, o de puntos interiores del medio rocoso, mediante extensómetros múltiples.
- Medición de presiones sobre el revestimiento, provisional o definitivo, y tensiones en estos últimos.

Si se quiere extrapolar los resultados obtenidos a otras condiciones, por ejemplo para un estado tensional diferente, o un mayor diámetro del túnel, las mediciones de movimientos y pre-

siones tienen un valor moderado, si no se conocen suficientemente las propiedades intrínsecas del medio rocoso, ya que aquellas mediciones son la integración del comportamiento del terreno en los contornos del túnel que engloba zonas elásticas y zonas plásticas, cuyo equilibrio final tenso-deformacional depende de sus propiedades en tales estados. El solo conocimiento de la integral no discierne el comportamiento puntual, y la extrapolación deseada deja un amplio margen de error. Es éste, a nuestro juicio, una de las deficiencias en las investigaciones de túneles, en especial para rocas blandas, como puede calificarse la arcilla dura del Almarchal. Un estudio somero de la resistencia y de la relación tensión-deformación de estos suelos aminora considerablemente la posibilidad del éxito de las previsiones, aunque el resto de las variables están adecuadamente definidas.

Por tal motivo, en el plan se hace un especial énfasis en la investigación de las propiedades básicas del medio rocoso, que debe entenderse no en el sentido de que sea el factor más importante, sino por estar muy poco atendido en los estudios realizados hasta la fecha.

Estos ensayos deben efectuarse «in situ», teniendo en cuenta la casi imposibilidad de obtener muestras pequeñas inalteradas de las arcillas fisuradas del Almarchal. En la figura 1 se esquematiza un tipo de ensayo, no convencional, que puede cubrir gran parte de los aspectos de propiedades intrínsecas que interesan. Consiste en controlar presiones, deformaciones y contenido de agua sobre un bloque de roca «in situ» mediante gatos planos, para reproducir las variaciones tensionales en el entorno del túnel. Estos gatos pueden alcanzar hasta 150 Kg/cm^2 , lo que cubre ampliamente el abanico tensional que puede presentarse en una obra de este tipo.

Planificación de la investigación geotécnica

Para obtener la información geotécnica de las cinco áreas de investigación antes señaladas se ha propuesto un plan de cuatro etapas previas a la construcción del túnel. Son, en sus lí-

neas generales:

- I) El aprovechamiento de los sondeos mecánicos de reconocimiento y de los testigos de ellos extraídos para la realización de ensayos de identificación y estado de los terrenos, y la obtención de índices que sirvan de referencia para la extrapolación del comportamiento mecánico. Determinaciones presiométricas, de permeabilidad, fracturación hidráulica, testificación geofísica, incluidos ensayos «up-hole», etcétera.
- II) Fijación de algunos parámetros geotécnicos de los terrenos superficiales, mediante ensayos en zanjas escogidas de los tramos arcillosos. Ensayos convencionales y pruebas de otros especiales.
- III) Construcción de galerías relativamente superficiales y de moderado diámetro, abiertas a partir de pozos poco profundos, en los que se lleven a cabo ensayos definitivos de las propiedades mecánicas y en donde se pudiera investigar, si procediera, algunos de los temas constructivos. Puesta a punto de métodos para la delimitación de los estudios y para el proyecto de la última fase.
- IV) Tramos experimentales propiamente dichos en los que se investigue a una escala real todos los aspectos que componen el marco geotécnico convenientes para el proyecto del túnel.

Señala conveniente, en principio, que estas etapas, a excepción de los sondeos que, evidentemente, se solaparán en el resto, fuesen secuenciales en el tiempo, y posiblemente independientes en el espacio. No obstante, según las circunstancias, aquellas fases pueden simultanearse fácilmente o, incluso, quedar englobadas en las siguientes. De tal forma, las galerías podrían fundirse en la planificación de los tramos experimentales como fase preliminar, o estos tramos incorporados al comienzo de la construcción de la obra.

No se van a detallar los múltiples aspectos a examinar en estas investigaciones. En la fi-

gura 5 se reseñan las cuestiones fundamentales probables de cada una de las etapas. Cabe subrayar algunos tipos no convencionales de ensayos o temas que serán objeto de atención prioritaria o especial. Se puede destacar:

- a) En relación con los ensayos en sondeos, o con los testigos de éstos obtenidos se puede subrayar las determinaciones de radioactividad natural como posible índice para identificación de estratos y de emisión acústica para acotar el estado de tensiones naturales en los tramos de roca más competentes.
- b) Determinación de las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos mediante ensayos convencionales u otros especiales, como el apuntado en el apartado anterior. Ensayos «in situ», preferentemente.
- c) Delimitación de los métodos más adecuados para prever y determinar las tensiones naturales «in situ», habida cuenta que este parámetro será plausiblemente muy cambiante a lo largo de la traza del túnel.
- d) Influjo del diámetro del túnel en el comportamiento del terreno y en los métodos constructivos.
- e) Las condiciones iniciales del agua intersticial, su evolución durante la apertura del túnel y su equilibrio final según las condiciones del drenaje del revestimiento.
- f) Los métodos de previsión de los terrenos a atravesar durante el avance de los túneles mediante sondeos subhorizontales y, si fuera posible, la determinación, siquiera aproximada, de las tensiones naturales en su interior, por fracturación hidráulica u otros procedimientos.
- g) El posible efecto retardado de la expansividad de arcillas, por aducción diferida del agua en zonas decomprimidas. Métodos para la aceleración de tal circunstancia.
- h) El posible efecto retardado de las inyecciones en el comportamiento mecánico

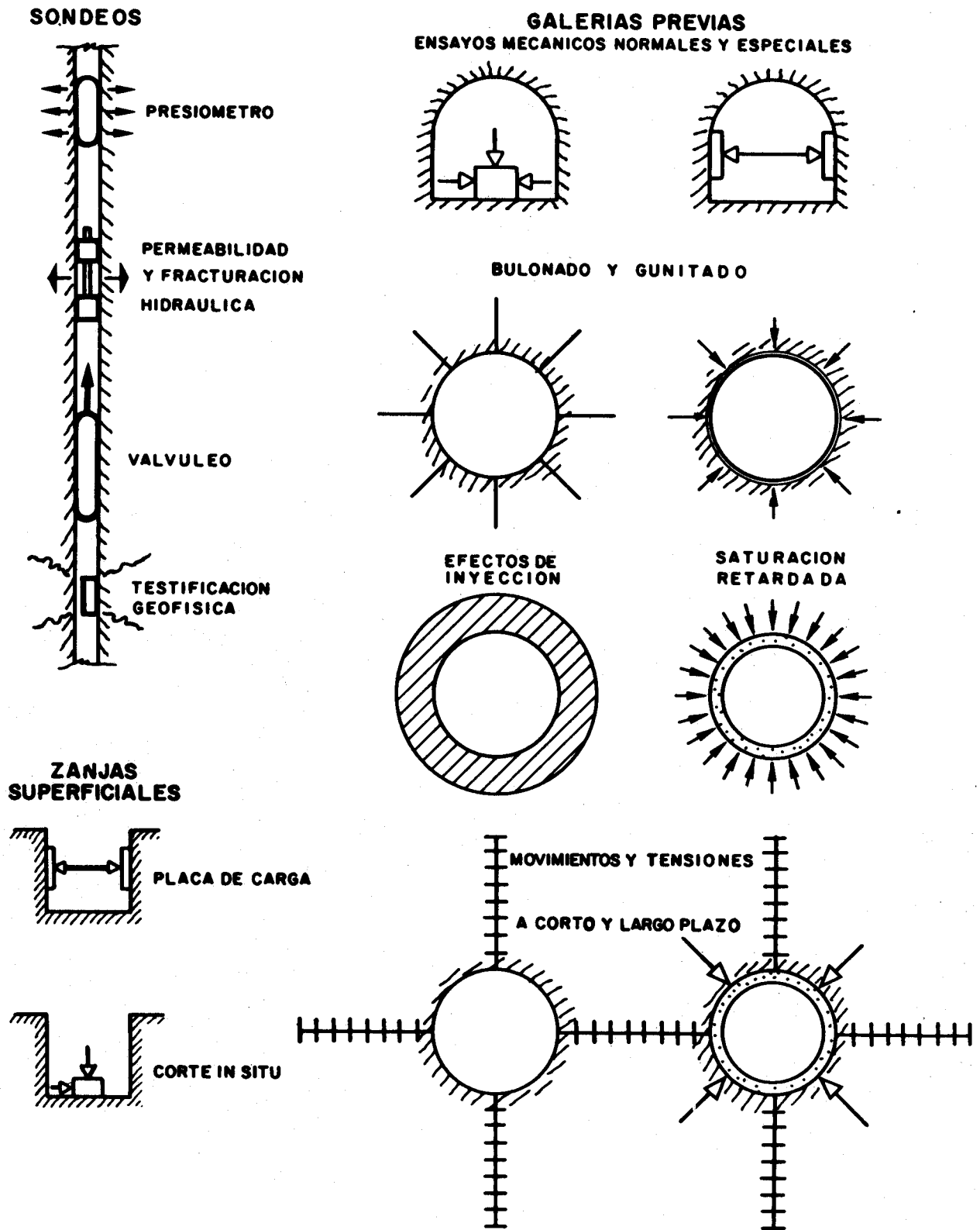
ESTUDIOS	Sondeos y testigos de sondeos	Zanjas superficiales	Galerías previas	Tramos experimentales	Construcción
IDENTIFICACION Y ESTADO	**	**	**	**	
PROPIEDADES MECANICAS PUNTUALES					A U S C U L T A C I O N
Resistencia	o	**	**	**	
Deformabilidad y dilatación	**	**	**	**	
P. Reológicas			o	**	
P. Dinámicas			o	**	
Expansividad inicial y retard.	**	o	o	**	
Alterabilidad	**		o	**	
Continuidad y abrasividad	**			**	
TENSIONES NATURALES	**		**	**	
HIDROGEOLOGIA					Y
Naturaleza y composición del agua	**		**	**	
Humedad, presión y su evolución	o		o	**	
Permeabilidad	**		o	**	
COMPORTAMIENTO GLOBAL					C O N T R O L
Influjo del diámetro			■	**	
Movimientos generales			o	**	
Evolución de tensiones			o	**	
MÉTODOS CONSTRUCTIVOS					G E N E R A L
Anclajes y bulonaje			**	**	
Gunitado			o	**	
Cerchado			■	**	
Efecto de inyecciones			■	**	
Método de excavación			■	**	
SONDEOS SUBHORIZONTALES			■	**	
OTROS FACTORES FISICOS					
Temperatura, gases, etc.	o		■	**	

NOTAS

- o Pruebas previas
- Probables pruebas
- ** Pruebas definitivas

de las arcillas y en el equilibrio final de la obra, como método sistemático de avance, tal como se ha llevado a cabo en el túnel Seikan. Las ventajas e inconvenientes de tal medida deben ser investigadas no sólo para los tramos tipo «flysch», sino también para los de componente arcillosa.

- i) Los métodos más adecuados para el bulonaje como sostenimiento provisional y su colaboración a largo plazo en el equilibrio final, tema cuestionable en suelos de componente arcillosa.
- j) Determinación de los movimientos absolutos inducidos por la apertura del túnel en sus entornos, a partir de un estado inicial no afectado por las excavaciones de la obra principal, como condicionante importante en el equilibrio final, y como factor posiblemente influyente en la fijación de la montera mínima de terreno bajo el umbral del Estrecho.



NOTA: VEASE TRAMOS EXPERIMENTALES. FIG.- 6

Fig. 5.—Planificación de la investigación geotécnica.

En la figura 6 se ha dibujado en sus líneas generales uno de los posibles esquemas de los tramos experimentales. A partir de un pozo vertical de pequeño o gran diámetro excavado hasta la profundidad de la obra definitiva, o hasta el nivel escogido para los ensayos, se estudiaría el comportamiento global del terreno para la sección tipo completo del enlace subterráneo, y con los diversos métodos constructivos previstos. Si se trata de una morfología de túnel doble con una galería de servicio intermedia, se construiría, en primer lugar, esta última de cinco metros (GS-5-1) y, posteriormente, los túneles gemelos de unos siete metros de diámetro (T-7-1 y T-7-2). En otra dirección se ensayaría el esquema de túnel único de 11 metros de diámetro (T-11-1) y su galería de servicio correspondiente (GS-5-2).

Previamente, sería de gran interés la apertura de unas galerías auxiliares (GP-3-1 o GP-3-2), situadas por encima del nivel de los tramos experimentales, a partir de las cuales se pudiera determinar la evolución de los movimientos y presiones en el terreno, en los entornos de los túneles, antes de ser alcanzado por la construcción de estos últimos. Con este mismo fin, las galerías de servicio (GS-5-1 o GS-5-2) estarían dotadas de ramales transversales, hasta alcanzar el eje de los túneles principales.

Cada uno de estos túneles se subdividirá en tramos de 25 ó 30 metros de longitud, para ensayar comparativamente los diferentes métodos de excavación de su sostenimiento o de los revestimientos definitivos.

Las investigaciones geotécnicas para otros tipos de enlace

Si para un túnel subterráneo las investigaciones geotécnicas tienen como fin primordial una optimización de la sección tipo y de los métodos constructivos, para unas pocas morfologías de la obra frente a los diferentes terrenos y estados iniciales de los mismos, para otro tipo de enlaces a través del Estrecho de Gibraltar, la orientación y la metodología de tales estudios se enfrenta en sus etapas iniciales con un amplísimo abanico de posibilidades, tanto en lo que respecta al tipo de obra como a los méto-

dos de cimentación de cada una de las soluciones, además de las dificultades que ofrece la investigación para calados de agua importantes, fuera de las plataformas costeras.

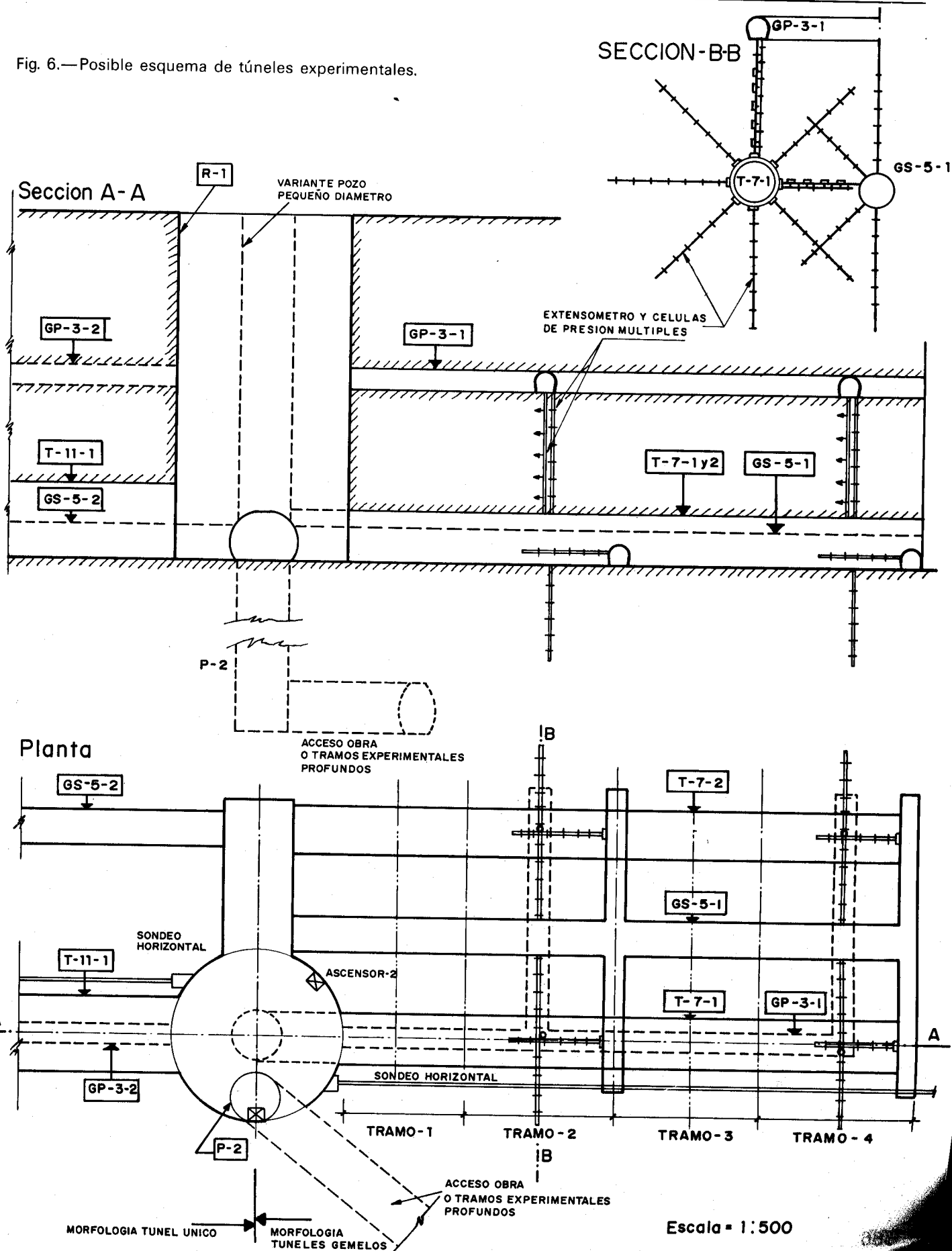
En cualquier caso, los tipos de apoyo que requieren otras soluciones pueden agruparse en unos pocos epígrafes:

- a) Grandes zapatas de más de 150 metros de anchura con gran probabilidad en número moderado, como pueden ser las de un puente aéreo sobre apoyos fijos de tipo gravedad, de morfología similar a las plataformas petrolíferas convencionales en el Mar del Norte. Las cargas normales y tangenciales son, por lo general, moderadas.
- b) Zapatas de dimensiones modestas, quizá unas pocas decenas de metros con fuertes cargas normales y tangenciales como pueden ser las del puente de apoyo fijo pero sustentado por tres o cuatro patas inclinadas. El número de elementos es también reducido.
- c) Zapatas de tamaño pequeño pero muy numerosas a lo largo del recorrido. Sería el caso de un túnel submarino apoyado en el fondo. Modestas cargas, tanto normales como tangenciales.
- d) Apoyo de pesos muertos que contrarrestan la tracción inducida por soluciones como un túnel flotante anclado o un puente flotante.
- e) En algunas circunstancias de los casos a) a d), la estabilidad frente a las acciones tangenciales o a posibles deslizamientos y socavaciones pueden requerir enlaces obra-terreno a tracción o esfuerzo cortante.

Dentro de este amplio abanico de posibilidades es evidente que el grado de conocimiento geológico-geotécnico requerido es máximo en superficie y disminuye con la profundidad. Salvo el caso a), es el tipo y estado de los terrenos más someros, no más de una o dos decenas de metros, lo que puede influir en la morfología de la cimentación si no existen recubrimientos modernos poco consolidados, lo que

LAS INVESTIGACIONES GEOTECNICAS PARA ENLACE FIJO ENTRE EUROPA Y AFRICA...

Fig. 6.—Posible esquema de túneles experimentales.



es el sentir general de los expertos, al menos en la parte profunda del Estrecho, debido a las fuertes corrientes existentes en el umbral. La topografía, tipo de roca y estratigrafías superficiales son los datos más importantes para el proyecto. En cualquier caso, también el espesor y estado de los posibles recubrimientos de suelos naturales o biogenerados.

Si bien las prospecciones marinas están sólo en sus comienzos, la opinión más generalizada aboga por un dominio de las formaciones «flysch» en todo el Estrecho, en disposiciones estratigráficas y topográficas tan caóticas como lo que se advierte en las proximidades de las costas. Existirán, por tanto, tramos competentes de tipo arenoso, alternado con estratos margosos o arcillosos de consistencia muy variable. Tampoco se descarta el afloramiento de las formaciones intrarrifeñas de Almarchal o Tánger. Si se prescinde de los recubrimientos poco consolidados, o de zonas muy superficiales alteradas, el apoyo que pudiera ofrecer estos terrenos, incluso el Almarchal, puede calificarse de aceptable si la topografía no es accidentada en el área del apoyo. Si no fuera así, a los problemas de resistencia y deformabilidad se añadiría el de posibles deslizamientos localizados cuando la estratificación fuera desfavorable.

En relación con los métodos constructivos, que sería preciso poner a punto, éstos dependen del tipo de solución y de la morfología de la cimentación escogidos. Los principales serían:

- Dragados y excavaciones a grandes profundidades, hasta 300 metros, para la eliminación de sedimentos y zonas alteradas, o para nivelación de la superficie de apoyo.
 - La ejecución de hormigones inyectados para unión de zapatas y terrenos para la realización de plataformas de apoyo o para la construcción de las propias zapatas.
 - La perforación de la roca para la implantación de pilotes y anclajes de tracción o de esfuerzo cortante en diámetros variables entre unos pocos decímetros y más de 10 metros, mediante rozadores o topes submarinos verticales.
- El clavamiento de pilotes a través de suelos poco consistentes hasta alcanzar la roca. Este tema está ya muy experimentado en la cimentación de plataformas, si bien, por tratarse de una obra definitiva en el caso del Enlace, la seguridad exigida será evidentemente mayor.

Es claro que la experimentación o estudios geotécnicos, llamando así a la obtención «in situ» de los parámetros que define el comportamiento de los terrenos, será muy precaria en las zonas submarinas profundas. En los momentos actuales se dispone solamente de algunos penetrómetros autónomos que podían proporcionar datos en el caso de sedimentos sueltos o estratos muy alterados. La sísmica, por refracción o por reflexión, puede ofrecer índices indirectos sobre el estado y consistencia en zonas localizadas cuya naturaleza y estratigrafía sea previamente conocida mediante los métodos que más adelante se indican. El empleo de presiómetros o testificación geofísica en el interior de sondeos mecánicos se presenta como muy problemática por su elevado coste y su incierto resultado. Por estas circunstancias, la cuantificación de las propiedades geotécnicas sólo podrán ser conocidas, y aun así de forma aproximada, mediante una correlación con ensayos efectuados en tierra en suelos y roca similares y en los que se intente reproducir las condiciones que la submersión impone al medio. Prueba de resistencia, deformabilidad, deslizamiento, elementos a tracción, etc., pueden ser experimentados en formaciones costeras análogas con una adecuada preparación.

El panorama que se ha presentado requiere unos estudios geológico-geotécnicos que pueden escalonarse en tres fases más importantes.

En la primera fase es preciso alcanzar un conocimiento lo más próximo posible de la naturaleza del fondo marino en su zona somera, en una franja de uno-dos kilómetros, a los lados de la traza prevista para las obras. Los métodos para llegar a esta meta, parte de los cuales se han realizado ya o están en vías de realización, son bien conocidos, tanto en su alcance como en sus limitaciones:

- Toma de muestras superficiales mediante dragalinas o tomamuestras de gravedad.

- Geofísica. Sísmica por reflexión y refracción, gravimetría, magnetometría, sonar lateral, etcétera.
- Geofísica. Sísmica por reflexión y refracción, gravimetría, magnetometría, sonar lateral, etcétera.
- Observación directa mediante submarinos y cámaras de televisión.
- Sondeos cortos, de unos pocos metros, mediante sondas autónomas.
- Sondeos profundos, aprovechando los que se van a efectuar, en número de 10 a 20, para la solución del túnel subterráneo. En la elección de su emplazamiento debe ser tenido en cuenta este doble objetivo.

En relación con los sondeos cortos, se ha demostrado (véase S. Uriel, «Los estudios geotécnicos para un enlace tipo túnel subterráneo en el Estrecho de Gibraltar») que si la geología de los terrenos submarinos es similar en su complicación estratigráfica a las zonas terrestres, con una cuadrícula de perforaciones distante alrededor de un kilómetro se obtiene una limitación de los terrenos en planta poco mejorable con una retícula de mayor densidad.

Las siguientes fases del reconocimiento deberían ser efectuadas una vez decidido el tipo de enlace, y el tipo de cimentación en base a los datos generales obtenidos en la primera etapa. Si el número de apoyos es discreto, en cada uno de ellos se volvería a efectuar, ahora de una forma localizada y más precisa, las mismas determinaciones antes señaladas, insistiendo en la sísmica por refracción y en la posibilidad de utilizar sondas penetrométricas autónomas. No se descarta la construcción de maquinarias especiales para atender a algunos aspectos concretos de los reconocimientos. En esta segunda fase se efectuarían también las prospecciones terrestres de tipo convencional que requieran los accesos.

La última fase se centraría en dos temas principales. El primero consistiría en la realización de ensayos mecánicos en tierra, intentando reproducir algunos problemas particulares de los esfuerzos a que se verían sometidos los terre-

nos de cimentación como antes se ha indicado. El segundo la puesta a punto de alguno de los métodos constructivos antes señalados, u otros sobre los que la experiencia actual es precaria o que suponga una extrapolación importante.

Santiago Uriel Romero



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático de Geotecnia en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, y jefe de Departamento en la Sección de Geotecnia del Laboratorio de Carreteras y Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

Ha sido presidente de la Sociedad Española de Mecánica de las Rocas y vicepresidente por Europa de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas. Es vocal de la Junta Rectora de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones.

Desde la terminación de sus estudios en 1959, ha dedicado toda su actividad a la Geotecnia. Es autor de más de 50 publicaciones en España y en el extranjero, habiendo pronunciado numerosas conferencias sobre su especialidad en el ámbito nacional e internacional.

José Manuel Serrano Herrero



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, promoción 1959. Es director técnico de SECEG (Sociedad Española de Estudios para la Comunicación Fija a través del Estrecho de Gibraltar).

Ha dedicado gran parte de su actividad profesional a las obras subterráneas: Jefe de obra de los túneles de Bao (Orense), con Dragados y Construcciones, y del quinto tramo

del abastecimiento de agua a Barcelona (12 km.), con Termac, S. A.

Desde 1974 hasta 1977, como director técnico de Tabasa (Túneles y Autopistas de Barcelona, S. A.), proyecta y dirige los túneles del Turó, de la Rubira y de Vallvidrera.

Ha intervenido como asesor permanente en el proyecto y construcción del túnel del Cadí (cinco kilómetros), próximo a inaugurar, y que enlazará las comarcas del Bergadá y La Cerdaña, en Cataluña.

Actualmente, como director técnico de SECEG, tiene a su cargo los estudios de viabilidad de un enlace fijo Europa-Africa a través del Estrecho de Gibraltar.