

Caracterización geotécnica mediante ensayos *in situ* y de laboratorio de algunas formaciones geológicas presentes en la traza de la Futura Conexión Fija entre España y Marruecos a través del estrecho de Gibraltar

Geotechnical characterization through in situ and laboratory tests of several geological formations present in the route of the Future Fix Connection between Spain and Morocco through Gibraltar Strait

Aurea Perucho Martínez^{1*}, Juan Antonio Diez Torres¹, Mauro Muñoz Menéndez¹, Herminia Cano Linares¹, Jose M^a Ruiz Fonticiella¹ y Fernando Pardo de Santayana¹

Palabras clave

ensayos geotécnicos in situ;
ensayos geotécnicos de laboratorio;
estrecho de Gibraltar;
SECEGSA;
CEDEX;

Resumen

El CEDEX y SECEGSA (Sociedad Española de Estudios para la Comunicación Fija a través del estrecho de Gibraltar) vienen colaborando desde hace varias décadas en el estudio de diferentes aspectos técnicos relacionados con el Enlace Fijo a través del estrecho de Gibraltar, principalmente, en relación con la geología y la geotecnia de diferentes formaciones presentes en el mismo, mediante la realización de numerosos estudios de caracterización geotécnica de materiales, realización de campañas de ensayos de laboratorio e “in situ” y asesoramiento en relación a estudios realizados por otros organismos mediante su participación en Comités de Expertos.

En este artículo se presenta una breve descripción de los aspectos más relevantes de los principales estudios geológico-geotécnicos realizados en relación con este Proyecto de Enlace Fijo y obtenidos a partir del estudio de la base documental de SECEGSA. Asimismo, se presenta un resumen de la caracterización geotécnica llevada a cabo mediante ensayos in situ y de laboratorio de diferentes formaciones Eocenas y Miocenas de la Unidad de Algeciras, presentes en la traza de la futura conexión entre España y Marruecos a través del estrecho de Gibraltar.

Keywords

geotechnical in situ tests;
geotechnical laboratory tests;
Gibraltar Strait;
SECEGSA;
CEDEX;

Abstract

CEDEX and SECEGSA (Sociedad Española de Estudios para la Comunicación Fija a través del estrecho de Gibraltar), have been collaborating since a few decades ago to study different technical aspects related to the Fix Connection through the Gibraltar Strait, mainly in relation to the geological and geotechnical properties of the different formations present in the route. In order to do so, many studies of geotechnical characterization of materials, in situ and laboratory testing campaigns have been carried out. Furthermore, they have participated in some Expertise Committees carrying out some advice work related to studies performed by other organizations.

This paper presents a brief description of the most relevant aspects of the main geological and geotechnical studies performed related to this Project of the Future Fix Connection and obtained through the study of SECEGSA's extensive data base. Moreover, it includes a synopsis of the geotechnical characterization carried out through in situ and laboratory tests on different Miocene and Eocene formations from the Algeciras Unit, present in the route of the future Fix Connection between Spain and Gibraltar through the Gibraltar Strait.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios llevados a cabo en el estrecho de Gibraltar hasta el momento actual han permitido identificar las dificultades del emplazamiento de una infraestructura de enlace fijo, debido a que el Estrecho se caracteriza por una abrupta batimetría, un medio marino y atmosférico muy agresivo y una geología muy compleja de materiales turbidíticos estructurados en distintas formaciones cabalgantes

en mantos, unas sobre otras, replegadas como consecuencia de la fuerte tectónica existente en el área del Estrecho. Para precisar las características de las formaciones geológicas del área, se han realizado numerosos estudios y campañas geológico-geotécnicas de diversa índole.

Tras una etapa en la que se vinieron desarrollando investigaciones y estudios sobre las alternativas al túnel excavado y al puente suspendido en el Estrecho, se optó en 1996 por la solución, considerada en aquel momento como más ventajosa, de un túnel ferroviario excavado bajo el fondo del mar. A partir de 1996 los estudios se orientaron hacia el objetivo de despejar las incertidumbres geológicas

* Autor de contacto: aurea.perucho@cedex.es

¹ Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, Madrid, España.

existentes, destacando la prospección marina mediante sondeos profundos realizados en 1997, con el descubrimiento de la existencia de formaciones geológicas pliocuaternarias en el centro del Umbral del Estrecho, cuyo contorno y espesor era necesario definir. En 1998-99 y en 2005 se llevaron a cabo una segunda y una tercera campaña de sondeos profundos, que confirmaron la posibilidad de adaptar la alternativa base a las nuevas condiciones geológicas.

No obstante, el Anteproyecto Primario del Enlace de 2007 no pudo llegar a un grado de definición completa de la infraestructura por la falta de datos geotécnicos exhaustivos, lo que ha hecho necesario desde esa fecha la continuidad de las investigaciones sobre materiales y estructuras en el área de trazado del túnel. Para ello, se ha considerado la necesidad de explotar al máximo los datos que pueden extraerse de la Galería de investigación de Tarifa, así como de sistematizar toda la información acumulada a lo largo de estos más de 30 años en materia de geotecnia y geología.

Los trabajos realizados más recientemente, parte de cuyos resultados se presentan aquí, se encuadraron dentro del Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España – Fronteras Exteriores (que se denominó POC-TEFEX) enmarcado dentro del Objetivo de Cooperación Territorial Europea del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), aprobado en marzo de 2009, con el objetivo global de “potenciar un desarrollo socioeconómico y ambiental armónico y contribuir a una mayor vertebración del espacio de cooperación entre el Reino de España y el Reino de Marruecos”. Dentro de este Programa se desarrolló el Proyecto que se denominó TTIGEM, de “Transferencia Tecnológica, entre el Reino de Marruecos y Andalucía, en temas de Ingeniería Geotécnica, de Estructuras y de Materiales y de Impacto de infraestructuras en el ámbito de la ingeniería civil”. Más concretamente, se enmarcó dentro de la Actividad 1: “Transferencia tecnológica relativa al proyecto del Enlace Fijo a través del estrecho de Gibraltar”

Los trabajos llevados a cabo han sido principalmente los siguientes:

- En relación a la recopilación y análisis de información geológica y geotécnica acumulada desde los orígenes de los estudios sobre el Enlace Fijo en el Estrecho (1980), SECEGSA ha facilitado al CEDEX el acceso a la información sobre los estudios e investigaciones relacionados con el Proyecto. Dentro de los trabajos realizados en esta Actividad, durante 2013 se procedió a la recopilación de todos estos datos, su sistematización y su integración en un solo estudio, con un criterio geotécnico único que ha permitido dar valor a los mismos y una caracterización geotécnica más profunda de los materiales, indispensable para abordar las futuras fases del proyecto de la comunicación fija a través del estrecho de Gibraltar.

Estos trabajos han formado parte de la tesis doctoral realizada en el CEDEX por Mauro Muñoz Menéndez y presentada en la Universidad Complutense de Madrid (Muñoz, 2015).

Este extenso análisis no se presenta aquí. Tan sólo se incluye una breve descripción de los estudios considerados de especial relevancia por su singularidad.

- En relación a la caracterización geotécnica de diferentes formaciones eocenas y oligocenas de la unidad de Algeciras, durante los años 2011 y 2012 estuvo vigente un Convenio de colaboración entre el CEDEX y SECEGSA dentro del cual se realizó en el interior de la Galería Experimental de Tarifa una extensa campaña de perforación sobre tres emplazamientos previamente elegidos en los que se realizaron diferentes ensayos geotécnicos “in situ”, con sondas geotécnicas y geofísicas y se obtuvieron muestras inalteradas para la posterior realización de ensayos geotécnicos en laboratorio. Dentro de los trabajos realizados en la citada Actividad, durante 2013 se procedió a la comparación y contraste de los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas empleadas, así como su contraste con los resultados de estudios anteriores, con el fin de realizar la caracterización geotécnica de estas formaciones. En este artículo se recogen los principales resultados de la caracterización geotécnica realizada y un resumen de la comparación de resultados de ensayos obtenidos con los ensayos in situ y de laboratorio.

2. ESBOZO DEL MARCO GEOLÓGICO

La compleja geología del estrecho de Gibraltar sólo puede entenderse y justificarse dentro del marco regional de la historia del Mediterráneo occidental, especialmente de las cadenas bético-rifeñas. La gran diversidad de interpretaciones paleo geográficas, sedimentológicas, estratigráficas y tectónicas emitidas por diversos autores a lo largo de las tres últimas décadas, es una buena prueba de la mencionada complejidad.

El estrecho de Gibraltar es un accidente geográfico importante por cuanto separa dos continentes y, por ello, se ha creído que representaba también un accidente tectónico de primer orden, separando dos grandes placas continentales: la placa europea y la africana. No obstante, el rasgo más importante que desde el punto de vista geológico, presenta el Estrecho es la homología entre sus dos orillas ya que a ambos lados afloran las mismas formaciones geológicas y se encuentran con idéntico estilo estructural (figura 1 y figura 2).

La zona directamente afectada por el Proyecto está constituida por unidades de flyschs con presencia de algunos recubrimientos pliocuaternarios.



Figura 1. Fotografía del estrecho de Gibraltar tomada desde Tarifa. Al fondo el Monte Musa en la orilla marroquí. (Facilitada por SECEGSA).

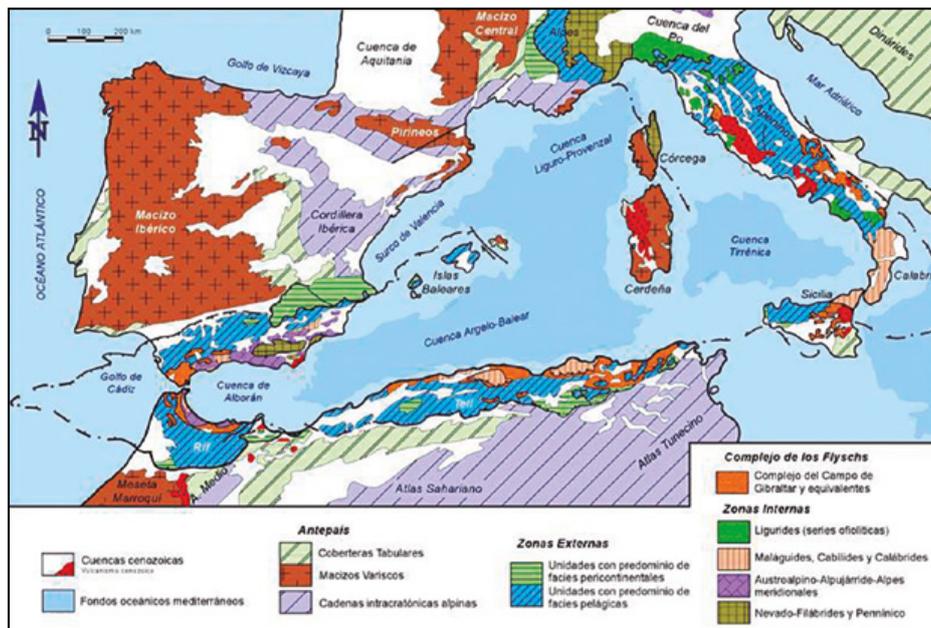


Figura 2. Mapa geológico del segmento occidental del Orógeno Alpino Perimediterráneo (Vera Torres, 2004).

Las unidades presentes en la zona del Estrecho, de naturaleza flyschoides, están formadas en su mayoría por alternancias rítmicas de bancos competentes (calcáreo-areniscosos) y niveles blandos (arcilloso-margosos), de espesores variables (centímetros a decímetros) y de edad Cretácico inferior (Neocomiense) a Mioceno (Burdigaliense). Se estructuran en mantos de cabalgamiento sobre las zonas externas, vergentes hacia el oeste y afectados por la tectónica post-mantos que generan retrocabalgamientos y estructuras internas muy complejas (figura 3).

El proyecto afecta a varias Unidades tectónicas que afloran de forma homóloga en ambas orillas del Estrecho (figura 4) y cuya denominación tanto en España como en Marruecos (entre paréntesis), es la siguiente:

- Nogales (Tisirene): Areniscas cuarcíticas y argilitas intercaladas.
- Facinas (Mellousa): Argilitas con finos bancos de areniscas cuarcíticas ferruginosas.
- Almarchal (Tánger): Argilitas con bancos intercalados de calcarenitas.
- Aljibe (Numidien): Areniscas cuarcíticas numidien-ses.
- Algeciras (Beni Ider): Es el conocido como Flysch de Algeciras, formado fundamentalmente por un flysch margo-areniscoso-micáceo, arcillas y pelitas rojas y un flysch calcáreo.
- Bolonia (Tala-Lakraah): Formado fundamentalmente por un flysch margo-areniscoso-micáceo y pelitas rojas, ambos similares a los de la Unidad de Algeciras y por bancos de calcarenitas.

Además de estas unidades existen rellenos de paleocanal formados por brechas arcillosas y por arenas bioclásticas.

Los posibles trazados de las soluciones para el Proyecto del Enlace Fijo se ubican exclusivamente en el complejo de los flyschs y en la unidad externa magrebí

de Tánger o Almarchal en el lado Español, además de verse afectados por los rellenos de paleocanal citados. La situación del trazado considerado para el estudio del Enlace Fijo a través del túnel, tiene su origen en Punta Paloma, en la orilla norte, y termina pasando por el Umbral del Estrecho, en Punta Malabata, en la orilla sur (figura 5).

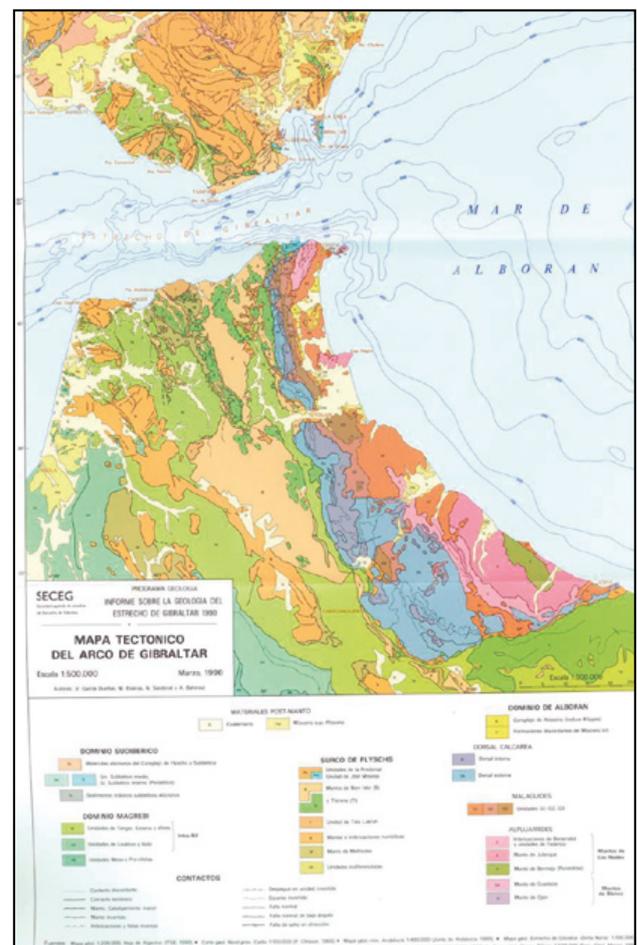


Figura 3. Mapa tectónico del Arco de Gibraltar (SECEGSA, 1990).

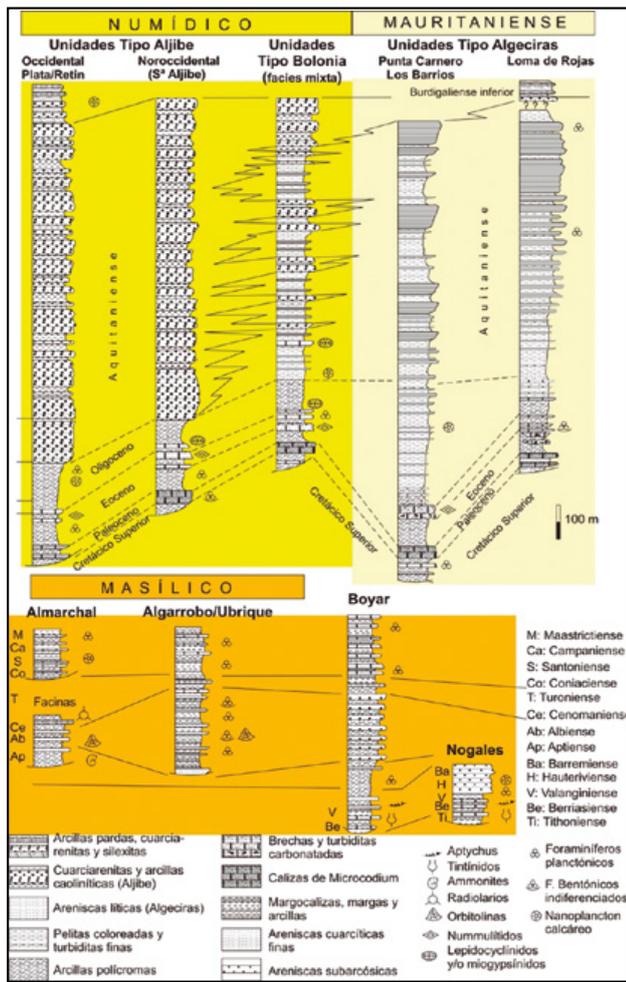


Figura 4. Estratigrafía de las unidades del Complejo de Campo de Gibraltar (Vera Torres, 2004).

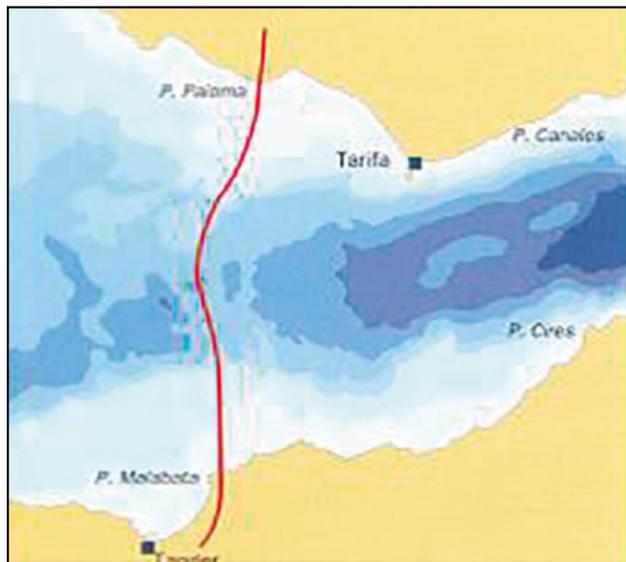


Figura 5. Alineamiento de la solución "túnel" (SECEGSA, 1990).

3. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES ESTUDIOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS ANTERIORES

Se han examinado los datos geológico-geotécnicos procedentes de más de 30 años de trabajos, que se han realizado tanto en el fondo del estrecho como en las dos orillas, permitiendo el estudio de la traza del túnel (Muñiz, 2015). Dichos trabajos incluyen obras singulares de especial

relevancia, zanjas y sondeos, en todos los cuales se han realizado ensayos de campo y laboratorio.

En las obras de especial relevancia se ha buscado estudiar a escala real el comportamiento de los materiales mediante excavaciones de gran tamaño, debidamente instrumentadas y que han servido, además, para probar diferentes técnicas de excavación y sostenimiento. Hasta el momento actual cabe destacar como obras de cierta relevancia las siguientes (figura 6):

- **Zanjas de experimentación**, destacadas como obras singulares aunque de menor entidad. Son las denominadas Z-I a Z-VI en la figura;
- **Obras singulares**, de especial relevancia. Se han realizado tres grandes obras singulares: el Pozo de Bolonia y la Galería de Tarifa en la orilla española y los Pozos y galerías de Malabata, en la orilla marroquí. En la Figura 6 se indica la ubicación aproximada de estas obras;
- **Campañas de sondeos**, realizadas tanto en tierra como en el mar.

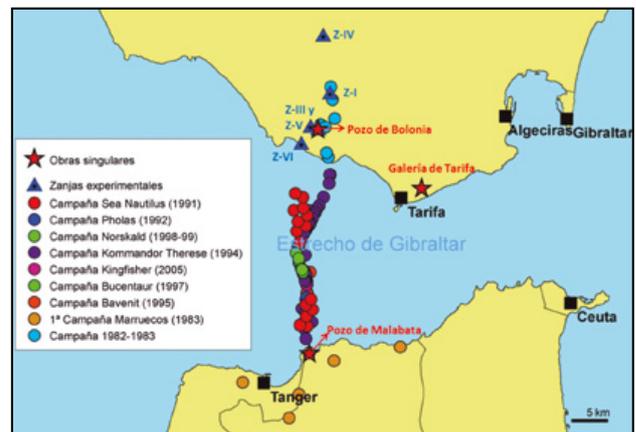


Figura 6. Situación de los principales reconocimientos (Muñiz, 2015).

Las **zanjas de experimentación** fueron excavadas entre 1984 y 1986 y en ellas el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX realizó una serie de investigaciones *in situ* (CEDEX, 1985a y b). La excavación de las zanjas tenía como propósito permitir la realización de ensayos en roca sana y a mayor escala.

Se situaron en diferentes emplazamientos: en el Cruce de Facinas, sobre materiales de la Unidad de Almarchal y Facinas (zanja I); en las inmediaciones del Puerto de Bolonia, sobre materiales de la Unidad de Almarchal (zanja III); en el paraje denominado Cortijo de la Haba, en la localidad de Tahibilla, sobre materiales de la Unidad de Almarchal (zanja IV); en la población del Pulido, en la ladera SE del arroyo del Pulido, sobre materiales pertenecientes a las pelitas rojas de la Unidad de Bolonia (zanja V); y en las inmediaciones de la población de Bolonia, en el Lentiscar, sobre materiales de la serie basal de la Unidad de Bolonia (zanja VI). En ellos se llevaron a cabo ensayos de carga en placa, de corte directo *in situ*, de densidad *in situ* por el método de la arena y se tomaron muestras en bloque. En las figuras siguientes (figura 7 a figura 10) se presentan esquemas de algunos de los principales ensayos realizados en las mismas.

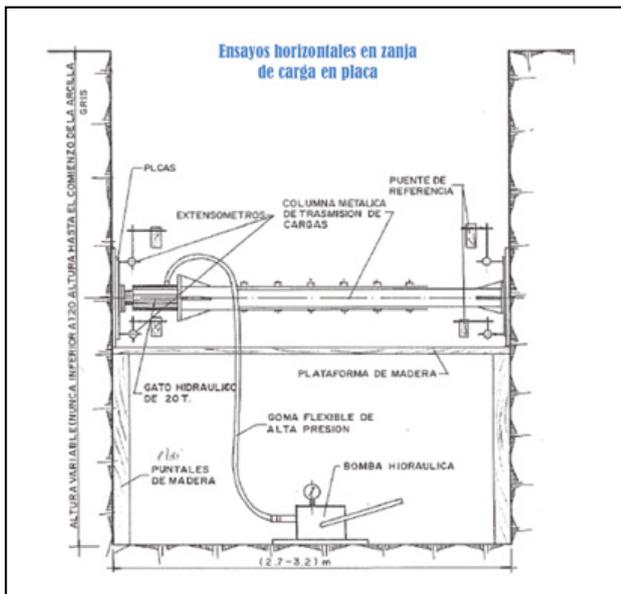


Figura 7. Esquema de la realización de los ensayos de carga en placa horizontales en la zanja Z-I (CEDEX, 1985a).

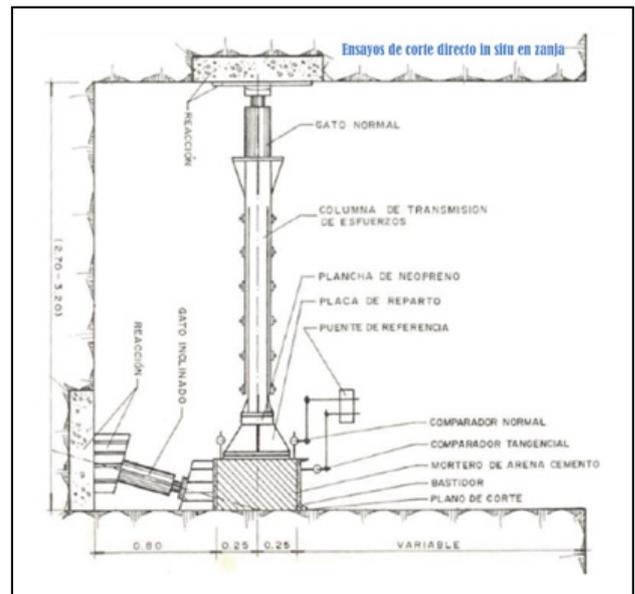


Figura 10. Esquema de los ensayos de corte directo in situ realizados en Z-I (CEDEX, 1985a).

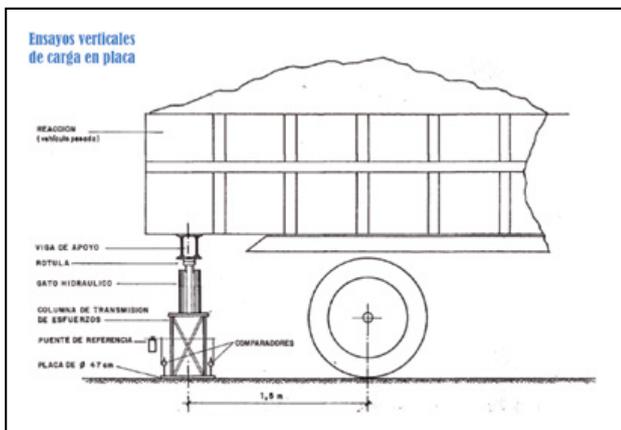


Figura 8. Esquema de los ensayos de carga en placa realizados en los emplazamientos Z-III y Z-IV (CEDEX, 1985b).

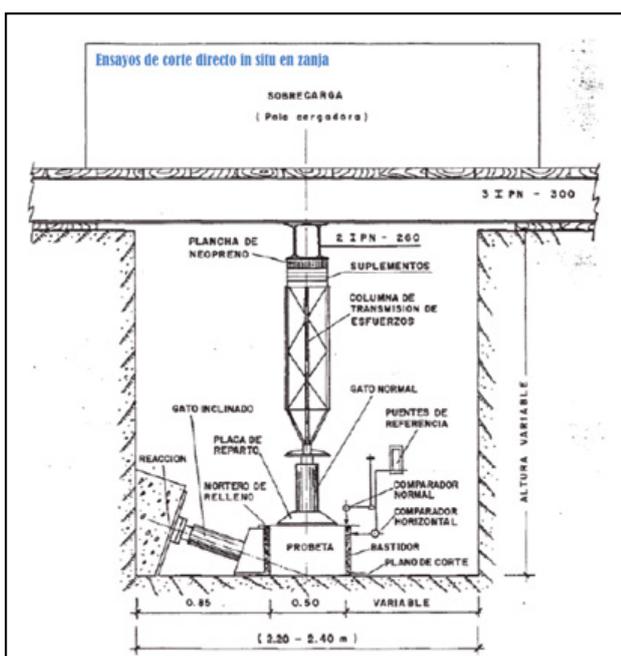


Figura 9. Esquema de los ensayos de corte directo in situ realizados en las zanjas Z-III y Z-IV, Z-V y Z-VI (CEDEX, 1985b).

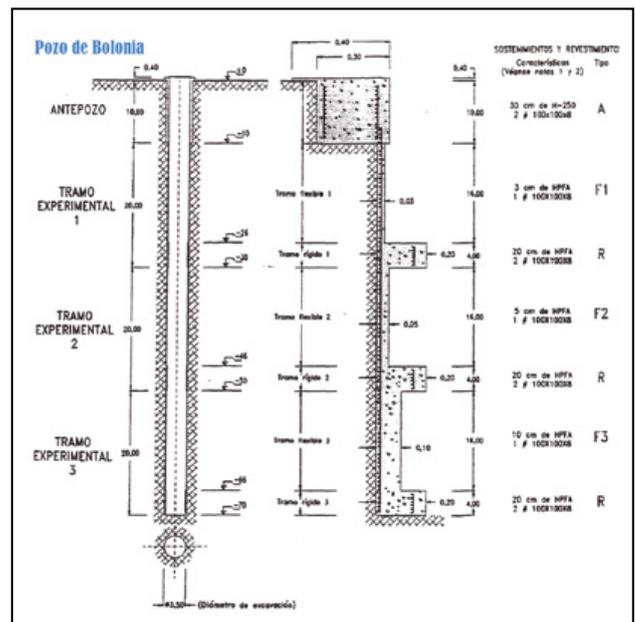


Figura 11. Sección, planta y esquema de sostenimientos del pozo experimental de Bolonia. Tomado de Pliego et al. (1992).

La Galería Experimental de Tarifa, excavada en 1995, con 3,8 m. de diámetro y 572 m. de longitud, y situada asimismo en el municipio de Tarifa, atraviesa las unidades más representativas que afectan al Enlace Fijo del estrecho de Gibraltar. Los materiales implicados pertenecen a las Unidades de Algeciras, Almarchal y Bolonia (figura 12).

En la Unidad de Algeciras se atraviesan tres términos litológicos diferenciados, que de muro a techo son:

- Flysch margo-arenisco-micáceo
- Secuencia de Pelitas rojas
- Flysch calcáreo

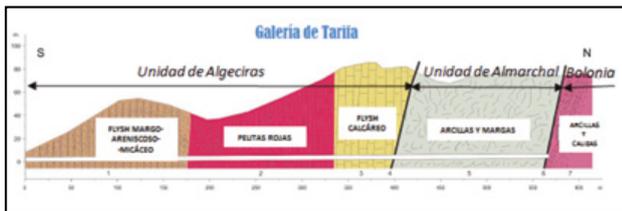


Figura 12. Corte esquemático de la Galería de Tarifa (facilitado por SECEGSA).

El Flysch margo-arenoso-micáceo (figura 13) está formado por paquetes decimétricos de argilita algo limosa sana de color gris con intercalaciones de arenisca calcárea y limolita arcillosa. En esta zona aparece con estratificación subvertical y escasa fracturación, principalmente asociada a laminación paralela a la estratificación. Los planos son lisos y algo escalonados, aparecen normalmente cerrados y sin relleno. Los valores de RQD medidos en los sondeos varían entre 55 y 100 %, con un valor medio en torno a 85%. En cuanto al RMR de esta zona se sitúa entre 47 y 66, correspondiente con un macizo de calidad media a buena (Bieniawski, 1989).



Figura 13. Afloramiento en el que se observa el aspecto del Flysch margo-arenoso-micáceo (facilitado por SECEGSA).

La secuencia de Pelitas rojas (figura 14) está formada por paquetes de argilita rojiza sana con intercalaciones centimétricas de calcarenita gris de grano fino. En la zona de la galería la estratificación aparece subvertical casi coincidente con el eje de los sondeos. La fracturación es muy escasa, con valores del RQD superiores al 70%. La mayoría de las discontinuidades se corresponden con planos de estratificación y laminación y presentan contactos lisos y brillantes con JRC muy bajos.



Figura 14. Afloramiento en el que se observa el aspecto de las Pelitas rojas (facilitado por SECEGSA).

El Flysch calcáreo (figura 15) está formado por calcarenitas grises y ocreas con intercalaciones margosas y niveles argilíticos. Presentan una baja calidad geomecánica con abundante fracturación y niveles de falla. Abundantes fracturas cerradas con relleno de calcita y texturas brechoides. En ocasiones las paredes de las fracturas aparecen algo alteradas y con rellenos terrígenos o arcillosos. La variación de las características es grande, con RQD variando entre 0 y 90 % entre puntos cercanos.



Figura 15. Afloramiento en el que se observa el aspecto del Flysch calcáreo (facilitado por SECEGSA).

El contacto entre la Unidad de Algeciras y la de Almarchal se produce por medio de una falla de desgarre con dirección N70°E y que buza 60° hacia el sur (160/60). Ésta queda manifestada por la presencia de una zona brechificada constituida por bloques decimétricos a métricos de calcarenita dentro de una matriz heterométrica compuesta por arcillas rojas y calcarenitas (Martín Ruíz, 1997).

La Unidad de Almarchal está compuesta por arcillas grises tectonizadas y margas microfisuradas. Se han diferenciado dos tramos. El primero de marcado carácter arcilloso, está formado por arcillas grises y rojas, muy tectonizadas, con bloques aislados, decimétricos a métricos, de calcarenitas. Se atraviesan desde el 0+400 hasta el 0+480. Desde el 0+480, la composición de la unidad se vuelve más margosa, con arcillas grises tectonizadas y margas microfisuradas. Este tramo termina con una falla de desgarre cuya composición es similar a la anterior, diferenciándose únicamente su dirección, siendo en este caso N50°E en el punto 0+560.

La Unidad de Bolonia está formada por bancos de calcarenitas y arcillas. Se atraviesa sólo en los 10 últimos metros de la galería (0+560 hasta 0+570).

El complejo de **Pozos y galerías de Malabata**, excavado en 1995, (Figura 16), se sitúa en la orilla Marroquí del Estrecho, en el cabo de Malabata, al este de Tánger. Esta obra singular permitió la realización de un extenso estudio de los materiales involucrados en el proyecto de enlace fijo, principalmente de materiales pertenecientes a la Unidad de Algeciras, en los que se sitúa. Las dimensiones de la obra posibilitan un estudio a escala real del comportamiento de los terrenos.

Los principales objetivos de esta actuación fueron (Chraïbi *et al.*, 1995):

- Determinar las características geotécnicas, a corto y largo plazo, de los materiales excavados.
- Determinar las tensiones in situ de la zona

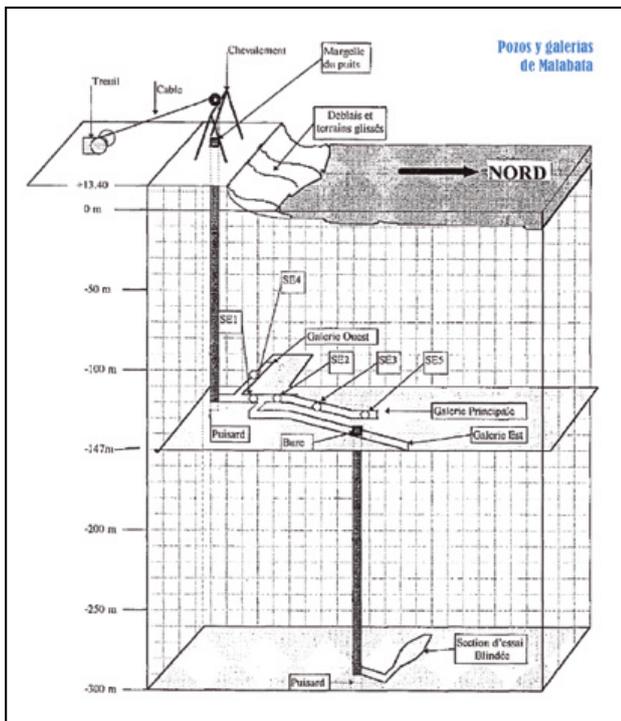


Figura 16. Esquema del complejo de pozos y galerías de Malabata excavado en 1995 (facilitado por SECEGSA).

- Estudiar el comportamiento de los materiales frente a la excavación a largo plazo
- Probar sostenimientos
- Efectuar un reconocimiento geológico detallado
- Estudios de la permeabilidad con especial interés en el paso por accidentes geológicos y zonas fracturadas

Aparte de estas obras singulares y de las zanjas citadas anteriormente, la investigación geológico-geotécnica se ha valido, como se indicó anteriormente, de diferentes campañas de sondeos.

En primer lugar estas campañas se desarrollaron en tierra, perforándose cerca de 4.000 metros de sondeo:

- 1ª Campaña de sondeos en tierra en la orilla norte (1983)
- 1ª Campaña de sondeos en tierra en la orilla sur (1983)
- 2ª Campaña de sondeos en tierra en la orilla sur (1992)

En el mar se han realizado siete campañas de perforación que, en total, superaron los 3.000 metros de perforación:

- Campaña Sea Nautilus (1991)
- Campaña Pholas (1992)
- Campaña Kommander Theresa (1994)
- Campaña Bevenit (1995)
- Campaña Buceantur (1997)
- Campaña Norskald (1998-1999)
- Campaña Kingfisher (2005)

La perforación de sondeos marinos ha permitido detectar la presencia de dos paleocanales de dirección E-O, separados por un afloramiento de flysch (Monte Tartesos) rellenos por una brecha arcillosa de importante espesor, generada por el derrumbe gravitacional de áreas próximas al Umbral Central o de Camarinal del estrecho de Gibraltar (figura 17).

Las excavaciones experimentales y los sondeos se utilizaron para la ejecución de ensayos in situ. En total, se han recopilado resultados de los siguientes ensayos:

- 62 Ensayos presiométricos
- 15 Ensayos de gato plano
- 32 Ensayos de placa de carga
- 5 Ensayos de corte directo in situ
- 81 Determinaciones de la densidad in situ por el método de la arena
- 14 Ensayos de carga con gripper
- 37 Ensayos de permeabilidad Lefranc
- 49 ensayos de permeabilidad Lugeon

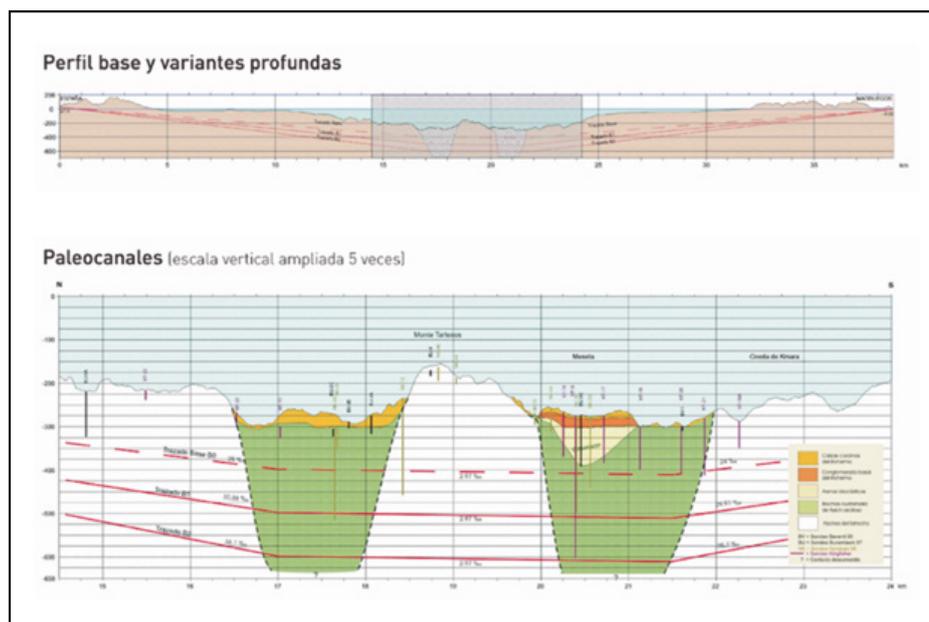


Figura 17. Perfil simplificado de los paleocanales del estrecho con las diferentes soluciones túnel. Realizado en base a las diferentes campañas de sondeos marinos (facilitado por SECEGSA).

Las muestras tomadas en las diferentes actuaciones, tanto obras singulares como campañas de sondeos, fueron utilizadas para la realización de un elevado número de ensayos de laboratorio. A continuación se resume, de manera aproximada, el número de ensayos de laboratorio recopilados:

- 776 Medidas de humedad
- 683 Medidas del peso específico o la densidad
- 418 Determinaciones de los límites de Atterberg
- 297 Granulometrías
- 84 Análisis del hinchamiento de suelos
- 213 Determinaciones del contenido en carbonatos, sulfatos o materia orgánica
- 219 Ensayos de resistencia a compresión simple
- 532 Ensayos de carga puntual (PLT)
- 71 Ensayos de resistencia a tracción indirecta (ensayo brasileño)
- 67 Ensayos triaxiales
- 70 Ensayos de corte directo
- 11 Ensayos edométricos
- 8 Ensayos de corte directo en juntas
- 55 Medidas de la velocidad de propagación de ondas en probeta
- 32 Ensayos SEHUEDS

4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE DIFERENTES FORMACIONES DE LA UNIDAD DE ALGECIRAS

Dentro de un convenio de colaboración firmado entre el CEDEX SECEGSA se realizó una campaña de investigación geotécnica en el interior de la galería experimental de Tarifa (Cádiz) (figura 18 y figura 19), que consistió en la perforación de 14 sondeos de entre 14 y 20 metros de profundidad, en los cuales se realizaron ensayos “in situ” de diferentes tipos y se tomaron muestras inalteradas y parafinadas, que se ensayaron en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Para ello la galería se dividió en tres zonas de estudio con el fin de abarcar las tres formaciones de flysch de la Unidad de Algeciras, (figura 20).



Figura 18. Mapa de situación de los trabajos.

Los resultados de los trabajos llevados a cabo han permitido realizar una mejor caracterización geotécnica de las formaciones presentes en la zona a atravesar por los futuros túneles bajo el Estrecho, así como la comparación de resultados obtenidos por las distintas técnicas de ensayo empleadas, tanto de laboratorio como in situ, con vistas a la planificación de una futura campaña de sondeos bajo el mar.



Figura 19. Fotografía del cerro atravesado por la Galería de Tarifa y puerta de acceso.



Figura 20. Perfil geológico simplificado de la galería experimental de Tarifa (facilitado por SECEGSA).

Los trabajos realizados “in situ” dentro de la Galería fueron los siguientes (figura 21 a figura 23):

Trabajos realizados in situ en la Zona 1 (Flysch margo-areniscoso micáceo, FMAM):

Ejecución de sondeos y equipamiento de perforaciones en sondeos

- 3 sondeos de 20 m
- 1 sondeo de 15m
- Toma de 13 testigos parafinados
- Toma de muestra inalterada en tubo triple (20m)
- Reperforado de 2 sondeos de 15 y 20 m a 101 mm
- Equipamiento de tubería de PVC sellada en 4 sondeos (75m).

Utilización de equipos de campo (presiómetros y sondas geofísicas)

- 19 Ensayos presiométricos
- 24 Ensayos geofísicos con 8 tipos de sondas
- 2 Ensayos PS-logging en sondeo revestido
- 2 Ensayos Cross-Hole en sondeo revestido
- 2 Ensayos Down-Hole (1 Up-Hole) en sondeo revestido

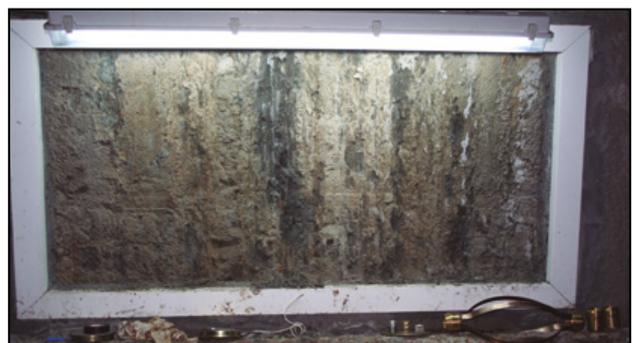


Figura 21. Aspecto del Flysch areniscoso-micáceo de la Unidad de Algeciras en la ventana geológica frente a la que se perforaron los cuatro sondeos de la Zona 1 (ventana V-4). Se aprecia el buzamiento vertical de las capas.

Trabajos realizados in situ en la Zona 2 (Pelitas rojas, PR):

Ejecución de sondeos y equipamiento de perforaciones en sondeos

- 2 sondeos de 20 m
- 2 sondeo de 15m
- Toma de 11 testigos parafinados
- Toma de muestra inalterada en tubo perspex (20m)
- Reperforado de 2 sondeos de 15 y 20 m a 101 mm
- Equipamiento de tubería de PVC sellada en 4 sondeos (70m).

Utilización de equipos de campo (presiómetros y sondas geofísicas)

- 13 Ensayos presiométricos (3 en avance)
- 19 Ensayos geofísicos con 8 tipos de sondas
- 2 Ensayos PS-logging en sondeo revestido
- 2 Ensayos Cross-Hole en sondeo revestido



Figura 22. Aspecto de la formación de Pelitas rojas perteneciente a la Unidad de Algeciras en la ventana geológica (V-7) frente a la que se perforaron los cuatro sondeos de la Zona 2. Se trata de una alternancia de argilitas rojas y verdosas con intercalaciones calcareníticas blanquecinas.

Trabajos realizados in situ en la Zona 3 (Flysch calcáreo, FC):

Ejecución de sondeos y equipamiento de perforaciones en sondeos

- 3 sondeos de 20 m
- 2 sondeo de 15m
- 1 sondeo de 5m (clausurado)
- Toma de 12 testigos parafinados
- Toma de muestra inalterada en tubo perspex (20m)
- Reperforado de 3 sondeos de 15 y 20 m a 101 mm
- Equipamiento de tubería de PVC sellada en 4 sondeos (90m).

Utilización de equipos de campo (presiómetros y sondas geofísicas)

- 12 Ensayos presiométricos (en avance)
- Ensayos geofísicos con 8 tipos de sondas
- 5 Ensayos PS-logging en sondeo revestido
- 2 Ensayos Cross-Hole en sondeo revestido.



Figura 23. Aspecto del Flysch calcáreo perteneciente a la Unidad de Algeciras en la ventana geológica (V-10) frente a la que se perforaron los seis sondeos de la Zona 3. Se aprecia un buzamiento del orden de 85° hacia el interior de la galería (NO).

4.1. Testificación de los sondeos

Se testificaron 11 sondeos (3 en la Zona 1, otros 3 en la Zona 2 y 5 en la Zona 3),

De forma resumida, en cuanto a las características de las tres formaciones perforadas de la Unidad de Algeciras en la zona de la galería, se puede indicar lo siguiente:

- En la Zona 1, o zona del Flysch arenoso micáceo se obtienen unas argilitas grises, duras algo limosas y margosas, con intercalaciones areniscas gris oscuro más calcáreas y con un buzamiento subvertical de la estratificación en torno a los 80°. La calidad de los testigos es bastante buena con una recuperación del 100%, un grado de meteorización de I y un RQD medio entre el 90 y el 100%, (figura 24).



Figura 24. Aspecto de las argilitas grises con intercalaciones areniscas que aparecen en los sondeos de la Zona 1.

- En la Zona 2 o zona de las Pelitas rojas, se perforan unas argilitas rojizas y/o verdosas con intercalaciones de areniscas calcáreas blanquecinas cuyo buzamiento es casi vertical, en torno a los 85°, apreciándose frecuentemente lisos especulares brillantes a modo de slickensides. Los testigos presentan buena calidad, un grado de meteorización predominante de II y un RQD medio superior al 80%, (figura 25).



Figura 25. Aspecto de las argilitas rojizas de la Zona 2.

- En la Zona 3 o zona del Flysch calcáreo, se recuperan unas areniscas calcáreas o calcarenitas blanquecinas, en ocasiones muy fracturadas, con algunas intercalaciones de argilitas rojizas o verdosas subverticales. Son frecuentes las zonas brechificadas con RQD inferior a 40 (0 en la mayoría de los casos), y grado de alteración entre IV y V. Este material ha presentado problemas tanto para su perforación como para la realización de los ensayos presiométricos y geofísicos, dado el alto grado de fracturación de algunos tramos, lo que dificultaba la introducción de las sondas y presiómetros (figura 26).



Figura 26. Aspecto de las areniscas calcáreas con intercalaciones argilíticas subverticales que aparecen en los sondeos de la Zona 3.

Las tres formaciones responden a una alternancia de materiales argilíticos y calcareníticos típica de las series de flysch de la Unidad de Algeciras, predominando uno u otro material según la formación. A su vez, en la zona de la galería presentan un buzamiento prácticamente vertical. Una descripción más amplia y detallada se encuentra recogida en CEDEX (2012a).

4.2. Ensayos presiométricos

Se realizaron un total de 44 ensayos presiométricos en interior de sondeo utilizando un equipo Elastmeter-200 fabricado por la compañía japonesa OYO, con medida de deformación radial, capaz de alcanzar una presión máxima de 20 MPa en condiciones ideales (figura 27).

Los ensayos se realizaron de manera sistemática, con una separación vertical aproximada de 3 metros, con la intención de determinar la rigidez “in situ”, a escala de macizo, de los materiales perforados.



Figura 27. Sonda y equipo de medida para los ensayos presiométricos tipo OYO.

En la Zona 1 (Flysch margoso-areniscoso), la buena calidad geomecánica de los materiales permitió la ejecución de un total de 19 ensayos, en la Zona 2 (Pelitas rojas) se ejecutaron 13 y en la Zona 3 (Flysch calcáreo) 12 más. Las deficientes condiciones geomecánicas del macizo en esta última zona dificultaron tanto la perforación de los sondeos como la realización de los ensayos.

Los ensayos presiométricos permitieron obtener diferentes parámetros geotécnicos de manera directa, como el módulo de corte presiométrico (G_p), la presión de fluencia y la presión de empuje al reposo. De manera indirecta se han podido estimar otros parámetros, con menos fiabilidad, como la presión límite o la resistencia al corte sin drenaje.

Los módulos de corte (G_p) obtenidos con los ensayos permiten estimar la deformabilidad de las diferentes litologías, a escala cercana a la de macizo. A partir de ellos y suponiendo un coeficiente de Poisson de 0,25 se estiman los módulos E_p , que se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores medios obtenidos de los módulos presiométricos

E_p (MPa)	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Media	2424	2024	1050
Máximo	5127	3274	1918
Mínimo	700	1050	362
Número de datos	12	10	10

A partir de estos módulos presiométricos se han podido estimar los módulos de deformación del macizo rocoso (E_M). Este parámetro, de gran importancia geotécnica, presenta cierta relación con la fracturación del macizo. A fin de estudiar este hecho se buscó a correlación entre el E_M y el RMR (índice que establece la calidad del macizo) obteniéndose varias expresiones empíricas. De entre estas expresiones, cabe destacar la recogida en Muñiz Menéndez *et al.* (2012, 2013) (figura 28):

$$E_M(GPa) = e^{\frac{RMR-35}{18}}$$

Los resultados de todos estos ensayos se recopilaron en un informe del CEDEX (CEDEX, 2012b).

En el apartado 5 se adjuntan los valores de los módulos obtenidos a diferentes profundidades en cada zona, así como las resistencias al corte estimadas en los diferentes terrenos a partir de estos ensayos.

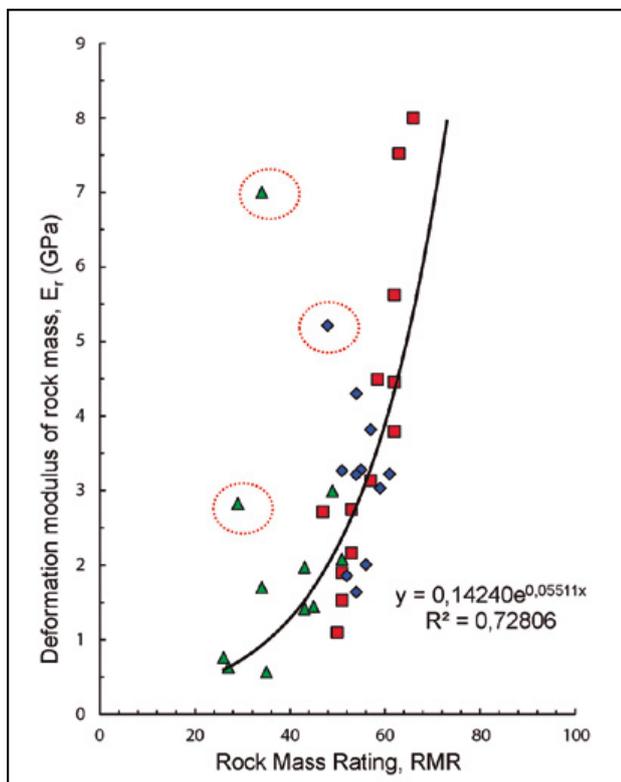


Figura 28. Correlación propuesta por Muñiz Menéndez *et al.*, (2012, 2013).

4.3. Ensayos geofísicos

La gran ventaja de la geofísica es su característica de ser ensayos no destructivos y que se puede utilizar en sondeos profundos lo que le da gran relevancia en el estudio de los materiales en aguas profundas (figura 29).



Figura 29. Testificación geofísica en el interior de un sondeo de la galería.

Las técnicas que se utilizaron fueron, fundamentalmente, las orientadas a sondeos: Testificación geofísica y ensayos sísmicos sobre sondeos (Up-Hole, Down-Hole y Cross-Hole) realizándose también un pequeño estudio de sismica de refracción en la zona correspondiente a la formación denominada Unidad de Almarchal.

En la tabla 2 se muestran las sondas utilizadas y los parámetros físicos medidos con cada una de ellas.

Tabla 2. Sondos geofísicos utilizados y parámetros medidos en cada una de ellas

Tipo de ensayo	Parámetro medido
Calibre de tres brazos	Diámetro del sondeo
Sonda Eléctrica	Resistividad (a dos distancias). Potencial espontáneo. Emisión gamma natural. Resistencia de punto simple. Temperatura del fluido del sondeo.
Sonda Electromagnética (sonda de inducción)	Conductividad de las paredes del sondeo a dos espaciados. Emisión gamma natural.
Sonda Gamma espectral	Porcentaje de Uranio, Torio y Potasio. Gamma natural total.
Inclinométrica	Orientación del sondeo. Inclinación del sondeo. Gamma natural.
HIRAT (Hight Resolution Acoustic Televier)	Imagen acústica Calibre virtual de cuatro brazos Distribución de fracturas Volumen del sondeo Orientación del sondeo Inclinación del sondeo
Onda sónica completa compensada	Velocidades de propagación de las ondas internas en la formación (P, S y Stoneley)
PS-logging	Velocidad de onda P y de onda S alrededor de sondeo
Cross-Hole	Velocidad de onda S entre sondeos

En todos aquellos casos en que fue posible se realizaron ensayos con los sondeos recién abiertos y, posteriormente, se repitieron sobre los sondeos entubados y cementados. Esto se realizó de forma sistemática en la Zona 1 y 2 pero en la Zona 3, por problemas de fracturación del terreno que llevaban a temer por la integridad de los equipos, sólo se llevaron a cabo los ensayos sobre sondeos entubados. En los casos en que se utilizó este proceder los datos obtenidos fueron muy similares, con las diferencias inherentes a los distintos ensayos.

Las sondas geofísicas (eléctrica, electromagnética, gamma e inclinométrica) funcionaron bien en general, excepto la sonda eléctrica con la que no se pueden adquirir datos hasta los 11 metros de profundidad y quedaba, por tanto, longitud insuficiente de sondeo.

En general, los registros son muy similares, ya que dentro de cada zona los sondeos atravesaron formaciones muy homogéneas, siendo sus mayores diferencias debidas a grados de fracturación.

La sonda HIRAT puede ser una herramienta muy potente allí donde la recuperación de testigos sea difícil. A partir de sus imágenes se puede realizar un estudio de fracturación en los sondeos y, teniendo en cuenta los sondeos de toda una zona, levantar rosas de fracturación y diagramas estereográficos de estratificación y fracturación para el macizo (figura 30) por lo tanto se puede determinar el RQD del macizo. Determina, también, el diámetro del sondeo (calculando la sobre-excavación, para estimar la cantidad de lechada necesaria para el macizado del entubado), su inclinación, su orientación y permite localizar oquedades y distinguir, en cierta medida, texturas. Usada de forma conjunta con otras sondas: TV, sónica, eléctrica, nucleares... se puede considerar una alternativa válida a la testificación mecánica de sondeos.

Los ensayos sísmicos de sonda sónica, PS-logging y Cross-Hole presentan bastante coherencia, salvo casos aislados, teniendo en cuenta el distinto diseño y aplicación de cada técnica, (figura 31). La sonda sónica está diseñada para trabajar en rocas mientras que el PS-logging lo está para suelos más o menos duros. Estos dos ensayos miden las velocidades en una porción del terreno cercana al sondeo, mientras que el Cross-Hole mide la velocidad promedio de todos los materiales que se encuentran entre los dos sondeos por lo que no son totalmente comparables. Por otro lado, las velocidades calculadas en los Cross-Hole, debido a la pequeña distancia a la que se encuentran los sondeos (en origen se diseñó a 3 metros) hace que cualquier pequeño error en la lectura del tiempo de llegada se refleje en un aumento importante de la velocidad.

La zona en la que se comprueba una mayor disparidad de resultados es en la Zona 3, donde los datos de los Cross-Hole se distancian bastante de los de PS-logging, siendo más lógicos los primeros que los segundos. Esta disparidad puede ser debida a los problemas de cementación que se presentaron en su momento.

Se realizó una sísmica de refracción en la zona de la Unidad de Almarchal, que ha servido para determinar la velocidad de onda P de los materiales de la misma para una profundidad limitada, pero que puede servir para diseñar una futura campaña de sondeos en esta zona.

En general, los ensayos Cross-Hole aunque con variaciones bruscas, se correlacionan bastante bien con otros ensayos sísmicos.

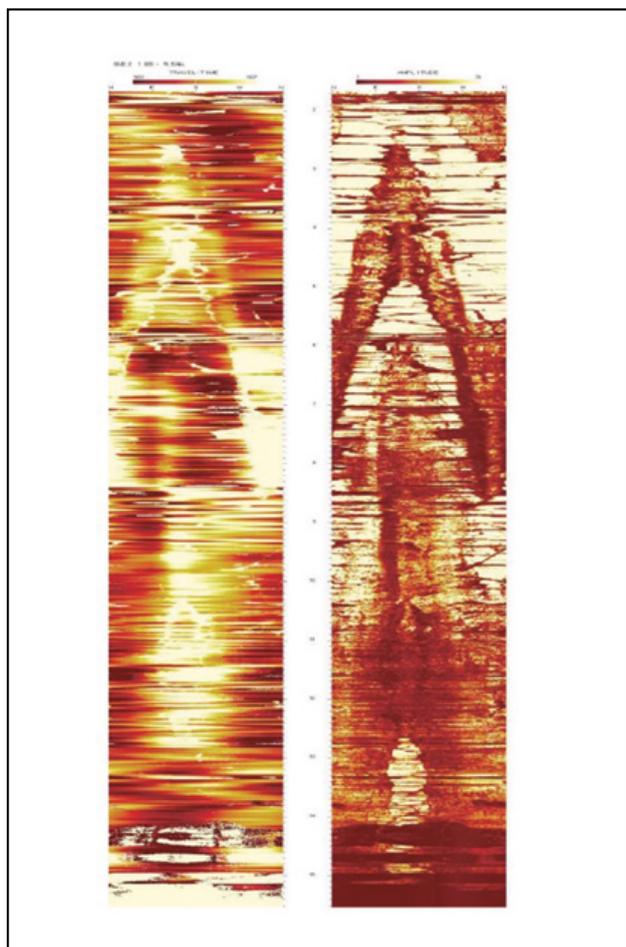


Figura 30. Imagen acústica del sondeo SM 2-(2) obtenida mediante la sonda HIRAT.

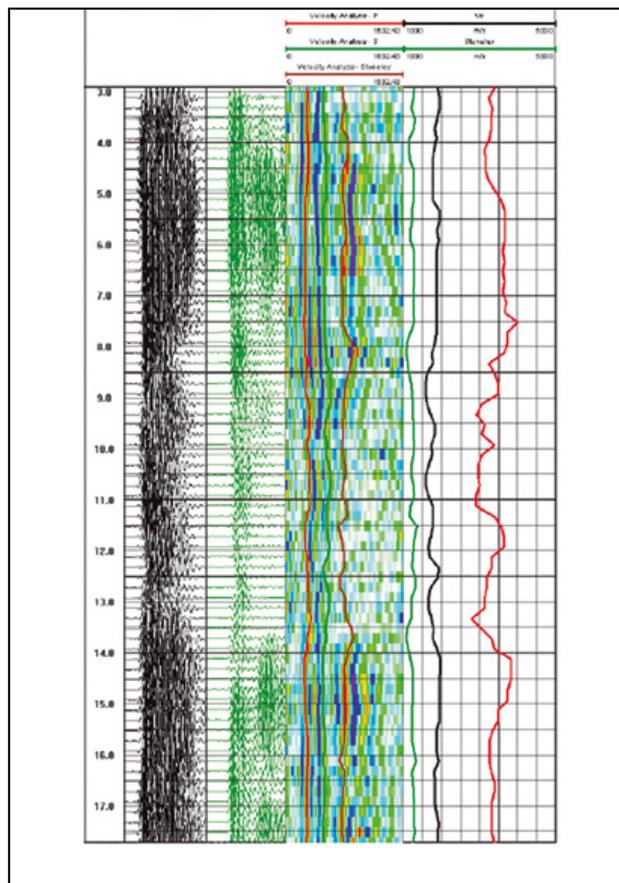


Figura 31. Ejemplo del cálculo de velocidades mediante la sonda sónica de onda completa.

Los resultados de todos estos ensayos se recopilaron en un informe del CEDEX (CEDEX, 2012c).

En el apartado 5 se adjuntan los valores de las velocidades obtenidas a diferentes profundidades en cada zona, en los diferentes terrenos a partir de estos ensayos mediante las sondas PS-logging y sónica.

4.4. Ensayos de laboratorio

Se realizaron numerosos ensayos de laboratorio de diferentes tipos para caracterizar cada una de las tres formaciones sondeadas: flysch margo-arenisco-micáceo (FMAM, Zona 1), pelitas rojas (PR, Zona 2) y flysch calcáreo (FC, Zona 3). En la tabla 3 se recoge una relación de los mismos. Los resultados de todos estos ensayos se recopilaron en un informe del CEDEX (CEDEX, 2012d), y los más relevantes se pueden consultar asimismo en Perucho *et al.* (2012) y Perucho *et al.* (2014).

Como se trata de un material anisótropo se tallaron probetas en diferentes direcciones para estudiar las propiedades resistentes y deformacionales en diferentes direcciones. En la figura 32 se muestra un esquema indicativo de la posición relativa de los sondeos respecto de los estratos, que quedaban verticales o sub-verticales. En la figura 33 se muestra un esquema indicando las direcciones de tallado de las probetas en relación a la dirección de los estratos y la denominación que se le ha asignado a cada tallado. Con el fin de obtener valores representativos tanto de la resistencia como de la deformabilidad de los materiales en las diferentes direcciones se realizó el tallado de un gran número de probetas, en total 85. En la figura 34 se muestran algunas de las probetas talladas con testigos de las tres zonas.

Tabla 3. Ensayos de laboratorio realizados

Grupo de ensayos	Ensayos	Nº de muestras ensayadas	
Mineralógicos de identificación	Estudio con lupa binocular	15	
	Difracción Rayos X	29	
	Fluorescencia	23	
Identificación, y propiedades índice	Límites de Atterberg	2	
	Humedad	87	
	Densidad aparente	83	
	Densidad seca	80	
	Peso específico	28	
	Porosidad	61	
	Absorción de agua	11	
	Carbonatos	11	
	Sulfatos	3	
	Permeabilidad	4	
	Resistencia y deformabilidad	Compresión simple con y sin bandas extensométricas	75
		Determinación de velocidad de ondas v_s y v_p en ensayo de velocidad sónica	77
Carga puntual		27	
Ensayo de tracción indirecta (ensayo brasileño)		9	
Triaxial en célula Hoek, con diferentes presiones de confinamiento		14	
Otros	Ensayo edométrico	19	
	Ensayo de alterabilidad (SEHUEDS)	2	

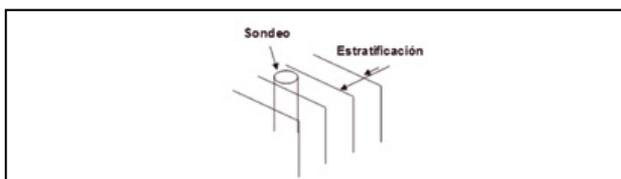


Figura 32. Esquema de la posición relativa de los sondeos y la estratificación.

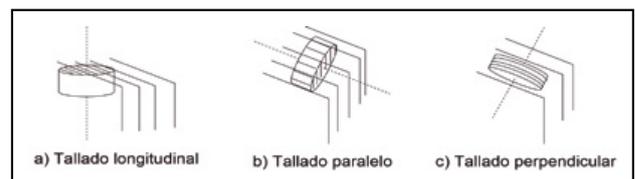


Figura 33. Esquemas de la dirección de talleo de las muestras en relación a la estratificación.

Además de identificar y caracterizar los diferentes materiales objeto de estudio en sus propiedades geotécnicas básicas, se realizó un estudio en profundidad de sus características resistentes y deformacionales. En la figura 35 se muestra un gráfico indicativo de la composición

mineralógica de cada una de las tres zonas estudiadas. En la figura 36 se recogen valores de la resistencia a compresión simple y el peso específico seco de muestras de las tres zonas. Se observa, como suele ser habitual, una correlación entre la el peso específico y la resistencia.



Figura 34. Muestra de algunas de las probetas talladas con testigos de cada zona (de izquierda a derecha: Zonas 1, 2, y 3).

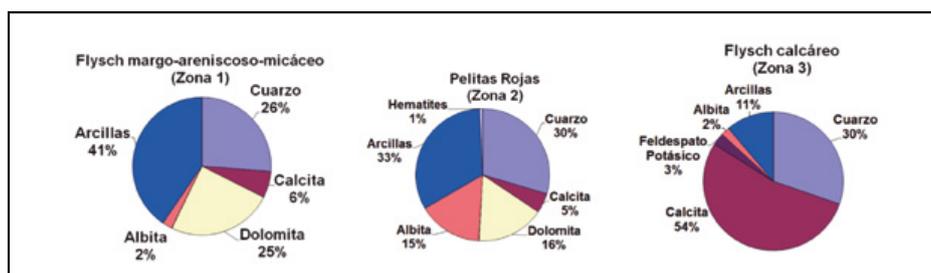


Figura 35. Composición mineralógica de cada una de las tres zonas estudiadas.

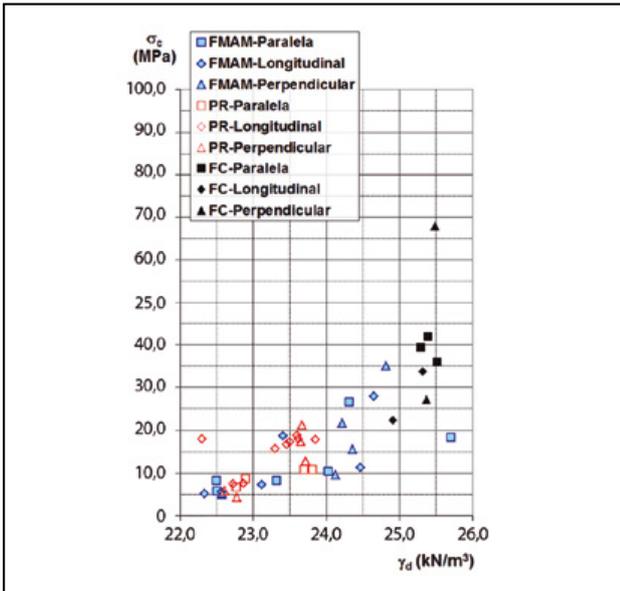


Figura 36. Relación entre la resistencia a compresión simple (σ_c) y el peso específico seco (γ_d).

En las tres formaciones se observa una gran influencia de la humedad (w) y el grado de saturación (s_r) tanto en la resistencia como en la deformabilidad de las muestras (σ_c : resistencia a compresión simple, E : módulo de elasticidad), tal y como se observa en las figuras siguientes (figura 37 a figura 40).

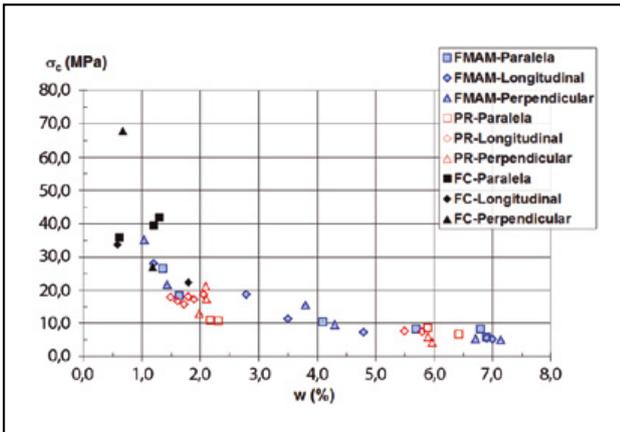


Figura 37. Relación de la resistencia a compresión simple (σ_c) de las muestras ensayadas con la humedad (w).

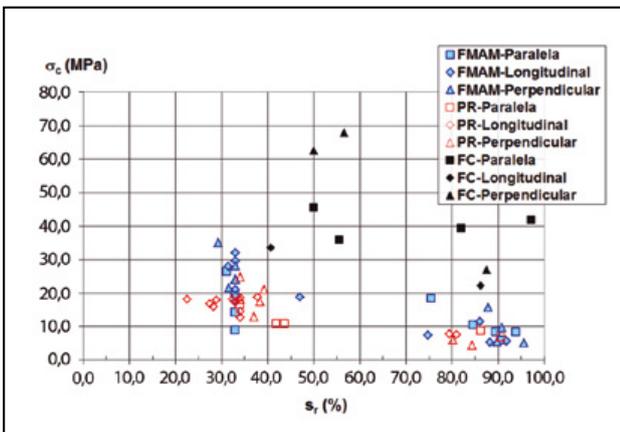


Figura 38. Relación de la resistencia a compresión simple (σ_c) de las muestras ensayadas con el grado de saturación (s_r).

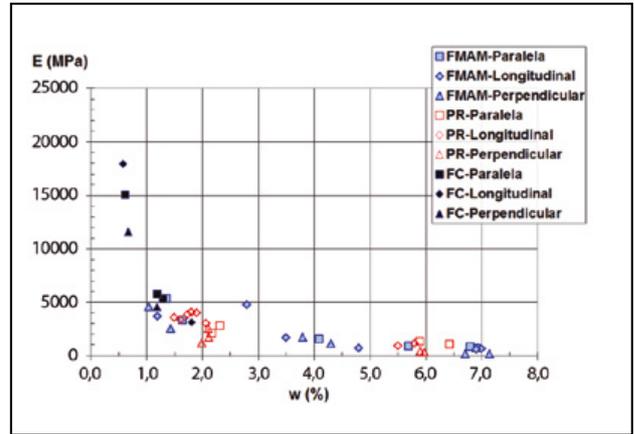


Figura 39. Relación entre el módulo lineal (E) de las muestras ensayadas con la humedad (w).

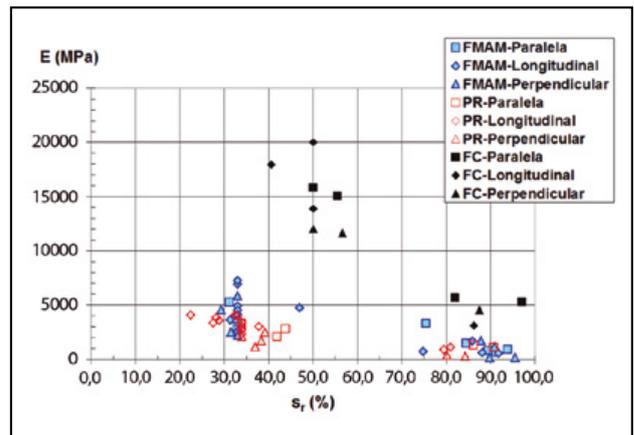


Figura 40. Relación entre el módulo lineal (E) de las muestras ensayadas con el grado de saturación (s_r).

En la figura 41 y la figura 42 se muestra la tendencia general al aumento de resistencia para rocas con mayores velocidades de transmisión de ondas. Una tendencia similar con el módulo de deformación se observa en la figura 43 y la figura 44. Estas tendencias, que no se aprecian al observar las formaciones por separado, pero sí se manifiestan claras al observarlas en conjunto, ponen de manifiesto el hecho conocido de que las rocas con mayor resistencia tienen generalmente mayores velocidades de transmisión de ondas.

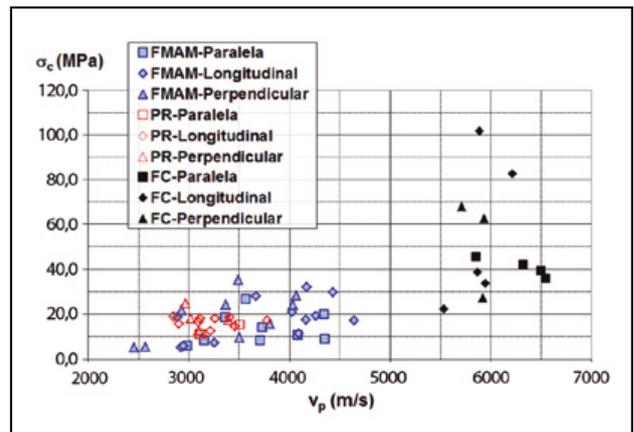


Figura 41. Relación entre la resistencia a compresión simple (σ_c) y las velocidades de transmisión de ondas longitudinales (v_p).

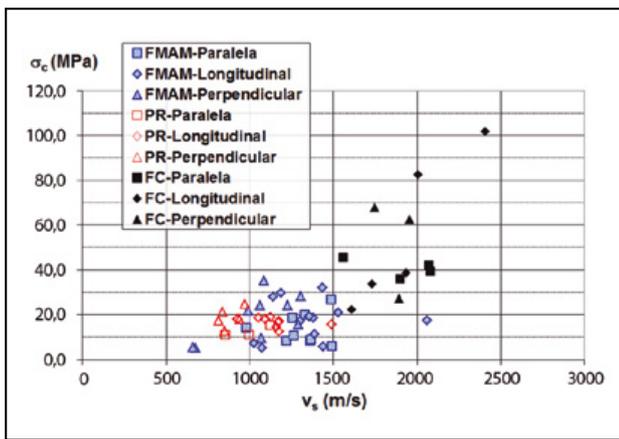


Figura 42. Relación entre la resistencia a compresión simple (σ_c) y las velocidades de transmisión de ondas de corte (v_s)

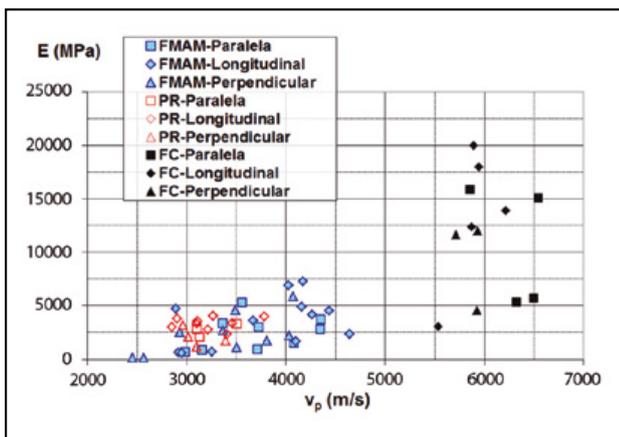


Figura 43. Relación entre el módulo de deformación (E) y las velocidades de transmisión de ondas longitudinales (v_p).

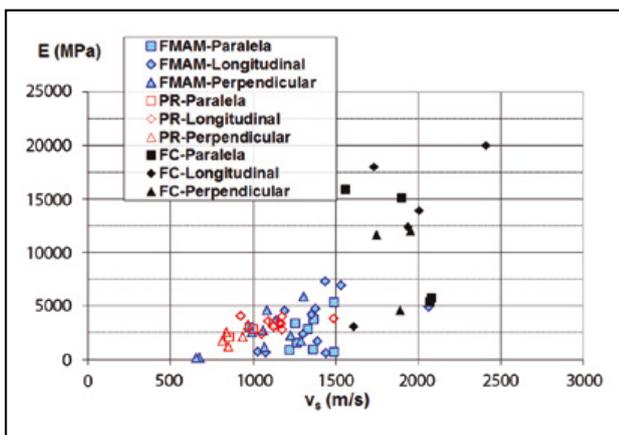


Figura 44. Relación entre el módulo de deformación (E) y las velocidades de transmisión de ondas de corte (v_s).

Como resumen y principales conclusiones de los resultados obtenidos en esta campaña de ensayos de laboratorio se pueden destacar las siguientes observaciones:

- La resistencia aumenta sistemáticamente y de forma notable para valores menores del grado de saturación y la humedad. Dependiendo del grado de saturación de las muestras, su resistencia se puede ver aumentada varias veces con respecto a la que presentan casi saturadas (con su humedad natural o próxima a ella), del orden de unas 2 a 3 veces.

- La deformabilidad disminuye de forma sistemática y notable para valores menores del grado de saturación y la humedad. Se han obtenido relaciones entre los módulos de deformación (obtenidos como parte lineal de las curvas tensión-deformación) deducidos con las muestras desecadas y las casi saturadas (con su humedad natural o próxima a ella). Dependiendo del grado de saturación de las muestras estos módulos pueden aumentar varias veces con respecto a los que presentan las muestras con humedad próxima a la natural, del orden de entre unas 2 y 6 veces, según los valores obtenidos en este estudio.
- Las muestras con tallado perpendicular son las más resistentes en el caso del FMAM y para las PR en el caso de las muestras desecadas.
- En el FMAM y en las PR se observa una mayor deformabilidad en las muestras de tallado perpendicular.
- Las formaciones del FMAM y las PR han presentado características de resistencia a compresión bastante similares entre sí. Los valores del parámetro m_i obtenidos para estas dos formaciones han sido $m_i = 3,3$ para el FMAM, y $m_i = 4,4$ para PR. Ambos valores se hallan en el rango definido por Marinis y Hoek (2001) para las rocas argilíticas, como son estas dos formaciones, igual a 4 ± 2 .
- De los ensayos realizados se puede deducir que aunque en la deformabilidad de estos materiales (FMAM y PR) parecen influir algo las trayectorias de tensiones y las presiones de confinamiento, esta no es una influencia muy marcada. El efecto de la presión de confinamiento en la deformabilidad se hace más notable con presiones próximas a la resistencia a compresión simple.

En el apartado 5 se adjuntan los valores de los módulos y las velocidades obtenidas a diferentes profundidades en cada zona, en los diferentes terrenos a partir de estos ensayos.

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Comparación entre ensayos de campo: presiométricos y sondas de testificación geofísica

5.1.1. Introducción

El parámetro que se puede comparar de los obtenidos con los ensayos presiométricos y los ensayos geofísicos es el módulo de deformación. Para hacer esta comparación, se han tomado los valores del módulo de deformación presiométrico, E_p , calculados a partir del módulo de corte inicial, G_i ; considerando un coeficiente de Poisson de 0,25. De las sondas de testificación geofísicas empleadas se han tomado los resultados de las sondas PS-logging y sonda de onda completa compensada (sonda sónica), que miden velocidades de propagación de las ondas P y S en un sondeo. A partir de la velocidad, V_s , se ha obtenido el módulo de deformación dinámico, G_{max} , considerando un valor medio de la densidad, ρ , de 2400 kg/m^3 , según la expresión:

A partir de los valores del módulo dinámico G_{max} así calculados se han obtenido los valores del módulo de deformación, E_{max} , considerando un valor medio del coeficiente de Poisson de 0,25.

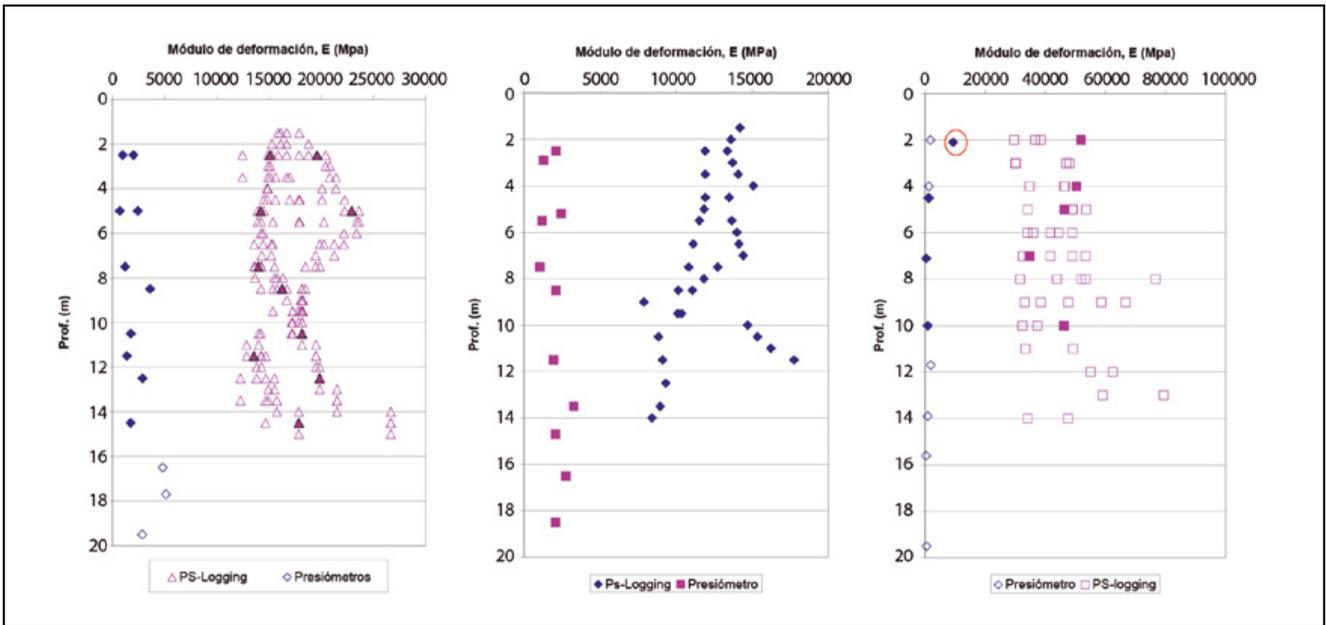


Figura 45. Módulos de deformación obtenidos con la sonda PS-logging y con el presiómetro, en función de la profundidad (de izquierda a derecha: Zonas 1, 2 y 3).

5.1.2. Síntesis de los resultados obtenidos en la comparación de parámetros deducidos de ensayos presiométricos y sondas de testificación geofísica

En la figura 45 se han representado en profundidad los valores de los módulos deducidos a partir de los datos medidos con la sonda PS-logging y con la presiométrica, y en la figura 46 los deducidos con la sonda sísmica, asimismo junto con los de la presiométrica.

A modo de resumen del análisis comparativo entre los resultados del ensayo presiométrico y las sondas geofísicas

PS-logging y sísmica, en la Tabla 4 se han recogido los valores medios por zonas de los módulos dinámicos obtenidos con las sondas PS-logging (E_{PS-log}) y sísmica (E_s) respectivamente, y el obtenido con el presiómetro, E_i , así como los cocientes entre los medios del conjunto de datos de cada sonda empleada con el valor medio del módulo obtenido con el presiómetro. De modo complementario, se presenta la relación entre los resultados de las dos sondas geofísicas empleadas (E_s / E_{PS-log}) y el rango de valores RMR que presenta cada zona.

En la Zona 3, debido a su estado de fracturación, no se pudieron realizar ensayos con la sonda sísmica y por tanto no hay datos disponibles.

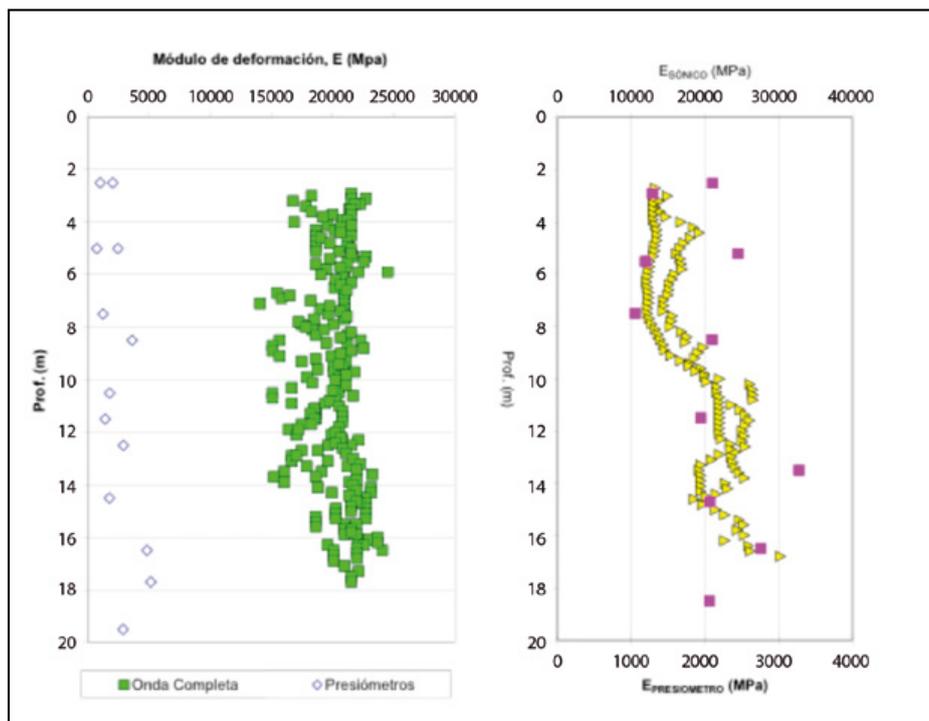


Figura 46. Módulos de deformación obtenidos con la sonda sísmica y con el presiómetro, en función de la profundidad ((de izquierda a derecha: Zonas 1 y 2. en la Zona 3 no se pudo introducir esta sonda. Obsérvese el la doble escala en los datos de la 2).

Tabla 4. Parámetros medios obtenidos para cada una de las tres zonas

Valores medios	Zona 1 (FMAM)	Zona 2 (PR)	Zona 3 (FC)
E_i (MPa)	2.424	2.024	1.050
E_{PS-log} (MPa)	17.339	12.603	45.425
E_s (MPa)	20.086	18.632	-
E_s / E_{PS-log}	1,16	1,48	-
E_{PS-log} / E_i	7,2	6,2	43,3
E_s / E_i	8,3	9,2	-
RMR (rango)	43 - 66	35 - 63	26 - 57

Siendo:

FMAM: Flysch margo-areniscoso micáceo.

PR: Pelitas rojas.

FC: Flysch calcáreo.

E_i : Módulo de deformación obtenido con los ensayos presiométricos.

E_s : Módulo de deformación obtenido con la sonda sónica.

E_{PS-log} : Módulo de deformación obtenido con la sonda PS-logging.

RMR: Rock Mass Rating (Bieniawski, 1989).

Del conjunto de estos resultados se puede señalar que las dos zonas más arcillosas (Flysch margo-areniscoso micáceo y Pelitas rojas) presentan un comportamiento semejante, que a su vez difiere significativamente del comportamiento del Flysch calcáreo, que muestra una litología claramente diferente con una roca matriz más rígida y una fracturación más intensa.

Cabe destacar que los resultados de la sonda sónica y del PS-logging muestran valores del módulo similares entre sí en el flysch margo—areniscoso—micáceo —Zona 1— y en las pelitas rojas —Zona 2— (20.086 y 17.339 MPa, respectivamente en la Zona 1; 12.603 y 18.632 MPa en la Zona 2); y ambos muy superiores a los deducidos de los ensayos presiométricos (casi un orden de magnitud superiores, ya que los valores medios de los módulos deducidos de los ensayos presiométricos son de 2.424 MPa en la Zona 1 y 2.024 MPa en la Zona 2). Estas diferencias son coherentes con los diferentes niveles de deformación con los que se realiza cada ensayo, muy inferiores en el caso de los ensayos con las sondas geofísicas (del orden de 10^{-7}) que con la presiométrica (del orden de 10^{-4}).

Se observa que la elevada fracturación del flysch calcáreo de la Zona 3 afecta de forma muy notable a los módulos obtenidos con el ensayo presiométrico, que son muy bajos (1.050 MPa) y, sin embargo, parece afectar poco al módulo estimado con el PS-logging (45.425 MPa). Esto puede ser debido a que el registro con la sonda PS-logging tuvo que realizarse con el sondeo entubado, por lo que la lechada empleada para sellar el tubo con el terreno pudo rellenar fracturas, produciendo una sobrestimación de los módulos.

Por otra parte, del estudio comparativo entre los módulos obtenidos mediante ensayos presiométricos y sísmicos con los parámetros geomecánicos, se pudo deducir que el parámetro RMR era el que presentaba una mejor correlación con los valores de dichos módulos. No obstante, debido al escaso rango de variación del RMR, solo se han podido establecer correlaciones suficientemente claras

de la variación de los módulos con el índice RMR para el flysch margo—areniscoso—micáceo de la Zona 1. En el caso del flysch calcáreo de la Zona 3 se puede apreciar una tendencia coherente aumentando los valores del módulo con el parámetro RMR. Esta tendencia no se aprecia en las pelitas rojas de la Zona 2.

5.2. Comparación entre los resultados de ensayos presiométricos y de laboratorio

5.2.1. Introducción

Se han comparado los dos parámetros siguientes: la resistencia a compresión simple y el módulo de deformación. Puesto que el ensayo presiométrico aplica una presión horizontal y mide la deformación en esa dirección, para la comparación se han tomado los resultados de los ensayos de laboratorio con muestras talladas con eje horizontal (muestras de tallado perpendicular y paralelo), adoptando los valores medios de los parámetros en ambas direcciones.

El módulo de deformación de laboratorio considerado es el obtenido como parte lineal de la curva tensión-deformación para las muestras con humedad natural. No se comparan los módulos de descarga-recarga, que en las probetas han mostrado unas curvas muy cóncavas, en general, que se han atribuido a un cierre y apertura de fisuras y que dificultan la obtención de unos módulos de elasticidad unívocos y fiables.

Cabe resaltar que los módulos de laboratorio de los ensayos de compresión simple se han obtenido con la muestra sin confinamiento, mientras que los módulos de los ensayos presiométricos se obtienen con el terreno confinado, lo que podría dar lugar a discrepancias. No obstante, de los ensayos triaxiales realizados con diferentes confinamientos en célula Hoek se deduce que para los niveles de presión de confinamiento máximos que se supone que puede haber in situ (unos 2 ó 3 MPa) estos no parece que influyan significativamente en el valor del módulo.

Por tanto, en relación a los valores de los módulos de deformación, los valores a comparar son los siguientes:

- De los ensayos de laboratorio, los valores de los módulos correspondientes a las muestras ensayadas a compresión simple con humedad natural (o próxima) de las muestras de tallado paralelo y perpendicular y medidos mediante bandas extensométricas (denominados E_s).
- De los ensayos presiométricos, los módulos E_i deducidos a partir de los módulos de corte iniciales medidos, suponiendo un coeficiente de Poisson igual a 0,25.

5.2.2. Síntesis de resultados obtenidos en la comparación de parámetros deducidos de ensayos presiométricos y de laboratorio

En la figura 47 se han representado en profundidad los valores de la resistencia a compresión simple medida en probetas en laboratorio y la deducida a partir de los ensayos presiométricos. Por otra parte, en la figura 48 están representados en profundidad los módulos de deformación deducidos de una y otra forma.

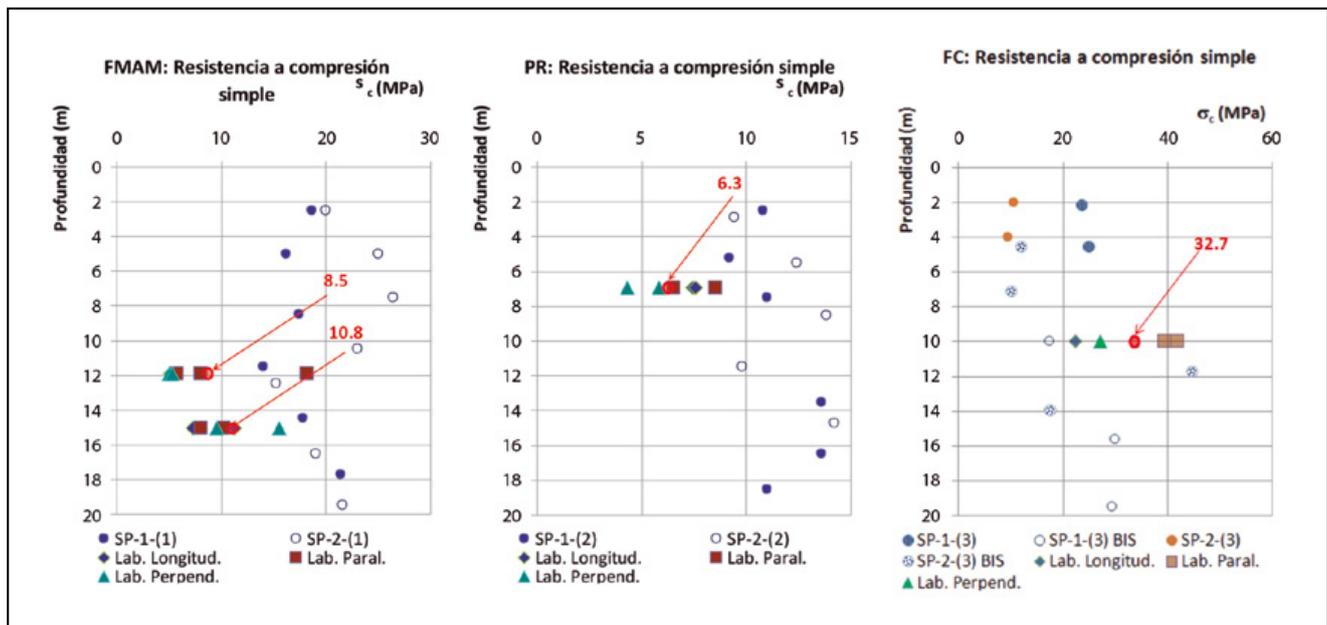


Figura 47. Resistencia a compresión simple estimada a partir de los ensayos presiométricos y de laboratorio

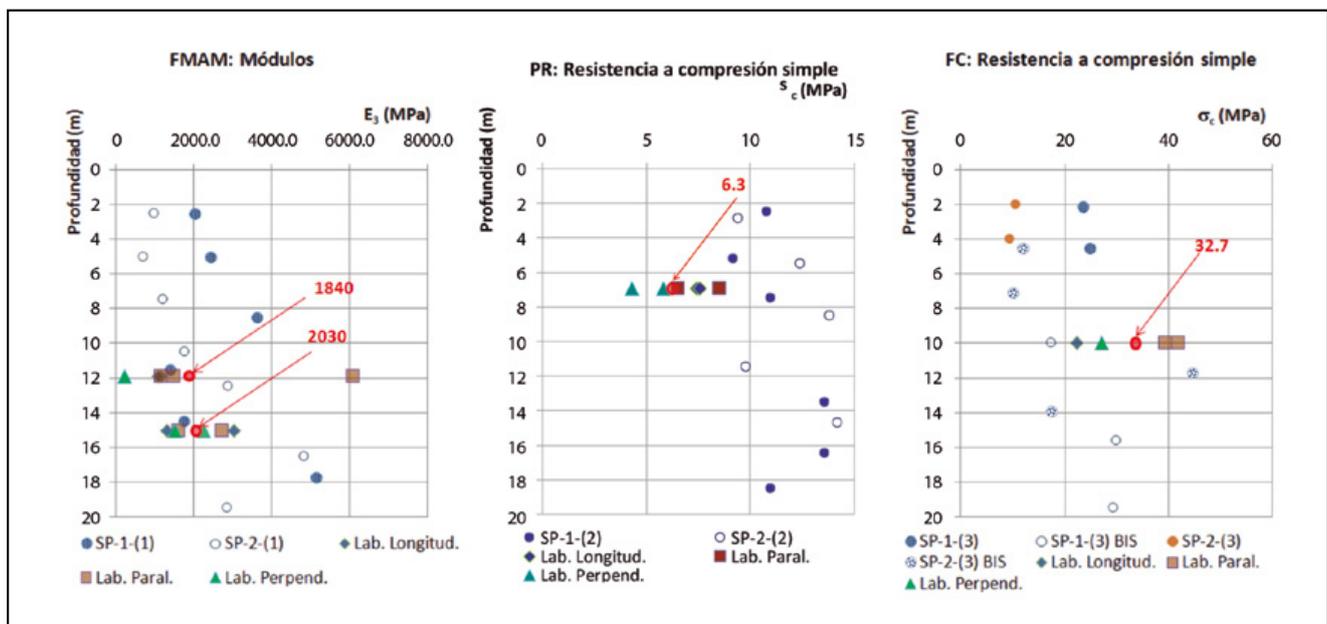


Figura 48. Módulos de deformación estimados a partir de los resultados de los ensayos presiométricos y de laboratorio .

Tanto para la resistencia a compresión simple como para el módulo de deformación se obtienen unos valores mayores en campo que en laboratorio para el flysch margo arenoso micáceo y para las pelitas rojas, e inferiores para el flysch calcáreo.

A partir de las comparaciones realizadas, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Los valores de resistencia deducidos de los ensayos in situ son superiores tanto en el caso del flysch margo arenoso micáceo como en las pelitas rojas, en cuanto a valores medios. Se han deducido valores in situ de 1,5 a 2 veces superiores. No obstante, los mayores valores obtenidos en laboratorio son del mismo orden de magnitud que los de campo.
- La diferencia de valores puede ser debida a que las muestras de laboratorio presentan cierta alteración (ya que en las rocas blandas, como son las pertenecientes a estas dos zonas, es muy complicado poder obtener muestras realmente inalteradas). No obstante, los valores de resistencia estimados a partir de los ensayos presiométricos se deben considerar meramente orientativos.
- En el caso del flysch calcáreo, se han obtenido mayores valores de resistencia en laboratorio, si bien se han ensayado muestras en una única profundidad (10 m), y a una profundidad algo mayor (unos 12 m) se han obtenido in situ valores superiores, por lo que no es posible extraer una conclusión general. No obstante, al encontrarse muy fracturada esta zona parece lógico que los valores obtenidos en laboratorio sean superiores a los deducidos en campo, ya que los ensayos a compresión simple de laboratorio se realizan sobre probetas talladas con las partes más sanas de los testigos recuperados. Además, al tratarse de una roca más dura que las anteriores

y de naturaleza calcárea y no arcillosa, la alteración que se produce en las muestras durante su extracción es menor.

- Los valores de los módulos obtenidos en los ensayos in situ son superiores tanto en el caso del flysch margo arenoso micáceo como en las pelitas rojas, en cuanto a valores medios. Se han obtenido valores in situ del orden de 1,5 veces superiores a los obtenidos en laboratorio. No obstante, los mayores valores obtenidos en laboratorio son del mismo orden de magnitud que los de campo.
- Es muy posible que la diferencia de valores se deba, al igual que en el caso de la resistencia, a que las muestras de laboratorio presentan unos valores inferiores a los reales debido a la alteración de las mismas.

5.3. Comparación entre los resultados de ensayos geofísicos y de laboratorio

5.3.1. Introducción

La comparación entre los resultados de los ensayos geofísicos y los de laboratorio se realiza con las velocidades de transmisión de ondas longitudinales y de corte, que se han obtenido por los siguientes métodos:

- Ensayos PS-logging en sondeo, tanto antes como después de entubarlo.
- Ensayos de velocidad sónica en sondeo.
- Ensayos de laboratorio (“Pundit”).

5.3.2. Síntesis de resultados obtenidos en la comparación de parámetros deducidos de ensayos geofísicos y de laboratorio

En la figura 49 se recogen las velocidades de transmisión de ondas obtenidas con las sondas geofísicas (PS-logging y sónica) y las obtenidas en laboratorio (ensayo Pundit).

En resumen, de la comparación de las velocidades obtenidas a partir de los ensayos de laboratorio y de los ensayos in situ PS-logging y velocidad sónica, se puede decir lo siguiente:

- Debido a la forma de realización de estos ensayos de campo, las ondas transmitidas para medir las velocidades se propagan fundamentalmente en dirección vertical, ya que tanto emisor como receptor se colocan en un mismo sondeo a diferentes profundidades. Por ello, la comparación se debe realizar con las velocidades de transmisión medidas en laboratorio en las muestras de tallado longitudinal (eje vertical).
- En el caso del flysch margo—arenoso—micáceo los resultados obtenidos no son muy diferentes. En cualquier caso, las diferencias que se aprecian entre los valores de laboratorio y los de campo son del mismo orden de magnitud que las diferencias entre los ensayos de campo realizados con diferentes sondas.
- En el caso de las pelitas rojas, los resultados obtenidos en campo y laboratorio son muy similares, en las velocidades longitudinales. Sin embargo, se observan unas diferencias apreciables entre los valores obtenidos en campo con diferentes métodos, en especial en el caso de la velocidad de ondas transversales, con unas diferencias muy elevadas a partir de los 9 metros de profundidad entre las velocidades obtenidas en el PS-logging la velocidad sónica. Esto puede ser debido al filtrado que fue necesario realizar para no tener en cuenta las señales anómalas registradas a partir de los 9 m, probablemente ocasionados por una deficiente rigidización del sistema tubo-cemento-terreno. Sin embargo la onda P es más creíble y coherente con el resto de ensayos debido a que es la primera en llegar mientras que la onda S está afectada por otros trenes de onda de origen incierto.
- En el flysch calcáreo hay una diferencia mayor entre las velocidades obtenidas en laboratorio y en campo,

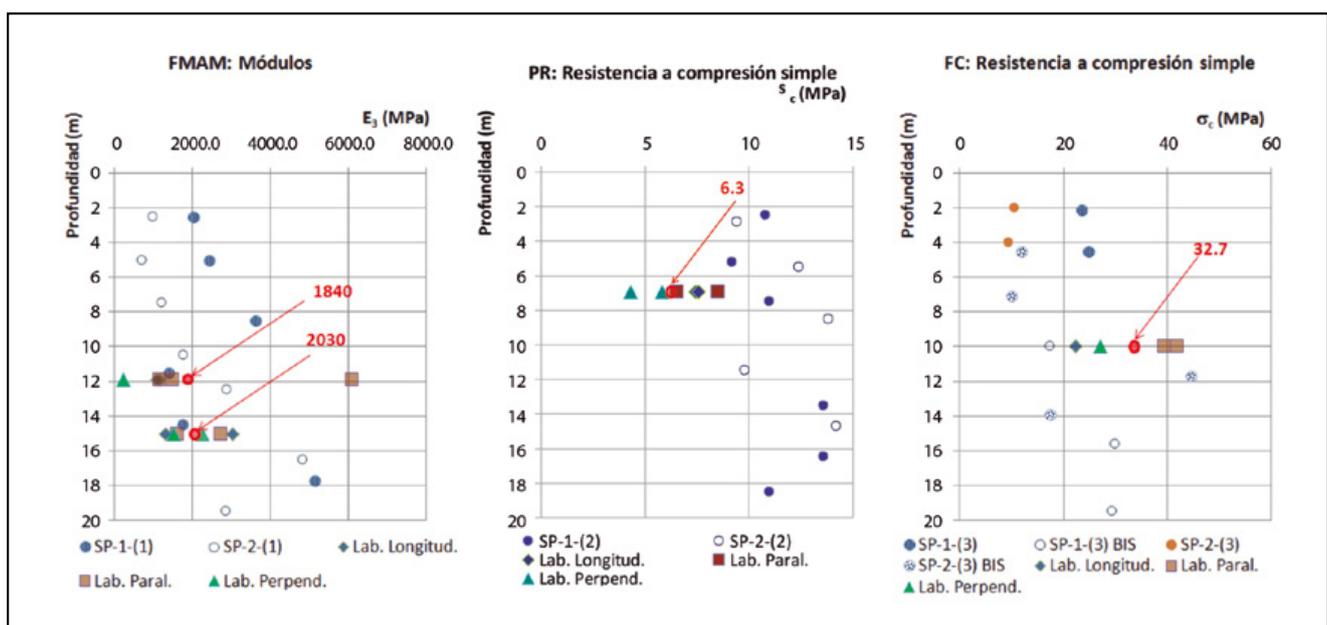


Figura 49. Velocidades estimadas a partir de los resultados de los ensayos geofísicos (sondas sónica y PS-logging) y de laboratorio.

que en este caso se han obtenido únicamente mediante PS-logging en sondeo entubado. Las velocidades de laboratorio son inferiores a las de campo en el caso de las ondas de corte y superiores en el caso de las longitudinales, si bien en este último caso parece que en la única muestra ensayada con humedad próxima a la natural el resultado es similar al de campo.

- Por otra parte, esta es la zona más resistente y ello se ha reflejado en los mayores valores de las velocidades, tanto de campo como de laboratorio, en relación a las otras dos.

6. DISCUSIÓN

En relación a la comparación de los parámetros obtenidos mediante diferentes técnicas de ensayo, cabe señalar algunos aspectos que pueden influir en que los valores obtenidos en cada caso sean diferentes, tales como los siguientes:

- Los volúmenes de roca afectados por cada ensayo son diferentes, ya que mientras que en los ensayos de laboratorio se toman volúmenes muy pequeños de roca y se ensaya por tanto siempre la roca matriz, en los ensayos de campo los volúmenes afectados son mayores y sus resultados pueden corresponder, bien a las características del macizo rocoso, bien a las de la roca matriz, según sea el grado de fracturación y alteración de la roca en las diferentes zonas. Por otra parte, los diferentes ensayos de campo afectan también a diferentes volúmenes de terreno, pues mientras que las sondas de los ensayos presiométricos tienen longitudes del orden de medio metro, las distancias entre los receptores de la mayoría de las diferentes sondas geofísicas son del orden de 1 m.
- Los niveles de deformación en los que se obtienen los módulos varían de unos ensayos a otros. Esto puede influir en los resultados, ya que en muchos tipos de roca —en especial en las rocas blandas— la deformabilidad depende del nivel de deformación siendo, en general, mayor para niveles mayores de deformación. Esta disminución de módulos con el mayor nivel de deformación es habitual y está recogida ampliamente en la bibliografía. Los niveles de deformación para los que se obtienen los módulos dinámicos (del orden de 10^{-7}) son inferiores a los niveles en los que se obtienen los módulos en los ensayos presiométricos y de laboratorio (del orden de 10^{-3} en ambos casos).
- La deformación que se induce en el terreno con ensayos presiométricos es de tipo radial, perpendicular al eje del sondeo, por tanto, la medida de la deformación estará afectada en su mayoría por las discontinuidades verticales próximas, en el entorno de 1,5 a 2 veces el radio del sondeo. Sin embargo, en el caso de los ensayos PS-logging y sonda sónica, la influencia de estas discontinuidades verticales será menor ya que los caminos recorridos por la onda sísmica son principalmente verticales, próximos a la pared del sondeo.

- Las tres técnicas empleadas —ensayos geofísicos, presiométricos y de laboratorio— han reflejado el hecho de que la Zona 2 (pelitas rojas) es la menos resistente (aunque sin mucha diferencia con la Zona 1, flysch margo arenoso micáceo), y ello ha quedado reflejado en los menores valores de los módulos obtenidos por todos los diferentes métodos empleados, así como en los menores valores de resistencia. Igualmente, esto se ha reflejado en los menores valores de las velocidades de transmisión de ondas obtenidas, tanto en campo como en laboratorio.

Por otra parte, la roca matriz de la Zona 3 (flysch calcáreo) es la más resistente, lo cual ha quedado reflejado claramente en los ensayos de laboratorio, tanto de resistencia y deformabilidad como de velocidad de transmisión de ondas. Sin embargo, al encontrarse muy fracturada esta zona, los ensayos presiométricos han arrojado unos valores muy bajos de los módulos de deformación. Por su parte, los ensayos geofísicos han reflejado unos módulos muy elevados, pero probablemente sobrestimados debido a que la lechada empleada para sellar el tubo con el terreno pudo rellenar fracturas abiertas.

De estos resultados se pueden hacer las siguientes consideraciones:

- Los resultados de los ensayos presiométricos por sí solos podrían hacer pensar que la Zona 3 está formada por materiales muy deformables y poco resistentes.
- Los resultados de laboratorio muestran que la roca de la Zona 3 es más resistente y menos deformable que las de las otras dos zonas. Sin embargo, no indican nada acerca del elevado grado de fracturación del macizo, que reduce mucho la resistencia global del mismo y aumenta mucho su deformabilidad. Es decir, los ensayos de laboratorio arrojan resultados de la roca matriz, pero no del macizo rocoso.
- Los resultados geofísicos dan un registro mucho más continuo del terreno. Sin embargo, por sí solos resultan, en general, difíciles de interpretar, y la inyección de lechada necesaria para sellar la tubería puede modificar las condiciones del terreno en las zonas fracturadas y arrojar resultados erróneos.

En cualquier caso, siempre es conveniente disponer de la información adicional suministrada por el testigo continuo recuperado, que permite complementar la información obtenida de los ensayos, sean del tipo que sean, mostrando el grado de fracturación de la roca, el estado de las juntas y, en definitiva, permitiendo la caracterización geomecánica de los materiales atravesados.

En todo caso, para que los resultados obtenidos puedan ser fiables se debe cuidar al máximo la calidad de las perforaciones, con el fin de reducir al mínimo la alteración de las paredes y de los testigos y muestras tomadas, así como para no producir la fracturación de los testigos.

- Desde el punto de vista geotécnico los ensayos sísmicos más eficaces han sido las sondas PS-logging y Sonda Sónica teniendo, la primera sobre la segunda, la ventaja de poder ser utilizada en sondeos entubados (PVC y cementado al terreno) y la desventaja de

que la forma de obtención de datos es discreta frente a la forma continua de la segunda.

- La sonda geofísica más eficaz en la determinación de la estructura litológica ha sido la HIRAT, con el inconveniente de no poder ser utilizada en sondeos entubados. Es recomendable el uso de las sondas de inducción y gamma natural, por su economía y rapidez, siendo utilizables en sondeos entubados con PVC, aunque para este estudio han sido medianamente eficaces debido a la homogeneidad de los materiales.

7. CONSIDERACIONES FINALES

Existen datos geológico-geotécnicos procedentes de más de 30 años de trabajos, que se han realizado tanto en el fondo del estrecho como en las dos orillas, permitiendo el estudio de toda la traza del túnel. En total suponen cerca de 300 ensayos in situ (ensayos presiométricos, de gato plano, de placa de carga, de corte directo in situ, de densidad in situ, de carga con gripper y de permeabilidad), y más de 3500 ensayos de laboratorio (humedad, peso específico y densidad, límites de Atterberg, granulometrías, hinchamiento, contenido de carbonatos, sulfatos y materia orgánica, resistencia a compresión simple, carga puntual, tracción indirecta, triaxiales, corte directo, edométricos, corte directo en juntas, propagación de ondas en probetas y sehudes).

Dentro del marco de estos trabajos y aunque no se ha recogido en este artículo debido a su extensión, se ha realizado la recopilación de todos estos datos, su sistematización y su integración en un solo estudio, con un criterio geotécnico único que ha permitido dar valor a los mismos y una caracterización geotécnica más profunda de los materiales, indispensable para abordar las futuras fases del proyecto de la comunicación fija a través del estrecho de Gibraltar (Muñiz, 2015).

En relación a la caracterización geotécnica realizada de diferentes formaciones eocenas y oligocenas de la unidad de Algeciras, se puede concluir que:

- Los resultados de campo y laboratorio han concordado razonablemente bien entre sí, con las variaciones que cabe esperar debidas a causas tales como el volumen de material afectado en cada tipo de ensayo (efecto escala), los diferentes niveles de deformación implicados o las distintas trayectorias de tensiones aplicadas.
- Cualquiera de las tres técnicas empleadas —ensayos geofísicos, ensayos presiométricos o ensayos de laboratorio— puede arrojar, por sí sola, una información muy valiosa de las características resistentes y deformacionales del terreno objeto de estudio. No obstante, todas presentan ciertas limitaciones y dificultades de interpretación, por lo que lo más recomendable es utilizarlas de forma conjunta y complementaria, contrastando los resultados arrojados por cada una de ellas. En todos los casos es conveniente, siempre que sea posible, disponer de la información adicional suministrada por el testigo continuo recuperado, lo que permite complementar la información obtenida de cualquiera de los ensayos con la caracterización geomecánica de los materiales atravesados.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo quieren expresar su agradecimiento a todos los compañeros del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX que participaron de una u otra forma en los trabajos de campo en la galería de Tarifa y en la realización de los ensayos de laboratorio, muy especialmente a Angel Tijera y Rubén Ruiz por su labor destacada en la campaña de geofísica.

Igualmente desean agradecer al personal de SECEGSA su estrecha colaboración con mención especial a Nicolás Sandoval por su gran dedicación a este proyecto y la información facilitada para el desarrollo del trabajo.

Asimismo, los autores agradecen al Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores, POCTEFEX, de la Comisión Europea (Fondos FEDER) la financiación del proyecto TTIGEM, en cuyos trabajos se enmarca este artículo.

9. BIBLIOGRAFÍA

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum Engineering*. J. Wiley & sons.

CEDEX (1985a) *Informe sobre los resultados de los ensayos in situ efectuados en el emplazamiento de un enlace fijo a través del Estrecho para la unión de España y Marruecos*.

CEDEX (1985b) *Informe sobre los resultados de los ensayos in situ efectuados en el emplazamiento de un enlace fijo a través del Estrecho para la unión de España y Marruecos. 2ª Parte*.

CEDEX (2012). *Informe sobre los trabajos realizados para el estudio geotécnico de las formaciones atravesadas por la galería experimental de Tarifa*.

CEDEX (2012). *Informe sobre los ensayos presiométricos realizados para el estudio geotécnico de las formaciones atravesadas por la galería experimental de Tarifa (Cádiz)*.

CEDEX (2012). *Informe sobre los ensayos geofísicos realizados en la galería experimental de Tarifa (Cádiz)*.

CEDEX (2012). *Informe sobre la caracterización geotécnica mediante ensayos de laboratorio de las formaciones atravesadas por la galería experimental de Tarifa (Cádiz)*.

CEDEX (2012). *Informe sobre la comparación de resultados de ensayos in situ y de laboratorio realizados en las formaciones atravesadas por la galería experimental de Tarifa (Cádiz)*.

Chraïbi, A., Mekboul, M. y Monkachi, M. (1995) Puits experimental de Malabata. En: *IV Coloquio Internacional sobre el enlace fijo del estrecho de Gibraltar*, Sevilla, España, 16-18 de mayo de 1995.

Marinos, P. y Hoek, E. (2001). Estimating the Geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch. *Bull. Eng. Geol. Env.* 60, 85-92.

Martín Ruíz, M. (1997) *Estudio geotécnico de los materiales afectados por a galería experimental de Tarifa*.

Muñiz, M., Cano, H., Pardo de Santayana, F. y Montero, N. (2012) Correlación entre la deformabilidad de la Unidad de Algeciras, estudiada mediante técnicas presiométricas, y sus características geomecánicas. En: *9º Simposio nacional de ingeniería geotécnica. Cimentaciones y excavaciones profundas* (Ed, SEM-SIG) Sevilla, España, 17 y 19 de octubre de 2012.

Muñiz Menéndez, M., Cano Linares, H., Pardo de Santayana Carrillo, F. y Sandoval Montero, N. (2013) Evaluation of the Deformation Modulus of Algeciras Flysch Unit by means of Pres-

suremeter Tests: Correlation with RMR. En: *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Parallel session ISP-6* Paris, Francia. 2-6 de septiembre 2013

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*. Universidad Complutense de Madrid.

Perucho, A., Muñiz, M., Díez, J. A. y Sandoval, N. (2012) Caracterización geotécnica de diversas formaciones anisótropas de la Unidad de Algeciras mediante ensayos de laboratorio. Resistencia y deformabilidad en diferentes direcciones. En: *9º Simposio nacional de ingeniería geotécnica. Cimentaciones y excavaciones profundas* (Ed, SEMSIG) Sevilla, España, 17 y 19 de octubre de 2012.

Perucho, A., Muñiz, M. y Díez, J. A. (2014). Geotechnical characterization of low strength anisotropic rocks in the Strait of Gibraltar area. *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on rock masses. Eurock 2014*. Vigo, España, 27-29 de mayo de 2014.

Pliego Gonzalez, J. M., García Gonzalez, E. y Esteras Martín, M. (1992) *Proyecto del pozo experimental de Bolonia*. SECEGSA.

SECEGSA (1983a) *1ª Campaña de sondeos mecánicos de reconocimiento en los flysch del campo de Gibraltar. Informe geológico*. Madrid.

SECEGSA (1983b) *1ª Campaña de sondeos mecánicos de reconocimiento en los flyschs del Campo de Gibraltar. Informe técnico. Vol. I, II y III*.

SECEGSA (1990) *Mapa tectónico del arco de Gibraltar*.

SECEGSA (1991) *Campaña de sondeos cortos 91. Informe de desarrollo. Periodo agosto-noviembre 1991*. Madrid.

SECEGSA (1992) *Campaña-test de sondeos cortos "Pholas-92". Informe de desarrollo*.

SECEGSA (1994a) *Campaña de sondeos marinos cortos KT-94. Buque oceanográfico Kommandor Therese. Informe geológico*. Madrid.

SECEGSA (1994b) *Campaña oceanográfica Kommandor Therese-94. Informe de desarrollo*. Madrid.

SECEGSA (1994c) *Campañas de sondeos marinos cortos SN-91 y PH-92. Informe geológico*. Madrid.

SECEGSA (1994d) *Pozo experimental de Bolonia. Datos geológicos*.

SECEGSA (1994e) *Pozo experimental de Bolonia. Recopilación de los datos de la auscultación*.

SECEGSA (1995) *Campaña de sondeos marinos profundos BV-95. Buque oceanográfico Bavenit*. Madrid.

SECEGSA (1996) *Enlace fijo del estrecho de Gibraltar*.

SECEGSA (1997a) *Campaña Bucentaur-97 de sondeos profundos en el estrecho de Gibraltar. Informe de desarrollo*. Madrid.

SECEGSA (1997b) *Campaña Bucentaur-97 de sondeos profundos en el estrecho de Gibraltar. Informe geológico*. Madrid.

SECEGSA (1999a) *Campaña Norskald-98 de sondeos profundos en el estrecho de Gibraltar. Informe de desarrollo*. Madrid.

SECEGSA (1999b) *Campaña Norskald-98 de sondeos profundos en el estrecho de Gibraltar. Informe Geológico*. Madrid.

SNED (1992) *Campagne forages Test-92 Pholas dans le detroit de Gibraltar. Rapport de mission*.

Vera Torres, J. A. (2004) *Geología de España*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.