

Caracterización estadística de la Unidad de Almarchal en el contexto del Túnel del estrecho de Gibraltar

Statistical characterization of Almarchal Unit in the context of the Tunnel under the Strait of Gibraltar

M. Muñoz Menéndez¹, M.J. Rodríguez Peces², A. Perucho Martínez¹ y H. Cano Linares¹.

¹ Laboratorio de Geotecnia, CEDEX. Alfonso XII, 3 - 28024, Madrid. mauro.muniz@outlook.com, aperucho@cedex.es; hcano@cedex.es.

² Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid. Jose Antonio Novais 12 - 28040 Madrid. martinjr@geo.ucm.es

Resumen: El proyecto de un túnel que una Europa y África bajo el estrecho de Gibraltar lleva en desarrollo desde hace más de treinta años, a lo largo de los cuales se ha generado una gran cantidad de datos geológicos y geotécnicos. La compleja geología de la zona, unida a lo poco accesible del fondo del Estrecho, hacen que la caracterización geotécnica de los materiales involucrados sea compleja y económicamente muy costosa. Los resultados de ensayos geotécnicos realizados en muestras provenientes de la Unidad de Almarchal han sido analizados mediante técnicas estadísticas lo que ha permitido obtener parámetros geotécnicos de suficiente calidad como para ser empleados en las futuras fases del proyecto.

Palabras clave: Geotecnia, Caracterización, Unidad de Almarchal, Estadística, Túnel del Estrecho.

Abstract: The Project of a tunnel between Europe and Africa under the Strait of Gibraltar has been developing for more than thirty years. During this time, a great amount of geological and geotechnical data has been generated. The complex geology of the area, together with the difficult accessibility to the bottom of the Strait, make the characterization of the involved materials very complex and expensive. The results of geotechnical tests executed on samples from Almarchal Unit have been analyzed by means of statistical methods allowing to obtain geotechnical parameters useful in future steps of the project.

Key words: Geotechnics, Characterization, Almarchal Unit, Statistics, Gibraltar Tunnel.

INTRODUCCIÓN

El proyecto de enlace fijo entre Europa y África a través del estrecho de Gibraltar ha sido, durante más de un siglo, uno de los proyectos más ambiciosos de la ingeniería civil española e internacional. En la actualidad el proyecto prevé un doble túnel excavado entre las regiones de Algeciras (España) y Tánger (Marruecos), bajo el “Umbral del Estrecho” (Fig. 1), atravesando una compleja geología. Este trazado presenta una longitud de unos 28 km bajo el mar y una profundidad bajo el nivel del mar de hasta 300 m.

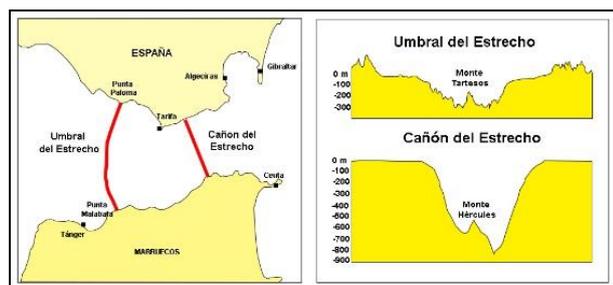


FIGURA1. Diferentes alternativas de trazado contempladas en los primeros estudios del proyecto.

Este proyecto lleva más de 35 años de desarrollo liderado por la empresa pública española SECEGSA y por la marroquí SNED. En este tiempo, los diferentes trabajos han originado una gran cantidad de datos geológicos y geotécnicos que, hasta recientes fechas, no habían sido analizado en conjunto, desaprovechándose gran parte de su valor (Muñoz Menéndez, 2015).

Siguiendo las tendencias actuales en el ámbito geotécnico del uso creciente de técnicas estadísticas para la estimación de parámetros (véanse por ejemplo los Eurocódigos), se analizarán los datos geotécnicos provenientes de la Unidad de Almarchal con el fin de obtener parámetros aprovechables en las siguientes fases del proyecto.

MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se localiza en el área del estrecho de Gibraltar; entre los municipios de Tarifa y Algeciras (orilla Norte), y las regiones de Tánger, Ceuta y Tetuán (orilla Sur), y en el territorio entre los flyschs del Campo de Gibraltar que, junto con sus

equivalentes en el Norte de África, conforman el Complejo del Surco de los Flyschs.

Dentro de esta zona, el trabajo se centra en el estudio de la Unidad de Almarchal (U. de Tangere en Marruecos). Esta unidad representa las zonas externas magrebíes (las sudibéricas no afloran en el área) y es el para-autóctono relativo para el resto de las unidades de flyschs del Complejo del Campo de Gibraltar, que se instalaron durante su desplazamiento en sucesivos mantos de cabalgamiento. Las dataciones indican que el depósito de esta unidad se realiza en el límite Campaniense-Maastrichtiense (SECEG, 2003).

La unidad de Almarchal está formada, principalmente, por arcillas y margas esquistosas grisáceas con intercalación de pequeños niveles turbidíticos (calcarenitas). La alteración de la Unidad en superficie es notable, siendo muy escasos los afloramientos rocosos de calidad. Principalmente los correspondientes a los niveles más competentes.

Esta unidad supone, según datos aportados por SECEG, un 14% de la traza proyectada para el túnel.

DATOS

Los datos estudiados provienen del análisis de más de 600 documentos de índole geológico-geotécnico. De estos documentos se han recogido, homogeneizado y ordenado más de 420 resultados de ensayos *in situ*, más de 4.700 ensayos de laboratorio e información proveniente de los más de 7.000 m de sondeos que se han perforado tanto en el fondo del Estrecho como en sus dos orillas.

Para la Unidad de Almarchal se han recopilado 1.235 datos de laboratorio, provenientes del ensayo de 298 muestras, y 110 datos provenientes de ensayos de campo.

METODOLOGÍA

Dado el gran volumen de datos a analizar, se ha decidido aplicar un enfoque estadístico a la caracterización de los materiales estudiados, utilizándose las recomendaciones indicadas por el Eurocódigo 7.

Una vez estudiados los datos geotécnicos con que se cuenta en el proyecto del túnel bajo el estrecho de Gibraltar, se ha realizado el análisis estadístico de cada parámetro empleando el siguiente método: Filtrado, corrección y procesado de los datos; Determinación de los parámetros estadísticos; Ajuste a una distribución estadística; Determinación de los rangos de confianza para la población; Obtención de los valores característicos.

Ajuste a una distribución estadística

Se determinó el tipo distribución estadística que mejor representaba cada conjunto de datos a analizar. Se utilizaron las distribuciones que suelen describir el comportamiento de materiales geotécnicos (distribución Normal, Log-Normal, Gamma y

Uniforme) eligiendo la que minimizara el error cuadrático.

Obtención de los valores característicos

Según el Eurocódigo 7 (AENOR, 2010), párrafo 2.4.5.2(11): “*Si se emplean métodos estadísticos [en la obtención de parámetros geotécnicos], el valor característico se debería determinar de modo que la probabilidad obtenida del valor pésimo que conlleva que se produzca el estado límite considerado no sea mayor del 5 %. NOTA: Con este punto de vista, una estimación prudente del valor medio es una selección de los valores medios de un conjunto limitado de valores de los parámetros geotécnicos, con un nivel de confianza del 95 %; respecto al fallo local, una estimación prudente del valor inferior es el percentil del 5 %.*”

Según este apartado del EC-7 debería tenerse en cuenta como valor característico el percentil 5 (ó 95) para el estudio de fallo local o una estimación prudente del valor medio con una confianza del 90% para el caso de fallo global. En el caso de un túnel, y más en fases preliminares del proyecto, el estudio del fallo global resulta suficientemente adecuada.

En cada caso y para cada parámetro se escoge como valor característico aquél de entre los dos que quede del lado de la seguridad. Esto es, el menor de ellos si se trata de un parámetro favorable y el más alto en caso de tratarse de un parámetro desfavorable: valor característico inferior ($X_{k,inf}$) o valor característico superior ($X_{k,sup}$).

Para ello, a partir de los estadísticos de la población y su función de densidad $f(x_i)$ se calcula, basándose en la Teoría Central del Límite, la función de densidad de la media $f(\bar{x})$. A partir de esta función pueden obtenerse los rangos de confianza de la variable \bar{x} .

Según la nomenclatura del Eurocódigo 0 (AENOR, 2003), el valor característico se encuentra desplazado de la media un cierto valor que dependerá de las características de la muestra estadística analizada. En el caso de una función normal toma las siguientes expresiones:

$$X_k = \mu \pm e ; e = k_n \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = k_n \cdot \sigma_{\bar{x}}$$

siendo X_k : valor característico; μ : valor medio de la población; e : error de estimación de la media para un nivel de confianza $(1-\alpha)$; k_n : cuantil $(1-\alpha/2)$ de la distribución Normal estándar $N(0,1)$; σ : desviación estándar de la población; $\sigma_{\bar{x}}$: desviación estándar de la función de densidad de la media; n : número de datos de la muestra. En caso de una distribución Log-normal debe tenerse en cuenta la realización de un cambio de variable.

Cuando la variable estudiada no sigue una distribución normal o el número de datos de la muestra es pequeño ($n < 30$), la utilización de la función normal puede restar fiabilidad al valor dado. Por tanto, en este caso es preferible la utilización de una distribución tipo *t* de Student, tomando las expresiones la siguiente forma:

$$X_k = \mu \pm e; e = t(n-1, 1-\alpha/2) \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

siendot($n-1, 1-\alpha/2$): el cuantil ($1-\alpha/2$) de la distribución *t* con $n-1$ grados de libertad.

En caso de muestras muy pequeñas ($n \leq 10$) la utilización de métodos puramente estadísticos, si bien pueden ser utilizados desde el punto de vista teórico, producirá valores del coeficiente de variación más altos que los que realmente presentaría el material (Schneider, 1999). Bond y Harris (2008) sugieren en estos casos, la determinación de X_k a partir de la siguiente expresión:

$$X_k = \mu \pm e; e = \frac{\sigma}{2}$$

Un ejemplo del análisis realizado puede observarse en la figura 2. En esta figura se representa el ajuste de la distribución estadística los datos de peso específico seco analizados para esta unidad.

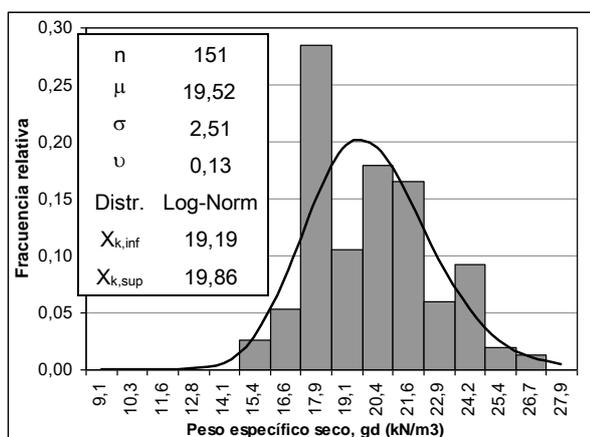


FIGURA 2. Ajuste de los datos de pesos específico seco analizados a una distribución Log-Normal.

RESULTADOS

Los parámetros que se han analizado en la Unidad de Almarchal han sido peso específico seco (ρ_d), peso específico saturado (ρ_{sat}), peso específico de las partículas sólidas (ρ_s), índice de huecos (e), densidad seca *in situ* (ρ_d), contenido en finos, índice de plasticidad (IP), resistencia a compresión simple (RCS), índice de carga puntual (I_{S50}), módulo de Young (E_i), resistencia al corte sin drenaje (C_u), resistencia al corte sin drenaje *in situ* (C_u^*), módulo presiométrico (E_p), módulo de deformación con carga en placa (E_{pc}), índice de Lambe (I_L), presión de

hinchamiento (P_{hinch}), hinchamiento libre (H) y permeabilidad *in situ* (k).

Los datos obtenidos con el análisis estadístico se recogen en la Tabla I.

Densidad y Peso específico

Teniendo en cuenta que la mayor parte del proyecto discurre bajo el nivel del mar se puede suponer que el peso específico aparente coincidirá con el saturado. El valor de la densidad *in situ* media de 1650 kg/m^3 es más bajo que el correspondiente a la roca matriz ($\rho_d=19,5 \text{ kN/m}^3$) pudiendo deberse a la alteración y descompresión de los materiales en cotas someras ($<5 \text{ m}$).

Granulometría y Plasticidad

La mayor parte de los componentes pertenecen a la fracción fina ($<0,08 \text{ mm}$). Las muestras analizadas se pueden clasificar como CH o CL.

Resistencia a compresión simple y carga puntual

Los valores de RCS siguen una distribución Gamma, estando el valor medio representativo entre $0,27$ y $0,43 \text{ MPa}$. Los materiales de esta unidad se encuentran, a lo sumo, en el límite entre suelo duro y roca blanda marcado en 1 MPa (ISRM, 1981). Los valores medios de resistencia a la carga puntual (I_{S50}) son altos en comparación con los ensayos de resistencia a compresión uniaxial si se utiliza la correlación habitual de $RCS = 25 I_{S50}$.

Resistencia al corte sin drenaje

La resistencia al corte sin drenaje en laboratorio es de unos 150 kPa que estaría en consonancia con los valores dados para la RCS.

Ensayos de resistencia al corte directo *in situ*

La resistencia de esta unidad se midió *in situ* por medio de ensayos de corte directo a gran escala. Los valores característicos ($<50 \text{ kPa}$) son bajos para el tipo de material ensayado y en comparación con los de laboratorio. Esto puede explicarse por la escasa profundidad a la que se realizaron los ensayos ($\sim 5 \text{ m}$).

Ensayos de deformabilidad

El módulo presiométrico es claramente mayor ($E_{pmedio}=423 \text{ MPa}$) que el medido mediante placa de carga ($E_{pcmedio}=0,51 \text{ MPa}$). Esto, al igual que en el apartado anterior, puede deberse a alteración superficial de los materiales.

Hinchamiento

Los resultados de los ensayos de presión de hinchamiento (sobre muestras inalteradas) y Lambe (con muestra remoldeada) muestran mucha similitud, tanto en dispersión como en valores medios, siendo algo menor en el ensayo Lambe. En función de los

Parámetro	γ_d (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	e	ρ (kg/m ³)	Finos (%)	IP (%)	RCS (MPa)	E _i (MPa)
n	151	34	34	34	22	18	85	25	22
μ	19,52	27,75	22,72	0,40	1648,2	84,69	40,67	0,35	28,28
σ	2,51	0,51	0,76	0,09	125,4	9,09	19,61	0,21	33,81
ν	0,13	0,02	0,03	0,22	0,08	0,11	0,49	0,62	1,22
Distrib	Log-N	Log-N	Normal	Log-N	Log-N	Normal	Log-N	Gamma	Log-N
X _{k,inf}	19,19	27,61	22,51	0,38	1601	80,96	37,44	0,28	19,17
X _{k,sup}	19,86	27,90	22,93	0,43	1696	88,42	44,18	0,42	41,73
Parámetro	I _{s50} (MPa)	Cu (kPa)	Cu* (kPa)	E _p (MPa)	E _{pe} (MPa)	Lambe (kPa)	P _{Hinch} (kPa)	Hinch. (%)	k log(m/s)
n	67	11	3	23	9	36	19	15	26
μ	0,53	193,6	66	422,9	0,51	149,11	129,89	5,29	-10,01
σ	0,92	86,9	36,3	563,3	0,27	76,74	80,64	4,67	0,31
ν	1,75	0,47	0,55	1,4	0,54	0,52	0,64	0,91	0,03
Distrib.	Log-N	Log-N	-	Log-N	-	Log-N	Normal	Gamma	Normal
X _{k,inf}	0,39	146,2	84,15	299	0,38	129,32	97,81	3,17	-9,90
X _{k,sup}	0,71	256,4	47,85	597	0,65	171,92	161,97	7,41	-10,12

TABLA I. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Unidad de Almarchal. Todos los materiales

Tabla I. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Unidad de Almarchal. Todos los materiales. datos recopilados, el Almarchal arcilloso puede clasificarse como de expansividad media a muy alta, mientras que el Almarchal margoso se clasificaría como de expansividad baja (González de Vallejo et al., 2002).

Permeabilidad

La permeabilidad de esta unidad se ha medido mediante 26 ensayos Lefranc. La permeabilidad media es inferior a 10^{-10} m/s, lo cual indica que la unidad es “prácticamente impermeable”.

DISCUSIÓN

Se ha observado que, para un mismo parámetro, la función de distribución que mejor se ajusta a la población varía entre unas unidades y otras. Este fenómeno no se ha podido estudiar en profundidad, pero puede deberse, por un lado, al diferente comportamiento geotécnico y, por otro lado, al pequeño tamaño que presenta alguna población.

De manera general no se han tenido en cuenta las propiedades de las discontinuidades. En el caso de las unidades flyschoides, donde la presencia de planos de estratificación paralelos determina en gran medida el comportamiento de los macizos rocosos, la caracterización de estos planos es determinante a la hora de estimar las propiedades globales de los mismos.

CONCLUSIONES

El uso de métodos estadísticos sencillos, en consonancia con lo propuesto por el Eurocódigo 7, ha posibilitado el aprovechamiento de los datos generados por los estudios realizados en el proyecto de enlace fijo a lo largo de más de 30 años.

Los valores característicos estimados para cada parámetro podrán ser empleados en las posteriores fases del proyecto dotando de mayor certidumbre a los

cálculos que se realicen y permitiendo una mejor estimación de las soluciones constructivas y de los presupuestos necesarios para su desarrollo.

La unidad de Almarchal, principalmente arcillosa, presenta unos parámetros resistentes y deformacionales bajos, con valores de resistencia a compresión simple por debajo de 1 MPa y módulos de deformación inferiores a 20 MPa. La unidad es “prácticamente impermeable” y presenta una expansividad baja.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a SECEG, S.A. el acceso a su base de datos y su colaboración en este trabajo.

REFERENCIAS

- AENOR (2003). *UNE-EN 1990-0: Eurocódigo 0: Bases de cálculo de estructura*. Madrid
- AENOR (2010). *UNE-EN 1997-1: Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales*. Madrid
- Bond, A. y Harris, A. (2008). *Decoding Eurocode 7*. London: Taylor & Francis.
- González de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuno, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall.
- ISRM (1981). Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 18(1), 85-110.
- Muñiz Menéndez, M. (2015). *Unidades geotécnicas del futuro enlace fijo a través del estrecho de Gibraltar*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid. 477 pp.
- Schneider, H. R. (1999). *Definition and determination of characteristics soil properties*. Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Proceedings.
- SECEG (2003). *Memoria del mapa geológico del estrecho de Gibraltar Escala 1:25.000. Orilla Norte*. Madrid.