

Aspectos geotécnicos de los túneles excavados en esquistos y filitas

Los esquistos pueden tener una composición mineral diversa (mica, feldespatos, cuarzo, carbonatos, anfíboles, grafito, etc.), existiendo tanto términos de composición monomineral, como otros en los que se identifican todas las especies minerales citadas. Se excluyen de este estudio otros materiales esquistosos como las pizarras o los neises

Naturaleza litológica

Se trata en general, de rocas metamórficas, de grado bajo a medio. Como se ha comentado, su principal característica es la presencia de esquistosidad (*cleavage*), es decir, una estructura planar definida por orientación preferencial de minerales laminares, que les confiere un carácter exfoliable.

Composicionalmente están constituidas por filosilicatos (micas y minerales arcillosos), cuarzo, feldespatos, carbonatos y minerales opacos, con proporciones variables de cada uno de ellos.

Comportamiento geotécnico

De manera sintética, las principales características geológicas y geotécnicas de estos materiales son:

- Presentan un alto grado de fracturación.
- Las fracturas de la roca se rellenan muy pronto con productos de alteración, lo que rebaja en gran medida la presencia de agua en estas rocas.
- Da muchos problemas de inestabilidad en excavaciones, tanto a cielo abierto como en túneles.
- Problemas muy acusados de inestabilidad de laderas.
- Resiste cargas medianas, ya que este tipo de roca se deforma y se compacta.
- Suelen poco útiles para su reutilización en otras obras de tierra.

Las filitas son un tipo particular de esquisto, con mayor presencia micácea. Sus características geotécnicas son más desfavorables. Sus principales características son:

- Son más impermeables que los esquistos, dando origen a paisajes muy secos y con escasa vegetación.
- Son muy abundantes en la Península, en

En este artículo se describen las principales características geotécnicas de las rocas esquistosas, en relación a su comportamiento en la ejecución de túneles y sus boquillas.

Estos tipos de terrenos son muy abundantes en las Cordilleras Béticas, habiéndose interceptado en numerosas obras, especialmente en la Autovía del Mediterráneo A-7. En un futuro, se prevé su aparición en diversos tramos de la futuro Corredor Mediterráneo de Alta Velocidad Ferroviaria, en las áreas correspondientes a los Sistemas Béticos.

Palabra clave: ANISOTROPÍA, BOQUILLA, CARACTERIZACIÓN, ESQUISTO, EXCAVACIÓN, FILITA, MINERAL, RESISTENCIA, ROCA, TÚNEL.

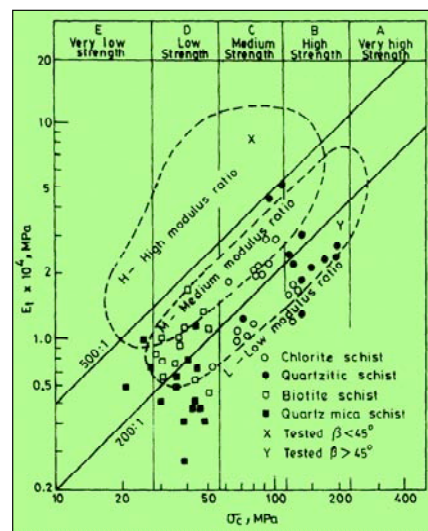


Laureano CORNEJO,
Presidente de GEOCONSULT

Manuel ARLANDI
Dtor. de Proyectos y Asistencia Técnica de GEOCONSULT

donde reciben el nombre de *Launas*. En esta zona se les ha llegado a utilizar como material impermeable para núcleo de presas de materiales sueltos e incluso en las Alpujarras es frecuente su uso como impermeabilizante y aislante térmico en las azoteas de las casas.

- Presentan una inestabilidad en desmonte muy acusada.
- Son muy inestables en excavaciones subterráneas, con tiempos de estabilidad muy bajos. Generan grandes sobre-excavaciones en los túneles.
- Se alteran con facilidad.
- Dadas sus características no son válidas para ninguna otra aplicación como material reutilizado.



[Figura 1] .- Clasificación de Deere y Miller para las Rocas Esquistosas.

Ensayos de laboratorio

Las rocas esquistosas presentan problemas de muestreo, muy importantes tener en consideración de cara a la interpretación de los ensayos de laboratorio:

- Generalmente la recuperación de testigos en los terrenos de peor calidad es muy difícil, ya que se deteriora en el proceso de extracción. Por ello, los testigos que suelen ensayarse responden más bien a las mejores calidades geotécnicas, lo que provoca un sesgo hacia los valores más altos de los parámetros ensayados.
- Aunque se han puesto a punto ensayos de laboratorio capaces de ensayar muestras de cualquier forma geométrica y tamaño (p.e.: Ensayo de Carga Puntual), la dispersión de valores es tan grande, que se hace difícil su análisis geotécnico.
- La anisotropía es difícil de estudiar, ya que generalmente no se dispone de muestras de testigos en todas las direcciones del espacio.

De acuerdo a la clasificación de Deere y Miller, las rocas esquistosas se clasifican como de baja resistencia y medio a bajo ratio de módulo

de deformación, como recoge la **Figura 1**.

Como se ha mencionado, una de las principales características geotécnicas de las rocas esquistosas es su anisotropía. En la **Figura 2** se ilustra la influencia de la anisotropía en la resistencia de la roca.

Los valores más altos de la resistencia se obtienen para esquistosidades paralelas o perpendiculares a la dirección de carga. Esto es debido a que para direcciones de cargas oblicuas a la esquistosidad, la rotura se produce a favor de estos planos, ya que tienen una resistencia al corte menor que las roturas por matriz. Este dato se ilustra en los esquemas adjuntos (**Figura 3**), que corresponden a probetas ensayadas con diversos ángulos entre la carga del ensayo y la esquistosidad.

Caracterización geotécnica

El enfoque geotécnico tradicional de la geotecnia de rocas, basado en las clasificaciones geomecánicas de base empírica (*RMR*, *Q*, *RMI*, etc), parte de la descripción de una reducida serie de parámetros fijos, aplicados a cualquier condición geológica del terreno.

Este enfoque ha demostrado no ser del todo universal, como lo demuestra la experiencia constructiva de numerosos túneles. Existe una amplia lista de excepciones a el enfoque geotécnico habitual, y entre ellas se encuentran los materiales esquistosos, objeto de este trabajo.

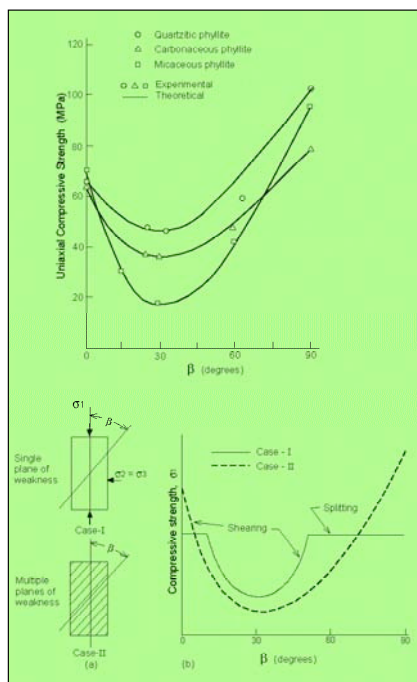
De acuerdo con las ideas geotécnicas más actuales, cada macizo rocoso tiene unos parámetros geotécnicos *clave* que describen su comportamiento. Estos parámetros no son necesariamente *universales*, siendo, en muchos casos, específicos del terreno en cuestión. En algunos países esto ha sido normalizadas, como el caso de Austria (Norma OEGG 2000).

De acuerdo a *Button* (2004), los parámetros clave para caracterizar rocas esquistosas son los siguientes:

- Mineralogía (porcentaje y distribución de micas y minerales arcillosos).
- Anisotropía de resistencia y deformacional.
- Persistencia y orientación de la esquistosidad.
- Características de las fallas y fracturas.

Otro aspecto muy importante a considerar, de acuerdo al mismo autor y a la norma OEGG-2000, es el tipo de mecanismos de inestabilidad y rotura que son posibles en estos terrenos, pues los sostenimientos deben estar específicamente diseñados para hacerlos frente. Para las litologías esquistosas, los habituales mecanismos de rotura son los siguientes:

- Desmoronamiento gravitatorio (*ravelling*),



[Figura 2] .- Influencia de la esquistosidad en la resistencia (Anisotropía).

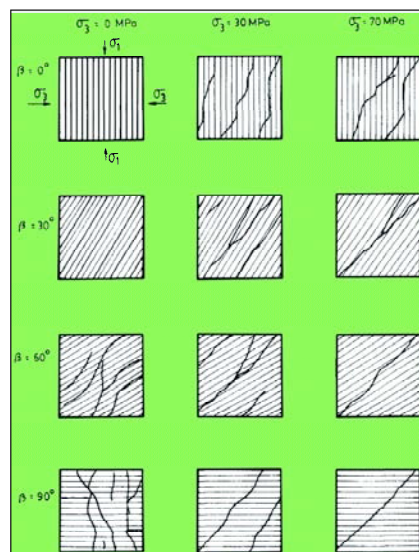
que consiste en la rotura del terreno en pequeños fragmentos. Tiene lugar cuando un material de baja resistencia al corte se

» De acuerdo con las ideas geotécnicas más actuales, cada macizo rocoso tiene unos parámetros geotécnicos clave que describen su comportamiento«

- descomprime (p.ej: filitas y micaesquistos).
- Roturas y deslizamiento a favor de la esquistosidad. Tiene lugar en materiales de matriz más resistente, tales como los micaesquistos, calcoesquistos o cuarzoesquistos.
- Roturas por fluencia, que suelen generar inestabilidades a largo plazo, con rotura del sostenimiento del túnel. Suelen estar asociadas a altos niveles tensionales, generados normalmente por las mayores coberturas, en los materiales de peor calidad (filitas).

Análisis de la influencia de la composición mineralógica en la resistencia

Una manera muy sencilla de estudiar la in-



[Figura 3] .- Roturas a compresión uniaxial y triaxial de probetas en materiales esquistosos (Ramamurthy, 1993).

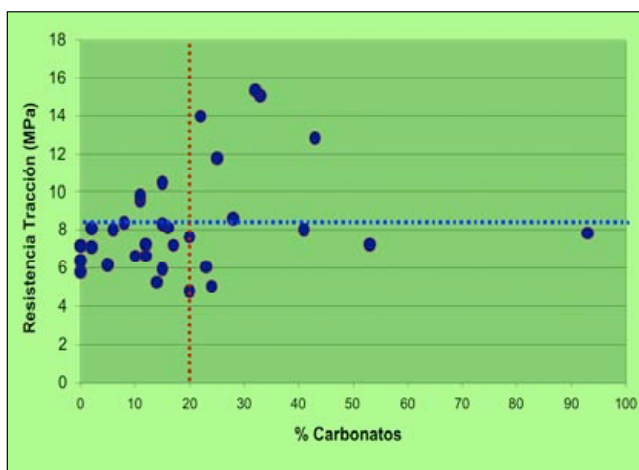
fluencia de la composición mineralógica en la resistencia mecánica de la roca parte de los datos empleados en la obtención del *Índice de Excavabilidad Schimazek*. Para obtener este índice es necesario realizar una descripción petrográfica de la muestra, cuantificando los porcentajes de los distintos tipos de minerales, y obtener la resistencia a tracción de la muestra. Representando gráficamente el porcentaje de un determinado tipo de mineral frente a la resistencia a tracción de la muestra, pueden obtenerse conclusiones sobre la influencia de la presencia de dicho mineral en la resistencia.

En general, con mayores contenidos en cuarzo, feldespatos o carbonato, son esperables resistencias más altas. Por el contrario, si se detectan mayores proporciones de micas o grafito, las resistencias suelen caer drásticamente.

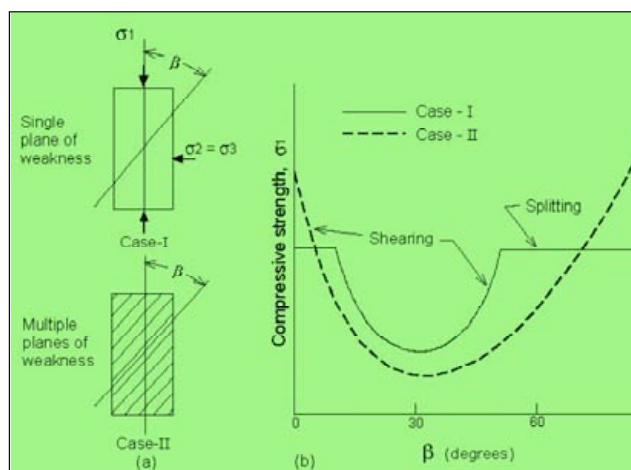
Como ejemplo se presentan los resultados de unas muestras de testigo ensayadas, correspondientes a los esquistos de los túneles del tramo *El Puntalón - Carchuna* (Granada), de la Autovía del Mediterráneo A-7. En la **Figura 4** se representan los valores de resistencia a tracción, frente al contenido porcentual de carbonato en los esquistos. Se ha marcado con una línea vertical y horizontal, los respectivos valores medios del contenido en carbonato y la resistencia a tracción.

Del gráfico puede deducirse que la resistencia a tracción decrece sensiblemente cuando disminuye el contenido en carbonato, ya que el carbonato actúa de agente cementante de la roca. De ahí su claro sentido geológico.

Caracterización



[Figura 4]. - Análisis de la influencia del contenido de carbonato en la resistencia



[Figura 5]. - Anisotropía de resistencia en función del ángulo formado por la esquistosidad y la carga

Influencia de la esquistosidad en la resistencia

Para estudiar la influencia de la esquistosidad en la resistencia, habitualmente se traza un gráfico en el que en ordenadas se representa la resistencia a compresión simple, y en abscisas el ángulo que forma la esquistosidad con la dirección de carga del ensayo (Figura 5).

En general, las litologías esquistosas suelen presentar una marcada anisotropía de resistencia, tal como se ilustra en los gráficos anteriores.

Se ha trazado el gráfico de la Figura 6 para el ejemplo de los túneles del Tramo El Puntalón - Carchuna. En este caso, el ángulo β entre la esquistosidad y la vertical, es muy monótono, variando entre $\beta = 50^\circ - 80^\circ$, lo que no permite trazar una gráfica completa con β entre 0° y

90° . Se han representado separadamente los valores de los esquistos (Litotipo E) y los esquistos cuarcíticos (Litotipo EQ).

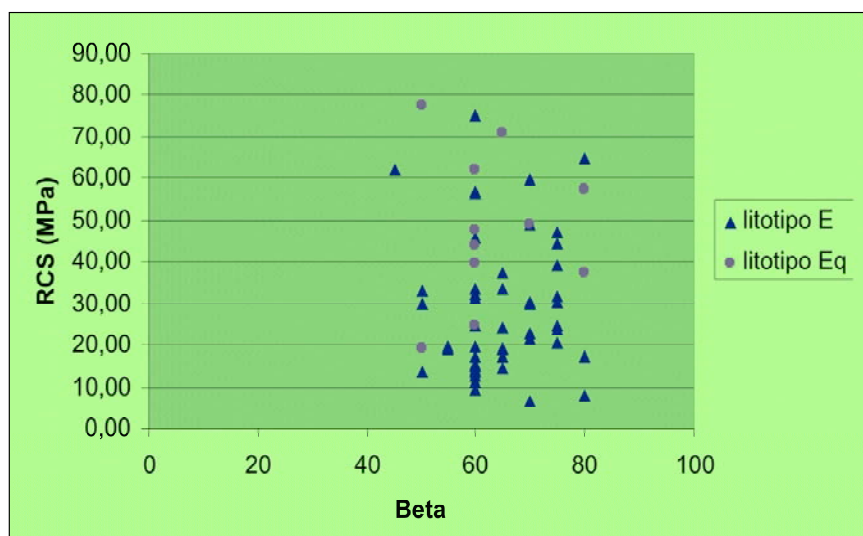
Del gráfico pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

» En general, las litologías esquistosas suelen presentar una marcada anisotropía de resistencia«

- Los datos disponibles no demuestran la anisotropía de resistencia, ya que los va-

lores obtenidos muestran una dispersión muy amplia, independiente de la dirección β . Sin embargo no puede descartarse completamente la anisotropía, ya que no se dispone de valores de β en su rango completo (0° y 90°).

- En general, para la misma dirección de la esquistosidad respecto a la carga principal, las roturas en los esquistos se producen a resistencias más bajas que en los cuarcioesquistos. Este último dato demuestra que las fracturas tienen parámetros resistentes diferentes, según la naturaleza litológica del terreno.



[Figura 6]. - Análisis de la anisotropía en los ensayos realizados sobre esquistos (Tramo El Puntalón - Carchuna, Granada, Auovía A-7).

Fallas

En los materiales esquistosos presentes en las Cordilleras Béticas, se trata generalmente de fallas inversas y/o cabalgamientos. Son los que mayor riesgo geotécnico presentan, debido a su buzamiento reducido y alto nivel de tensiones. Presentan un milonito constituido por harina de falla (*gouge*), tal y como se presenta en la Foto 1.

Para caracterizar el relleno de falla, debe recurrirse a la toma de muestras *in situ*, generalmente en afloramiento, ya que en sondeo estos materiales son de difícil recuperación.

Clasificaciones geomecánicas

Las clasificaciones geomecánicas son, hoy en día, un elemento auxiliar muy útil para la caracterización geotécnica de los túneles, ya que a partir de ellos pueden obtenerse muchos parámetros, aplicando correlaciones empíricas.

Sin embargo, las características de los esquistos y filitas no permiten obtener valores precisos del RMR y el Índice Q, ya que algunos factores que intervienen en su cálculo, ta-

Caracterización



[Foto 1]. - Harina de falla, en falla subhorizontal según la esquistosidad (Túnel de La Fuentecilla, Tramo El Puntaón - Carchuna, Granada, Auovía A-7).

les como la resistencia de la roca, el RQD o las características de la fracturación, son difíciles de estimar con precisión en estas litologías.

Hoek y Marinos (1998), han propuesto una tabla para la obtención del índice GSI, que modifica la original de Hoek (1997), y que tiene en consideración las litologías esquistosas, pero solo las de peor calidad.

En fechas más recientes, Truzman (1999, en Hoek 2001), ha definido una tabla de obtención del GSI para un abanico muy amplio de tipologías de esquistos, que en nuestra opinión es la mejor manera de obtener el valor del GSI en estas litologías (Figura 7).

Recomendaciones constructivas de sostenimiento

Actualmente, la construcción de túneles en rocas esquistosas se aborda empleando una tecnología de sostenimiento basada en el empleo de bulones, hormigón proyectado, fibra metálica, mallazo y cerchas.

Para recomendar y definir unos sostenimientos adecuados a los túneles en terrenos esquistosos, se suele partir de los siguientes criterios:

- La experiencia demuestra que uno de los principales problemas de inestabilidad que presentan estos tipos de terreno es el desmoronamiento y sobre-excavación de la bóveda. Para evitar este riesgo, lo más eficaz es la aplicación de paraguas de enfilaje y pases de excavación cortos.
- Los terrenos esquistosos requieren importantes espesores de gunita para evitar que se desarrollen plastificaciones y convergencias a medio y largo plazo.
- La calidad geotécnica de los terrenos

[Figura 7].- Tabla para la obtención del GSI en rocas esquistosas (Truzman, 1999)

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR SCHISTOSE METAMORPHIC ROCKS		SURFACE CONDITIONS				
From a description of the structure and surface conditions of the rock mass, pick an appropriate box in this chart. Estimate the average value of GSI from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38. It is also important to recognize that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of individual blocks or pieces is small compared with the size of the excavation under consideration. When the individual block size is more than about one quarter of the excavation size, the failure will be structurally controlled and the Hoek-Brown criterion should not be used.		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, aperture < 1 mm hard filling	FAIR Slightly rough, moderately weathered, aperture 1 - 5 mm, hard and soft filling	POOR Smooth, highly weathered surfaces, aperture > 5 mm, predominantly soft fillings	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces, aperture > 5 mm, soft fillings
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES				
INTACT OR MASSIVE - complete lack of foliation and very few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A	N/A
SPARSELY FOLIATED - partially fractured, massive intervals prevail over foliated intervals	80					
MODERATELY FOLIATED - fractured rock mass formed by massive and foliated intervals in similar proportions	70					
FOLIATED - folded and/or faulted rock mass with occasional massive intervals	60					
VERY FOLIATED - folded and/or faulted rock mass, highly fractured, formed by foliated rocks only	50					
FAULTED/SHEARED - very folded and faulted, tectonically disturbed rock mass	40					
	30					
	20					
	10					
	N/A	N/A				

Truzman ha definido una tabla de obtención del GSI para un abanico muy amplio de tipologías de esquistos«

presentes es de tipo media a mala, lo que aconseja evitar sostenimientos de baja cuantía.

- Es frecuente que la deformación del terreno evolucione con el tiempo, lo que aconseja cerrar estructuralmente el túnel, ejecutando una contrabóveda.
- Cuando las coberteras son elevadas, las deformaciones en el sostenimiento pueden llegar a ser muy importantes. En estos casos se recomienda la aplicación de "juntas de contracción".
- En los esquistos de naturaleza más cuarcítica o carbonatada, la mayor resis-

tencia de la matriz rocosa permite eventualmente emplear sostenimientos sin cerchas.

Bibliografía

- *Characterization of Phyllites for Tunneling*. E.A. Button. SINOROCK 2004 Symposium. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 41, No 3, (2004).
- *Engineering Behaviour of Phyllites*. T. Ramamurthy, et al. Engineering Geology, 33 (1993).
- *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) Classification for Very Weak and Sheared Rock Masses. The case of the Athens Schist Formation*. E. Hoek et al. Bull. Eng. Geol. Env. 57 (1998).
- *Rock Mass Properties for Underground Mines*. E. Hoek, publicado en *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies* Society for Mining, Metallurgy and Exploration. Colorado, (2001).
- *Diseño de un Túnel en Motril en un macizo de Esquistos y Filitas*. M. Fe et al. Simposio sobre Geotecnia de Infraestructuras del Transporte. Barcelona (2000).