

La Geología y los túneles

Por **MIGUEL ARENILLAS PARRA**

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Cátedra de Geología Aplicada a las Obras Públicas
E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Valencia

En el presente artículo se recogen algunas ideas generales sobre los problemas básicos que suelen presentarse en las obras subterráneas y, asimismo, se resume muy sucintamente el diferencial comportamiento de los distintos tipos pétreos en tales obras.

INTRODUCCION

La mayor parte de los problemas que se presentan durante la construcción de un túnel suelen tener el mismo origen: la falta de un conocimiento suficiente del terreno atravesado por la obra. Este hecho tiene, normalmente, una explicación inmediata como es la inexistencia o el inadecuado planteamiento del correspondiente estudio geológico.

Hasta fechas recientes era usual esta carencia de información en la mayor parte de los proyectos de túneles. Lo cual podría quedar justificado, en cierto modo, por el carácter menor dentro de otras construcciones de mayor entidad que solían tener, en obras públicas, las excavaciones subterráneas. De ahí que el proyectista soslayase —quizá con demasiada frecuencia— los indudables problemas que podría plantear el túnel y que, en consecuencia, el constructor tratase de solucionar la obra del mejor modo posible, con el convencimiento de que lo que iba a hacer tendría escasa o nula relación con lo proyectado.

En la actualidad la situación ha cambiado en parte: las excavaciones subterráneas tienen cada vez mayor entidad y en muchos casos son ya obras singulares perfectamente individualizables; los medios de prospección del terreno han mejorado notablemente; e, incluso, los planteamientos teóricos necesarios para abordar los problemas reales del subsuelo también se han desarrollado ampliamente. No obstante, los lógicos desajustes que la nueva situación plantea, determinan que, todavía en numerosas ocasiones, prime la mentalidad anterior y no siempre se abor-

den las obras subterráneas con el enfoque adecuado. De este modo no es extraño comprobar aún cómo muchos proyectos de túneles siguen siendo iguales unos a otros y todavía conforme a los antiguos modelos; y cómo se siguen ignorando, en demasiadas ocasiones, los condicionantes geológicos básicos. Es usual que los planos de proyecto consistan tan sólo en el dibujo de algunas secciones tipo, en las que se detallan los diversos revestimientos, acompañadas, en el mejor de los casos, por una esquemática representación, topográfica de la traza de la obra. Las correspondientes memorias poco más suelen aclarar.

Por el contrario, últimamente es fácil encontrar, en los proyectos de túneles, anejos de cálculo de mucho empaque, con hojas y hojas de salidas de ordenador que desgraciadamente resultan, a la postre, de reducida utilidad. La explicación de esta aparente paradoja suele ser obvia: la escasa o nula adecuación con la realidad de las hipótesis utilizadas para realizar los cálculos. Este falso cuantificar con el que, en la actualidad, es tan fácil encontrarse en temas de ingeniería —donde, por otro lado, puede tener cierta, aunque pobre justificación— no hace sino reflejar un modo de actuar ampliamente generalizado en muy variados campos de las ciencias y de las técnicas. La manía cuantificadora, explicada en parte por la accesibilidad que hoy tienen los ordenadores, degenera, en muchos casos, en el simple contar, o en esa también falsa metodología a la que antes me he referido, que consiste en vestir ampulosamente datos de baja o nula utilidad. No hay que olvidar que los ordenadores permiten tanto abordar complejas formulaciones matemáticas acordes

con la realidad física, como tratar engorrosos y muy abundantes datos numéricos que, bajo falsa capa de alta matemática, no hacen sino encubrir el desconocimiento que se tiene de los problemas reales. Esta misma facilidad en el empleo de fórmulas complejas o abstrusas, ha potenciado, asimismo, la mitificación del número. En un campo tan concreto como el que ahora tratamos, las excavaciones subterráneas, los ejemplos podrían ser múltiples. Con lo cual, y de un modo indirecto, se está desvirtuando el propio sentido de la ingeniería, al pasar por encima de condiciones tan necesarias como el ingenio y la imaginación, primando el mero formulismo más elemental.

Además, en geología, la cuestión se agudiza porque, como es bien sabido, las condiciones propias del terreno pocas veces permiten definir alguna de sus características con un número abundantemente seguido de cifras después de la coma. Por fortuna, en la mayoría de los casos eso tampoco es necesario. Sin embargo, no es difícil comprobar, a causa de las manías y mitos antes señalados, cómo en muchas ocasiones el especialista parte de datos aparentemente muy precisos que, en última instancia, tienen su origen en simples apreciaciones muy poco acordes con la realidad geológica. De ahí que sus resultados, válidos si las hipótesis de partida lo fuesen, resulten tantas veces inaplicables por su escasa adecuación con lo que el terreno marca realmente. El problema es grave y no conviene ignorarlo. He insistido, en numerosas ocasiones, que en geología aplicada —y, por tanto, en obras subterráneas— no se trata sólo de resolver unas fórmulas más o menos complicadas, sino que es necesario, con carácter primordial, aplicar en cada situación los valores que representen, del modo más aproximado posible, las condiciones impuestas por el terreno, es decir, por la geología. Aunque últimamente en ingeniería parece que se observa una cierta remisión de las tendencias falsamente cuantificadoras —en paralelo a lo que ocurre en otros ámbitos de la actividad humana—, en un campo como el nuestro no está de más recordar que el buen especialista —en este caso el ingeniero geólogo o el geotécnico— no es aquél que conoce mayor número de fórmulas, sino el que sabe encontrar los valores más adecuados de las variables y parámetros que intervienen en tales formulaciones. En muy pocas circunstancias

estos valores son tan «exactos» como lo que a veces se ha pretendido.

También es verdad que, en ocasiones, la falta de concordancia entre proyecto y realidad no hay que achacársela ni al proyectista ni al especialista. Las circunstancias geológicas de algunas excavaciones subterráneas pueden resultar tan complejas que ni la geología de visu, ni los estudios regionales o de detalle, ni la prospección —del tipo que sea—, permiten aproximar suficientemente las características del macizo que debe atravesar el túnel. En estas condiciones pretender un gran detalle en el proyecto puede resultar utópico. Pero lo que no cabe es tomar lo particular por general y actuar siempre como si tales problemas fuesen los comunes. Las investigaciones geológicas deben hacerse siempre, y en la medida que cada obra exija, con objeto de llegar a esa buena caracterización de las variables de que hablaba antes. Esta idea que, en principio, parece bastante lógica, tropieza, sin embargo, con una dificultad que suele reducir notablemente las posibilidades de actuación. No es otra que la impuesta por la muy generalizada falta de criterio respecto a lo que debe ser el coste de un proyecto. En general, no se admite que pueda ser alto, opinión que quizá sea válida respecto a determinados tipos de obra, pero que no lo es, en absoluto, al tratarse de un túnel. Es, sin embargo, la idea que prevalece en el mundo y la que, en definitiva, condiciona totalmente la posibilidad de alcanzar una información adecuada; meta a la que, normalmente, se llega con dificultad, por la carencia de medios materiales que resulta de la restricción económica impuesta. Ello a pesar de la reiterada constatación del hecho de que toda inversión realizada en el estudio de una obra subterránea puede suponer reducciones en el coste de la construcción de 10, 100 o incluso más veces la cantidad empleada en el proyecto.

En consecuencia, unas veces por falta de estudio, otras por imposibilidad material de llegar a resultados absolutamente válidos y otras por errónea interpretación de las variables en juego, según lo dicho, la realidad es que los condicionantes geológicos implicados en una obra subterránea, muchas veces quedan sin precisar con el rigor que sería necesario. En lo que sigue voy a tratar de describir, aunque sea a grandes rasgos, tales condicionantes, indicando, también esquemá-

ticamente, los que cabe encontrar en cada circunstancia geológica concreta.

PROBLEMAS GEOLOGICOS DE LOS TUNELES

Al analizar los aspectos geológicos implicados en una obra subterránea conviene diferenciar, al menos, tres temas de carácter principal que, si bien permiten un cierto tratamiento independiente, la realidad es que sus interrelaciones suelen ser tan fuertes que difícilmente se puede prescindir de uno de ellos al estudiar los restantes. Son: a) los relacionados con la litología; b) los que dependen de la estructura, y c) los que origina el agua. En la exposición que sigue me ocuparé con más detalle —dentro de lo reducido de este artículo— de la primera cuestión, acompañando algunos datos de la segunda. El tema del agua es suficientemente amplio como para que sea tratado en otra ocasión.

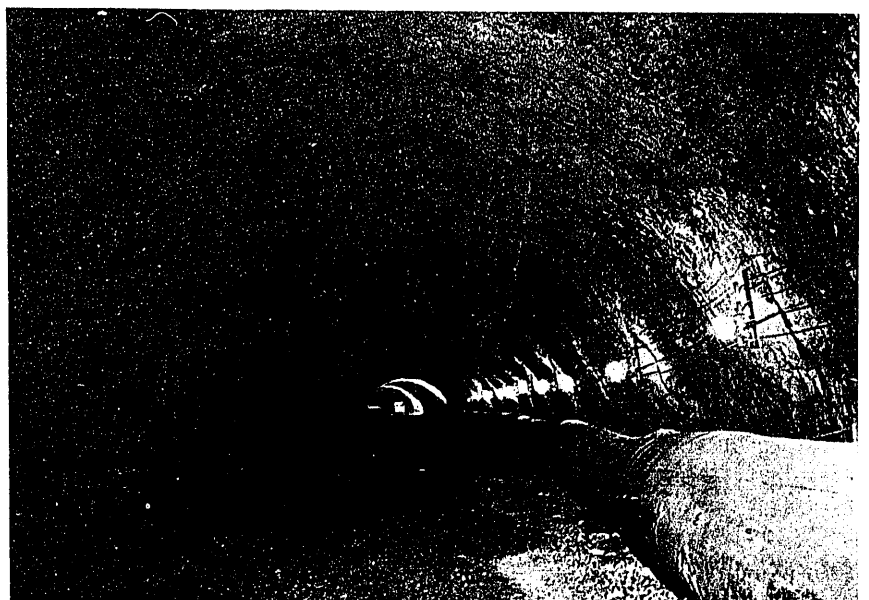
PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA LITOLOGIA

Es evidente que cada tipo de roca tiene un comportamiento distinto frente a la excavación y reacciona de modo variable respecto al sostenimiento del túnel ya excavado, cuestiones ambas de la máxima importancia en la construcción de una obra subterránea.

Esta variabilidad de respuestas, dentro de un lógico deseo de normalizar actuaciones,

ha dado origen a muy diversos intentos de clasificación de los macizos rocosos en relación con los túneles. Desde la muy esquemática ordenación de Terzaghi, hasta las más recientes propuestas de Bieniawski, Barton o la A.F.T.E.S. francesa, por citar algunas de las más caracterizadas, demuestran la complejidad del problema y lo difícil que puede resultar todo intento de esquematización que trate de reducir la Naturaleza a unas cuantas casillas de accesibilidad directa. Más aún si la propia Naturaleza —en este caso, la geología— se deja al margen, al partir de tratamientos excesivamente teóricos y simplificadores. La realidad es que todos los intentos de ordenar los macizos pétreos hasta ahora realizados, ignoran, en mayor o menor medida, las características geológicas del roquedo, pretendiendo reducir estas características a simples formulaciones, más o menos matemáticas, en las que se suele prescindir de algo tan elemental como la propia litología. No quiero con esto decir que las clasificaciones intentadas sean inútiles; por el contrario suponen actitudes muy meritorias respecto a un problema real que precisa de soluciones urgentes. Tampoco creo que esta solución sea imposible. Ahora bien, parece lógico que para clasificar las rocas se parta, por lo menos, de la consideración de sus características más elementales. De otro modo puede ocurrir, como ya viene comprobándose, que las pretendidas clasificaciones se conviertan, en cada caso concreto, en un intrincado crucigrama de difícilísima aplicabilidad por el enorme

Túneles del Mascart.



número de casillas a las que hay que recurrir, incluso en tramos muy localizados de una misma obra.

No hay que olvidar que cada tipo litológico puede venir condicionado por múltiples factores, como los estructurales, los propios de la génesis del material o del respectivo medio sedimentario, los correspondientes a las alteraciones sufridas, y otro largo etcétera, que pueden hacer muy variables las condiciones geotécnicas en ámbitos muy restringidos. De ahí que parezca lógico iniciar toda clasificación que se pretenda efectiva, a partir de unos rasgos en general fácilmente caracterizables como son los petrológicos. Hace tiempo que los geólogos están bastante de acuerdo respecto a los grandes grupos pétreos y, en cualquier caso, donde caben pocas dudas es en relación con las tipologías que podríamos considerar ingenieriles. A partir de éstas es, en mi opinión, desde donde se debe buscar el encasillamiento posterior de la correspondiente casuística particular. Y, de cualquier modo, la sistemática final debe ser lo suficientemente sencilla para que sea realmente manejable. En caso contrario dejará de ser operativa y se abandonará. Es preferible anotar eventuales problemas de amplio espectro, que pretender una minuciosa sistematización de todas las posibilidades reales o imaginarias. Con lo cual, además, se podría llegar al hecho paradójico de que un intento de resolver las dudas al constructor, conduzca a que éste se desentienda —como en épocas pasadas— de los datos del proyecto, ante la imposibilidad de utilizar de modo práctico toda la información suministrada.

A partir de estas ideas, necesariamente esquematizadas, opino que, por el momento, para tratar los condicionantes litológicos de los macizos pétreos en obras de túneles, conviene agrupar los diversos tipos existentes según las clasificaciones geológicas clásicas, con la simplificación que permita el planteamiento ingenieril del problema, es decir, con la posibilidad de reunir dentro de una misma tipología, rocas petrológicamente algo diversas, pero de comportamiento análogo en las obras. Estos datos básicos son los que tienen que servir de elementos de partida para todos los ulteriores tratamientos simplificadores que faciliten la construcción, que, en definitiva, es lo que debe plantearse el ingeniero. En este sentido, voy a tratar de rocas endógenas, metamórficas y sedimentarias, destacando

otros grupos menores cuando sea necesario y señalando las condiciones diferenciales que tales tipos pétreos imponen en las obras de túneles.

1. Rocas endógenas

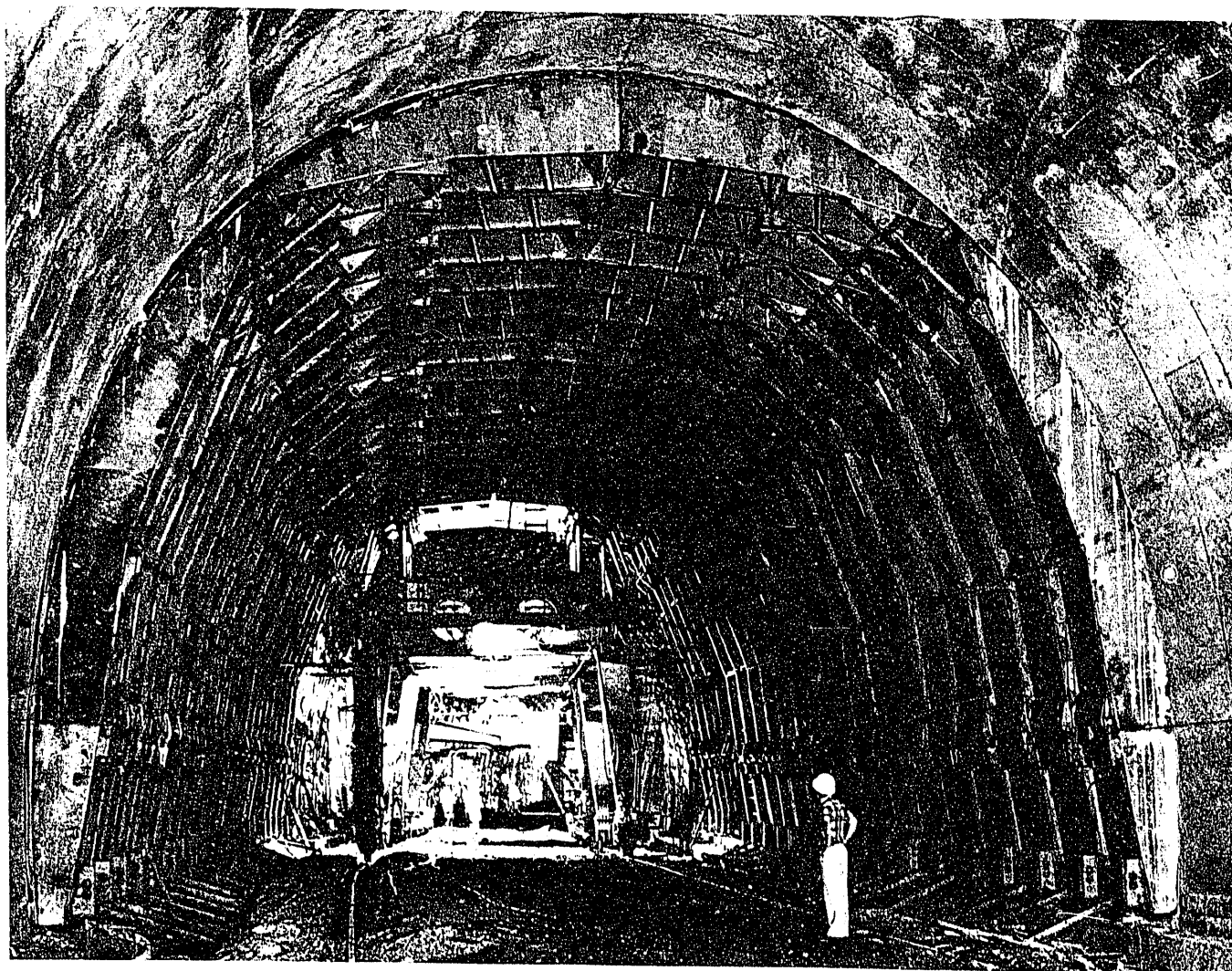
Presentan una tipología muy variada, en razón de las diversas condiciones que pueden imperar durante su génesis. Una diferenciación inmediata, determinada por la mayor o menor rapidez de su consolidación a partir de magmas profundos, es la de plutónicas y volcánicas.

1.1. Rocas plutónicas

Si bien la cantidad de categorías posibles es muy amplia, la realidad es que los tipos mayoritarios, es decir, los que pueden condicionar el trazado completo de un túnel, o buena parte del mismo, son relativamente pocos. Más aún si, con un criterio ingenieril, reunimos en el mismo grupo a todas las rocas que, dentro de unos límites admisibles, presentan un comportamiento análogo, por lo que a la obra se refiere. En este sentido el prototipo del conjunto principal sería el granito, entendiéndolo por tal, a nuestros efectos, la amplia serie de rocas, petrológicamente diferenciadas, que se sitúan en la banda media del triángulo superior de la clasificación de Streckeisen.

El granito es roca que en las obras suele plantear pocos problemas. No obstante, esta generalización puede resultar excesiva en los túneles. Por una parte es una roca dura, con un coste de perforación bastante elevado, y al mismo tiempo no es tenaz, lo que exige, en principio, maquinaria en la que prime la percusión sobre la rotación. Sin embargo, ambas características llegan a ser muy variables y en gran medida dependientes del tamaño de grano, que refleja el proceso genético. Lo cual puede determinar, incluso en pequeñas distancias, cambios importantes en su reacción frente a la perforación. No obstante esto no es lo usual.

Los principales problemas del granito los plantean la tectónica y las posibles alteraciones existentes. Es normal que el macizo granítico se presente fracturado según dos —o más a veces— direcciones verticales principales, otra dirección subparalela a la super-



Túnel del Turismo (Venezuela).

ficie libre —producto de la decompresión— y, a veces, una última serie de discontinuidades subhorizontales. Cuando la tectonización es muy intensa todas estas litoclasas pueden determinar la existencia de numerosos bloques de pequeño tamaño, cuya estabilidad resulta precaria una vez excavado el túnel. El desapeo de tales bloques se puede ver facilitado si las discontinuidades están rellenas de productos de la descomposición del granito, es decir por materiales de carácter arcilloso. La llamada que siempre determina el túnel puede acelerar el proceso, al potenciar la circulación de agua a favor de tales litoclasas. Por ello una solución adecuada, y muchas veces posible, es fijar los trazados de los túneles en granito sesgados respecto a las direcciones de las discontinuidades verticales mayores. Con ello se reduce la probabilidad de caída de bloques, al resultar

cortados éstos según orientaciones no paralelas a sus lados.

En granitos muy sanos y poco fracturados, cuando se alcanzan profundidades importantes, o cuando el macizo conserva aún el efecto de fuertes compresiones soportadas en épocas pretéritas, es fácil que se presenten procesos muy acentuados de decompresión que, en función de carácter agrio de la roca, se manifiestan en la rotura frágil del material, con el consiguiente desprendimiento de llascas, a veces volumétricamente importantes. Esto puede exigir bulonados más o menos densos, o la disposición de revestimientos de carácter menor —mallazo gunitado suele resultar suficiente—, colocados con un cierto huelgo capaz de permitir, al menos en parte, la decompresión de la roca.

La alteración del granito es un proceso

bien comprobado, aun que mal explicado hasta ahora. El mecanismo químico se conoce con bastante detalle, si bien no se sabe todavía la incidencia relativa de los diversos factores en juego, como son, entre otros, el clima, el propio quimismo de la roca y su textura. De ahí que en muchos casos sea difícil predecir el estado en que se encontrará el macizo en una determinada zona. La jabrización, normalmente relacionada con las fracturas —a partir de las cuales avanza hacia la masa pétreo—, y con el drenaje del macizo en el momento de producirse la alteración, puede alcanzar profundidades importantes y extensiones de geometría muy variable. El jabre supone una mejora de las condiciones de excavación, pero un notable empeoramiento de la estabilidad del túnel. El granito arenizado llega a exigir sostenimientos muy densos y revestimientos importantes. El venteo es otro factor que, en este caso, dificulta la estabilidad; igualmente la eventual llamada de agua que origina la excavación.

Las restantes rocas plutónicas tienen, normalmente, interés menor por su más reducido desarrollo volumétrico. En cualquier caso se aproximan bastante al granito, en cuanto a su comportamiento en los túneles, determinando, en general, variaciones de orden secundario, más acusados en las más básicas, en las que algunos de sus componentes mineralógicos pueden inducir mayores índices de inestabilidad. Al mismo tiempo el carácter básico, aunque dependiendo del quimismo concreto, suele suponer mayor tenacidad y, en consecuencia, requerir planteamientos distintos a los indicados, respecto a la perforación.

Las rocas filonianas —a los efectos que ahora interesan— suelen ser episodios muy localizados dentro de la roca encajante. No obstante cabe siempre suponer un túnel trazado al hilo del filón o la existencia de un dique de dimensiones realmente importantes. En tales casos es aplicable lo dicho anteriormente, con las lógicas matizaciones dependientes de los caracteres petrológicos del material. El efecto que produce el dique sobre las circulaciones hídricas, puede incidir sobre la construcción del túnel, a veces con importancia. Hay filones drenantes y filones presa, según canalicen o impidan la circulación de las escorrentías profundas. En ambos casos pueden originarse venidas de agua a la excavación superiores a las propias

del macizo encajante, aspecto que requerirá las adecuadas previsiones.

1.2. Rocas volcánicas

Estas rocas se vienen clasificando, normalmente, en paralelo a las plutónicas, con las que existe una indudable relación, bien reflejada por la equivalencia de sus respectivas composiciones químicas. Sin embargo la similitud a efectos ingenieriles es bastante menor, en particular por lo que respecta a las efusiones más modernas o de implantación más superficial. En las restantes, en especial las más antiguas o profundas, es posible admitir una generalización de lo dicho para las plutónicas, al menos en lo que se refiere a los problemas de perforación. Los sostenimientos y los revestimientos plantean, por el contrario, una problemática muy particular, determinada en gran medida por las peculiaridades de las estructuras volcánicas y por la fuerte variabilidad de características que es usual encontrar en este tipo de rocas.

Son en general litologías —y especialmente las del primer grupo indicado— que requieren investigaciones de mucho detalle, frecuentemente costosas, siempre que las exigencias de la obra determinen la necesidad de caracterizaciones muy concretas. El problema del agua supone, en general, nuevas complicaciones, por lo muy impreciso de las circulaciones hídricas interiorizadas en los macizos volcánicos. En España la problemática de las rocas efusivas se reduce, en la práctica, a las islas Canarias, ya que los afloramientos peninsulares quedan muy localizados y en pocos casos podrán incidir en las obras subterráneas. En Canarias, sin embargo, y concretamente en galerías para captación de aguas, suponen una casuística enormemente compleja, cuyo sentido exigiría un tratamiento monográfico de gran extensión.

2. ROCAS METAMORFICAS

La gama de litologías también es muy amplia en este caso, y de ahí la relativa variedad de comportamientos. No obstante, prescindiendo de algunos tipos extremos o marginales —como las de alto grado de metamorfismo, a partir del gneis glandular, que cabe asimilar a las plutónicas, algunas filitas, cuyas características pueden aproxi-

marse a las arcillas, o las cuarcitas metamórficas muy próximas a las areniscas de la misma clase—, las restantes, que son la mayoría, presentan unos rasgos muy específicos que condicionan su reacción en las excavaciones subterráneas.

El carácter común a estas rocas metamórficas, que podríamos considerar típicas, es la esquistosidad. Esta dirección preferente de fractura determina una fuerte anisotropía del macizo, cuya incidencia en los túneles es inmediata. Por un lado condiciona la perforación, que alcanzará resultados diferenciales según el ángulo de ataque respecto a los planos de disyunción. Por otra parte, la estabilidad también dependerá de las orientaciones relativas de la esquistosidad y el eje del túnel, llegándose a un mínimo cuando ambas coincidan y siendo éste absoluto cuando las discontinuidades de pizarrosidad sean verticales. Es decir, los sentidos preferentes de avance vienen fuertemente condicionados por la característica dominante de las rocas metamórficas, lo que suele exigir un análisis de trazado de gran detalle, que tenga en consideración, con carácter preferente, la disposición general del macizo pétreo. En el caso de que esta cuestión no pueda solventarse convenientemente, evitando las trazas al hilo de la esquistosidad, será necesario prever unos fuertes elementos de sostenimiento, que deberán colocarse muy próximos al frente de avance. Los desapeos propios de este tipo de rocas se presentan de modo brusco, al alcanzarse el estado crítico, por pérdida de características en los materiales arcillosos que rellenan los planos de esquistosidad, situación que se ve favorecida por la circulación de agua hacia el túnel, en función de la llamada que éste determina. Desapeos parciales y fenómenos de descompresión también son frecuentes en las rocas metamórficas, procesos que a veces pueden paliarse o corregirse mediante un bulonado adecuado, que debe prever anclajes profundos. Estos, sin embargo, pueden dejar de funcionar en plazos breves, al progresar la descompresión hacia el interior del macizo.

Por último no conviene olvidar que también el venteo puede producirse en algunos de estos tipos pétreos, en particular en ciertas pizarras. Esto puede exigir la previsión de revestimientos —completos o parciales— próximos al frente de la excavación, aspecto que

complica, nuevamente, el progreso general de la obra.

Algunas mineralizaciones como la pirita y, en especial, la pirrotina, que no son infrecuentes en determinadas rocas metamórficas —las pizarras, por ejemplo— suponen otro factor añadido a la problemática general, al poder originar efectos de agresión a los hormigones del revestimiento. Ciertas silicificaciones, que a veces se presentan, determinan, a su vez, retrasos en los avances e, incluso, la necesidad de sustitución de los medios de perforación.

3. ROCAS SEDIMENTARIAS

La gran variedad de tipos y los contrastantes comportamientos obligan al análisis independiente de los principales grupos individualizables. Estos, desde el punto de vista del ingeniero, pueden ser calizas, areniscas, conglomerados, arcillas, yesos y rocas sueltas. Los estudiamos particularmente.

3.1. Calizas

La caliza compacta es una roca que se trabaja muy bien y que no suele plantear problemas graves de sostenimiento. De hecho, gran parte de los túneles construidos en este tipo de roca no precisarían revestimiento que, cuando se dispone, suele ser por otro tipo de condicionantes. Los auténticos problemas que surgen en las calizas están relacionados con la estructura o con el agua, siendo éstos últimos normalmente los más graves. Se explican por el carácter soluble del roquedo calcáreo —aunque esta solubilidad sea muy lenta—, que puede determinar la existencia de zonas altamente karstificadas, a través de cuyos conductos el agua puede alcanzar circulaciones importantes, que lleguen a incidir en la obra cuando ésta interfiere tales conductos.

3.2. Areniscas

Desde las cuarcitas hasta las arcosas, la variedad de comportamientos es muy amplia.

Las cuarcitas son, probablemente, el tipo pétreo más costoso de perforar y a veces, también, difícil de sostener, si bien esta última condición se presenta más acusada en las variedades metamórficas más antiguas, que han sido más intensamente afectadas por las orogénias.

En el extremo opuesto, las arcosas no plantean problemas de excavación, pero pueden resultar de imposible sostenimiento por métodos convencionales. Cuando se encuentran por debajo del freático pueden comportarse como una auténtica pasta, que fluye a través de los intersticios de cualquier sostenimiento. Las inyecciones —mal admitidas si no se trata de productos de enorme finura—, la congelación o sistemas equivalentes, a veces son los únicos métodos que posibilitan el avance.

Por el contrario, las areniscas medias —moladas, maciños, calcoarenitas— resultan las rocas idóneas para la perforación y el sostenimiento, si bien en algunos casos, problemas de venteo o inestabilidad por presencia de materiales arcillosos, pueden dar lugar a la necesidad de un revestimiento relativamente próximo al avance. Cuando esto no es así, se logran avances espectaculares, en especial con tuneladoras de sección completa.

3.3. Conglomerados

Su comportamiento en túneles depende del carácter mineralógico de los materiales constituyentes. Cuando predominan los silíceos, se aproximan a las cuarcitas; cuando son mayoritarios los calcáreos, a las calizas. No obstante, la estabilidad suele ser mejor que en las primeras y peor que en las segundas. La perforación puede resultar incómoda, por el eventual comportamiento desigual de los cantos, la matriz y el cemento. A veces el agua da problemas equivalentes a los de las calizas.

3.4. Arcillas

Pueden determinar comportamientos muy variables, en función de sus características intrínsecas. En cualquier caso lo normal es que resulten fáciles de trabajar y difíciles de sostener. La práctica aconseja que los túneles en este material alcancen, lo antes posible, cotas profundas, donde se suelen paliar los efectos de los principales factores que determinan inestabilidad, aunque, en ocasiones, otros aumentan.

Los procesos de fluencia —que dependen del campo de fuerzas originado por la apertura del túnel y que determinan la tendencia, en general lenta, al cierre de la cavi-

dad—, las roturas por cizalla —variables según el contenido de agua y que, en el límite, supone hundimientos bruscos—, los fenómenos de aumento de volumen —por decompresión o por hidratación de ciertos minerales—, los efectos del venteo, son las principales causas de inestabilidad que, en conjunto, suelen exigir sostenimientos y revestimientos geoméricamente adecuados —las cargas pueden ser fuertes— y próximos al frente de la excavación.

3.5. Yesos

Cuando hay agua los problemas son múltiples; seco y masivo resiste perfectamente. De ahí que el comportamiento sea más desfavorable cuando se presenta asociado a rocas que aporten al agua. Las alternancias con arcilla, margas y areniscas originan tales situaciones, por lo demás frecuentes en las cuencas terciarias españolas. En todo caso, la perforación —cuando se llega a precisar— no es costosa, mientras que sostenimientos y revestimientos tienen que llevarse, normalmente, próximos a los avances. Los recubrimientos exigen materiales adecuados, resistentes a los sulfatos. La presencia de anhidrita, por su posible tránsito a yeso, con aumento de volumen importante —del orden del 30 %—, plantea problemas adicionales que inciden directamente sobre el revestimiento.

3.6. Rocas sueltas

Las arenas, gravas y bloques suponen casi siempre avances difíciles, función del importante sostenimiento necesario. En las primeras influye fundamentalmente el agua: Bajo freático requieren procedimientos especiales: aire comprimido, congelación, etc.

CONCLUSION

Con este breve esquema creo que han quedado anotados los principales y numerosos problemas —aparte el agua— que puede determinar la geología en las obras subterráneas. Sería de desear que en los años venideros, acuciados por la progresiva demanda de tales obras, fuésemos capaces de llevar a buen fin esas perentorias y tan necesarias clasificaciones y cuantificaciones a que me he referido al principio.