

Planificación de reconocimiento para excavación de túneles en roca

Por M. ROMANA RUIZ

Dr. Ingeniero de Caminos

Las tareas de reconocimiento previas al proyecto de túneles tienen una gran importancia por su repercusión funcional y económica en el desarrollo de las obras. En el artículo se exponen las distintas fases del reconocimiento, en los estudios previos, anteproyecto, hidrogeológico y geotécnico, medios utilizables y presentación de resultados, de acuerdo con las actuales prácticas y recomendaciones para este tipo de obras.

1. NECESIDAD DE UN BUEN RECONOCIMIENTO

Un túnel es normalmente la obra pública más azarosa que puede emprenderse. El hecho de que transcurre a través de terrenos que no pueden conocerse más que de forma indirecta y/o incompleta hace que raro es el túnel que no presenta sorpresas durante su construcción. En todo el mundo tanto el coste como el plazo se incrementan de un 50 a un 200 % sobre los previstos.

Con objeto de disminuir estas incertidumbres es preciso realizar un buen reconocimiento.

Sin embargo la práctica actual sólo muy lentamente tiende a aceptar la necesidad de ese estudio completo (y su coste que puede evaluarse en un 3-5 % o más del de la obra).

García Yague (1978) clasifica así los enfoques corrientes del problema (de mayor a menor grado de ligereza):

- a) Se elige la recta de menor longitud entre dos portales predeterminados sin tener en cuenta ninguna consideración geológica.
- b) Con los mapas geológicos de superficie se elige la línea más corta dibujando un perfil geológico sumario/supuesto.
- c) Se completa el caso anterior con algunos sondeos (cortos) y con geofísica tratanto de verificar el perfil geológico supuesto.

Obsérvese que en todos los casos se parte del pie forzado de una línea recta que se impone a la geología.

En opinión de García Yague (1974) las causas de «esta no brillante situación» son:

1.º Coste... que debiera ser del 2-3 % y hasta el 10 % en casos difíciles (pero que sufre limitaciones a partir del millón de pesetas por km.).

2.º Reducción de los trabajos de reconocimiento... al 0,1 %, cifras ridículas frente a los incrementos muy superiores al 100 % que, con frecuencia generalizada, se producen en los costes de construcción de los túneles a causa de las incidencias y sorpresas.

3.º Rutina (en la exploración geológica) con ausencia de imaginación creadora.

4.º Inmovilismo. Uso de métodos clásicos de exploración... Baste citar que en pocos casos se aprovechan bien los registros de sondeos.

5.º Insuficiente dedicación. Falta de horas de trabajo de técnicos superiores... No es suficiente conocer la distribución geológica general. Se precisa describir los detalles.

6.º Ausencia de recapitulaciones reales. Concluido un túnel (no se obliga a realizar) un informe general, en el que se recogiese todo lo sucedido con visión coordinada de geólogo, geotécnico, proyectista y constructor».

Este planteamiento, con escasez de medios humanos y económicos y de dedicación,

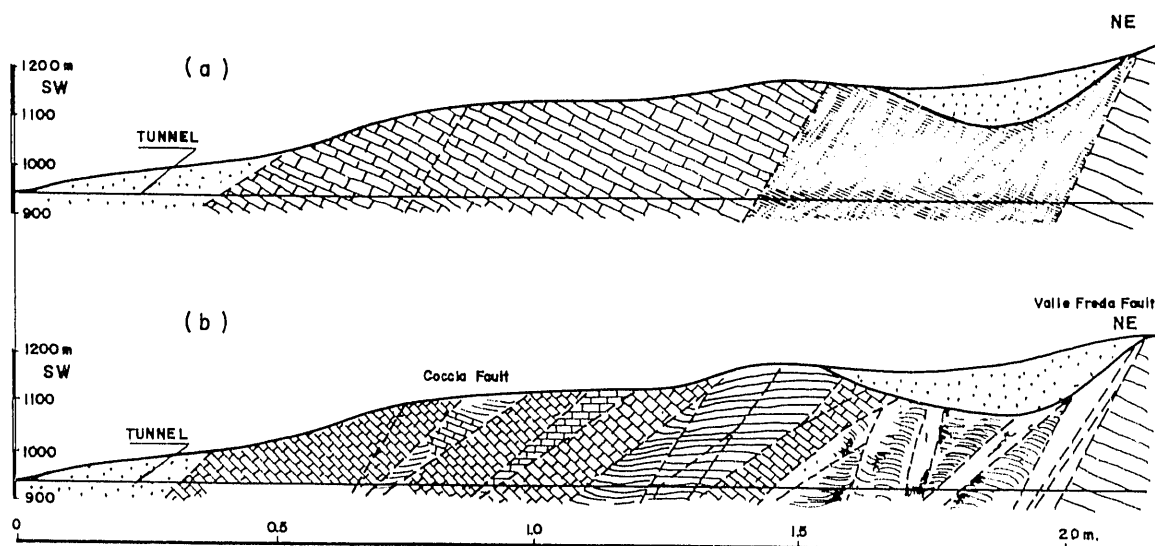


Fig. 1.—Túnel del Gran Sasso. Perfiles geológicos.

(a) supuesto. (b) real.

Materiales: calizas, margas y coluviones

Según Baldovin (1972).

ha conducido a innumerables errores. Presentemos dos ejemplos.

En el túnel del Gran Sasso, descrito por Baldovin (1972), la geología real fue mucho más compleja que la prevista (Fig. 1-1).

En el trasvase Sorbe-Jarama, cerca de Madrid se presentaron, durante la ejecución, problemas que requirieron el cambio de traza para evitar unas calizas karsticas de edad turonense-senonense con 150 m. de carga de agua. No pudo evitarse el cruce de un paleocanal relleno de arenas albenses.

En la Fig. 1-2 debida a García Yagüe (1978) se muestran las diferentes trazas del túnel y los perfiles geológicos dibujados sucesivamente. Obsérvese la notable evolución del conocimiento del terreno en toda su complejidad.

2. PERSONAS QUE INTERVIENEN EN UN RECONOCIMIENTO

Un buen estudio requiere la participación de especialistas competentes. Véase, como ejemplo, la Tabla siguiente incluida en la Recomendación SI 199 sobre «Estudio del macizo rocoso para los trabajos subterráneos».

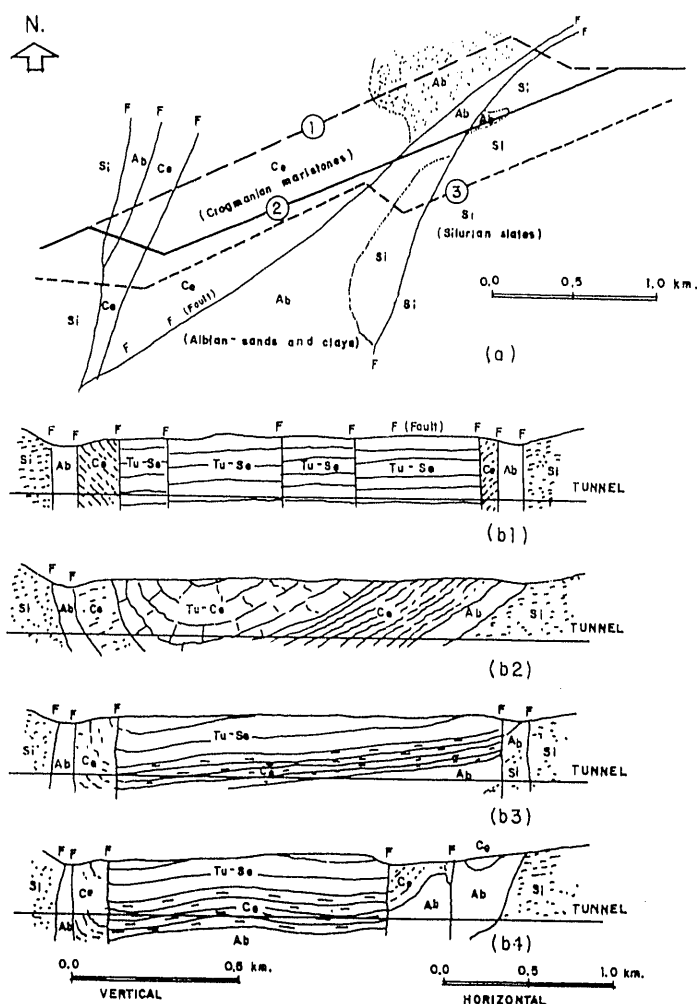


Fig. 1-2.—Geología del túnel de las Nieves (Santander). (a) planta. (b1) perfil de proyecto. (b2) perfil corregido. (b3) perfil real por traza 1. (b4) perfil real por traza 2. (1) traza prevista. (2) traza construida. (3) traza optima. Materiales. F: falla. Si: pizarra silúrgica. Ab: arena albense. Ce: margas cenomanenses. Tu-Se: calizas turonenses-senonenses.

PLANIFICACION DE RECONOCIMIENTOS PARA EXCAVACION DE TUNELES EN ROCA

ATRIBUCIONES DE TAREAS A LOS ESPECIALISTAS

	Geo- logo	Geo- tecnico	Proyec- tista	Direc. de obra	Empresa espe- cialista
ESTUDIOS					
PRELIMINARES					
Geología general (a)	XX	—	X	—	—
Previsión geotéc- nica (b) (basado en a y experiencia).	X	XX	X	—	—
Programa de son- deos (c)	XX	XX	X	X	X
Ejecución de son- deos (d)	XX	XX	—	X	XX
Reconocimiento geotécnico (e)	X	XX	X	—	—
Interpretación geo- lógica (f)	XX	X	X	(X)	—
Interpretación geo- técnica (g)	X	XX	X	(X)	—
Informes (h)	XX	XX	X	—	—
PROYECTO (i)	X	X	XX	—	X
EJECUCION					
Ejecución de obra (k)	X	X	X	XX	XX
Control geotécnico (l)	X	XX	X	X	(X)
Adapt. proyecto (m)	X	X	XX	X	X
Infor. geológ. final (n)	XX	X	—	X	X

X Participación como asesor.

XX Tarea principal.

(X) Participación eventual.

donde se indican, con minuciosidad suiza, las atribuciones de los distintos especialistas durante las diferentes fases del trabajo de un túnel.

Para realizar bien el reconocimiento de un túnel debemos encontrar los siguientes «papeles» (definimos «papeles» y no «personas» puesto que con frecuencia una misma persona efectúa dos o más «papeles»):

- Geólogo.
- Hidrogeólogo.
- Geotécnico.
- Autor del proyecto.
- Director de obra.
- Asesor-consultor.

Un Hidrogeólogo especializado sólo es necesario cuando el túnel discurre bajo el nivel freático, en formaciones acuíferas. Normalmente el Geólogo cubre este campo.

Muchas veces el Geólogo y el Geotécnico son la misma persona. Si el Geólogo tiene amplia experiencia en túneles, y conocimientos de geotecnia, desempeñará bien los dos papeles. Pero con frecuencia el Geólogo y el Geotécnico tienen funciones claramente distintas y desfasadas en el tiempo. En tú-

neles complejos, con problemas, un simple reconocimiento geológico, aunque esté bien realizado, no puede contestar cuantitativamente las cuestiones planteadas por el proyecto. En el mundo crece la tendencia a la intervención simultánea de ambos especialistas, Geólogo y Geotécnico.

La identidad entre Autor del proyecto y Director de obra tiende a desaparecer. La ventaja de una mayor especialización de cada uno en su cometido puede verse contrarrestada si hubiera falta de coordinación e incluso divergencia de puntos de vista.

La figura del Consultor o Asesor se está extendiendo. Su función es la de intervenir en las diferentes fases del proceso revisando los trabajos realizados, criticándoles y aportando, con base en su experiencia, consejos y sugerencias. No hay ya proyecto internacional importante donde no aparezca.

El Proyecto y Construcción de un túnel deben ser realizados en equipo, equilibradamente. Es mala la situación en la que «un hombre fuerte», un ingeniero de prestigio y con plena autoridad en la organización, tome decisiones que nadie discute y se convierten en dogma de fe. Con frecuencia aparecen condiciones o circunstancias imprevistas, que no son tenidas en cuenta hasta que producen resultados desastrosos. Se trata de una situación bastante frecuente.

Pero el caso totalmente opuesto también es malo. Nadie decide que debe hacerse y empieza a desfilar una colección de «especialistas», cada uno de los cuales realiza estudios y aporta soluciones individuales e independientes de las demás. A veces la Administración espera que del mero contraste de pareceres surja de manera automática una solución y se pueda evitar así la elección entre distintas opciones y, en definitiva, la asunción de responsabilidades. Y eso nunca ocurre.

En definitiva ni «hombre fuerte» ni «orquesta sin director». Es necesario un equipo coordinado de diferentes especialistas que siguiendo un plan común, previamente trazado, elaboren un estudio, también común. Ese equipo debe estar coordinado por una persona: el autor del proyecto.

3. FASES DE RECONOCIMIENTO

Para el proyecto de un túnel deben considerarse las siguientes fases:

- Estudio previo.
- Anteproyecto.
- Proyecto.

El objetivo del Estudio Previo es la búsqueda de la traza más conveniente. Las condiciones funcionales vendrán determinadas por el tipo de túnel y nos darán más o menos libertad de trazado. Así un túnel ferroviario o de autopista sólo permiten curvas de gran radio en planta mientras que un túnel hidráulico en lámina libre puede tomar curvas con radios más reducidos. Los túneles carreteros con pendiente, exigen tramos de recuperación, antes de las bocas, que permitan un buen régimen a los vehículos que lo atraviesen. Pero siempre queda un margen de libertad de trazado y es preciso utilizarlo para evitar las dificultades graves. La línea más corta no siempre es la más barata (Recuérdese la frecuente disposición de túneles en vaguadas-falla).

El objetivo fundamental del Anteproyecto es definir la viabilidad de la obra y permitir su valoración aproximada. Por lo tanto es preciso resolver en el Anteproyecto las cuestiones fundamentales: tipos de terreno a atravesar, métodos de excavación y revestimiento a emplear, ataques intermedios (bocas, ventanas, pozos), drenaje, tratamiento de los accidentes principales a atravesar, etc.

Por último al nivel del Proyecto hay que definir la obra con todo el detalle posible respecto a cada uno de los elementos que integran el proceso de construcción: excavación, sostenimiento provisional, revestimiento definitivo, boquillas, instalaciones, etc., y prever, si es posible, todos los problemas que puedan aparecer y su solución. Hay que mencionar expresamente la previsión de los daños causados por la excavación del túnel al entorno y a las construcciones próximas.

Las tres fases de proyecto determinan tres fases de reconocimiento con objetivos diferentes que se resumen en el siguiente cuadro.

NIVELES DE RECONOCIMIENTO

Fase de proyecto	Objetivo	Técnica clave
Estudio previo	Elegir traza	Geología
Anteproyecto	Visión general	Geotecnia
Proyecto	Estudio detallado	Técnica de túneles

4. ESTUDIO PREVIO

4.1. Estudio geológico

Inicialmente hay que alcanzar un conocimiento general de la geología de la zona, lo que permitirá programar sensatamente los reconocimientos posteriores. Se utilizarán:

- Los mapas geológicos generales existentes (¡ojo! no siempre son veraces).
- Una interpretación fotogeológica a escala amplia (de 1: 10.000 a 1: 35.000, según las fotografías disponibles) dirigida fundamentalmente a obtener el relieve general, las fallas y/o accidentes (con frecuencia difíciles de ver en el terreno) y las correspondientes unidades geológicas.
- Un reconocimiento de campo en el que se levante un plano de los afloramientos y se anoten algunos importantes detalles complementarios (estabilidad de taludes, diaclasado, meteorización, surgencias de agua, escombreras...).

El estudio se extenderá a una banda amplia que cubra todos los trazados posibles y conviene que sea comprobado por otro geólogo (o equipo) diferente a fin de contrastar las hipótesis geológicas básicas.

A partir de los resultados de la etapa inicial es preciso determinar claramente la tipología de los terrenos. Para ello se emplearán algunos sondeos, pozos, trincheras, catas para aclarar los puntos oscuros y se realizará una cartografía de campo detallada:

Si el tipo de terreno aconseja una exploración geofísica general este suele ser el momento adecuado (¡ojo! no conviene abusar; luego hay que saber interpretarla).

Se presentará:

- Un plano geológico de superficie con inclusión de todos los afloramientos indicando su validez (reales o supuestos).

- Un esquema estructural de la zona con indicación de fallas y accidentes generales y de las direcciones predominantes de diaclasado.
- Una columna estratigráfica.
- Un plano geológico a la cota del túnel que servirá para decidir el trazado. La facilidad para realizar este plano depende mucho de la complicación estructural de la zona. A veces será fácil (terrenos sedimentarios poco plegados) y a veces muy difícil (terrenos metamórficos fracturados). Sea cual sea su dificultad debe recordarse que para una elección válida de traza es preciso conocer el terreno, precisamente a la cota del túnel.

4.2. Estudio hidrogeológico

Su objetivo es determinar los acuíferos (libres o cautivos, generales o colgados) y las formaciones impermeables (para ayuda a la elección de traza) y el régimen general de circulación de aguas. Para ello se realizará:

- Inventario de datos existentes como Estudios de Recopilación y Síntesis del S.G.O.P., partes del programa PIAS del IGME o estudios regionales de cualquier tipo.
- Inventario de datos de campo dirigido al registro de pozos y fuentes.
- Estudio de los datos hidrológicos de los ríos que cruzan la zona.

Se presentará:

- Un plano de isopiezas (o curvas de nivel de la superficie freática) a la misma escala que el plano geológico de superficie, en el que se indicarán las direcciones del flujo del agua.
- Un plano indicando los accidentes hidrogeológicos (barreras impermeables, formaciones karsticas, procesos de disolución, etc.).

4.3. Estudio geotécnico

En esta fase sólo será posible analizar los aspectos más generales, trabajando en muchos casos sin tener aún clara la geología.

En primer lugar se estudiarán cuidadosamente todos los posibles antecedentes de obras subterráneas más o menos próximas, analizando todos los problemas de construc-

ción y visitándolas detalladamente. Aún si el acceso al interior no es posible (como por ejemplo en una galería hidráulica en servicio) deben examinarse las escombreras, las bocas y el terreno situado sobre el antiguo túnel.

Además se realizará una clasificación sumaria de los principales terrenos atravesados utilizando alguno de los métodos de clasificación más conocidos (Bienawski, Lauffer, Barton) para tratar de establecer ideas generales sobre la facilidad o dificultad de excavación.

5. ANTEPROYECTO

5.1. Labores de reconocimiento

Su objetivo es el estudio detallado de la traza escogida para servir de apoyo al proyecto del túnel (método de excavación, revestimientos primario y secundario, bocas, instalaciones, etc.), y prever con la mayor precisión posible las incidencias durante la construcción.

A este nivel de reconocimiento, donde se produce el máximo coste, se pueden emplear muy diferentes métodos (sondeos mecánicos, sondeos eléctricos, diagrfias, ensayos hidráulicos, ensayos mecánicos, galerías de reconocimiento, etc.).

En cualquier caso es preciso que el empleo de los métodos escogidos obedezca a un plan concreto, detallado, establecido conjuntamente por el geólogo y el geotécnico. El plan tiene que ser:

- *Concreto*, definiendo el objetivo de cada labor y su alcance.
- *Progresivo*, estableciendo un orden de trabajo que permita aclarar sucesivamente las dudas planteadas en el estudio previo.
- *Dinámico*, con controles incorporados para permitir su modificación en función de los resultados parciales obtenidos.
- *De calidad*, con definición detallada de las condiciones de ejecución de las diferentes labores, sistemas de pago y métodos de supervisión.

Todo ello exige una gran coordinación entre quienes trazan el plan (geólogo y geotécnico), quienes lo ejecutan (normalmente una empresa especializada) y quienes lo

controlan y pagan (propietarios y/o proyectistas). El control de campo es clave, no sólo para obtener la calidad de exploración exigida, sino sobre todo para permitir una aplicación dinámica del plan previsto.

5.1.1. Sondeos mecánicos

Normalmente se ejecutan sondeos verticales, más simples y baratos, en las bocas y en aquellos puntos donde el recubrimiento es menor. Para reconocer fallas y accidentes verticales son necesarios los sondeos inclinados, más caros y difíciles, que también son útiles cuando se desea reconocer una serie de estratos subverticales o de gran buzamiento. Los sondeos inclinados de gran longitud (~200 m.) tienen tendencia a incurvarse hacia abajo por lo que conviene verificar su linealidad. Pueden emplearse sondeos horizontales en las bocas y a partir del fondo de las galerías de reconocimiento, pero suelen resultar más caros y difíciles de ejecutar (Fig. 5.1.1.-1).

Para la ejecución se suele exigir la perforación a rotación con tubo doble (o triple) y extracción total de testigo. Con esta técnica el rendimiento no es alto (menos de 10 m/día) y el coste es elevado.

En el registro del sondeo deben anotarse todas las incidencias de perforación y la longitud perforada diaria.

Debe prestarse especial interés a los datos hidráulicos, midiendo y anotando el nivel de agua al principio y al final de cada jornada de trabajo, registrando las pérdidas de agua, realizando ensayos de inyección de agua por gravedad (tipo Lefranc) o a presión (*) (tipo Lugeon) y finalmente dejando en el sondeo tubería piezométrica para el registro continuo de niveles.

Las muestras deben guardarse en cajas de madera (o plástico) donde se anoten número

(*) Sus resultados no son confiables en la zona superior meteorizada del terreno si la presión excede del peso del terreno.

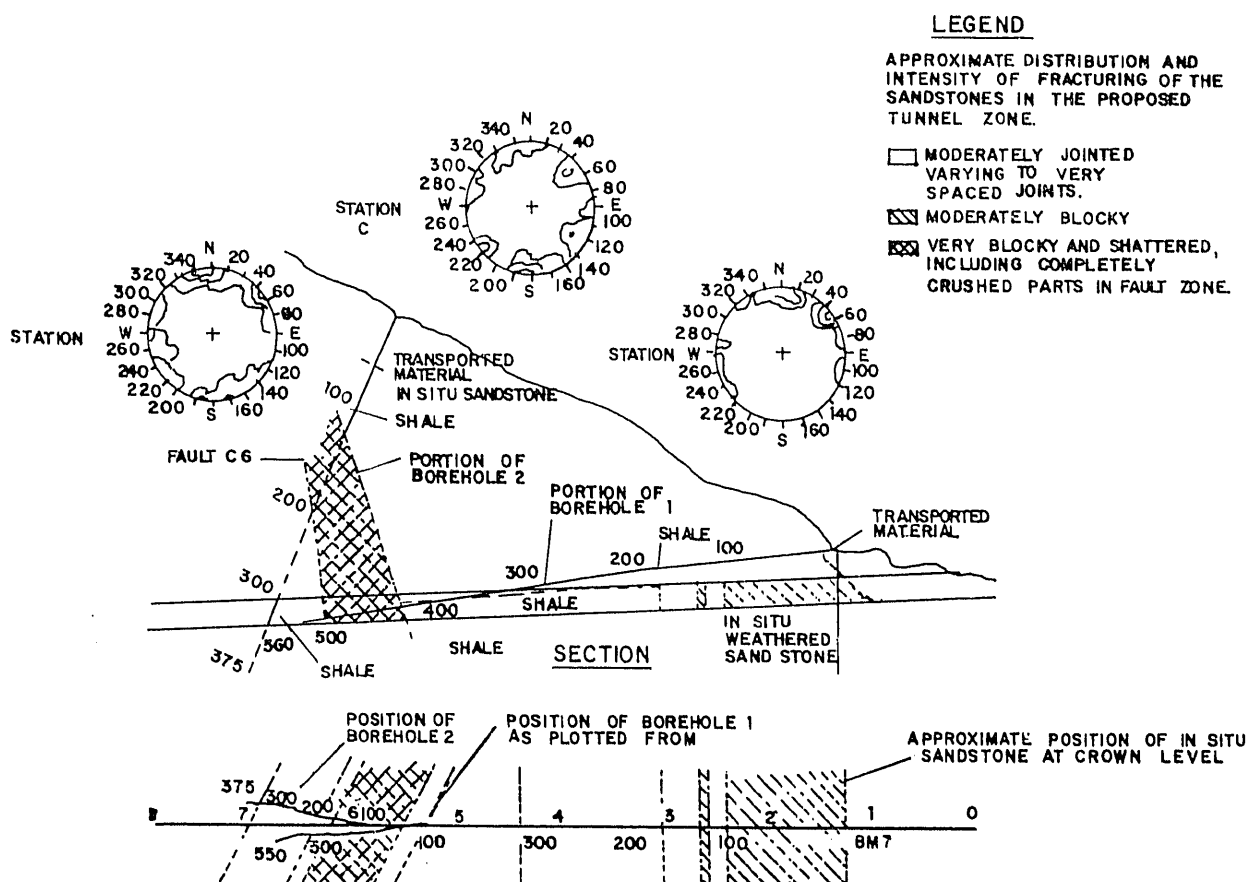


Fig. 5.1.1.-1.—Túnel de Boyes Drives. Reconocimiento con sondeos inclinados y subhorizontales (según Mountain y Kantey, 1970).

de sondeo y caja, profundidades de perforación, muestras enviadas a laboratorio, etc. Dichas cajas se almacenarán ordenadamente en litotecas durante todo el período de ejecución de la obra.

El registro debe incluir:

- % de recuperación.
- RQD (% de recuperación de trozos de testigo de longitud superior a 10 cm.) que resulta un dato objetivo sobre la calidad de las rocas ígneas y/o masivas y un buen índice en rocas metamórficas o sedimentarias muy diaclasadas.
- Grado de alteración/meteorización según alguna escala definida (como la de la Sociedad Geológica Inglesa, casi universalmente admitida).
- Competencia de la roca estimada por el supervisor del sondeo o mejor medida mediante ensayo con el Esclerómetro tipo Schmidt o con máquina de compresión puntual («point-load») tipo Franklin.

Todas estas determinaciones deben realizarse a pie de sondeo y por técnico competente.

Los registros de sondeo se acompañarán con fotografías en color de las cajas de testigos.

Es conveniente guardar también el detrito de perforación en las zonas de recuperación baja.

El registro geofísico de sondeos (o diagráfia) completa la información obtenida. Puede medirse la resistividad y potencial espontáneo del terreno en sondeos no entubados. La variación del diámetro del sondeo es un buen índice de la dureza de las formaciones. El interior del sondeo puede ser fotografiado y observado mediante una cámara de televisión (procesos lentos que a menudo dan resultados pobres). En sondeos entubados pueden hacerse registros mediante rayos. Las diagráfias son especialmente útiles en terrenos heterogéneos en resistencia y permeabilidad y permiten determinar con precisión los acuíferos.

5.1.2. Sondeos geofísicos

La geofísica puede dar un suplemento de información si está bien interpretada y se correlaciona con la información geológica y

de sondeos disponible. Las campañas deben ser moderadas y con programas definidos de acuerdo con la información disponible.

Los métodos más adecuados dependen de la profundidad a explorar: Sondeos eléctricos verticales (S.E.V.) para profundidades inferiores a 200 m. y sísmica de reflexión para profundidades superiores a 150 m. La sísmica de refracción sólo es útil en superficie, pero puede suministrar buenas informaciones puntuales sobre el espesor del macizo decomprimido en las bocas, la profundidad de alteración en las vaguadas...

5.1.3. Calicatas, trincheras y pozos

Se trata de métodos de reconocimiento que permiten un acceso directo al terreno, con observación visual, toma de muestras, ensayos in situ, etc. Suelen ser de coste reducido por lo que es recomendable su utilización como complemento a una campaña de sondeos y para el estudio de las bocas.

Las trincheras o zanjas largas permiten aclarar la sucesión estratigráfica en terrenos cubiertos por la vegetación, o reconocer las zonas alteradas a los lados de un contacto o accidente tectónico.

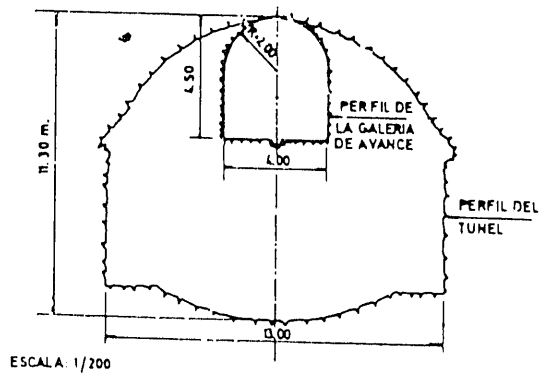
Los pozos sirven para reconocer el estado de la roca cuando el espesor de suelos residuales no es muy grande.

Cualquier labor de reconocimiento debe ser fotografiada, descrita y registrada con detalle; con toma de muestras de los estratos característicos.

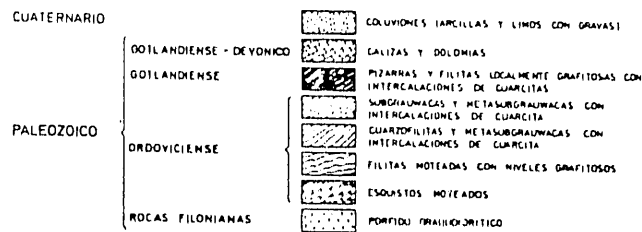
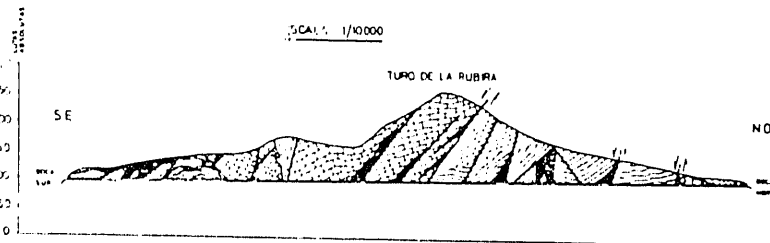
5.1.4. Galerías de reconocimiento

No cabe duda de que la galería de reconocimiento es el mejor método para el acceso directo al interior del terreno y puede aclarar totalmente la geología del macizo. En el túnel urbano del Turó de la Rubira (Barcelona) se perforó una galería previa. En la Fig. 5.1.4.-1 aparece la situación de la galería dentro del perfil del túnel, la complicada geología que no hubiera sido posible determinar con tanta precisión sin la galería y un resumen esquemático del registro de la galería realizado por Vidal Font (1974).

Sin embargo, una galería no es el método más adecuado para el reconocimiento porque:



(a)



(b)

LEYENDA

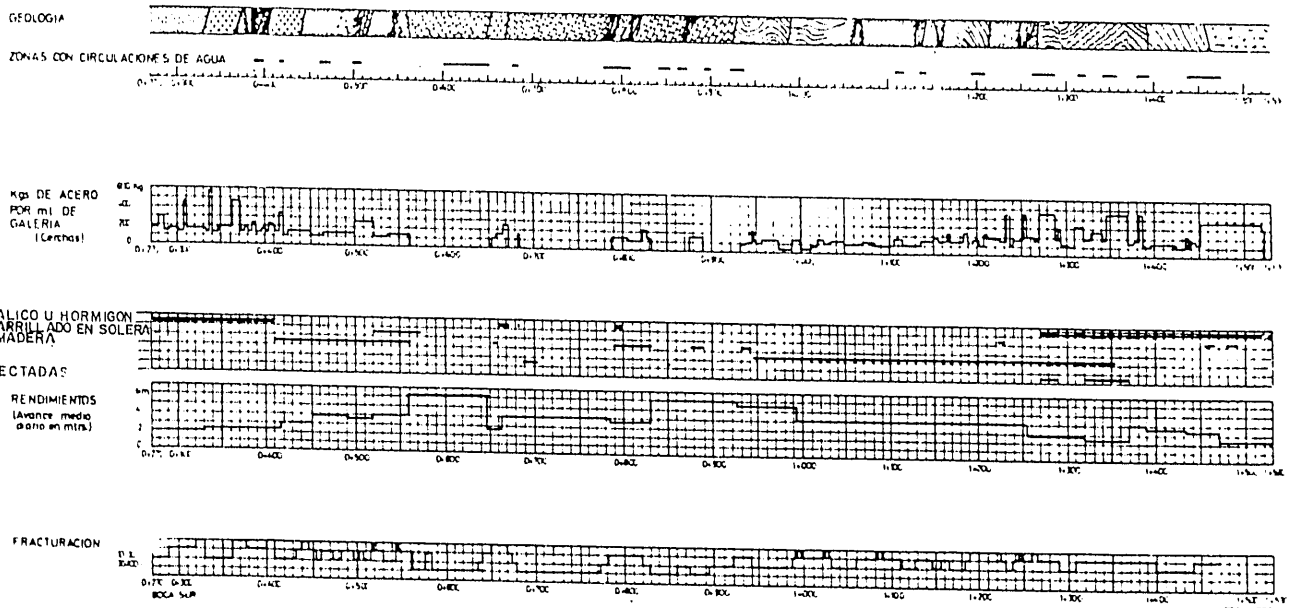
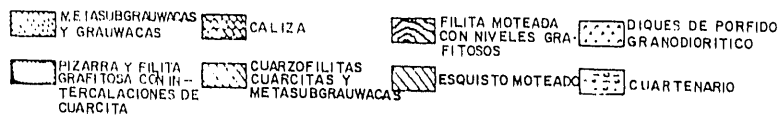


Fig. 5.1.4.-1.—Túnel del Turó de la Rovira (Vidal Font 1974). (a) situación de la galería de reconocimiento. (b) perfil geológico. (c) levantamiento geológico de la galería.

- Es cara.
- Su excavación es lenta (menos de 2,5 m/turno).
- Presenta problemas de sostenimiento mucho menores que el túnel real.
- Atraviesan fácilmente fallas y accidentes que para el túnel suponen obstáculos importantes.
- Finalmente la galería puede inducir al proyectista a prescindir de los demás métodos produciendo una falsa seguridad en el conocimiento del terreno.

La ubicación de la galería dentro del perfil suele ser la clave del túnel. Ello es malo porque la excavación de la galería (normalmente con voladuras no controladas) afloja y decompone el terreno en clave donde más se necesita la resistencia a tracción. Por ello en bastantes casos (túneles del Turó de la Rovira en Barcelona, túnel del Turumo en Caracas...) ha sido preciso detener la excavación del túnel para consolidar el terreno que rodeaba la galería, lo que produjo gastos y retrasos importantes. El problema se agrava por la tendencia de la galería, mal replanteada, a «subir».

El «Centro de estudio de los Túneles» francés (CETU, 1976) recomienda la ubicación en la parte central de un túnel único o en el eje de una pareja de túneles lo que favorece el drenaje previo de la excavación. Ver Fig. 5.1.4.-2.

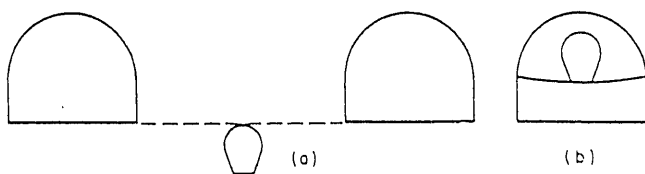


Fig. 5.1.4.-2. Situación óptima de la galería de reconocimiento según el CETU (1976). (a) doble túnel, (b) túnel único.

Cuando la galería se construye fuera de la sección del túnel (como en el caso del nuevo túnel de S. Gotardo) puede tener ventajas adicionales (HACAR, 1974).

- Contribuye a la ventilación de obra.
- Facilita la evacuación del escombro (con una cinta por ejemplo).
- Permite hacer tratamientos del terreno (drenajes, inyecciones, cosidos) en puntos difíciles antes de la llegada del túnel principal.

- Puede dejar conducciones (agua, electricidad, aire, teléfono) tanto durante la obra como en explotación.
- Como túnel auxiliar durante la explotación ayuda al mantenimiento y reparación.
- Puede servir como túnel de socorro.
- Finalmente puede ser un elemento de partida para la construcción, por ensanche, de un segundo túnel cuando las necesidades (tráfico, abastecimiento) lo exijan.

Para todo ello es preciso que la galería esté integrada en el proyecto con estudio previo de su forma y dimensiones y de los enlaces con el túnel.

La decisión de construir una galería no debe tomarse a la ligera y nunca como método para postergar decisiones de proyecto. Su coste y posibles utilidades posteriores serán sopesadas contra las ventajas iniciales. Normalmente la galería completa no se justifica. Pero para el estudio de las bocas una galería de reconocimiento de 50-100 m. de longitud es muy útil, especialmente en zonas donde se sospeche la alteración y/o fracturación de las capas superficiales.

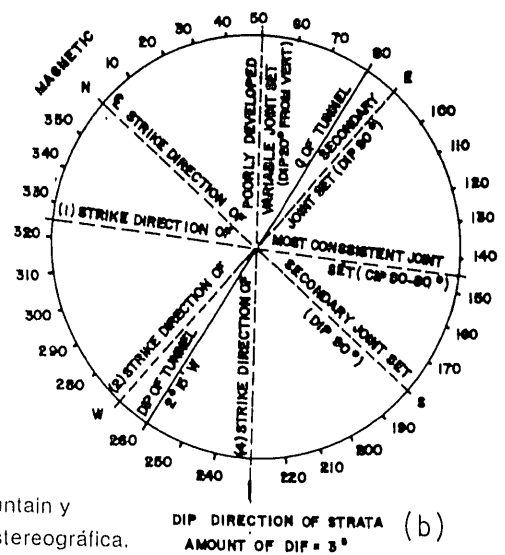
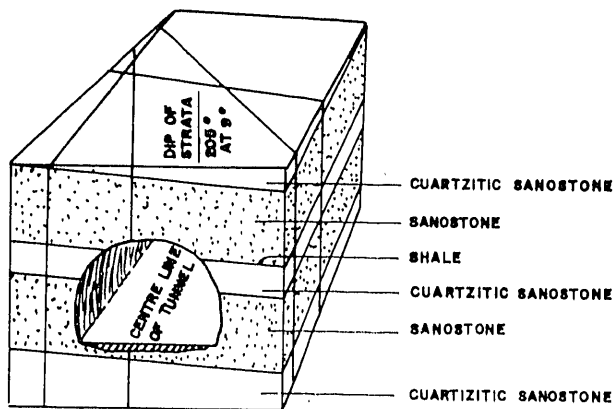
5.2. Estudio geológico

Su objetivo es el levantamiento fidedigno del perfil geológico del túnel integrando todos los datos obtenidos con la campaña de reconocimientos.

Se prestará especial atención a la previsión de todos aquellas zonas que puedan causar problemas de construcción:

- Fallas y contactos mecánicos.
- Zonas tectonizadas (shear-zones).
- Zonas alteradas en profundidad (ojo con las vaguadas).
- Corrimientos y deslizamientos (activos, dormidos o fósiles).
- Paleocauces.
- Cavernas de disolución (calizas, yesos).
- Zonas microkarstificadas o dolomitizadas.
- Rocas alterables, solubles o expansivas.

Se realizará un levantamiento detallado de diaclasas a lo largo de la traza. Los resultados se presentarán en forma de bloque diagrama.



(a) Fig. 5.2-1.—Túnel de Boyes Drive. Fracturación (Mountain y Kantey 1970). (a) bloque diagrama, (b) proyección estereográfica.

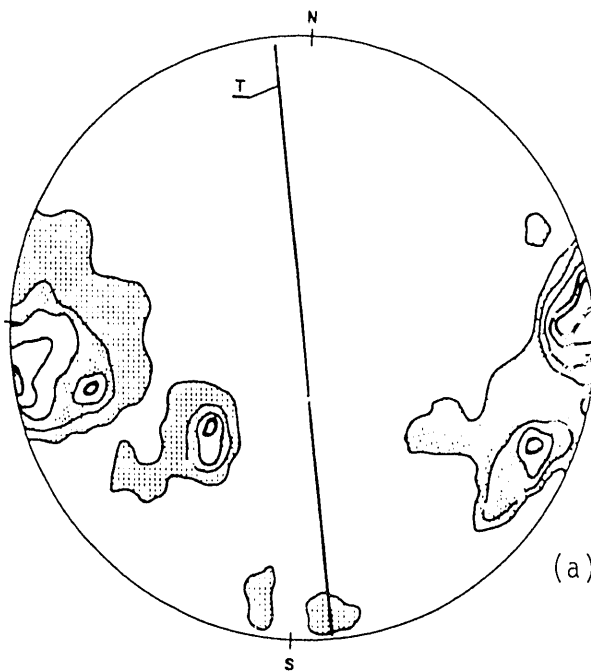
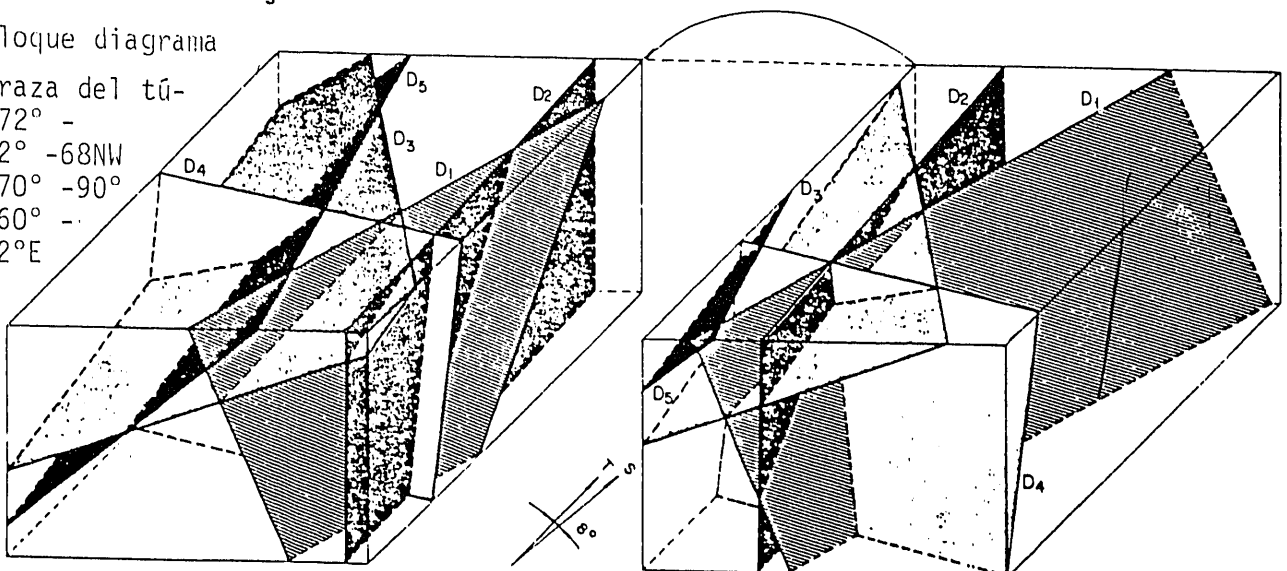


Fig. 5.2-2.—Túnel de Jeresa. Fracturación (Alvaro, Pavón y Portillo, 1974).

(a) diagrama de SCHMIDT (áreas 2-3%, 3-4%, 5-6%, > 6%)

(b) bloque diagrama

(T: traza del túnel 172° -
D₁: 22° -68NW
D₂: 170° -90°
D₃: 160° - 52°E



La Fig. 5.2.-1 muestra un ejemplo que corresponde al túnel Boyes Drives en la Ciudad del Cabo (Mountain y Kantay, 1970) y la 5.2.-2 otro correspondiente al túnel de Jeresa en España (Alvaro, Pavón y Portillo, 1974).

En el informe es preciso definir bien litológica y tectónicamente todos los terrenos y todos los accidentes que el túnel vaya a atravesar e integrar los resultados de las labores de reconocimiento.

Se presentarán planos a la escala más detallada disponible, que generalmente oscilará entre 1: 10.000 y 1: 1.000.

Será necesario un estudio detallado de las bocas (donde posiblemente el terreno estará decomprimido, fracturado y más alterado) a escala 1: 500 ó 1: 1.000.

Realmente en la fase de anteproyecto deberían acabarse los estudios geológicos para disponer así de toda la información necesaria. Pero normalmente los sondeos, y otras labores de reconocimiento, se retrasan y el estudio geológico debe continuar durante la fase de proyecto y aún durante la obra.

En cualquier caso es preciso asegurar la posibilidad de realizar un control geológico durante la excavación del túnel para contrastar y actualizar los estudios realizados con los terrenos realmente atravesados por el túnel.

5.3. Estudio hidrogeológico

Su objetivo consiste en valorar, tan cuantitativamente como sea posible, los aportes de agua al túnel durante su construcción (régimen variable) y explotación (régimen permanente) y el riesgo de accidentes debidos a venidas bruscas de agua. Esta es probablemente la parte más difícil del estudio de un túnel, pero su importancia durante la construcción justifica cualquier esfuerzo.

Las tareas incluidas serán las siguientes:

- Revisar y completar el inventario de puntos de agua indicando para cada uno nivel del agua, litología de los acuíferos, transmisividad calculada a partir de datos de bombeo, datos sobre calidad química de las aguas.
- Hacer un inventario especial de las circulaciones subterráneas (zonas de infiltración, zonas endorreicas, karsts,

aguas termales...) intentando cuantificar los flujos de agua.

- Analizar todos los acuíferos de la zona cuantificando sus características hidrogeológicas.
- Establecer un balance o balances hídricos globales *antes* de la construcción del túnel.
- Estudiar las características químicas de las aguas de la zona.
- Finalmente cuantificar los flujos de agua hacia el túnel.

Tanto el ancho como la intensidad del estudio dependen de las condiciones locales y no deben darse reglas generales. La experiencia enseña que con más de 100 m. de carga de agua se corre el riesgo de grandes venidas (graves a partir de 200 m.) en terrenos permeables y/o fracturados. Pero en zonas poco tectonizadas los terrenos tienden a hacerse muy poco permeables en profundidad.

Se presentará un plano de inventario y otro de isopiezas a la misma escala adoptada para el estudio geológico.

5.4. Estudio geotécnico

En esta fase deberían definirse cualitativa y cuantitativamente todos los materiales a atravesar.

Existe una tendencia creciente al uso de clasificaciones geotécnicas del terreno. Ninguna de las existentes tiene, hoy día, un consenso universal. Todas se basan, como es natural, en los mismos datos geotécnicos:

- Recuperación y R.Q.D.
- Resistencia mecánica de la matriz.
- Frecuencia de diaclasas. Número de familias.
- Tipo, relleno, continuidad y separación de las diaclasas.
- Nivel de tensiones.
- Características hidrogeológicas.

El tipo de clasificación escogido influirá notablemente en la planificación de las labores de reconocimiento y sobre todo en la lista de ensayos a ejecutar. Pero debe tenerse en cuenta que no basta con los parámetros geotécnicos de clasificación rocosa, puesto que luego un buen proyecto exigirá

determinaciones más precisas. La definición de los terrenos afectados deben incluir:

- Identificación geológica.
- Permeabilidad.
- Alterabilidad.
- Resistencia mecánica y deformabilidad.
- Comportamiento reológico a largo plazo.

lo que en muchos casos exige ensayos cuidadosos de laboratorio que después deben ser extrapolados al comportamiento del macizo.

Como con frecuencia los sondeos continúan durante la fase de proyecto, esta parte del estudio geotécnico suele continuar también. Pero sería deseable que en este momento del reconocimiento se disponga de casi toda la información cuantitativa geotécnica.

El estudio geotécnico, orientado a definir los métodos de ejecución tendrá varias partes:

- a) Análisis de la perforabilidad mecánica de cada terreno (dureza, contenido en sílice, resistencia mecánica, fracturación).
- b) Problemática de la excavación (partición de la sección, estabilidad del frente, techo y hastiales, ritmo de alteración de los terrenos).
- c) Estimación de las venidas de agua y/o de las filtraciones regulares.
- d) Métodos de sostenimiento recomendables y reglas para fijar la distancia al frente y ritmo de ejecución de los sostenimientos.
- e) Métodos de revestimiento recomendables.

6. PROYECTO

6.1. Labores de reconocimiento

Además de continuar, y terminar, los reconocimientos en curso, es preciso dedicar atención en esta fase a un reconocimiento detallado de las bocas, pozos, cámaras de ventilación o de compuertas, estructuras de toma, etc., que están situados próximos a la intersección del túnel con la superficie del terreno, donde la alteración, meteorización y compresión serán más grandes.

Se utilizarán sondeos mecánicos, y calicatas o pozos que pueden complementarse

con geofísica, útil para definir los espesores alterados. En general los reconocimientos no serán profundos. A veces pueden aparecer dificultades de acceso al emplazamiento que no deben utilizarse como excusa para no reconocerlo.

Si el estudio del túnel requiere determinaciones del estado de tensiones de la roca este es el momento de realizarlas. Usualmente se utilizan métodos de relajación de tensiones en sondeos (con sobreperforación) o en las paredes de cámaras (con gatos planos) para restablecer el estado inicial de deformaciones. Sin embargo, es recomendable el uso de métodos de fracturación hidráulica, mucho más simples, y que pueden repetirse en sondeos a gran profundidad. No es frecuente que este tipo de estudios se realice para túneles, aunque para construcción de cavernas y para minería presentan mucho más interés.

La deformabilidad (y resistencia) del macizo pueden determinarse con grandes ensayos de placa de carga (o de corte directo) «insitu», menos frecuentes en túneles que en presas. Complemento y/o sustitución de los ensayos de placa es el dilatómetro que mide la deformación, bajo carga, de las paredes de un sondeo. El gato de Goodman, que transmite la carga mediante dos sectores circulares rígidos, es cada día más utilizado en el mundo.

6.2. Estudio geotécnico

El primer objetivo del estudio geotécnico en fase de proyecto es el diseño detallado del revestimiento. Ese diseño puede ser empírico, en base a la experiencia en túneles similares, utilizando colecciones de revestimientos tipo o previendo secciones experimentales instrumentadas (poco usual). En ese caso es la experiencia del geotécnico la que cuenta sobre todo. Pero si se van a utilizar métodos de cálculo es preciso que sus bases reflejen correctamente las propiedades del terreno. Según el método utilizado será necesario estimar con la mayor precisión posible:

- Módulo de reacción del terreno frente a empujes del revestimiento.
- Módulos de deformación volumétrica y transversal del terreno.
- Límites de plastificación del terreno y

comportamiento (frágil, dúctil, viscoso) tras esa plastificación.

Es preciso prestar atención y cuantificar efectos que pueden tener gran importancia para la obra (aunque no se den regularmente) tales como:

- Expansividad del terreno.
- Existencia de tensiones tectónicas horizontales superiores a las gravitatorias.
- Erosionabilidad de los materiales.

El segundo objetivo es el análisis de las bocas y otras estructuras especiales. Debe incluir:

- Estudio de los problemas de estabilidad de taludes en base a inventarios de campo de taludes en materiales similares y a análisis de estabilidad.
- Definición del punto de emboquille.
- Estudio del revestimiento necesario en la zona de emboquille.
- Estudio de la cimentación de las obras complementarias (si las hay).

6.3. Efectos antrópicos

No debe olvidarse que la acción antrópica ha actuado intensamente sobre toda la corteza terrestre. Un túnel puede verse afectado (y con frecuencia lo es) por otras actuaciones previas humanas.

Un reconocimiento completo debe incluir:

- Inventario de cavidades artificiales (otros túneles o galerías, depósitos, refugios antiaéreos, etc.)
- Inventario de cimentaciones en la zona (por ejemplo la línea de las Rondas del Metro de Barcelona discurre paralela al trazado de la antigua muralla medieval. Uno de los túneles tuvo que atravesar las cimentaciones de todas las torres).
- Inventario de posibles fuentes de agua

(conducciones, depósitos, piscinas, alcantarillas, etc.)

- Inventario de instalaciones de gas y electricidad (por ejemplo la línea del Metro madrileño que recorre el tercer cinturón sufrió una venida de agua en el frente con arrastres y socavones que a su vez dañaron una conducción de gas próxima a una galería con cables eléctricos y telefónicos. Se produjo una serie importante de explosiones que, por fortuna sin víctimas, ocasionaron graves daños).
- Inventario de posibles contaminaciones con hidrocarburos a causa de surtidores, conducciones, tanques depósitos (por ejemplo la línea del Metro de Barcelona Correos-Maresme se excavaba con ayuda de well-points para rebajar el nivel freático. A la altura de la antigua fábrica del gas las bombas empezaron a aspirar una bolsa de petróleo y el incendio resultante destruyó más de 300 m. de túnel).

7. PRESENTACION DE RESULTADOS

Es general el requisito de presentar los resultados en perfiles detallados. A título de ejemplo se presentan tres casos concretos:

- Ejemplo de perfil geológico con información geotécnica detallada que aparece en la norma suiza SIA (1975). Fig. 7-1.
- Ejemplo de perfil geológico con recomendaciones de construcción que aparece en el «Dossier pilote des tunnels» editado por el CETU (1976). Fig. 7-2.
- Ejemplo de perfil geológico-geotécnico tomado de la práctica española. El túnel de Martorell es un túnel ferroviario de vía doble y casi un kilómetro de longitud (Portillo, Romana y Cedrún, 1981). Fig. 7-3.

PLANIFICACION DE RECONOCIMIENTOS PARA EXCAVACION DE TUNELES EN ROCA

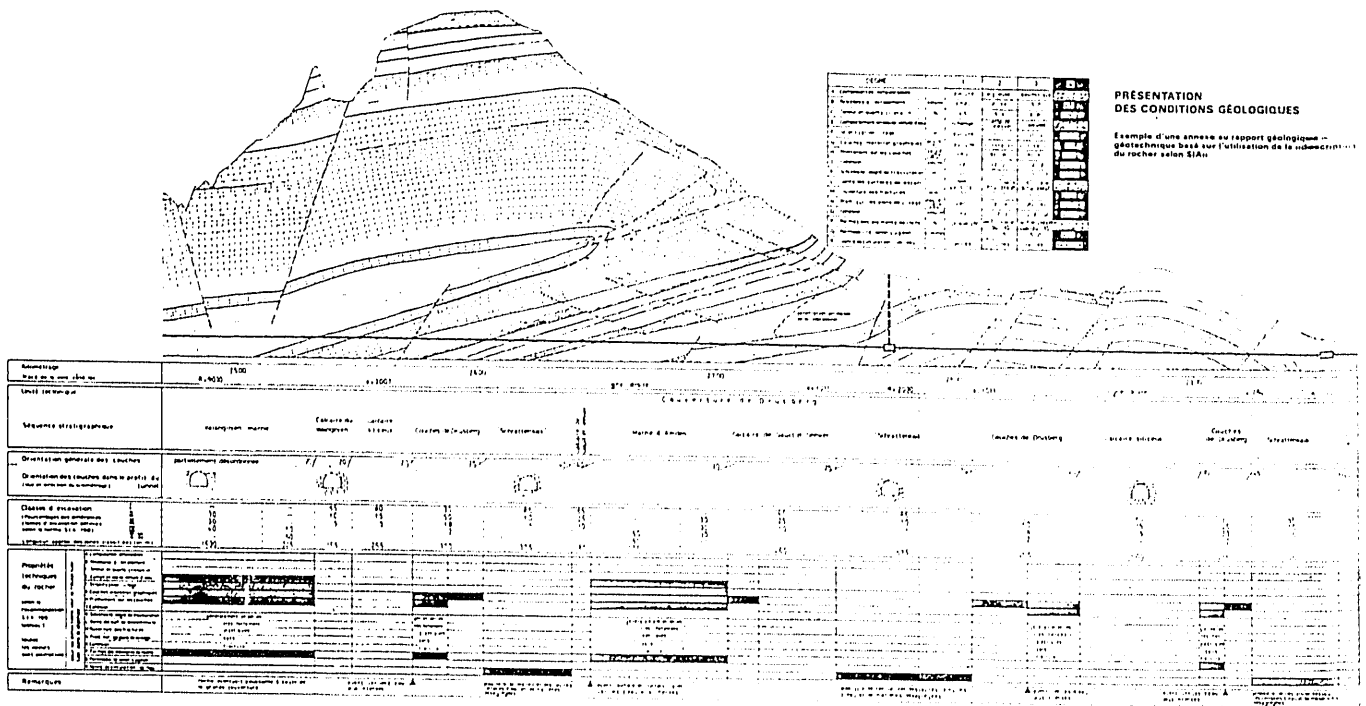
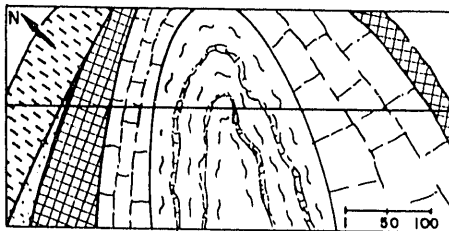
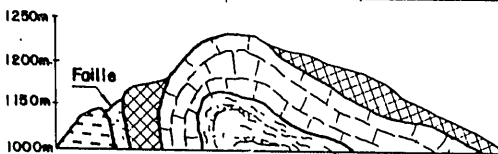


Fig. 7.1.



PLAN GEOLOGIQUE A
LA COTE DU TUNNEL



PROFIL EN LONG

PRESENTATION DES RESULTATS D'UNE ETUDE GEOLOGIQUE

p.m.		0 a 70	70 a 90	90 a 125	125 a 175	175 a 350	350 a 500	
Description lithologique		Calcaire en plaquettes	Zone broyée	Calcaire mameux	Calcaire en gros bancs karstique	Marnes (60%) et marno-calcaires (40%)	Calcaire en gros bancs karstique	
Stratification	Pendage	75° \searrow 70°		65° \searrow 80°	65° \searrow 80°	55° \searrow 80° 30° \searrow 20°	30° \searrow 20° 20° \searrow 20°	\searrow 20°
	Epaisseur des bancs	5 a 10 cm		20 a 40 cm	200 a 500 cm	variable (pissotements) dans les joints mameux marno-calcaires	10 a 50 cm	200 a 500 cm 20 a 40 cm
Diaclasses	Orienta-tion	25° \searrow 165° 65° \searrow		10° \searrow 65°	0-10° \searrow 65°	Familles perpendicu-laires a la stratifi-cation dans les marno-calcaires	70° \searrow 25°	70° \searrow 30°
	Espacement	30 a 40 cm		30 cm	300 a 300 cm		500 a 800 cm	30 cm
	Nature des joints	Ouverts sans remplissage		calciteux	fermes	Orienta-tion variable remplissage de calcaie espacement moyen 20 cm	fermes	calcite
Venues d'eau (previsions)		reparties liées a la pluie	sous pression 2 bars	nulles	ponctuelles a debit variable	nulles	ponctuelles a debit variable surtout au contact des marnes	faibles
Soutènement (previsions)		cintres tous les 1 m	entilage traitments speciaux	beton projete cintres localement	quelques boulons	Marnes cintres et prealablement beton coffre Marno-calcaire projete	neant	cintres tous les 1 m
Pilotage chantier consignes particulieres			sondages de reconnaissance a l'approche de la faille		sondages rayonnants ou marteau perforateur pour reconnaitre les cavites et les circulations d'eau	Mesures de convergence dans les marnes		

Fig.7.2.—Ejemplo de perfil geológico con recomendaciones de construcción (CETU, 1976).

PLANIFICACION DE RECONOCIMIENTOS PARA EXCAVACION DE TUNELES EN ROCA

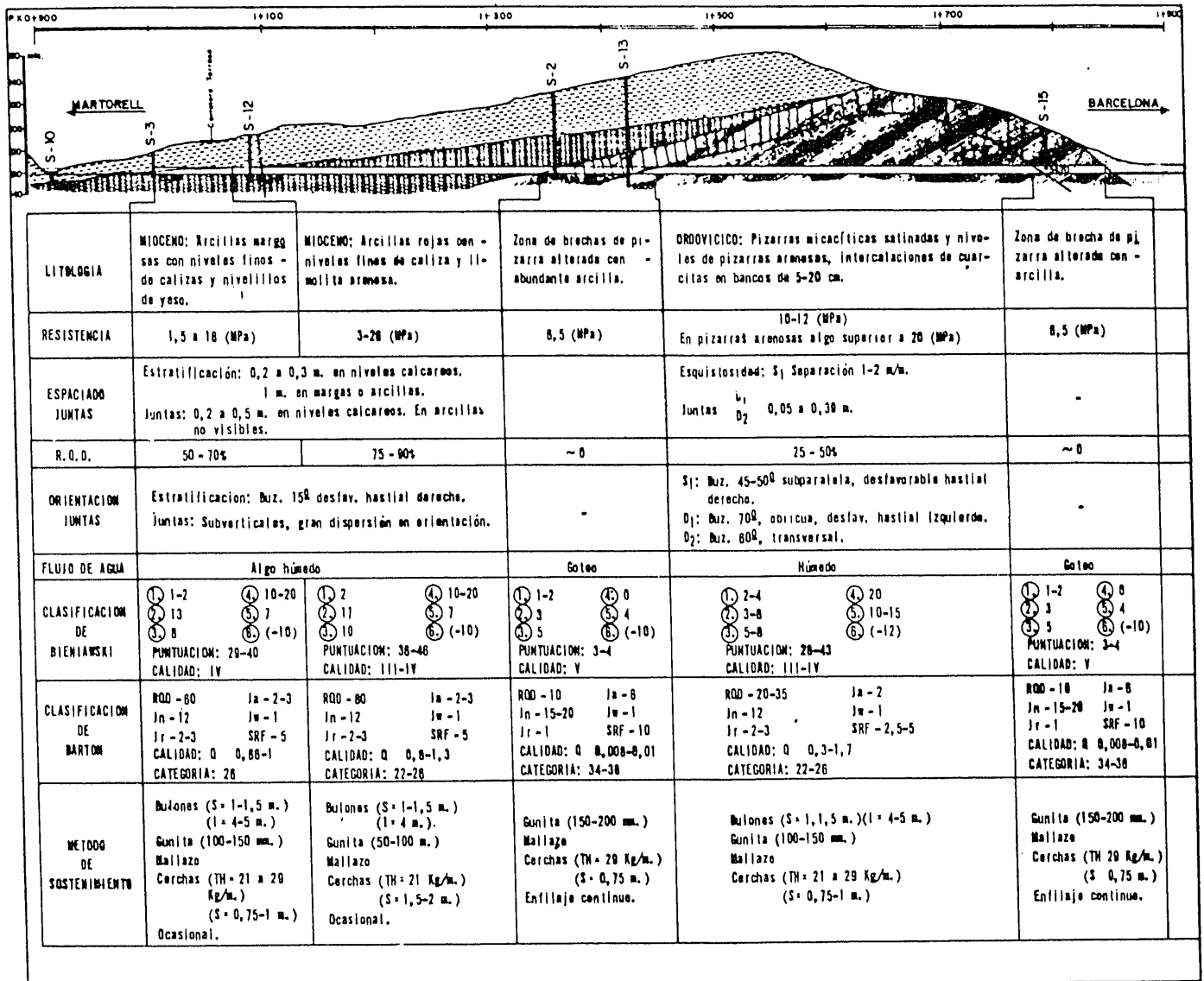


Fig. 7.3.—Perfil geológico y geotécnico del túnel de Martorell (Portillo, Romana y Cedrún, 1981).