

La finalidad del presente artículo es hacer resaltar una vez más las duras condiciones que concurren en la ejecución de los túneles y poner de manifiesto la necesidad de adoptar enérgicamente unas cautelas, incluso por normativa administrativa, que reduzcan en lo posible la serie de dificultades y fracasos que están acompañando a este tipo de obras.

INTRODUCCION

Recientemente se ha constituido la Asociación Española de los Túneles y con ello se dispone de un nuevo instrumento destinado a colaborar eficazmente en el sucesivo perfeccionamiento de los proyectos y la ejecución de estas obras.

No se trata, por supuesto, de promover de modo indiscriminado la construcción de túneles, sino de procurar que, una vez elegida esta solución, su realización se efectúe por la vía menos onerosa.

El túnel es una estructura frecuentemente inserta en una obra de mayor envergadura y además oculta, por lo cual no suele recibir el interés y el impulso fundamental del técnico. Este hecho representa un factor de desventaja, que en este tipo de obra puede conducir a consecuencias graves.

En efecto, el túnel es usualmente una parte de las líneas de transporte:

- Ferrocarriles,
- Carreteras,
- Conducciones hidráulicas,

o está integrado en el conjunto de otras obras hidráulicas más compactas:

- Presas, centrales hidroeléctricas, tomas y captaciones de agua, etc.

En todas ellas el túnel suele quedar fijado por los condicionantes de la obra principal.

Por ser una obra parcial de otra mayor no recibe, por ejemplo, la atención de una presa, como caso típico de obra suficiente por sí, al menos en algún sentido.

Por su carencia de visibilidad, queda fuera de los cuidados que se proporcionan a las obras vistas, como los puentes, aunque éstos sean solamente una parte mínima de las líneas de transporte.

El proyecto y ejecución de las presas y puentes suelen quedar bajo la dirección de especialistas en dichas materias.

Por el contrario, en los proyectos de túneles intervienen frecuentemente técnicos no especializados, olvidando que la subsiguiente ejecución del túnel va a re-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 31 de octubre de 1976,

sultar una de las labores más complejas y costosas que pueden presentarse en ingeniería.

Fiel reflejo del criterio dominante es la existencia de unidades administrativas encargadas específicamente de puentes y presas y una falta manifiesta de las mismas en lo que se refiere a túneles.

PROBLEMATICA DEL TUNEL

El túnel es causa de una alteración muy localizada y muy intensa de una zona del subsuelo.

Los parámetros que quedan fuertemente modificados son:

- Tensiones del terreno, fundamentalmente de compresión.
- En su caso, circulación hidráulica subterránea.
- Contacto del terreno con la atmósfera.

Estas manifestaciones genéricas, juntamente con otras de tipo accidental pero frecuente, como la aparición de terrenos deformables, son las causas fundamentales que complican la ejecución de estas obras, sobre todo por tener que ser desarrolladas desde un espacio muy reducido.

El conjunto de factores que inciden en el proyecto y construcción de túneles pueden analizarse bajo tres aspectos:

- Técnico.
- Económico.
- De seguridad en el trabajo.

Las actuaciones que se contemplan en cada aspecto están muy relacionadas entre sí. Por ejemplo, la reducción o supresión de entibado o la demora en ejecutar el revestimiento son circunstancias favorables a la ejecución de las tareas, pero disminuyen la seguridad.

TECNOLOGIA

Las técnicas a emplear en la ejecución de túneles poseen las siguientes características: son muy costosas en cuanto a los medios, en relación con el volumen de obra ejecutada; son muy variadas en cuanto al número de especialidades que deben aplicarse en el escaso recinto de la obra; son muy versátiles en cuanto que cada obra se concluye por procedimientos casi individuales, distintos de un caso a otro.

Esta compleja instrumentación queda, en general, a cargo de personal ocasional, fundamentalmente en los niveles superiores de dirección de la obra, que suelen cubrirse con técnicos jóvenes y poco experimentados.

Por todo ello es muy conveniente mejorar la aplicación de las técnicas, procurando que se hagan sencillas, sistemáticas, económicas y seguras.

Paralelamente, las empresas constructoras, en función de su capacidad, deberían preparar personal especializado en túneles, a todos los niveles.

Las técnicas utilizadas en túneles deben aplicarse usualmente a plena capacidad y con los métodos de vanguardia por las especiales dificultades en que deben ser puestas en práctica.

En efecto, debe exigirse el máximo rendimiento de las siguientes materias:

- | | | |
|-------------|---|-----------------------------------|
| — Geotecnia | { | Geología. |
| | | Geofísica. |
| | | Geomecánica. |
| | | Interpretación de aerofotografía. |
| | | Prospecciones, |

fundamentalmente en la fase de proyecto.

- | | | |
|-----------------------------|---|------------------------------------|
| — Excavación | { | Perforación. |
| | | Explosivos. |
| | | Excavación mecanizada. |
| — Transporte de materiales. | | |
| — Estabilidad del terreno | { | Entibado. |
| | | Técnicas variadas de sujeción. |
| — Hormigonado | | Hormigón bombeado, preparado, etc. |
| — Agotamiento de aguas. | | |
| — Ventilación. | | |
| — Seguridad en el trabajo. | | |
| — Organización de tajos. | | |

El fallo en la aplicación de cualesquiera de ellas puede repercutir de modo fundamental en el desarrollo o incluso en la viabilidad de la obra.

A modo comparativo se exponen las técnicas, que pueden considerarse de máxima importancia en otros tipos de obras:

En carreteras:

- Consolidación de terrenos.
- Ejecución de firmes.

En presas:

- Geotecnia.
- Hormigonado.
- Seguridad en el trabajo.

En consecuencia, parece que el túnel es precisamente la obra que requiere en su planteamiento y ejecución la mayor concentración de expertos en materias fundamentales en obras públicas.

Esta múltiple especialización que deben poseer los constructores, apenas queda matizada actualmente por la clasificación que se exige al contratista por disposición administrativa, el cual debe estar incluido en el grupo A, subgrupo 5 y, en su caso, por la especialidad en ventilación, también en el grupo J, subgrupo 1.

ECONOMIA

Los costes que comporta la ejecución de una unidad de longitud de túnel, a igualdad de otras circunstancias, es función de la distancia a las bocas de ataque.

De modo simplificado podría ponerse:

$$\text{Coste/m.l.} = K_1 + K_2 \cdot L^m$$

siendo K_1 y K_2 constantes; L , distancias a las bocas de ataque, y m , un coeficiente dependiente de los medios de trabajo y del terreno que se atraviesa.

Ello significa que los costes de ejecución lejos de las entradas de ataque pueden llegar a alcanzar valores varias veces superiores a los que resultan en las proximidades de las mismas.

Al modificarse las características del terreno, quedan modificadas las constantes que definen el coste.

La relación de coste de ejecución en un terreno muy desfavorable respecto a otro sin problemas, puede ser muy considerable. Índices de relación de coste del orden de 10 se presentan con relativa frecuencia.

El paso del túnel por una zona muy perturbada del terreno puede incrementar precios y riesgos de una forma notable, y más si dicha zona se encuentra en un tramo profundo de la obra. Esta circunstancia lleva al corolario de que "a igualdad de otros factores, un túnel de mayor longitud, puede resultar más económico y menos arriesgado que otro más corto ubicado en terreno más desfavorable".

Cuando la diferencia de las condiciones del terreno sea muy acusada, el incremento de longitud que puede admitir el túnel para quedar alejado de la zona de perturbación sin que aumenten los inconvenientes o el coste, es también muy fuerte.

En líneas generales, un túnel puede admitir incrementos de longitud del 50 por 100, por ejemplo, en otra ubicación cuando la traza más corta cruzase en una buena parte terreno muy difícil.

Cuando la única solución fuese de túnel a toda costa y se detectasen zonas extensas muy peligrosas (terrenos muy deformables, grandes corrientes de agua) el incremento de longitud admisible podría aumentar hasta rozar los propios límites de rentabilidad o necesidad de la obra total de la que forme parte el túnel. O, dicho de otra forma, todo el margen económico disponible debería sacrificarse en la ejecución de un túnel situado en un grado aceptable de seguridad.

En casos extremos, cuando existan otras posibilidades, debe ponderarse la conveniencia de desechar la alternativa de túnel.

SEGURIDAD

El túnel es el tipo de obra que produce el índice más alto de víctimas por accidente de trabajo.

Un estudio realizado en 1968 por el Ministerio de Trabajo de Inglaterra arroja el siguiente balance:

TIEMPO PERDIDO POR ACCIDENTES
POR CADA 10⁶ HORAS X HOMBRE, TRABAJADAS

Tipo de obra	Días perdidos
Túneles	15.326
Líneas de alta tensión	9.845
Muelles y malecones	8.648
Presas	7.041
Alcantarillados y otras conducciones	4.700
Puentes	4.687

El análisis de las cifras es suficientemente significativo para necesitar de ningún comentario.

Desarrollar el máximo esfuerzo en la planificación de la seguridad es un objetivo que debe perseguirse a toda costa.

De hecho, la seguridad humana debería ser en la fase de construcción del túnel, uno de los criterios directores de los procedimientos de ejecución.

Se tiene experiencia de túneles de alto presupuesto (*) en los que un plan de seguridad de coste elevado, hasta el cinco por mil (5 por 1.000) del coste total de la obra, dio resultados excelentes en el desarrollo general de la construcción.

La seguridad debe preverse para reducir riesgos en todos los grados de daño:

- Riesgo de muerte, generalmente por aplastamiento o asfixia en desprendimientos o hundimientos del terreno.
- Riesgo de lesión por las mismas causas anteriores y por maniobras incorrectas con maquinaria.
- Riesgos de asfixia o intoxicación por ventilación inadecuada.
- Riesgos de enfermedades del sistema respiratorio por una perforación poco cuidada.

Debe pensarse asimismo en disponer en las proximidades de los frentes de ataque de los túneles largos, de determinados dispositivos para casos de urgencia, tales como teléfono, transporte rápido, camillas, inhaladores de oxígeno, torniquetes y demás elementos cuya eficacia depende a veces de su empleo en cuestión de segundos.

COORDINACION

A la vista de las exigencias que supone un desarrollo eficaz de un plan de acción en túneles, conviene establecer una actividad coordinada de todos los organismos interesados.

Los campos fundamentales en que debe establecerse la cooperación son:

(*) Tercer Tubo del Túnel Lincoln, de Nueva York.

- Investigación: Programada o imprevista, como la que resulta al adoptar soluciones de emergencia que deben aplicarse durante la ejecución de una obra.
- Obtención y ordenación de información.
- Divulgación de la información.
- Normalización.

INVESTIGACION

La investigación podría llevarse a cabo mediante un programa coordinado, dirigido por la Administración del Estado, con el asesoramiento de entidades especializadas y desarrollado por:

- Empresas constructoras.
- Empresas de maquinaria.
- Laboratorios del suelo.

Este programa podría hacerse más operativo, aprovechando las labores de ejecución que en ese momento se estuviesen realizando en túneles.

La investigación debería cubrir la doble vertiente de descubrir nuevos procedimientos y mejorar el rendimiento de los ya conocidos.

Sería asimismo interesante favorecer la experimentación de los prototipos o procedimientos nacionales que presentasen características suficientes de calidad y eficacia.

OBTENCION DE INFORMACION

Utilizando los procedimientos usuales de análisis y ordenación de la información se puede montar un Banco de Datos a partir de las revistas nacionales y extranjeras especializadas en túneles y materias relacionadas con ellos.

Cabe también aprovechar el intercambio de información mantenido entre la Asociación Española de los Túneles y las correspondientes Asociaciones de otros países.

Asimismo, se puede solicitar de las empresas proyectistas, constructoras o explotadoras, el envío directo de datos de túneles en cualquier fase de su desarrollo.

El Banco de Datos podría utilizarse para respuestas inmediatas o para la preparación de documentación generalizada.

La información obtenida debería ser suficiente para permitir la preparación de unos índices representativos de las características técnicas y económicas de la ejecución del túnel, que pudieran definir de algún modo la calidad o eficacia de los procedimientos utilizados.

Estos índices podrían ser del siguiente estilo:

	para cada operación	o cada circunstancia
— Coste/m l o coste/m ³ :	ejecución total, perforación, transporte de mate- riales, etc.	terreno, dimensiones, formas, etc.

- Velocidad de ejecución: metros por jornada laboral u hora de trabajo.
- Velocidad de perforación: metros por hora de perforación.
- Número de personas por jornada y equipo.
- Factor de explosivo: kilogramos de explosivo por metro cúbico de roca demolida.

Estos índices podrían incluso evaluarse como porcentajes de rendimiento sobre unos máximos teóricos estimados u obtenidos en condiciones óptimas.

Sería también interesante disponer de un fichero de personas y entidades expertas en túneles y materias relacionadas con ellos.

DIVULGACION DE LA INFORMACION

La información obtenida debe divulgarse de modo ordenado por todos los medios disponibles, tales como:

- Publicación de una revista exclusiva de túneles o en colaboración con otras disciplinas relacionadas con dichas obras.
- Publicación, en forma de fichas, de información seleccionada procedente del Banco de Datos.
- Conferencias, coloquios, etc.

NORMALIZACION

El objeto de esta normalización sería presentar de modo sistemático los procedimientos deducidos de la experiencia y el estudio de los mejores especialistas para generalizar su utilidad, y obligar al cumplimiento de un determinado mínimo de condiciones, fundamentalmente relacionadas con la seguridad.

La normalización debería establecerse en distintos niveles y con distinta vinculación.

Un esquema resumido de la misma podría ser el siguiente:

- Una Instrucción, como doctrina común de cumplimiento preceptivo.
- Normas, para cuestiones particulares o como sistema de reglas a emplear hasta disponer de la Instrucción.
- Manuales de cálculo, para facilitar la aplicación de la normativa existente

La normativa debería cubrir las tres fases de proyecto, ejecución de las obras y explotación.

En la Instrucción deberían desarrollarse los siguientes extremos:

- Cuestiones generales:
 - Definiciones, terminología, etc.
- Estudio del terreno:
 - Estudios.
 - Prospecciones.
 - Ensayos mecánicos del terreno.
- Cálculo de túneles:
 - Acciones.
 - Fórmulas y procedimientos de cálculo.
- Construcción de túneles:
 - Preparación de los trabajos.
 - Perforación, etc.
- Explotación.

Sería interesante normalizar, aunque con cierta holgura, la forma y dimensiones de las secciones, fundamentalmente la circular, con la intención, entre otras, de establecer una relación con la maquinaria existente en el mercado para optimizar su aprovechamiento.

Asimismo debería intentarse una clasificación del terreno, principalmente a efectos de perforación y excavación, utilizando como índice, por ejemplo, la progresión de una perforadora tipo.

Podría hacerse de modo semejante al siguiente:

Tipo de roca	Velocidad de perforación
Muy dura	15 cm/min.
Dura	16 a 25
Media	26 a 35
Blanda	36 a 50

Esta clasificación podría completarse con otra que tuviera en cuenta la deformabilidad o posibilidad de derrumbamiento del terreno.

ESTUDIOS PREVIOS

Aceptada la viabilidad de la solución en túnel, deben analizarse todas las alternativas que pudieran adoptarse para dicha obra, de manera que queden definidos con suficiente antelación los límites en que esta solución sería realizable económicamente.

A continuación debe atacarse el planteamiento técnico del proyecto de túnel.

En este momento, y antes de prever ninguna traza de la obra, se debe efectuar

un reconocimiento geofísico extenso y detenido de una amplia zona por donde pudiera desarrollarse la obra, con una visión muy amplia de las posibilidades del trazado.

Esta zona de exploración quedaría definida por unas líneas de contorno, determinadas por la flexibilidad de la obra total para adaptarse a la solución de túnel que resultase elegida.

Debe evitarse la adopción inmediata de una traza del túnel siguiendo las alineaciones normales de la línea general de transporte u otros condicionantes de la obra total, hasta que hechos los estudios geotécnicos correspondientes se compruebe que el terreno a atravesar por este lugar no es peor que los de su entorno.

En esta fase debe considerarse la relevancia que ha de tener el coste relativo de los estudios, prospecciones y ensayos geofísicos. La evaluación de esta partida es de difícil determinación apriorística, ya que, por ejemplo, no es función del coste de la obra y sólo en algún grado de la longitud del túnel. No obstante, para limitar de algún modo su cuantía deben tenerse a la vista diversos factores y fundamentalmente los siguientes:

- Presupuesto de la obra total, de la que forma parte el túnel.
- Presupuesto del túnel.
- Riesgos y costes potenciales de ejecución en los tramos situados en zonas difíciles, en función de:
 - Tipo de terreno.
 - Longitud de los tramos.
 - Distancias a las bocas de ataque.
- Posibles alternativas en caso de fracaso en la perforación y ejecución del túnel.

A este respecto no puede tomarse como modelo la cuantía de estos costes en casos anteriores semejantes, pues en general han sido notoriamente insuficientes. Cuantías del orden del 10 al 15 por 100 del presupuesto estimado del túnel, podrían ser cifras aceptables.

Las actividades geotécnicas deben agruparse en dos fases. La primera corresponde al análisis general de toda la zona potencial de construcción del túnel. La segunda consiste en un examen, más bien de tipo comprobatorio, de la franja que se elija para el desarrollo de la obra.

En los aspectos geotécnicos que intervenga en gran medida la interpretación personal y en la definición de los resultados finales podrían ser necesarios los procedimientos redundantes, de manera que se utilizase como coeficiente de fiabilidad el estado de coincidencia o disparidad de criterios de dos o más estudios paralelos.

La distribución de prospecciones puede hacerse de modo uniforme o bien aumentando su densidad en las zonas más movidas, de manera que para un número determinado de las mismas se obtuviese el menor error total posible.

Una vez explorada toda la zona de ejecución potencial del túnel deben pon-

derarse los riesgos y los costes. En zonas de terreno muy uniforme puede seleccionarse la solución más corta. Cuando la diferencia de calidad del terreno fuese muy apreciable, a efectos de la construcción, debe elegirse la zona más fiable, hasta admitir incrementos notables de longitud en el desarrollo de la obra.

La prospección de la franja elegida debe hacerse con gran intensidad.

PROYECTO

Al concretar en el proyecto los elementos básicos de la obra debe definirse la traza sobre un buen plano topográfico para fijar las bocas de ataque extremas e intermedias, teniendo en cuenta en esta fase la geología, como siempre, pero también y con gran relevancia, la topografía (distancias y accesos a las bocas de ataque).

Debe preverse también la ubicación de las escombreras y sus efectos en los cursos próximos de agua (aterramientos, turbiedad) y en el aspecto estético de la zona.

En general, puede ser interesante dejar en las bocas unas amplias plataformas, que pueden ser operativas incluso durante la explotación de la obra, en cuyo caso deberán quedar perfectamente concluidas.

En cuanto a la línea de la traza, debe procurarse la línea recta, ya que a pesar de la moderna instrumentación permite todavía un más fácil seguimiento de la alineación y en la explotación una utilización más segura. De todas formas, cuando existan bandas de terreno muy favorable cuyo paso no pudiera hacerse en recta o por necesidades ineludibles de la explotación no debe dudarse en elegir la línea que mejor se adapte a dichas circunstancias.

Definida la traza del túnel, se acoplará a sus extremos el resto de la obra total, alineaciones, etc.

Al dimensionar la sección, es conveniente prever el procedimiento de medición y abono, que servirá para certificar al constructor la obra ejecutada.

Los cálculos teóricos de la sección a efectos de la resistencia mecánica son siempre convenientes, al menos para disponer de un orden de magnitud en las cifras de los espesores, y en su caso de las armaduras que se precisen. Conviene hacer estos cálculos con criterio pesimista, contando, por ejemplo, con una cohesión baja o casi nula y con un revestimiento poco despegado del terreno, que se traduce para el cálculo en una alta presión de ese terreno por haber quedado impedida su descompresión.

Sería deseable un precio diversificado de abono, en función de las dificultades de excavación y de las circunstancias en que se efectuasen los trabajos, aunque ello exige una gran precisión en la determinación de todos los factores y suele ser origen de desacuerdos entre la Administración y el contratista.

En la legislación de contratos del Estado se indica que la realización de la obra es a riesgo y ventura del contratista. Sin embargo, cabe plantear la posibilidad de que dicho riesgo quedase limitado de alguna manera para los túneles, ya que

por otra parte, cuando los costes imprevistos desbordan un porcentaje determinado la Administración termina por acudir con su ayuda para poder concluir la obra, por cuanto cabe interpretar que la obra que se realiza es distinta de la proyectada.

PREPARACION Y ORGANIZACION

Para la ubicación de viviendas, oficinas, parques de material o maquinaria y demás elementos auxiliares, deben tenerse en cuenta los riesgos de la montaña y entre éstos los de avalanchas, deslizamientos del terreno y tormentas eléctricas.

Deben preverse y efectuarse los suficientes ejercicios de entrenamiento para tener plenamente capacitados los equipos de emergencias. Es preferible habilitar un presupuesto generoso para mantener perfectamente dispuestos equipos y materiales que correr los riesgos sin medios adecuados.

La organización, incluso detallada, del personal de obra y sus tareas, debe ser asunto propio de todos los mandos hasta el máximo nivel.

Una óptima ordenación del personal debe contener los siguientes factores:

- Número estricto de personas en cada tajo y operación.
- Dos o tres turnos diarios.
- Rotación del personal para alcanzar un descanso adecuado. En algunos puestos, hasta un 25 por 100 de los días hábiles, por ejemplo.

La ordenación de tajos y tareas debe ser minuciosa. Una ligera modificación en el proceso de perforación puede aumentar el rendimiento en un 10 por 100.

La diversificación existente de operaciones y su alternancia permiten que un mismo operario pueda desempeñar distintos cometidos según la tarea que se esté desarrollando en cada momento, de forma que los tiempos improductivos se reduzcan o anulen.

EJECUCION DE LAS OBRAS

Los procedimientos clásicos de perforación pueden mejorarse y adaptarse en cada caso particular como una verdadera labor de artesanía.

"Jumbos" sobre potentes vehículos y con el mayor número posible de brazos de ataque, suelen resultar la solución óptima en la perforación.

El uso de plantillas para situar las posiciones de ataque de las brocas, permite una gran precisión del esquema de voladuras y facilita el trabajo de las máquinas.

La prospección en el frente de ataque, que se interfiere notablemente con la fase de excavación, puede facilitarse utilizando equipo ligero y aprovechando los intervalos de tiempo en que no actúen los equipos principales.

El manejo de los explosivos exige el máximo cuidado. El uso de los detonadores eléctricos debe quedar suspendido durante las tormentas eléctricas.

Los explosivos utilizados con un plan de demoras mejoran el rendimiento de la

voladura. La distribución e intensidad de las demoras puede modificarse a partir de un plan inicial hasta alcanzar el punto de máximo rendimiento.

La utilización de máquinas excavadoras a plena sección debe evaluarse cuidadosamente, para evitar que la costosa inversión de las mismas no quede adecuadamente compensada. La versatilidad en el uso de estas máquinas va aumentando, tanto en lo que se refiere a la variación de las dimensiones de la sección que puede excavar cada una, como en lo que respecta al tipo de terreno en que pueden operar ventajosamente.

El director de obra debe estar dispuesto a adoptar un cambio de alineación, previos los estudios y trámites oportunos, cuando la aparición de un accidente geológico imprevisto y prolongado complique considerablemente la ejecución de la obra.

La sujeción del terreno admite soluciones variadas que pueden adaptarse a cada caso particular, constituyendo una materia que puede ser objeto de amplia investigación y experimentación.

En cuanto al momento de ejecutar el revestimiento, deben tenerse en cuenta múltiples factores:

- Una ejecución inmediata a la excavación tiene la ventaja de aumentar considerablemente la seguridad del trabajo en el túnel y evita la degradación superficial del terreno, que suele concluir frecuentemente en derrumbamientos y otros accidentes peligrosos y de costosa solución.
- Una ejecución demorada facilita las operaciones en el túnel, con ventajas económicas si no surgen complicaciones, y reduce el empuje del terreno sobre el revestimiento por proporcionar a aquél un período más amplio de expansión.

En general, la conveniencia de una ejecución inmediata del revestimiento, contabilizando ventajas inmediatas y reducción de riesgos, supera los beneficios de una construcción demorada del mismo.

Finalmente, en los túneles destinados al tránsito de vehículos debe atenderse al aspecto estético final, fundamentalmente en relación con las filtraciones, por lo que deben preverse durante la construcción los dispositivos y procedimientos necesarios para suprimir o reducir los efectos indeseados.