

CAPÍTULO 26 TÚNELES EN TERRENOS KÁRSTICOS

Manuel ARLANDI RODRÍGUEZ
Luis JORDÁ BORDEHORE
Julio VERDEJO SERRANO

I. Introducción

Aunque las calizas y otras rocas solubles (yesos, sales, etc.) suelen presentar buen comportamiento geotécnico, cuando se karstifican pueden inducir una serie de riesgos durante la excavación de túneles, que a veces derivan en serias dificultades. El agua subterránea es la principal fuente de problemas, así como el cruce de cavidades, tanto rellenas como vacías (Marinos, 2001).

La palabra *Karst* proviene de la región del Kras en Eslovenia, dominada por mesetas calcáreas. Posteriormente el término se germanizó pasando a denominarse Karst. El concepto de karst fue empleado por primera vez por Jovan Cvijic, geógrafo serbio especializado en geomorfología (*Das Karstphänomen*, 1893).

En principio este término se aplicó únicamente a materiales carbonatados (calizas y dolomías) para extenderse posteriormente a formas similares desarrolladas sobre litologías diferentes: sulfatos (yeso, anhidrita y epsomita), haluros (halita, silvina y carnalita), rocas sedimentarias detríticas con cemento carbonatado o sulfatado (p.e. areniscas y conglomerados calcáreos) y rocas metamórficas carbonatadas, (p.e. mármoles).

En ocasiones se alude también al concepto de pseudokarst, que engloba una serie de materiales que presentan una

fisonomía similar pero cuyo origen no proviene de los procesos de meteorización química. Se encuentran en este grupo las rocas volcánicas, en el caso de los conductos de lava, algunas rocas plutónicas, silíceas (cuarcitas karstificadas), glaciokarst en zonas de hielo glacial y termokarst o criokarst en zonas de permafrost. Los procesos implicados en la meteorización son hidrólisis, vulcanismo, periglaciario y glaciario.

A la hora de abordar una obra subterránea en presencia de materiales kársticos, se deben resolver una serie de problemas específicos, derivados de la presencia de huecos, que pueden estar rellenos o no. Los riesgos se multiplican con la aparición del agua subterránea, que puede dar origen a infiltraciones e incluso presiones hidrostáticas sobre el revestimiento del túnel.

En el presente capítulo se va a describir, de manera general, el fenómeno kárstico. Se expondrán las técnicas empleadas para la detección de cavidades, tanto en la fase previa de estudio de un túnel, como durante la construcción del mismo. Se completará el capítulo con una revisión de las afecciones que la ejecución de túneles puede provocar en los sistemas kársticos, así como de las dificultades técnicas que entraña realizar una excavación subterránea en terrenos karstificados.

2. El fenómeno kárstico

2.1. Proceso de karstificación

La karstificación es un fenómeno básicamente de meteorización, en el que se implican una serie de procesos químicos (disolución, hidratación, sustitución iónica y procesos de oxidación – reducción) y procesos físicos (transferencia de masa y difusión).

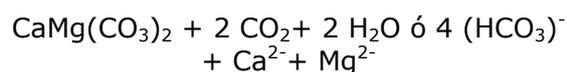
En sales, el proceso es una simple disolución, siendo los factores más determinantes la concentración iónica en el agua (actividad) y la temperatura.

Las rocas carbonatadas tienen una constante de solubilidad baja, por lo que su karstificación engloba una serie de procesos físico-químicos más o menos complejos:

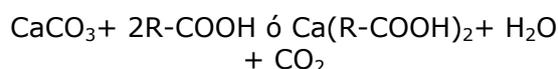
- Disolución escasa en agua pura, con una tasa de disolución limitada en el tiempo que produce formas superficiales
- Formación de ácido carbónico disociado a partir de la oxidación del anión carbonato. Tasa de disolución alta-media
- Intervención del dióxido de carbono (atmosférico o edáfico). Este proceso se retroalimenta al formarse más ácido carbónico a partir de aniones carbonato procedentes de la roca. Esta fase, con tasa de disolución media, es la más importante en la karstificación superficial.
- Interacción atmósfera-agua-roca, es una fase de establecimiento de equilibrios sucesivos. La diferencia entre el contenido en dióxido de carbono del aire y del agua se suple mediante la disolución de grandes cantidades de CO₂. Se establecen una serie de reacciones reversibles controladas por la temperatura, la superficie de roca expuesta, las variaciones del

nivel freático, etc. Las tasas de disolución van disminuyendo aunque se alcanzan grados de karstificación importantes.

Las reacciones químicas son:



En el caso de presencia de ácidos húmicos se tendría:



La evolución hacia zonas más profundas tiene lugar mediante la percolación de aguas agresivas a través de las discontinuidades (diaclasas, fracturas y planos de estratificación). Estas aguas van disminuyendo progresivamente su contenido en CO₂ disuelto y aumentando su contenido en carbonato. Este hecho hace a veces compleja la interpretación de grandes desarrollos kársticos en profundidad. Sin embargo debe tenerse en cuenta también los procesos originados por la mezcla de aguas, responsables en gran medida de la karstificación en zonas profundas. Dos aguas saturadas, generan al mezclarse una interfase con presencia de aguas agresivas que reactivan el proceso de disolución.

Dado el carácter reversible de las reacciones, a la disolución se une la precipitación, ambas asociadas normalmente a la evaporación de agua o la reducción en contenidos de dióxido de carbono. La evolución de un karst se encuentra muy condicionada por el contexto hidrogeológico regional, especialmente por el desarrollo de la red hidráulica y las variaciones de nivel freático.

2.2. Zonificación vertical del Karst

Una primera clasificación del karst estaría basada en la proximidad a la superfi-

cie, diferenciando entre el *epikarst*, zona más próxima a la superficie, y el *endokarst*, zona más profunda. En función de la posición del nivel freático, en un endokarst se distinguen tres zonas, Fig. 1:

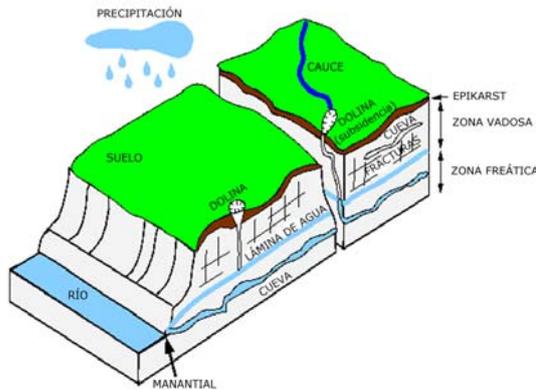


Figura 1. Zonificación vertical de un karst

- **Zona vadosa o de aireación:** La presencia de agua es estacional, ligada a las precipitaciones, con circulación rápida
- **Zona de transición o epifreática:** Presenta un funcionamiento mixto.

- **Zona freática:** Situada por debajo del nivel freático, con conductos rellenos permanentemente de agua.

La afección de los túneles a los sistemas kársticos, y a la inversa, dependerá fundamentalmente de la zona donde se realice la excavación.

2.3. Rocas carbonatadas

Las rocas carbonatadas (calizas y dolomías) son las litologías karstificables por excelencia. Se definen como tales aquellas en las que el contenido en carbonatos supera el 50 % en peso.

En la Fig. 2 (Ford et al, 2005), se refleja la distribución mundial de rocas carbonatadas con presencia de fenómenos kársticos. Las áreas marcadas en negro señalan los principales afloramientos. De una simple observación de esta figura se concluye que este fenómeno se desarrolla en mayor medida en el hemisferio norte, y en especial en Norteamérica, Europa y Asia.

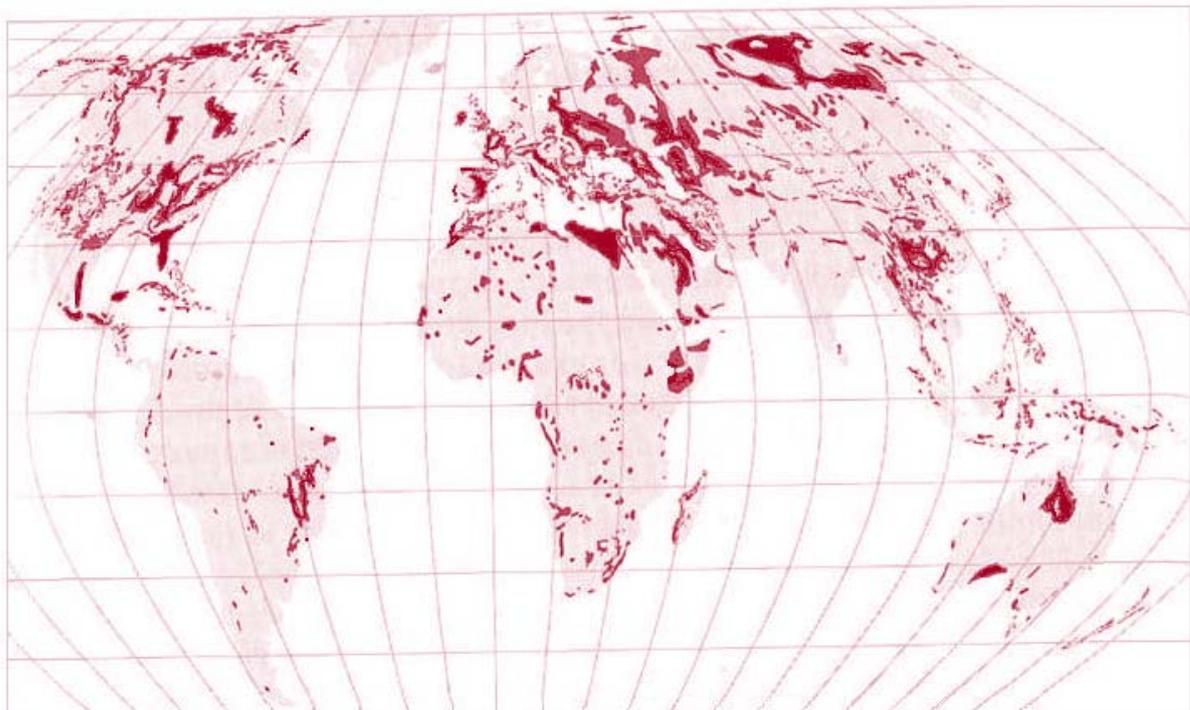


Figura 2. Distribución mundial del karst en rocas carbonatadas (Ford et al, 2005).

La resistencia mecánica de una caliza oscila habitualmente entre valores de la UCS en el rango de 30 a 100 MPa. La resistencia, densidad y porosidad primaria de la roca son propiedades clave en el desarrollo del karst. De este modo, pueden establecerse dos casos generales (Waltham et al, 2005):

- La mayor parte de las cavidades, dolinas y zonas kársticas se desarrollan en las rocas más resistentes (UCS > 60 MPa), con pesos específicos de 2,6 kN/m³ y porosidad primaria < 2%. El flujo de agua y el desarrollo de la disolución de la roca se focaliza principalmente en las fracturas, creándose conductos discretos.
- Las calizas con resistencias más moderadas, en el entorno de 30 MPa, pesos específicos más bajos, del orden de 2,3 kN/m³, y porosidad primaria > 10%, presentan un flujo de

agua más difuso, con menor desarrollo de cavidades y dolinas.

La disolución de las calizas es un proceso significativamente lento. Los ratios medios oscilan entre algo menos de 0,0005 mm/año en terrenos árticos, a algo más de 0,1 mm/año en zonas ecuatoriales húmedas (Waltham et al, 2005).

El ensanche de las fisuras se inicia muy lentamente, manteniéndose inicialmente un flujo laminar mientras las fisuras son estrechas (< 5 - 10 mm). A medida que la fisura se ensancha, el flujo de agua pasa de laminar a turbulento, lo que acelera el proceso de ensanche de la fisura.

En la Fig. 3 (White, 1988) se ilustra la evolución temporal de los conductos kársticos, desde las fisuras estrechas, a las grandes cavidades.

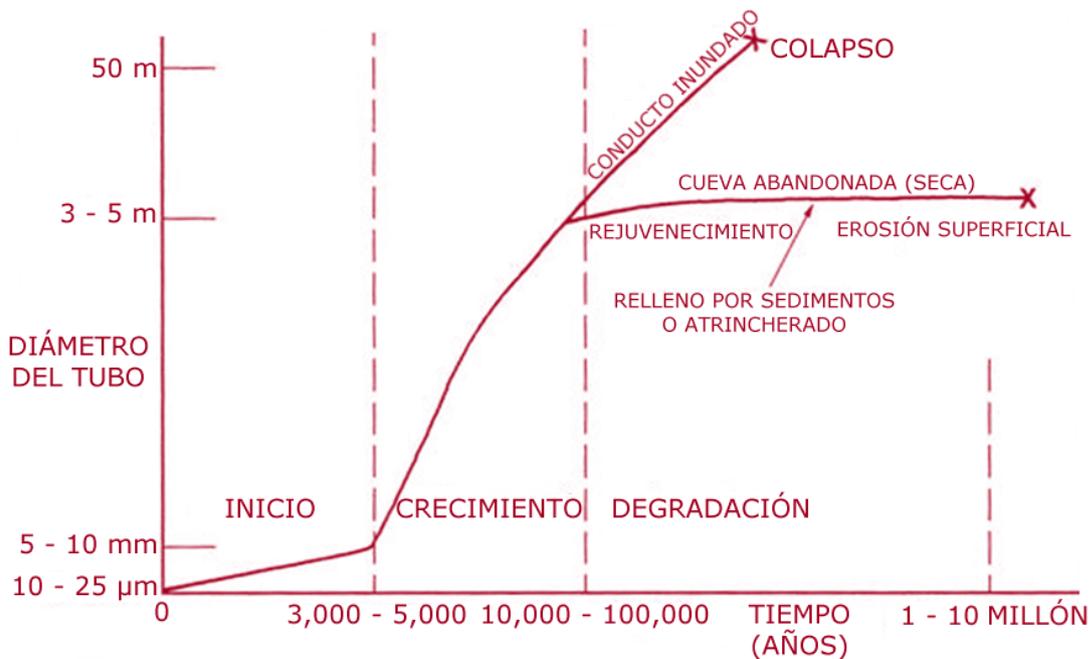


Figura 3. Evolución temporal de la disolución de una caliza, desde las fisuras estrechas a las grandes cavidades.

El proceso de disolución puede acelerarse debido a cambios generados por el hombre en las condiciones del entorno.

2.4. Acuíferos kársticos

Se pueden distinguir tres tipos generales de acuíferos kársticos en función básicamente de su comportamiento respecto al flujo de agua:

- **Acuíferos kársticos en sentido estricto:** La permeabilidad de la matriz rocosa es prácticamente nula y la circulación del agua se produce a través de grandes conductos o fisuras discretas. Son acuíferos sin grandes reservas.
- **Acuíferos de flujo difuso:** La permeabilidad es de tipo secundario, ligada principalmente a una extensa fisuración. Son asimilables en su comportamiento a los acuíferos granulares (porosos). Tienen gran capacidad de almacenamiento.
- **Acuíferos mixtos o de doble porosidad:** participan de las características de los dos anteriores. Están constituidos por una red de drenaje preferencial y una matriz rocosa con permeabilidad variable en función del grado de fisuración.

2.5. Clasificación del Karst

Con el fin de ayudar a la ingeniería a definir actuaciones en terrenos kársticos, se han realizado diversas propuestas de clasificación de los distintos grados de karstificación del terreno. Una clasificación cuantificada de tipo similar a la clasificación geomecánica *Rock Mass Rating* (RMR) no ha sido aun desarrollada para describir el grado de desarrollo del fenómeno kárstico.

La clasificación más aplicada en la actualidad es la debida a Waltham y Fookes (2003), que considera las cinco clases o categorías recogidas en la Figura 4. Está basada en la descripción cualitativa de

las características observadas, con especial atención a las dolinas y cuevas. Como apoyo considera el parámetro NSH (*New Sinkhole Failures*), que se define como los colapsos superficiales de dolinas registrados por km² en un año.

- **Karst Clase kI (Incipiente):** tiene lugar principalmente en zonas desérticas, periglaciares, o sobre rocas carbonatadas impuras. El parámetro NSH presenta valores $< 0,001$. Las escasas cuevas desarrolladas apenas llegan a un metro de diámetro.
- **Karst Clase kII (Juvenil):** es el mínimo grado de desarrollo kárstico registrado en las regiones templadas del planeta. Las dolinas no superan los 10 m de diámetro y el valor del NSH se sitúa entre 0,001 y 0,05.
- **Karst Clase kIII (Maduro):** es la categoría más común de desarrollo kárstico en climas templados y mediterráneos. Las dolinas pueden alcanzar hasta los 100 m de anchura, y el valor del NSH se ubica en el rango 0,05 – 1. Es habitual localizar cavidades de hasta un par de decenas de metros.
- **Karst Clase kIV (Complejo):** es el más típico de las regiones tropicales, pero puede localizarse también en zonas de clima templado. La orografía superficial está dominada por grandes dolinas, que pueden llegar a alcanzar hasta 1 km de diámetro. El valor de NSH se sitúa entre 0,5 – 2. Las cuevas de algunas decenas de metros pueden ser relativamente abundantes.
- **Karst Clase kV (Extremo):** solo se conoce en zonas tropicales muy húmedas. El relieve superficial está caracterizado por la presencia de torres cónicas (pináculos), con grandes depresiones kársticas entre ellas, de varios kilómetros de extensión. El índice NSH supera ampliamente la unidad. Las cuevas son de la mayor magnitud conocidas a nivel mundial.

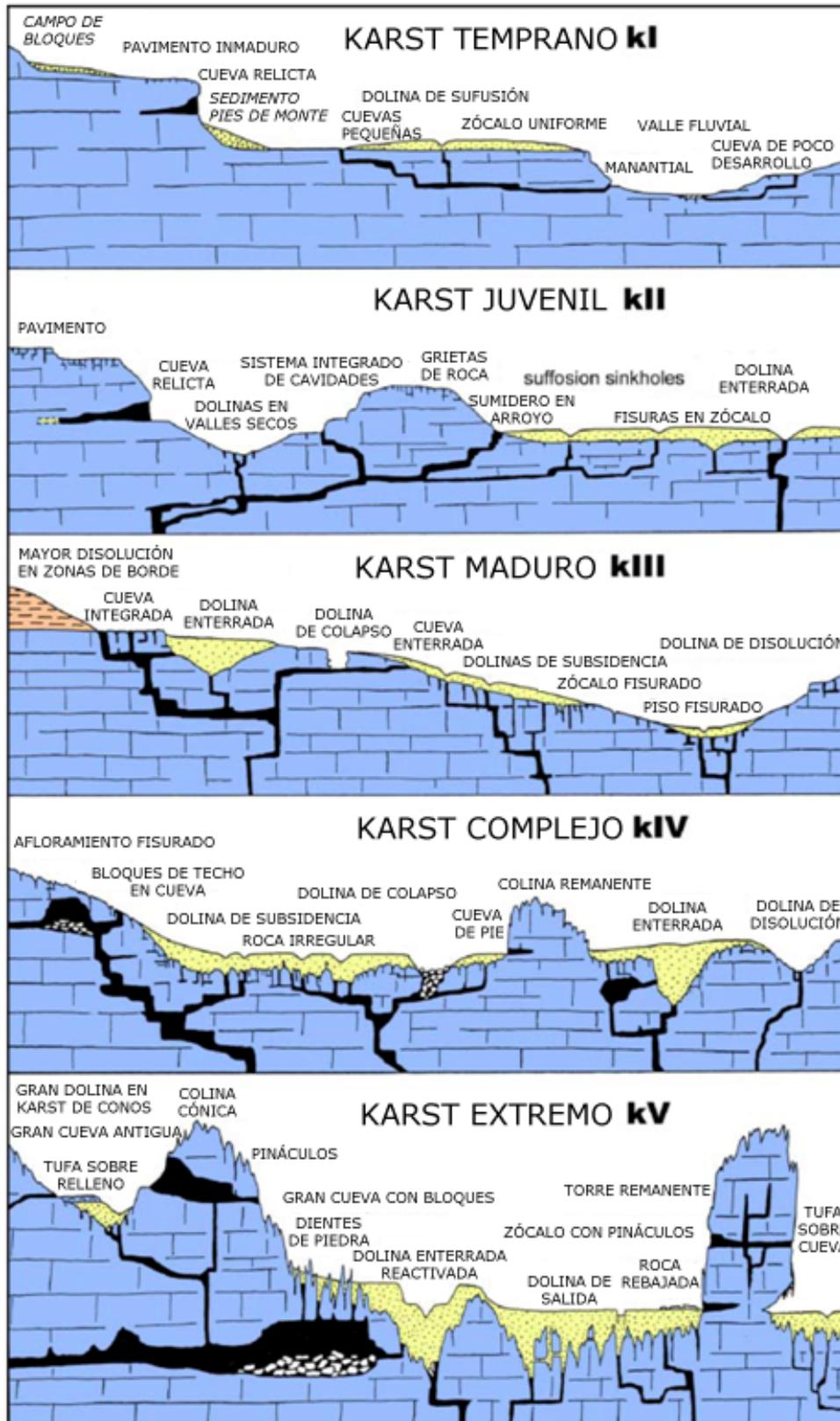


Figura 4. Clasificación ingenieril del Karst (Waltham et al, 2005).

3. Investigación de los terrenos kársticos

Son dos los aspectos básicos a investigar:

- **Detección de cavidades** que, potencialmente puedan interceptar el trazado del túnel. El proyecto deberá definir la estrategia más adecuada para evitar que las excavaciones intercepten cuevas, y si esto no es posible, deberá definir un método adecuado para atravesarlas. Las cuevas podrán estar vacías (agua o aire) o con relleno de consistencia débil (sedimentos kársticos o caos de bloques).
- Es fundamental, en la fase de proyecto, **conocer de la manera más precisa posible, las condiciones hidrogeológicas del sistema kárstico**. No es suficiente con

conocer las condiciones en el entorno inmediato mediato a cota de túnel, sino que es necesario investigar el comportamiento regional del acuífero.

En los túneles someros es posible de emplear de manera eficiente un buen número de técnicas de investigación. Sin embargo, en los túneles más profundos (cobertera mayor de 50 m), la eficacia de las técnicas es más limitada, y su coste mayor.

3.1. Detección de cavidades

Los túneles pueden interceptar diversos tipos de cavidades cuando se excavan en terrenos karstificados. La Fig. 5 ilustra estos tipos. Con el fin de minimizar el impacto que puedan generar en la obra y también para preservar la dinámica del sistema kárstico, es importante detectar las cavidades de manera temprana.

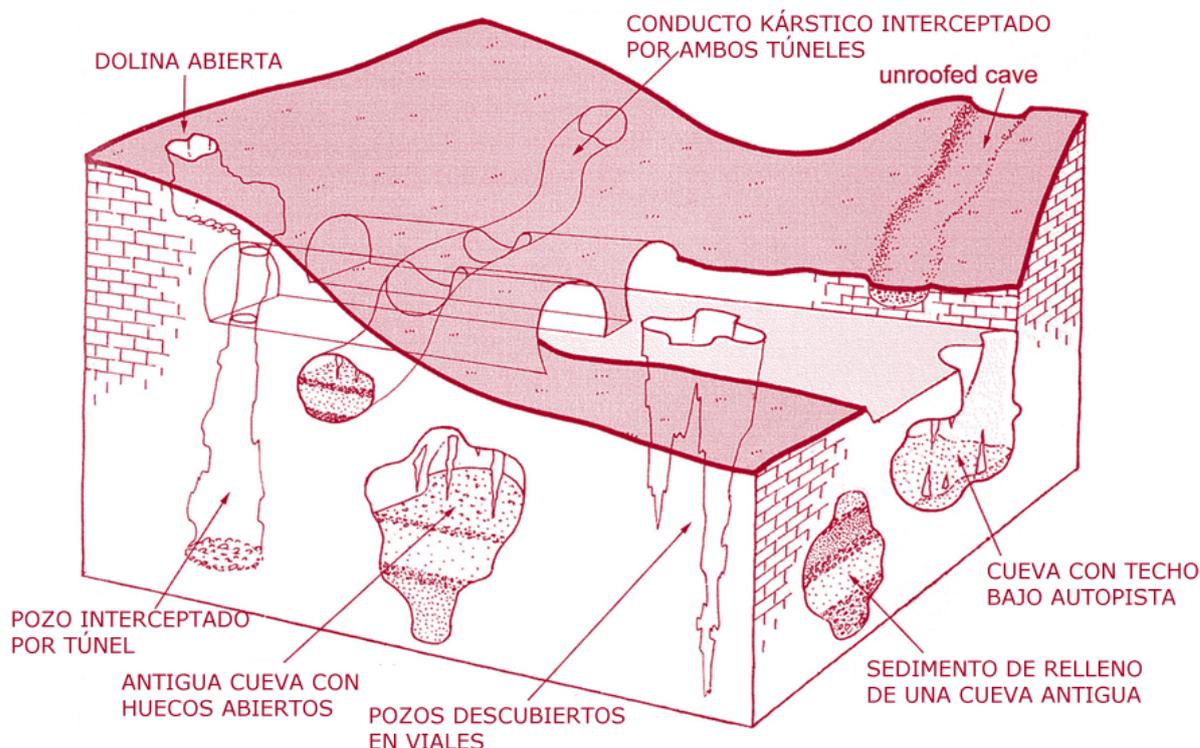


Figura 5. Diferentes tipos de cavidades y conductos kársticos que pueden interceptarse durante la construcción de un túnel (Waltham et al., 2005).

3.1.1. Detección en la fase de proyecto

Para reconocer el entorno kárstico previamente a la excavación del túnel, se emplean habitualmente las siguientes técnicas:

- **Investigación estructural del macizo:** como se ha comentado en apartados precedentes, la fisuración de la roca juega un papel esencial en el desarrollo de conductos kársticos. Por ello es de gran importancia determinar la orientación y características de los sistemas de diaclasas, estratificaciones, superficies estilolíticas, existentes en el terreno, ya que condicionarán estructuralmente la ubicación de cuevas y conductos.
- **Inventario de cavidades e indicios kársticos:** la inspección *in situ* de las cavidades y afloramientos de la zona en estudio, proporciona múltiples datos útiles para entender la estructura y funcionamiento del sistema kárstico. Para ello resulta de gran utilidad acudir a los grupos espeleológicos locales.
- **Reconocimientos geofísicos:** principalmente desde superficie, pero también desde sondeos o desde las propias cavidades. Estas técnicas reconocen un volumen importante de terreno, lo que facilita la detección de huecos.
- **Sondeos mecánicos:** para reconocer el aspecto general del terreno, y como comprobación de anomalías detectadas mediante técnicas geofísicas.

En la Tabla 1, se resumen los principales métodos geofísicos empleados.

3.1.2. Detección durante la ejecución del túnel

Cuando se interceptan zonas con riesgo kárstico elevado, es fundamental disponer de un sistema que permita detectar cavidades y agua, por delante del frente. Los sistemas básicos más empleados son los siguientes:

- Taladros exploratorios por delante del frente, con o sin monitorización de los parámetros de perforación.
- Técnicas geoelectricas, especialmente de polarización inducida (Sistema BEAM)
- Técnicas sísmicas (Sistemas TSP, TRT, etc.)
- Georradar, con antena aplicada directamente sobre el frente, o en el interior de un sondeo.

• Taladros exploratorios

Constituye el método más extendido para investigar el terreno por delante del frente, ya que los medios con los que se realiza son los mismos que se utilizan en el proceso de excavación (jumbo, perforadoras, etc.).

La perforación puede ser monitorizada, es decir, registrando los parámetros operativos del proceso: empuje, velocidad de rotación, velocidad de avance, etc. La interpretación de los valores de estos parámetros permite determinar la consistencia del terreno y detectar la presencia de huecos.

La Fig. 6 muestra un esquema típico de disposición de los taladros.

TABLA 1. Métodos geofísicos para la detección del karst.

DETECCIÓN GEOFÍSICA DE CAVIDADES		
MÉTODO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
Georradar (GPR)	Emisión de ondas de radar contra el terreno, mediante antenas. Detecta muy bien los huecos vacíos.	Sólo funciona bien a profundidades someras (menores de 15 m). Alta resolución.
Tomografía eléctrica	Inyección de corriente continua en el terreno mediante electrodos. Se mide la resistencia eléctrica del terreno, pudiendo detectar cuevas vacías (alta resistencia) o llenas de agua o arcillas (baja resistencia).	Funciona adecuadamente tanto a poca como a gran profundidad. Genera perfiles longitudinales y es capaz de distinguir el tipo de relleno de la cueva. En la práctica, por debajo de 50 m de profundidad no tiene suficiente resolución para detectar cavidades con precisión.
Métodos sísmicos de superficie	Se genera una onda de compresión que viaja por el terreno y es recogida por los geófonos	No es una técnica habitual. Detecta bien estructuras asociadas al karst tales como fallas.
Tomografía de acoplamiento eléctrico capacitivo (CCR)	Se mide la resistividad del terreno mediante un sistema de emisores y receptores sin clavar en el terreno	Es más rápida que la tomografía eléctrica convencional.
Microgravimetría	Medición del campo gravitatorio local. En las zonas con cuevas la gravedad es menor.	Funciona bien tanto en zonas profundas como someras, pero la topografía de la zona debe ser suave. Sólo detecta cuevas vacías de varios metros de anchura.
Radiolocalización	Se sitúa un emisor en la cavidad y se registra el campo magnético en superficie	Útil para localización en planta rápida de cavidades, sustituyendo a la topografía en zonas de muy difícil acceso.
Resonancia acústica	Se emite un sonido de frecuencia determinada desde un punto accesible de la cavidad. Mediante geófonos en superficie se recogen las emisiones sónicas.	Al igual que con la técnica de la radiolocalización, es útil para localización en planta de cavidades.
Tomografía sísmica cross-hole	Se emiten ondas sísmicas en un sondeo, y son recogidas en otro cercano. Si aparece una cueva se detecta una disminución de la velocidad sísmica medida.	Funciona muy bien a cualquier profundidad, pero requiere que los sondeos estén muy próximos el uno al otro. Alta resolución. Proporciona perfiles transversales entre los sondeos.
Georradar en sondeo	Se emite un impulso electromagnético en el sondeo y los "ecos" son registrados por el propio útil	Detecta fallas y cavidades, con gran precisión en cota pero no permite discernir el azimut

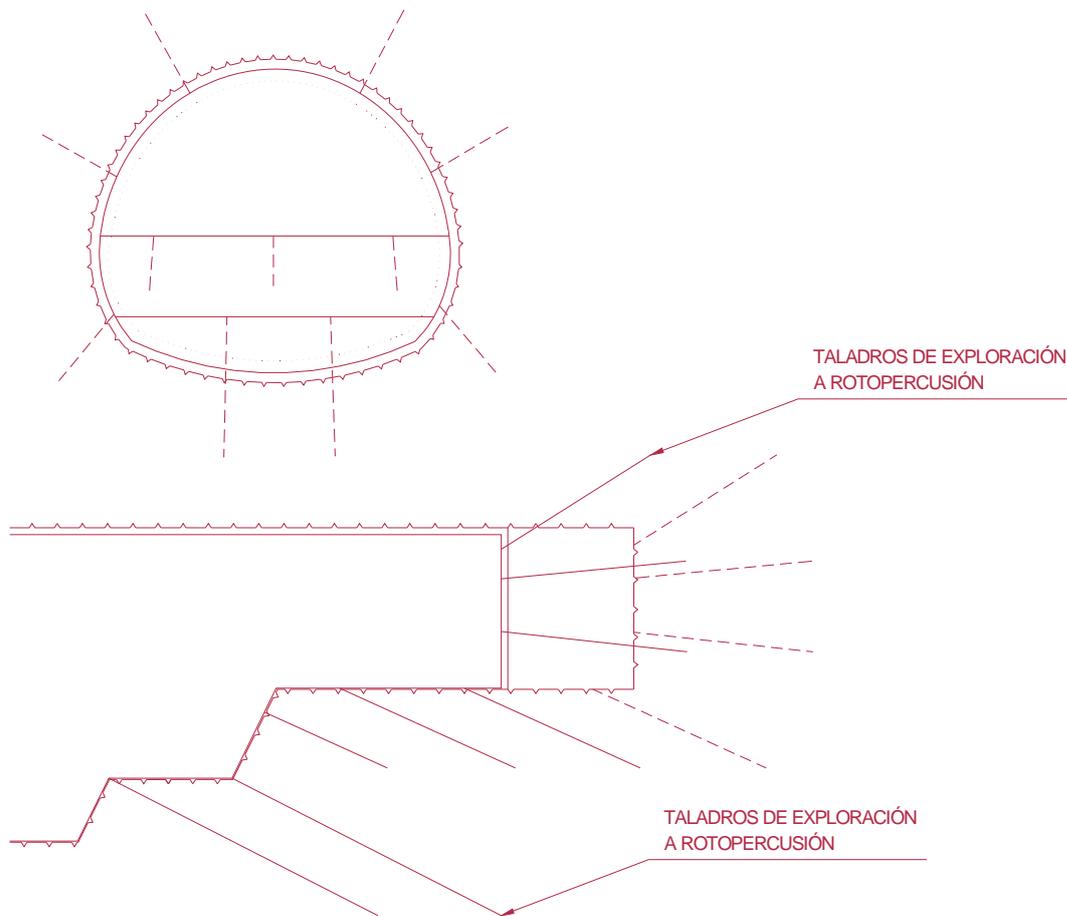


Figura 6. Taladros exploratorios por delante del frente.

- **Sistema geoelectrico (BEAM)**

El sistema BEAM es aplicado en tuneladoras (TBM). Está basado en la medida de la polarización inducida. El sistema induce corrientes de frecuencia definida que generan una zona de alta densidad de corriente en el frente de excavación. La TBM es utilizada como electrodo de medida (A0), situado tan lejos como sea posible el electrodo de guarda (A1) y finalmente, situado a una distancia adecuada estaría el electrodo de retorno (B).

En la Fig. 7 que se adjunta a continuación, se muestra un esquema general de los distintos elementos que componen el sistema BEAM.

La unidad BEAM situada en la TBM registra datos permanentemente y está controlada por un ordenador en el exterior del túnel. Los datos enviados son procesados inmediatamente y son enviados en tiempo real en la pantalla del operador de la TBM.

El parámetro que va a definir el estado del macizo rocoso, tipo de material que se va a interceptar, o determinar la presencia de agua, es el "porcentaje de frecuencia efectiva (PFE)", que es un parámetro petrofísico que caracteriza el terreno en cuanto a la propiedad de almacenar energía eléctrica en él mismo. En la Tabla 2 se muestra la escala de clasificación de las condiciones del terreno, atendiendo a los valores de PFE.

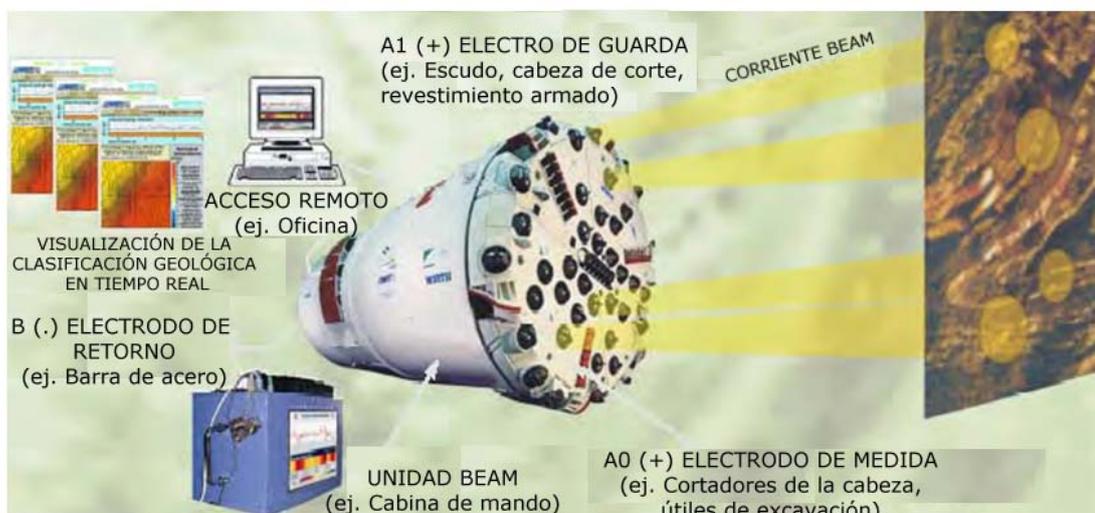


Figura 7. Sistema BEAM aplicado desde los cortadores de la tuneladora.

Tabla 2. Clasificación del terreno a partir del parámetro PFE (Sistema BEAM).

DETECCIÓN GEOFÍSICA DE CAVIDADES		
TERRENO	DESCRIPCIÓN	PFE (%)
TIPO 1	Macizo rocoso sano y compacto, sin fisuras o con fisuras selladas.	>55 %
TIPO 2	Macizo rocoso con moderada fracturación y características semi-permeables (baja resistencia).	25 – 55 %
TIPO 3	Macizo fracturado o karstificado, con capacidad acuífera	5 – 25 %
TIPO 4	Macizo fallado, con cavidades, muy fracturado, con importante presencia de agua.	< 5%

Los Tipos 4 son los que mayor riesgo entrañan de mostrar fuerte presencia de agua o cavidades, lo que corresponde a PFE < 5%. El alcance de detección del sistema se sitúa entre 2,5 y 4 veces el diámetro de la TBM.

- **Sistemas sísmicos y acústicos**

Existen diversos sistemas sísmicos y acústicos para investigar el terreno por delante del frente

El sistema TSP (*Tunnel Seismic Prediction*) presenta la ventaja de operar en los hastiales del túnel en lugar de hacerlo en el frente, y la desventaja de necesitar un periodo de más de una hora para completar el registro de datos. El método consiste en la detonación de 24 cartuchos explosivos en el hastial, lo que genera un tren de ondas que viaja más allá del frente. Las diversas reflexiones son registradas por dos geófonos triaxia-

les de gran sensibilidad. El método tiene un alcance entre 100 y 200 m.

El sistema TRT (*Tunnel Reflection Tomography*) aplica la metodología tomográfica para reconocer una zona de terreno de entre 50 y 150 m más allá del frente. La técnica requiere la generación de ondas sísmicas en el frente del túnel, mediante cargas explosivas o martillos especiales. Presenta la desventaja de necesitar del orden de 18 a 20 h para generar las imágenes predictivas.

- **Georradar**

Se ha empleado mediante dos procedimientos distintos. En el primero de ellos se aplica una capa de hormigón proyectado en el frente de excavación para regularizar su superficie. A continuación se aplica una antena de baja frecuencia, capaz de detectar cavidades métricas a distancias de hasta 10 – 15 m.

El segundo procedimiento consiste en la realización de una perforación horizontal, dentro del cual se aloja una sonda de radar. Esta sonda detecta el eco de las cavidades, pero no es capaz de ubicarla espacialmente, de modo que el único dato que proporciona es la posible presencia de una cavidad a la distancia del frente en la que se ha producido el eco.

3.2. Investigación del acuífero kárstico

La investigación del acuífero supone la aplicación de un amplio número de técnicas hidrogeológicas (test de permeabilidad, pruebas de bombeo, diagráfias, trazadores, etc.), cuya exposición en detalle no es el objeto de este capítulo. De manera general, los aspectos a investigar son los que se enumeran a continuación (Marinos, 2001):

- Identificación del medio acuífero mediante cartografía hidrogeológica y estructural.

- Distinción de las diferentes unidades hidrogeológicas.
- Identificación de las zonas de recarga y descarga.
- Localización y cartografía de puntos de agua.
- Elaboración de mapas piezométricos.
- Estimación de los parámetros hidrogeológicos, tanto del entorno inmediato del túnel, como de zonas más alejadas (permeabilidades, transmisividades, coeficientes de almacenamiento, etc.).

4. Interacción entre los acuíferos kársticos y los túneles

Marinos (2001) ha descrito los posibles escenarios y situaciones hidrogeológicas que pueden tener lugar cuando un túnel se excava en calizas. El organigrama incluido en la Fig. 8 resume estos escenarios y las situaciones a las que conduce durante la construcción.

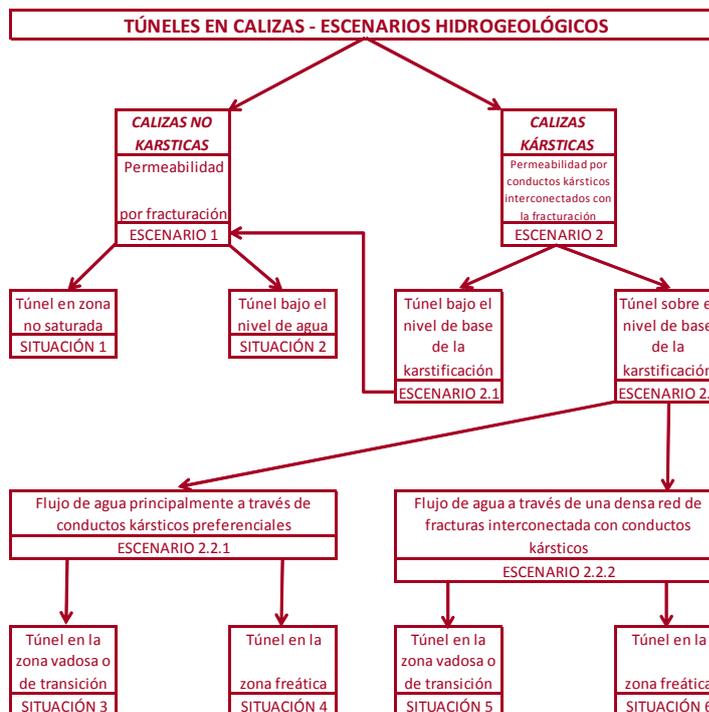


Figura 8. Escenarios hidrogeológicos en los túneles en calizas (Marinos, 2001).

Marinos (2001) describe las distintas situaciones hidrogeológicas del siguiente modo:

- **Situación 1:** el túnel atravesará un macizo calizo completamente seco, sin riesgo de sufrir inundación.
- **Situación 2:** el túnel sufrirá flujos de agua de escasa magnitud a moderada, en función del grado de fracturación y apertura de las fracturas presentes en cada zona.
- **Situación 3:** el túnel se excava en la zona de circulación vadosa, donde se produce la transferencia de agua hacia la zona freática. El túnel se excavará en terreno seco, pero pueden tener lugar súbitos inlfujos de agua e inundaciones si se producen lluvias o tormentas en el área de recarga. En este caso suele ser habitual realizar taladros o reconocimientos por delante del frente.
- **Situación 4:** el túnel se excava en zona freática, en un entorno saturado de agua. Se drena agua del acuífero kárstico de manera continuada. La infiltración puede ser estimada de acuerdo al gráfico de la Fig. 9. Si la karstificación se limita a fisuras más o menos ensanchadas, la cantidad de agua infiltrada será moderada, pero si se interceptan conductos o cavidades de mayores dimensiones, la afluencia puede ser rápida y violenta, y mantenerse durante mucho tiempo. Se hace imprescindible realizar reconocimientos por delante del frente de excavación. Cuando estos reconocimientos detectan conductos importantes, deberán adoptarse medidas de predrenaje o sellado de estos conductos. Los recursos hídricos del acuífero kárstico pueden verse afectados.
- **Situación 5:** el túnel se excava en la zona vadosa o de transición. El terreno presenta una densa red de fisuras con ligera karstificación y moderada apertura. Durante la construcción se detectan algunas humedades. Durante los periodos climáticos más húmedos se detectan epi-

sodios puntuales de infiltración de aguas en tránsito hacia la zona freática, pero sin riesgo de inundaciones en el túnel.

- **Situación 6:** el túnel se localiza en la zona freática, saturada de agua. La excavación drena, de manera permanente, cantidades significativas de agua, imponiendo la necesidad de disponer en obra de adecuados sistemas y equipos de drenaje. Deben evitarse las irrupciones violentas de agua, lo que lleva a la necesidad de realizar reconocimientos sistemáticos por delante del frente, y aplicar técnicas de predrenaje y tratamientos especiales en las zonas de riesgos que se vayan detectando. Los recursos hídricos del acuífero kárstico se pueden ver seriamente afectados.

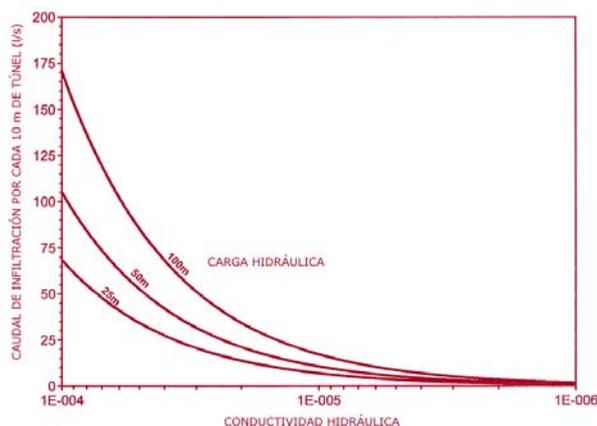


Figura 9. Estimación del inlfujo de agua en un túnel de 10 m de diámetro excavado dentro de la zona freática de un acuífero kárstico (Marinos, 2001).

5. Riesgos en la ejecución de túneles en zonas kársticas

Pueden considerarse tres grandes grupos de riesgos:

- Riesgos relacionados con el agua
- Riesgos relacionados con la presencia de rellenos blandos

- Riesgos relacionados con la presencia de cavidades.

5.1. Riesgos relacionados con el agua

Son los más difíciles de combatir. Pueden destacarse los siguientes:

- **Grandes golpes de agua o inundaciones:** Se producen de forma súbita y pueden causar grandes daños materiales y personales. Generalmente se asocian a conductos kársticos de cierta magnitud. Es necesario detectar previamente desde el frente de excavación los conductos o zonas donde pueden tener lugar estos riesgos.
- **Tasas de infiltración considerables:** En zona vadosa o de transición tienen carácter estacional o temporal, y más permanente en zona freática. Durante la fase de obra suponen una complicación para las instalaciones de drenaje. Puede solucionarse mediante inyecciones de sellado e impermeabilización, que limiten la infiltración.
- **Efecto pantalla:** Por obstrucción de conductos kársticos, este hecho en obras poco profundas puede afectar a cimentaciones o bien movilizar contaminantes. Puede solucionarse mediante obras de bypass que permitan restituir la red de flujo.
- **Presencia de precipitados:** Estos precipitados obstruyen la red de drenaje del túnel en explotación. Los conductos de drenaje deben lavarse periódicamente con agua a presión, en ocasiones se pueden emplear productos descalcificantes.
- **Afección a manantiales del entorno:** Los manantiales del entorno pueden quedar afectados tanto en la cantidad del recurso, disminuyendo su caudal incluso llegando al agotamiento, como en su calidad, debido

a la infiltración desde la obra de contaminantes derivados de la operación. Se debe establecer en un estudio hidrogeológico previo una zonificación de zonas de protección de manantiales estratégicos, y adoptar medidas para evitar que las aguas que surten al manantial sean derivadas al túnel (*by-pass*, sellados, etc.).

- **Subsidiencias debidas al drenaje:** Una extracción rápida de agua debido a un drenaje desde la obra (tanto drenaje preventivo como la propia infiltración no controlada), puede derivar en fenómenos de subsidencia en superficie. Este riesgo es especialmente significativo en zonas urbanas. Puede solucionarse mediante inyecciones de sellado, y la preparación de conductos *by-pass*.
- **Carga hidrostática elevada sobre el revestimiento:** En algunas ocasiones, cuando el túnel discurre en zona freática, o se obstruye un conducto en zona vadosa o de transición, pueden desarrollarse presiones hidrostáticas sobre el revestimiento. Este problema se puede solucionar mediante conductos *by-pass* que restituyan el flujo original del agua, y mediante "tapes" diseñados para resistir eventuales presiones.

El agua puede acceder al túnel de una manera moderada pero continua o de forma brusca y violenta, de acuerdo a las condiciones hidrogeológicas del sistema kárstico. En aquellos casos en los que la información disponible prevea estos riesgos, es recomendable llevar una exploración sistemática por delante del frente, para poder detectar los conductos por los que fluye mayor caudal. Una vez detectados los conductos o zonas de peligro, se procederá a tratarlas, mediante drenajes e inyecciones.

Es una buena práctica ejecutar de manera sistemática canalizaciones *by-pass* de los principales conductos kársticos, Fig. 10, tanto en zona vadosa como en zona

freática, ya que con ellos se restituye la dinámica del sistema acuífero, se preservan los recursos hídricos, se evitan infiltraciones continuas al interior del túnel, y se libera al revestimiento de presiones hidrostáticas.

Cuando sea difícil evitar la actuación de presiones hidrostáticas sobre el revestimiento, es preferible que estas actúen sobre el "tape" que retiene el agua, ya

que este elemento de contención puede dimensionarse con toda la robustez necesaria. Si se asume que es el revestimiento al completo el que admite la carga hidrostática, es necesario diseñarlo reforzado (armadura, etc.) y se hace inevitable que el agua se infiltre en el sistema de drenaje, afectándose así al sistema acuífero, lo que lleva habitualmente a descartar este tipo de soluciones.

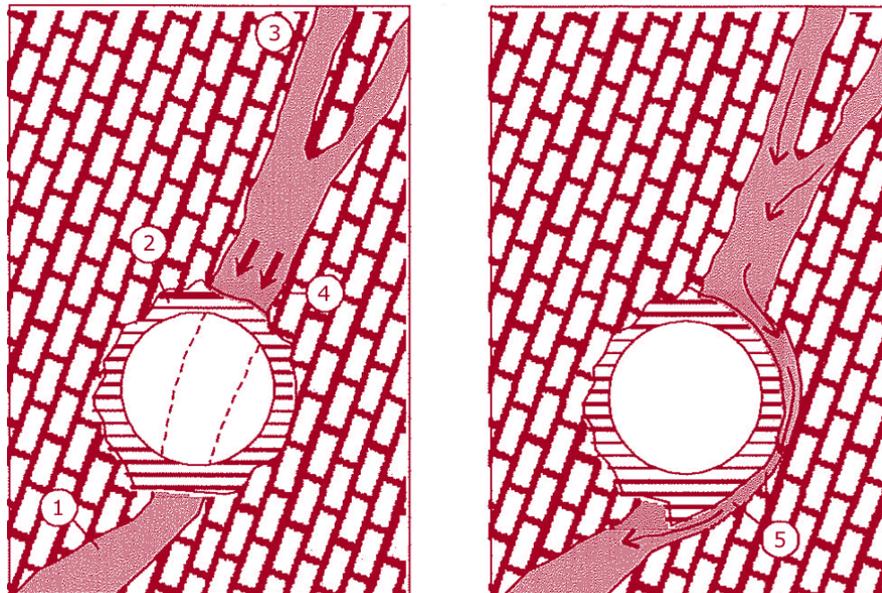


Figura 10. *By-Pass* de conductos kársticos alrededor del revestimiento de un túnel (Milanovic, 2000).

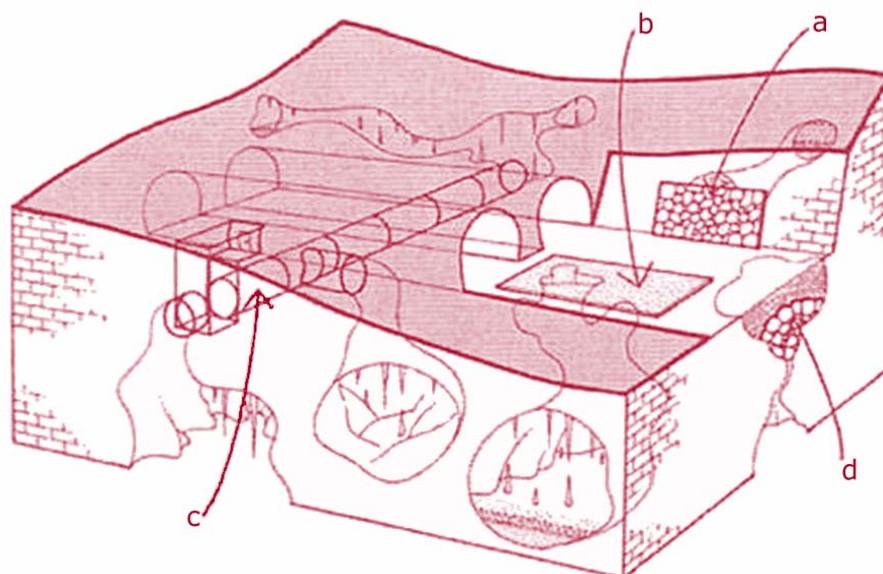


Figura 11. Tratamientos de preservación del entorno kárstico interceptado por los túneles: a, b y d) Cerramiento de cavidades. c) Conductos *by-pass* (Knez, 2008).

En algunas situaciones en las que se prevea que las presiones hidrostáticas sean especialmente elevadas, puede definirse un sistema de válvulas de presión, ubicadas en el interior de los conductos kársticos. Cuando la presión

supere el valor de resistencia del tape colocado, la válvula se abrirá, introduciendo agua en el sistema de drenaje del túnel, y liberando carga hidrostática. La Fig. 12 ilustra un ejemplo de este tipo de instalación (Mussger, 1989).

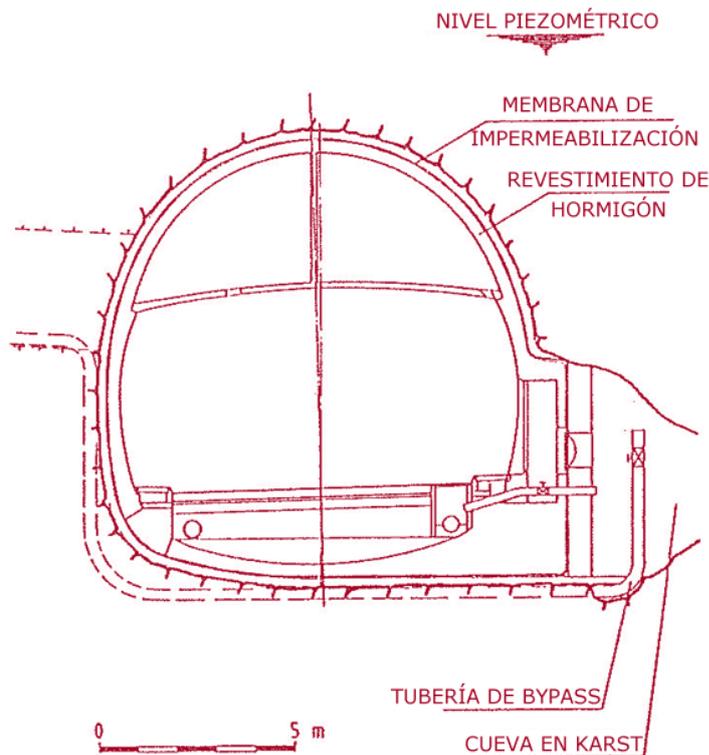


Figura 12. Revestimiento y conductos kársticos dotados de válvulas de presión.

5.2. Riesgos relacionados con la presencia de rellenos

Con frecuencia se registra la presencia de cavidades rellenas de material blando o caos de bloques. A veces estos depósitos pueden tener una extensión considerable, como es el caso de las depresiones kársticas y de las dolinas profundas, habituales en los grados de karstificación kIV y kV.

Este tipo de terreno puede ocasionar los siguientes riesgos:

- **Inestabilidad del túnel y del frente de excavación:** La baja calidad

geomecánica de estos materiales provoca inestabilidades de bóveda y del frente de excavación. Requiere sostenimientos robustos y tratamientos del frente.

- **Desvío tuneladoras:** Los rellenos tienen poca capacidad portante, y podrían provocar el cabeceo de la tuneladora. Esta situación puede combatirse mediante inyecciones practicadas desde la propia máquina, o desde galerías auxiliares.
- **Hinchamiento de materiales de relleno (*swelling*):** las características mineralógicas de algunos materiales de relleno pueden derivar en fenómenos de hinchamiento. Pueden

evitarse mediante aplicación de sostenimientos y revestimientos robustos.

Las zonas de rellenos blandos se ejecutan mediante los métodos clásicos de excavación en terrenos blandos. De acuerdo a Hoek (2000) un método adecuado es el que se describe en la Fig. 13, que consta de los siguientes elementos: 1) Paraguas de micropilotes, de diámetro

entre 75 y 114 mm. 2) Capa de sellado de hormigón proyectado, de unos 5 cm de espesor. 3) Bulones de fibra de vidrio instalados en el frente, de entre 6 y 12 m de longitud, en malla de 1 x 1 m. 4) Cerchas de perfil HEB muy cercanas al frente. 5) Contrabóveda de sostenimiento. 6) Hormigón proyectado con fibras, con un espesor total próximo a los 25 - 30 cm. 7) Bulones autoperforantes. 8) Contrabóveda de revestimiento final.

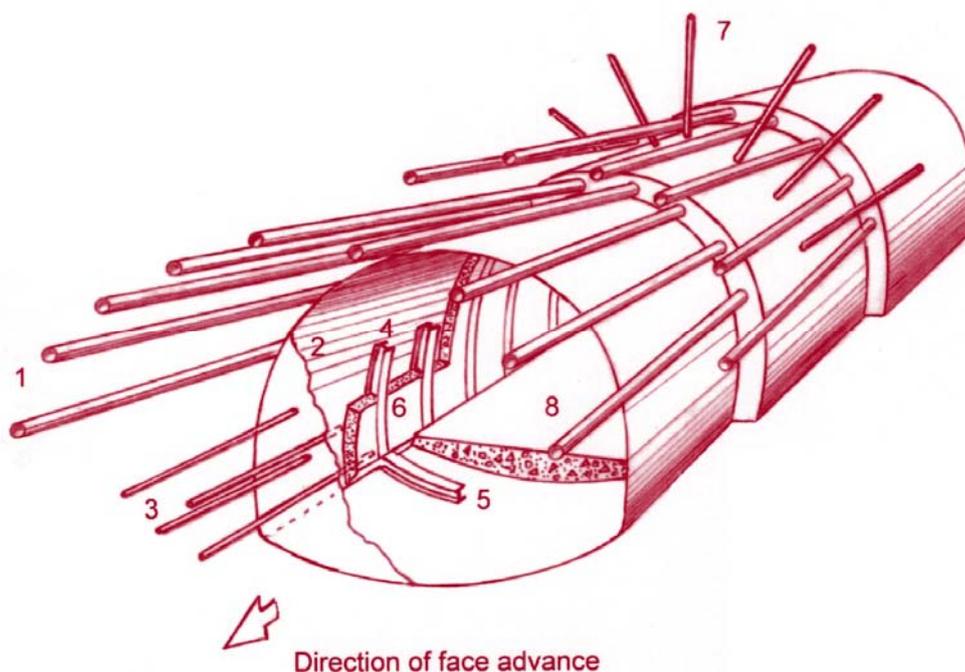


Figura 13. Sostenimiento para rellenos blandos en zonas kársticas. Basado en Hoek (2000).

5.3. Riesgos relacionados con la presencia de cavidades

El paso de cuevas requiere la definición de medidas específicas, en función del tamaño de la cavidad, de su geometría y de su disposición relativa respecto del túnel. En la mayor parte de las ocasiones el paso de la cueva puede abordarse sin dificultad desde el propio frente. Solo en ocasiones excepcionales es necesario recurrir a cambios de trazado.

Los principales riesgos que cabe destacar son los siguientes:

- **Incertidumbre sobre la estabilidad del túnel y cavidad:** Cuando un túnel intercepta una cavidad, el nivel tensional del entorno se modifica, ya que el hueco resultante puede ser mayor. Esta situación puede crear inestabilidades en la cavidad, y necesidades adicionales de sostenimiento en el túnel. Debe realizarse un análisis tensodeformacional del conjunto cueva + túnel, que permite determinar la necesidad de eventuales refuerzos.
- **Problemas de vibraciones con las voladuras:** Las vibraciones generadas por las voladuras pueden provocar inestabilidades en las cuevas cercanas. En ocasiones están cuevas

pueden tener uso turístico o estar protegidas por cuestiones arqueológicas o medioambientales. Estos riesgos pueden evitarse mediante voladuras controladas.

- **Problemas de ejecución de los sostenimientos y revestimientos:** La presencia de cavidades de tamaño inferior al diámetro del túnel provoca que en las zonas que interceptan las cavidades se pierda el contorno del túnel. En estas zonas no es posible colocar el sostenimiento, salvo que se preparen "tapes".
- **Dificultad de paso de las tuneladoras a través de las cavidades:** Cuando la tuneladora alcanza una cavidad, puede perder su zona de apoyo, con el consiguiente riesgo de desvío de la máquina.

Cuando se aplican métodos de excavación convencional, el paso de cuevas suele ser más sencillo, ya que la cavidad es accesible desde el frente, lo que facilita reconocer su geometría y características, y de este modo definir el procedimiento más adecuado.

En algunos casos, las cavidades han sido de tal magnitud, que ha sido necesario definir auténticos "túneles artificiales" por el interior de la cueva, tal como se ilustra en la Fig. 14.

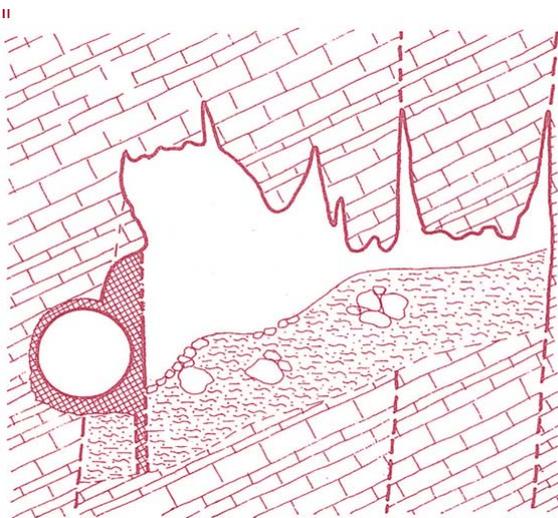


Figura 14. Cueva de grandes dimensiones en el hastial del túnel (Milanovic, 1985).

Otras veces, la gran dimensión de la cavidad hace que su tratamiento sea muy costoso, prefiriéndose realizar un cambio del trazado del túnel. Suele ser un caso habitual en túneles hidráulicos y mineros.

La Fig. 15 ilustra una situación de este tipo.

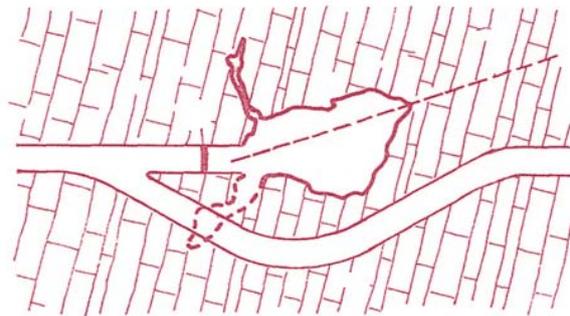
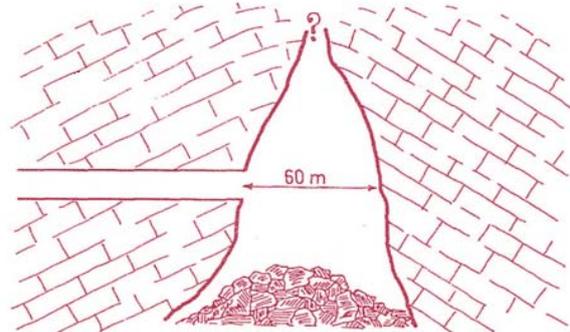


Figura 15. Desvío de un túnel para evitar una cavidad de grandes dimensiones, (Milanovic, 1985).

Las mayores dificultades en el paso de cuevas tienen lugar cuando el túnel se excava mediante tuneladora, ya que se trata de máquinas muy rígidas, generalmente sin posibilidades de retroceso y sin frente accesible. Los tratamientos habituales suelen ser los rellenos, las estabilizaciones de bóveda, las "losas puente", etc. En la mayor parte de las ocasiones es necesario recurrir a galerías laterales o auxiliares para poder realizar los distintos tipos de tratamiento.

La Fig. 16 ilustra algunos de los tratamientos habituales en estos casos.

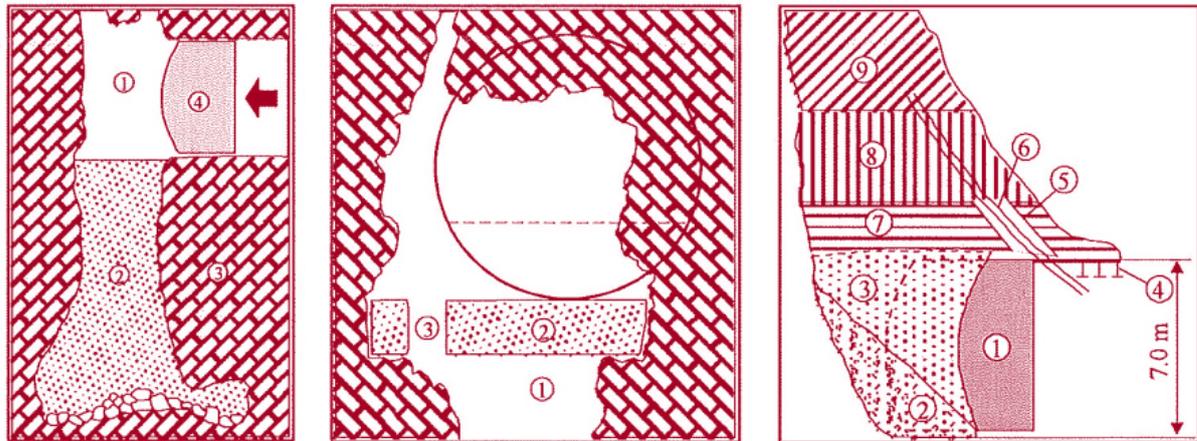


Figura 16. Cruce de cavidades con tuneladora (Milanovic, 2000).

6. Tratamientos mediante inyecciones

Las inyecciones en el interior de un túnel conllevan una serie de diferencias sustanciales con aquellas realizadas desde la superficie. Se dispone de una plaza de trabajo más limitada y el transporte de personal y equipos supone un consumo de tiempos y una complejidad adicional.

La primera clasificación se establece en función de en qué fase se encuentra el túnel: distinguiendo entre trabajos en avance y labores que se ejecutan una vez realizada la excavación, los primeros tienen que ver normalmente con sellado bien de conductos o cavidades, y resultan especialmente complicados cuando se encuentra agua a presión, o bien un conjunto de agua y sedimentos/lodos.

Una vez ejecutado el túnel, se pueden emplear las inyecciones para reducir las filtraciones hacia el mismo.

6.1. Inyecciones en avance

La filosofía general de trabajo cuando se aborda el sellado en avance de una cavidad kárstica es controlar primero el flujo de agua para a continuación ejecutar los trabajos propios de relleno y sellado.

A modo de guía práctica se establecen las siguientes recomendaciones (Milanovic, 2004):

- Análisis de los datos geológicos, hidrogeológicos, geofísicos etc, recogidos durante las campañas de reconocimiento.
- Perforación de sondeos de reconocimiento en avance (30 – 100 m).
- En caso de detectar fuertes flujos de agua en los sondeos de reconocimiento, se recomienda emplear paraguas de protección en avance.
- En caso de detectar una presión en el frente de excavación debido a la presencia de agua a presión, es recomendable emplear un sellado de hormigón en el frente previo a la perforación del paraguas.
- En el caso de detectar conductos aislados con presiones de agua reducidas se pueden emplear las metodologías de bypass o sellado expuestas en este mismo capítulo.
- A continuación se continúa la excavación a través de la zona consolidada.

Los materiales a emplear para el sellado consisten básicamente en lechadas de cemento o morteros, aditivados en fun-

ción de la presencia de agua. En el caso de microkarstificaciones se han empleado con éxito microcementos, de menor tamaño de partícula que el cemento tradicional. Cuando se trabaja con agua a presión es fácil que se produzca el lavado del mortero antes del fraguado por lo que resulta efectivo el empleo de resinas.

En el caso de emplear resinas como material de inyección debe tenerse en cuenta su composición, las resinas organominerales tiene una velocidad de reacción muy rápida y una gran expansividad, por lo que resultan muy eficaces para detener temporalmente el flujo de agua, sin embargo su durabilidad no es muy alta por lo que no deben emplearse como una solución permanente sino más bien como una solución a corto plazo que permita utilizar tratamientos complementarios. Las resinas de poliuretano tienen una mayor durabilidad y diferentes grados de reacción, especialmente en el caso de las bicomponente. Estos tratamientos con resinas se pueden complementar con un tratamiento posterior a base de microcemento para rellenar posibles poros.

6.2. Inyecciones de mejora del terreno

Una vez ejecutado el túnel, si se detectan filtraciones importantes, afecciones a captaciones o manantiales, o presencia de huecos tras el sostenimiento, se pueden abordar estos problemas mediante la ejecución de inyecciones desde el túnel.

El objetivo de estas inyecciones es disminuir la permeabilidad en el entorno de la excavación, de forma que se minimice la interacción entre la obra subterránea y el sistema acuífero.

En el caso particular de acuíferos kársticos, la heterogeneidad de la permeabilidad es un factor de peso, y está muy relacionada, como ya se ha comentado, con el tipo de acuífero. Estas inyecciones

tienen una probabilidad de éxito mayor en acuíferos de flujo difuso. En acuíferos mixtos se debe valorar la posibilidad de fugas a favor de direcciones principales de drenaje y en el caso de acuíferos kársticos en sentido estricto sólo tiene sentido sellar aquellos conductos que se puedan detectar, bien por métodos directos o indirectos.

Las inyecciones se realizan mediante taladros en sentido radial. El número de taladros recomendado oscila entre 5 y 10, en función del diámetro del túnel y de la heterogeneidad del terreno. La profundidad de dichos taladros depende entre otros factores de la zona a tratar y del grado de fisuración. En general es admisible trabajar con longitudes de taladro que oscilan entre $(0.75-1)D$ siendo D el diámetro del túnel.

Como fluido de inyección se emplean desde lechadas de cemento, en el caso de tener una red de fracturas lo bastante abierta hasta microcementos resinas de poliuretano e incluso resinas acrílicas. Un criterio de decisión es emplear tamaños de partícula cuyo $D_{80} \geq e$, siendo "e" el tamaño promedio de las fisuras a tratar.

En el caso de tener presión de agua es más recomendable el uso de resinas, ya que tienen mejor resistencia al lavado y gran penetrabilidad incluso en presencia de agua.

Durante la inyección se debe controlar la presión del fluido, el volumen inyectado y el tiempo. La combinación de estos parámetros nos dará el criterio de cierre de la inyección. Es recomendable realizar un tratamiento piloto previo, para poder calibrar estos parámetros de cierre y planificar una inyección efectiva en plazos coste y eficacia.

El tratamiento se realiza por secciones compartimentando las zonas de trabajo. Es importante identificar el origen de las filtraciones previamente a la inyección. En el caso de túneles ejecutados con tuneladora, si el trasdós no es perfectamente impermeable, el agua puede reco-

rrer grandes distancias antes de ser visible en el túnel. En estos casos se recomienda acantonar previamente las zonas con probabilidad de infiltración, mediante el sellado de los anillos que delimitan dicha zona.

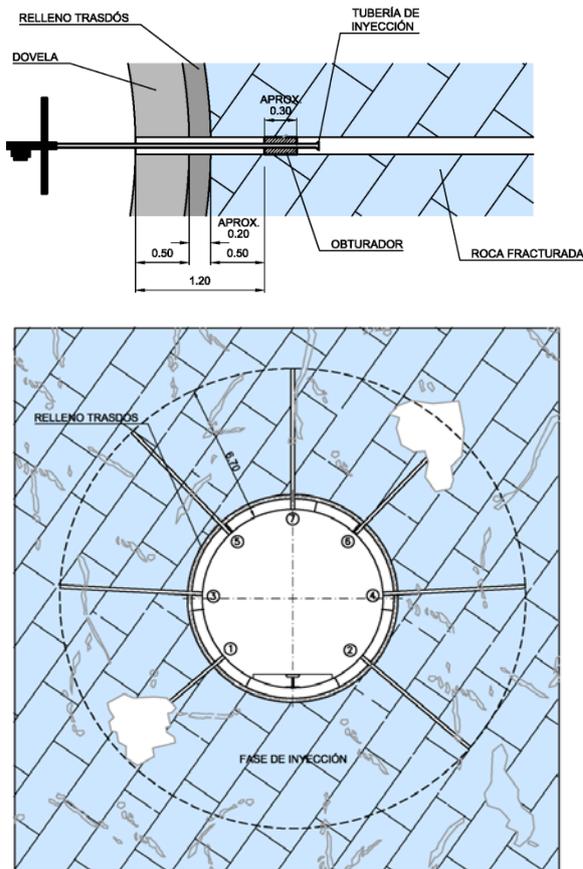


Figura 17. Sección tipo de inyección y detalle obturador (Geoconsult).

Además de los parámetros de corte indicados, se deben controlar los siguientes aspectos.

- Fluidez en el cono Marsh.
- Viscosidad plástica.
- Decantación.
- Tiempo de fraguado.
- Resistencia mecánica a compresión.

7. Resumen

Aunque hay muchos tipos de terreno susceptibles de sufrir fenómenos de karstificación, los más importantes por

su extensión y frecuencia de aparición son los asociados a rocas carbonatadas (calizas y dolomías).

Las rocas carbonatadas suelen presentar dos patrones generales de karstificación. En los materiales más resistentes y compactos ($UCS > 60 \text{ MPa}$, Peso Específico $2,6 \text{ kN/m}^3$ y Porosidad Primaria $< 2\%$) es donde se desarrollan con mayor frecuencia las mayores cavidades, dolinas y conductos, siendo la fracturación de la roca la vía principal de karstificación y la que condiciona el flujo de agua. En los materiales de resistencia más moderada y menor densidad ($UCS < 30 \text{ MPa}$, Peso Específico $2,3 \text{ kN/m}^3$ y Porosidad Primaria $> 10\%$), se presentan menos cavidades y dolinas, y el flujo de agua es más difuso.

La planificación de túneles en macizos karstificados requiere una investigación profunda de las características hidrogeológicas del sistema acuífero, y la detección de cuevas. Estas investigaciones deben desarrollarse tanto en fase de proyecto, como durante el desarrollo de las obras.

La ejecución de túneles en terrenos kársticos suele llevar aparejados tres tipos generales de riesgos: los relacionados con el agua, los relacionados con la presencia de rellenos blandos y los relacionados con la presencia de cavidades. El proyecto y los medios de obra deberán tener previstas estas situaciones.

Los riesgos derivados del agua son los más difíciles de evitar y combatir. Por ello, en las zonas donde se prevea riesgo elevado, es necesario ejecutar el túnel con reconocimientos por delante del frente, y tener definidos protocolos de actuación cuando se detecten puntos de riesgo (predrenajes, inyecciones, etc.).

Es conveniente ejecutar canalizaciones *by-pass* de los principales conductos kársticos, tanto en zona vadosa como en zona freática, ya que con ellos se restituye la dinámica del sistema acuífero, se preservan los recursos hídricos, se evitan

infiltraciones continuas al interior del túnel, y se libera al revestimiento de presiones hidrostáticas.

Cuando sea difícil evitar la actuación de presiones hidrostáticas sobre el revestimiento, es preferible que estas actúen sobre el "tapa" que retiene el agua, ya que este elemento de contención puede dimensionarse con toda la robustez necesaria. Si se asume que es el revestimiento al completo el que admite la carga hidrostática, es necesario diseñarlo reforzado (armadura, etc.) y se hace inevitable que el agua se infiltre en el sistema de drenaje, afectándose así al sistema acuífero, lo que lleva habitualmente a descartar este tipo de soluciones.

Las zonas con presencia extensa de rellenos blandos o caos de bloques se ejecutan mediante los métodos clásicos de excavación en terrenos blandos. De acuerdo a Hoek (2000) un método adecuado consta de los siguientes elementos: paraguas de micropilotes, bulones de fibra de vidrio instalados en el frente, cerchas de perfil HEB muy cercanas al frente, contrabóveda provisional y definitiva, hormigón proyectado con un espesor total próximo a los 25 - 30 cm y eventualmente bulones autopercutores.

El paso de cuevas requiere la definición de medidas específicas, en función del tamaño de la cavidad, de su geometría y de su disposición relativa respecto del túnel. En la mayor parte de las ocasiones el paso de la cueva puede abordarse sin dificultad desde el propio frente. Solo en ocasiones excepcionales es necesario recurrir a cambios de trazado.

Cuando se aplican métodos de excavación convencional, el paso de cuevas suele ser más sencillo, ya que la cavidad es accesible desde el frente, lo que facilita reconocer su geometría y características, y de este modo definir el procedimiento más adecuado.

Las mayores dificultades en el paso de cuevas tienen lugar cuando el túnel se

excava mediante tuneladora, ya que se trata de máquinas muy rígidas, generalmente sin posibilidades de retroceso y sin frente accesible. Los tratamientos habituales suelen ser los rellenos, las estabilizaciones de bóveda, las "losas puente", etc. En la mayor parte de las ocasiones es necesario recurrir a galerías laterales o auxiliares para poder realizar los distintos tipos de tratamiento.

En ocasiones es necesario recurrir a las inyecciones para sellar conductos las fracturas y conductos por los que circula el agua, especialmente cuando el túnel discurre en zona freática.

8. Bibliografía

- FORD, D.C., y WILLIAMS, P.F., (2005).: "Karst Hidrogeology and Geomorphology". Ed. Wiley. New York (USA).
- HOEK, E., (2000).: "Big Tunnels in Bad Rock: 2000 Terzaghi Lecture". ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Seattle (USA).
- KNEZ M., SLABE, T., Y SEBELA, S., (2008).: "The Largest Karst Cave Discovered in a Tunnel During Motorway Construction in Slovenia's Classical Karst (Kras)". Environ. Geol. No. 54.
- MARINOS, P.G., (2001).: "Tunnelling and Mining in Karstic Terrane; An Engineering Challenge". Geotechnical & Environmental Applications of Karst Geology & Hidrology. Beck and Herring (eds.). Balkema Publishing. Rotterdam. Netherlands.
- MILANOVIC, P.T, (1985).: "Karst Water Resources". Antalya Symposium. IAHS Publication No. 161.
- MILANOVIC, P.T, (2000).: "Geological Engineering in Karst". Zebra Editions. Belgrade. Serbia.

- MUSSGER, K. (1989).: "Karst problems at the Plabutsch Expressway Tunnel". Tunnels and Water. Serrano (ed.). Balkema.
- WALTHAM, A.C., y FOOKES, P.G., (2003).: "Engineering Classification of Karst Ground Conditions". Quarterly Journal Engineering Geology Hidrology, No. 36.
- WALTHAM, T., BELL, I F., y CULSHAW, M., (2005).: "Sinkholes and Subsidence. Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction". Springer-Praxis Books. Chichester. UK.
- WHITE, W.B., (1988).: "Geomorphology and Hidrology of Karst Terrains". Oxford University Press. New York. USA.