

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua

*A la Libertad por la Universidad !!*



# INGENIERÍA GEOLÓGICA II

---

## Túneles

Dr. Ingeniero Tupak Obando R., Geólogo  
Doctorado en Geología y Gestión Ambiental  
Celular: 84402511  
Website: <http://blogs.monografias.com/>

Managua, 2010

## CONTENIDO

1. Introducción
2. Investigaciones *in situ*
3. Influencia de las condiciones geológicas
4. Parámetros geomecánicos de diseño
5. Clasificaciones geomecánicas
6. Estimación de los sostenimientos por métodos empíricos
7. Criterios de excavabilidad
8. Métodos de excavación y de sostenimiento de túneles en roca
9. Métodos de construcción de túneles en suelos
10. Consideraciones geológico-geotécnicas durante la construcción

# Introducción

El aprovechamiento del espacio subterráneo constituye en la actualidad una de las alternativas más idóneas para el desarrollo de vías rápidas de comunicación. A pesar de su mayor coste con respecto a otras soluciones de superficie, presenta cada vez mayores ventajas, tanto desde el punto de vista medio ambiental como funcional (acortamiento de distancias, seguridad, menor impacto ambiental, etc.).

La mayoría de los túneles se construyen para salvar un obstáculo natural y permitir el acceso a vías de comunicación para transporte urbano (metros), transvases y conducciones; o para unir islas o estrechos y para pasos fluviales, en cuyo caso el trazado se efectúa bajo una lámina de agua. Las excavaciones subterráneas están estrechamente relacionadas con la energía y los recursos minerales (aprovechamientos hidroeléctricos, centrales, explotaciones mineras, almacenamientos subterráneos, etc.; Figura 10.1).

Dentro de la amplia variedad de usos del espacio subterráneo, gran parte de los túneles se excavan para infraestructuras del transporte, basándose su diseño en la **seguridad** y la **economía**. Este capítulo se centra



Excavación de una central hidroeléctrica subterránea (cortesía de J. Granero).

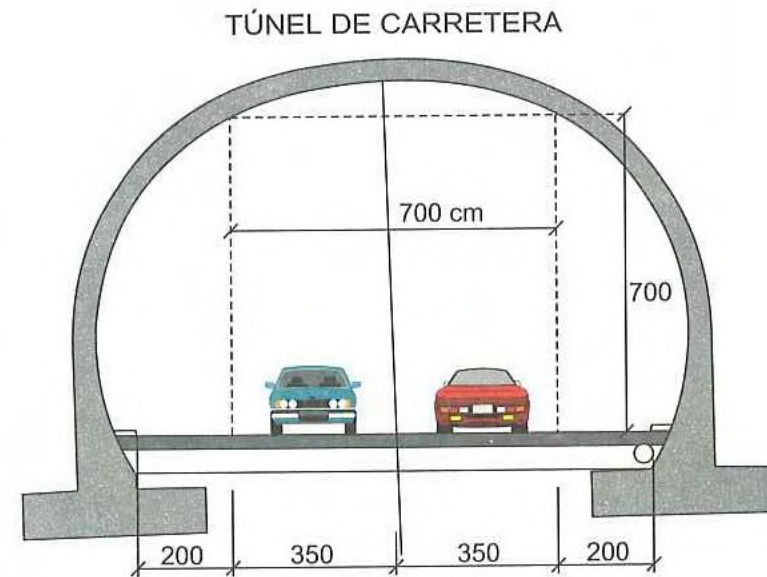
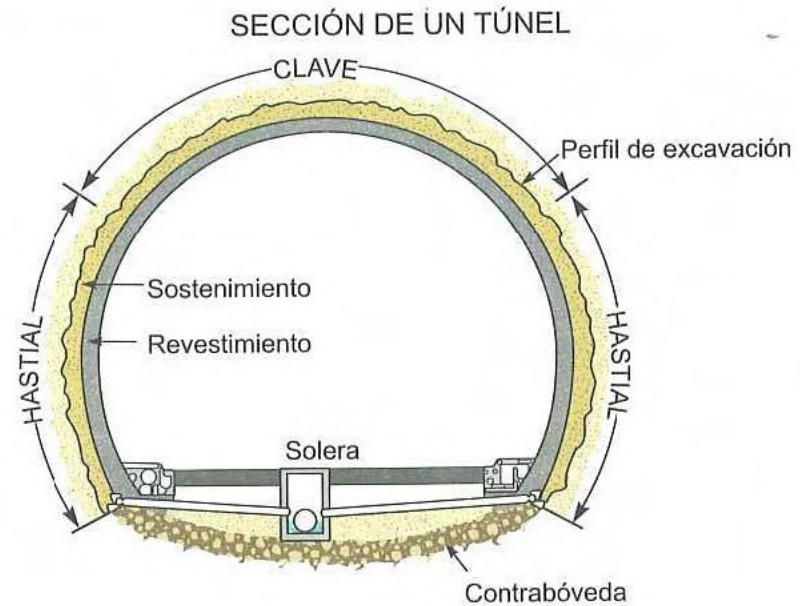


Los túneles se caracterizan por su trazado y sección, definidos por criterios geométricos de gálibo,

pendiente, radio de curvatura y otras consideraciones de proyecto. Bajo el punto de vista de la ingeniería geológica los datos más significativos son la sección, perfil longitudinal, trazado, pendientes, situación de excavaciones adyacentes, boquillas y accesos intermedios. En la Figura 10.2 se muestran varias **secciones típicas** de túneles y las denominaciones más habituales.

El **sostenimiento** se refiere a los elementos estructurales de sujeción del terreno, aplicados inmediatamente después de la excavación del túnel, con el fin de asegurar su estabilidad durante la construcción y después de ella, así como garantizar las condiciones de seguridad.

El **revestimiento** se coloca con posterioridad al sostenimiento y consiste en aplicar sobre dicho sostenimiento una capa de hormigón, u otros elementos estructurales, con el fin de proporcionar resistencia a largo plazo al túnel y dar un acabado regular, mejorando su funcionalidad (condiciones aerodinámicas, impermeabilidad, luminosidad, albergar instalaciones y propiciar la estética de la obra).

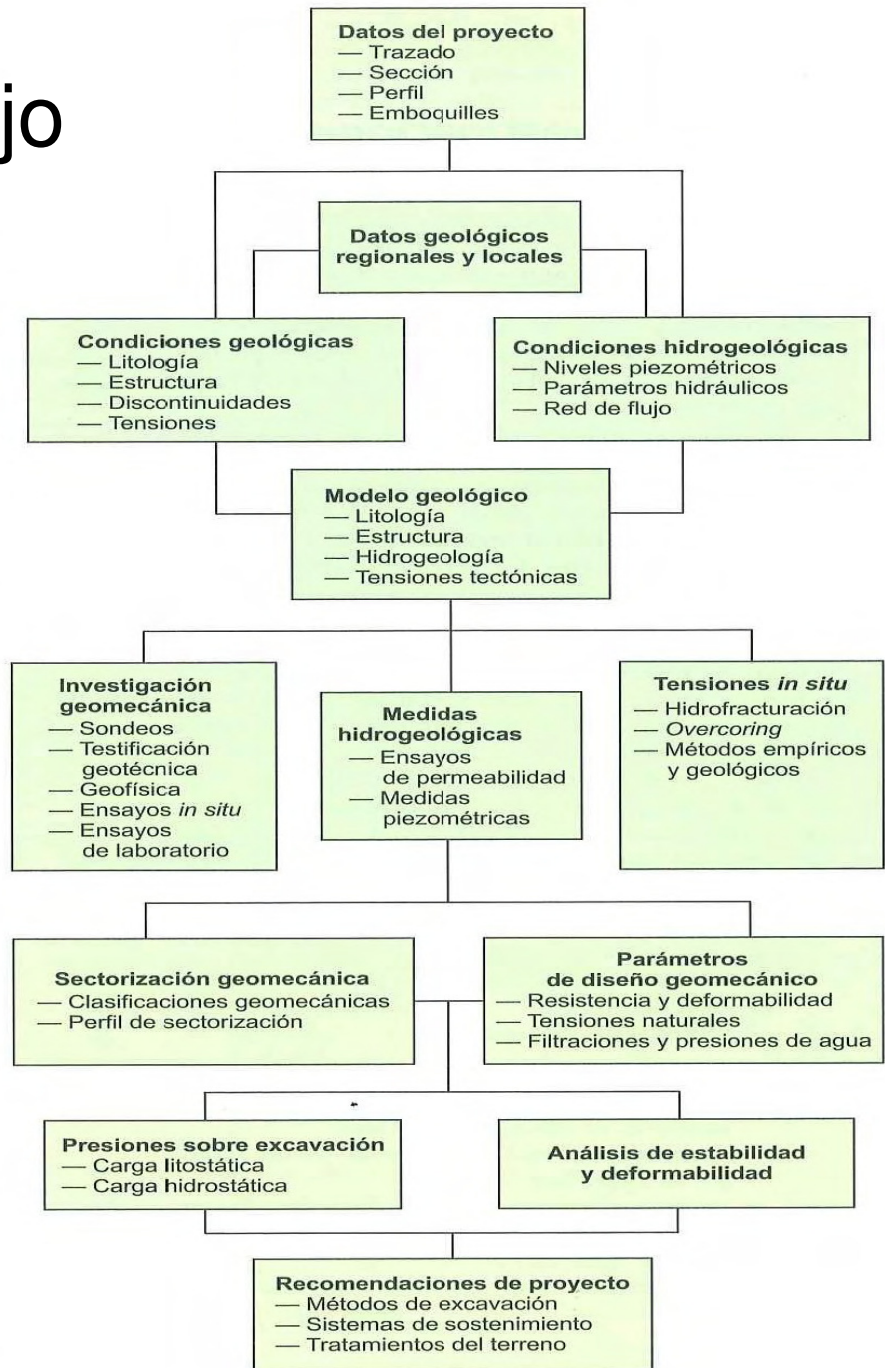


Secciones típicas de túneles y sus denominaciones.



# Metodología de trabajo

- Condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del trazado.
- Identificación de puntos singulares o zonas de mayor complejidad geológica, hidrogeológica o geotécnica.
- Clasificación y sectorización geomecánica, propiedades y parámetros de diseño del macizo rocoso.
- Criterios geomecánicos para el cálculo de sostenimientos y métodos de excavación.
- Emplazamiento, excavación y estabilización de boquillas y accesos intermedios.
- Recomendaciones para la excavación, sostenimientos y proceso constructivo del túnel.
- Tratamientos del terreno para la estabilización, refuerzo, drenaje o impermeabilización del terreno.



Metodología de los estudios geológico-geotécnicos para túneles.

# Investigaciones *in situ*

## Fases, objetivos y contenido de las investigaciones *in situ* para túneles

Fases y objetivos	Tareas	Contenidos
<b>Estudios previos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reconocimiento geológico general del trazado o corredores.</li> <li>• Identificación de riesgos geológicos para la excavación del túnel.</li> <li>• Clasificación geológico-geotécnica básica de materiales.</li> <li>• Planificación de investigaciones para la siguiente fase.</li> <li>• Análisis de alternativas de trazados.</li> </ul>	Revisión de información	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Topografía.</li> <li>— Hidrología e hidrogeología.</li> <li>— Mapas geológicos.</li> <li>— Túneles y minas próximas.</li> <li>— Sismicidad.</li> </ul>
	Fotointerpretación	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Fotogramas en color y blanco y negro.</li> <li>— Técnicas especiales en zonas cubiertas de vegetación.</li> <li>— Teledetección.</li> </ul>
	Reconocimientos geológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Geomorfología y estabilidad de laderas.</li> <li>— Litologías.</li> <li>— Fallas y estructuras tectónicas.</li> <li>— Datos hidrogeológicos.</li> </ul>
	Investigaciones <i>in situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Sondeos espaciados.</li> <li>— Geofísica en superficie.</li> </ul>
	Interpretación geológico-geotécnica	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Mapas y cortes geológicos (1:10.000 – 1:2.000).</li> </ul>
<b>Anteproyecto y proyecto</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Selección del trazado y emboquilles.</li> <li>• Estudio geológico-geotécnico detallado.</li> <li>• Evaluación de los problemas geológico-geotécnicos y su incidencia en la excavación.</li> <li>• Características geomecánicas de los materiales.</li> <li>• Criterios geomecánicos para el diseño.</li> <li>• Recomendaciones para el sostenimiento, excavación y tratamientos del terreno.</li> </ul>	Cartografía geológica-geotécnica	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Litoestratigrafía.</li> <li>— Estructura.</li> <li>— Estaciones geomecánicas.</li> <li>— Geomorfología.</li> <li>— Mapas a escala 1:2.000 – 1:500.</li> </ul>
	Datos hidrológicos e hidrogeológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Regionales y locales.</li> <li>— Estimación de caudales y presiones.</li> </ul>
	Investigaciones geotécnicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Ensayos de laboratorio.</li> <li>— Sondeos.</li> <li>— Calicatas.</li> <li>— Geofísica.</li> <li>— Ensayos <i>in situ</i>.</li> </ul>
	Interpretación geológica-geotécnica	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Clasificaciones geomecánicas.</li> <li>— Propiedades geomecánicas.</li> <li>— Recomendaciones para el sostenimiento y excavación.</li> <li>— Tratamientos del terreno.</li> </ul>
<b>Construcción</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Control geológico-geotécnico y auscultación.</li> <li>• Adecuación del proyecto a las condiciones del terreno.</li> <li>• Medidas de control de inestabilidades, filtraciones y tratamientos del terreno.</li> </ul>	Control geológico-geotécnico	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Cartografía geológica-geotécnica en el interior del túnel.</li> <li>— Sondeos en avance, galería exploratoria, geofísica, ensayos.</li> </ul>
	Auscultación	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Instrumentación geotécnica.</li> </ul>
	Control de calidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Ensayos.</li> </ul>
	Asistencia técnica	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Seguimiento y control de ejecución.</li> <li>— Soluciones constructivas y tratamientos del terreno.</li> </ul>



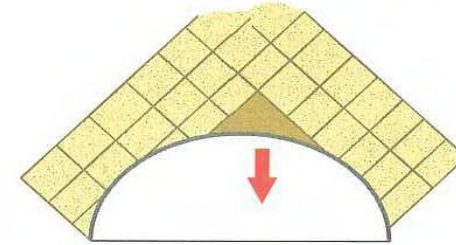
# Influencia de las condiciones geológicas

Al excavar un túnel se pueden encontrar tres tipos de **condiciones naturales** que dan lugar a la pérdida de resistencia del macizo y, por tanto, a **problemas de estabilidad** (Figura 10.4):

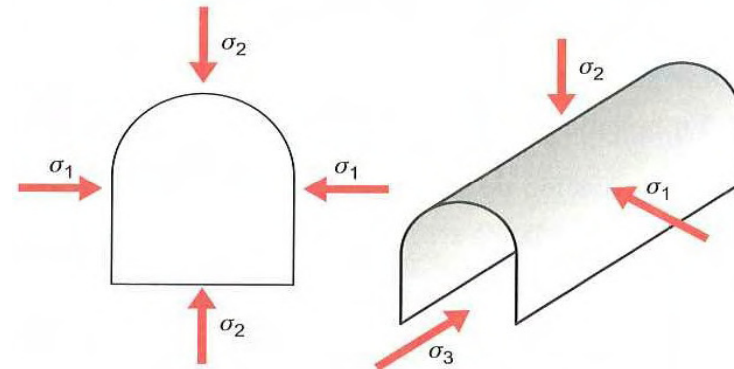
- Orientación desfavorable de discontinuidades.
- Orientación desfavorable de las tensiones con respecto al eje del túnel.
- Flujo de agua hacia el interior de la excavación a favor de fracturas, acuíferos o rocas carstificadas.

Por otro lado, la excavación del túnel también genera una serie de **acciones inducidas** que se suman a las citadas condiciones naturales, como son:

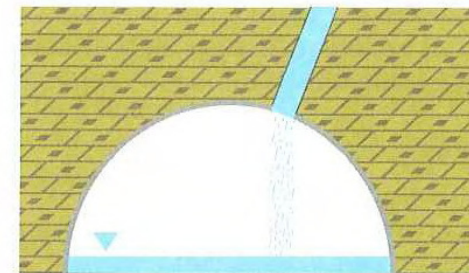
- Pérdida de resistencia del macizo que rodea a la excavación como consecuencia de la decompresión creada: apertura de discontinuidades, fisuración por voladuras, alteraciones, flujos de agua hacia el interior del túnel etc.
- Reorientación de los campos tensionales, dando lugar a **cambios de tensiones**.
- Otros efectos como subsidencias en superficie, movimientos de ladera, cambios en los acuíferos, etc.



a) Orientación desfavorable de discontinuidades.



b) Orientación desfavorable de tensiones.

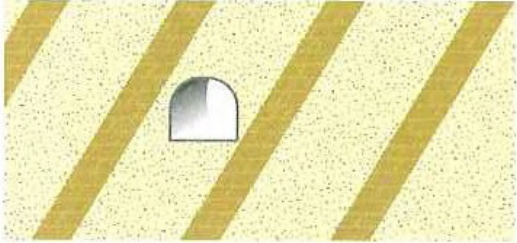
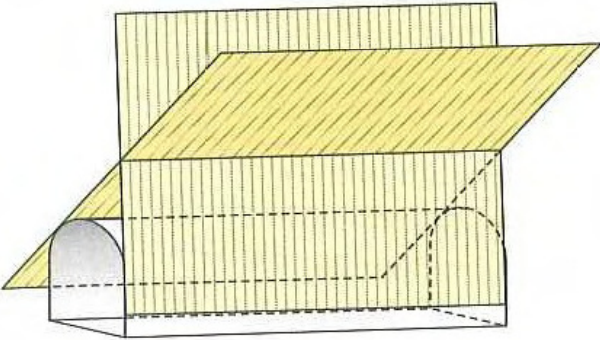
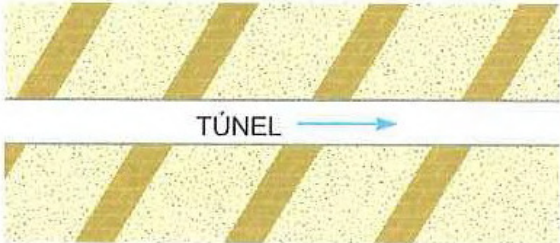
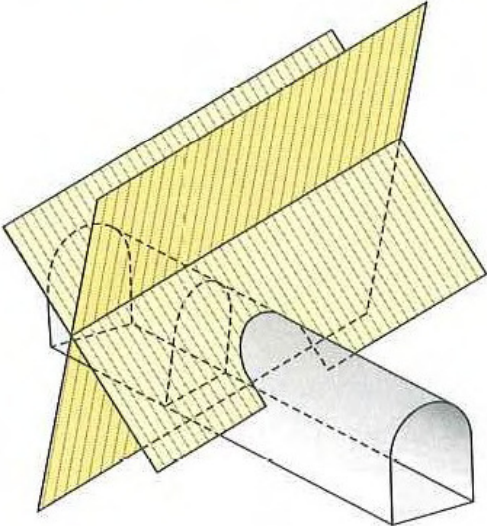


c) Filtraciones hacia el interior de la excavación.

Condiciones naturales de inestabilidad en excavación de túneles en roca.

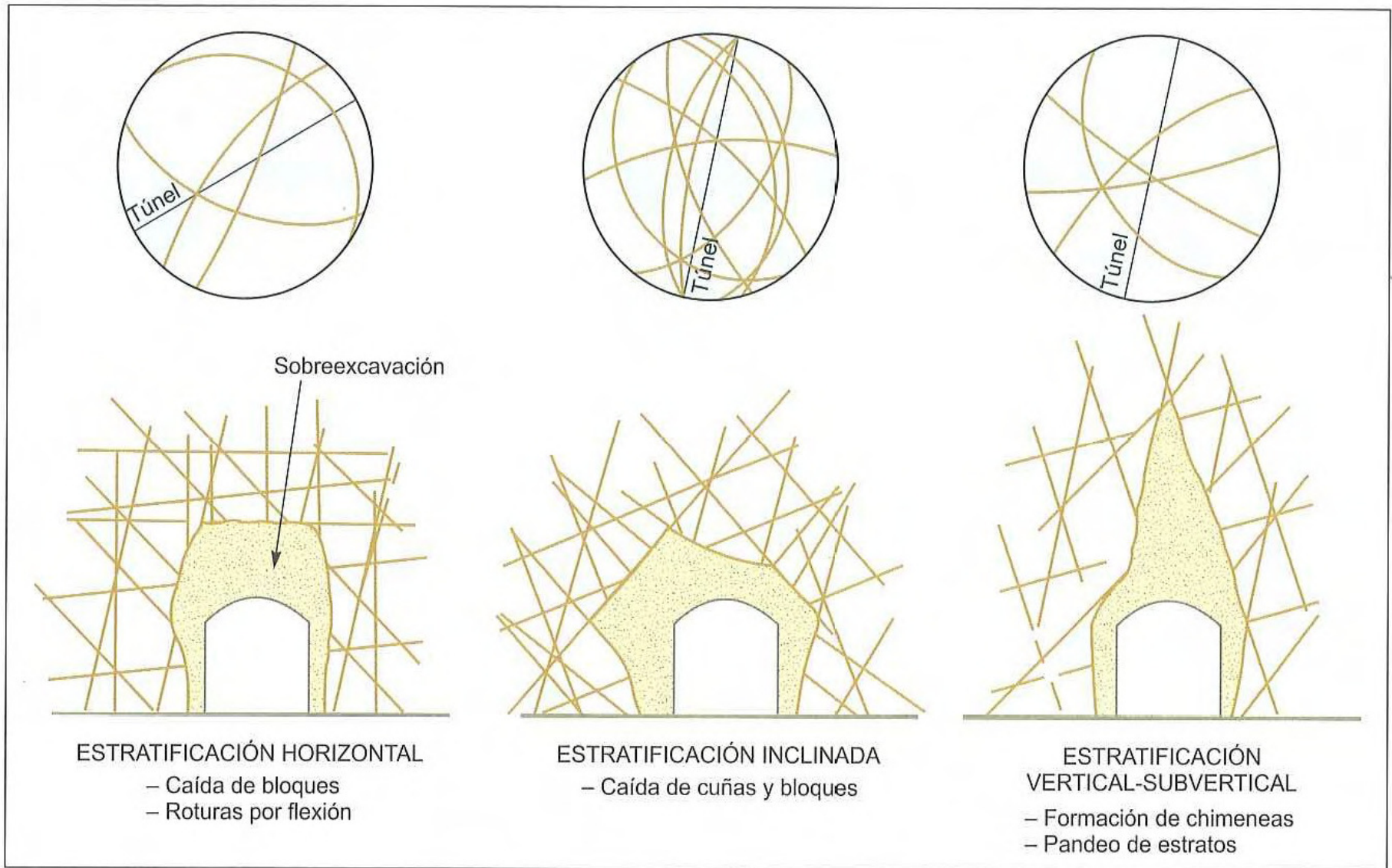


# Estructura geológica

ORIENTACIÓN ESTRUCTURAL DESFAVORABLE	ORIENTACIÓN ESTRUCTURAL FAVORABLE
<p data-bbox="415 321 961 354">TÚNEL PARALELO A LA ESTRUCTURA</p>  <p>The diagram shows a cross-section of a rock mass with diagonal yellow and brown stripes representing geological structure. A grey tunnel is shown as a semi-circle, oriented parallel to the structure.</p>  <p>The 3D diagram shows a synclinal fold with a grey tunnel following the curve of the fold. The rock layers are shown as yellow and brown planes.</p>	<p data-bbox="1073 321 1717 354">TÚNEL PERPENDICULAR A LA ESTRUCTURA</p>  <p>The diagram shows a cross-section of a rock mass with diagonal yellow and brown stripes. A grey tunnel is shown as a horizontal line with a blue arrow pointing to the right, oriented perpendicular to the structure.</p>  <p>The 3D diagram shows an anticlinal fold with a grey tunnel passing through the center of the fold. The rock layers are shown as yellow and brown planes.</p>
<p data-bbox="537 1268 831 1300">PLIEGUE SINCLINAL</p> <ul data-bbox="401 1320 972 1385" style="list-style-type: none"><li>• Distribución de tensiones desfavorable.</li><li>• Flujo de agua hacia el interior del pliegue.</li></ul>	<p data-bbox="1234 1268 1545 1300">PLIEGUE ANTICLINAL</p> <ul data-bbox="1098 1320 1675 1385" style="list-style-type: none"><li>• Distribución de tensiones favorable.</li><li>• Flujo de agua hacia el exterior del pliegue.</li></ul>

Influencia de la estructura geológica en la estabilidad de un túnel.

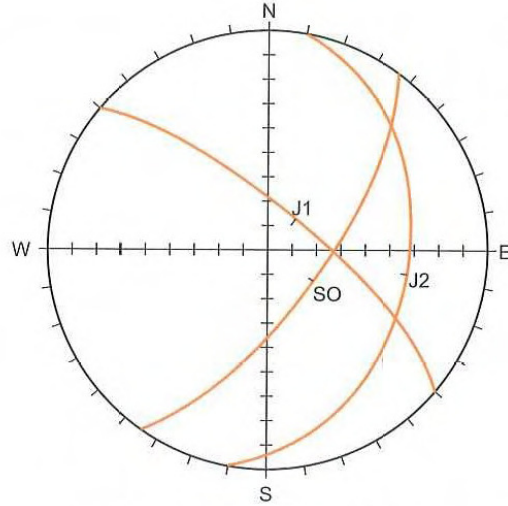
# Discontinuidades



Influencia de las discontinuidades en la estabilidad de un túnel. Ejemplos de sobreexcavaciones producidas en un túnel de trasvase (González de Vallejo, 1981).

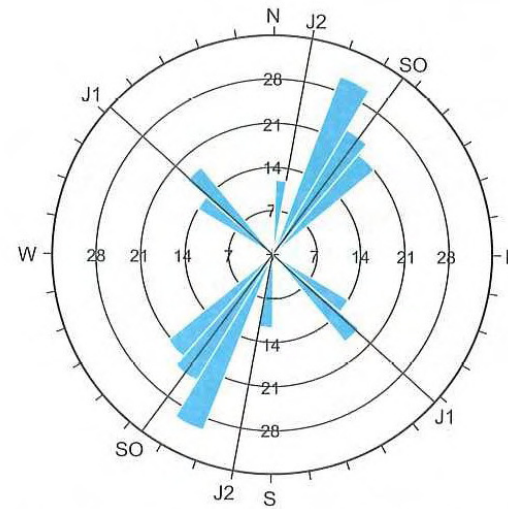


# Resistencia de la matriz rocosa

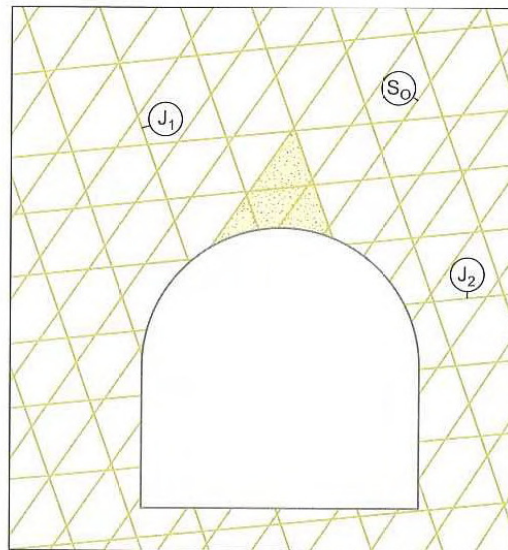


So : 125/70  
J1 : 42/75  
J2 : 100/37  
Túnel : E-W

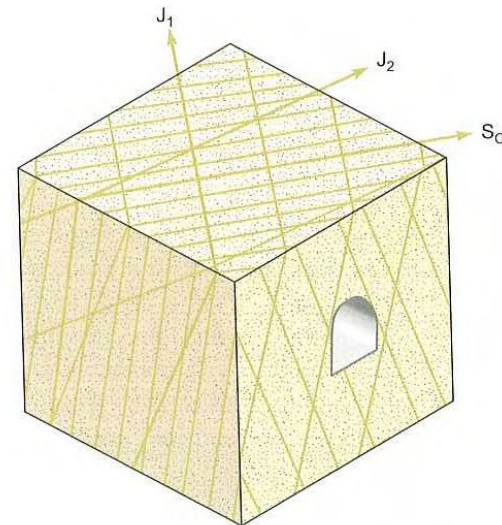
Representación estereográfica de planos de discontinuidades



Orientaciones preferentes de discontinuidades



Intersección de discontinuidades con la sección

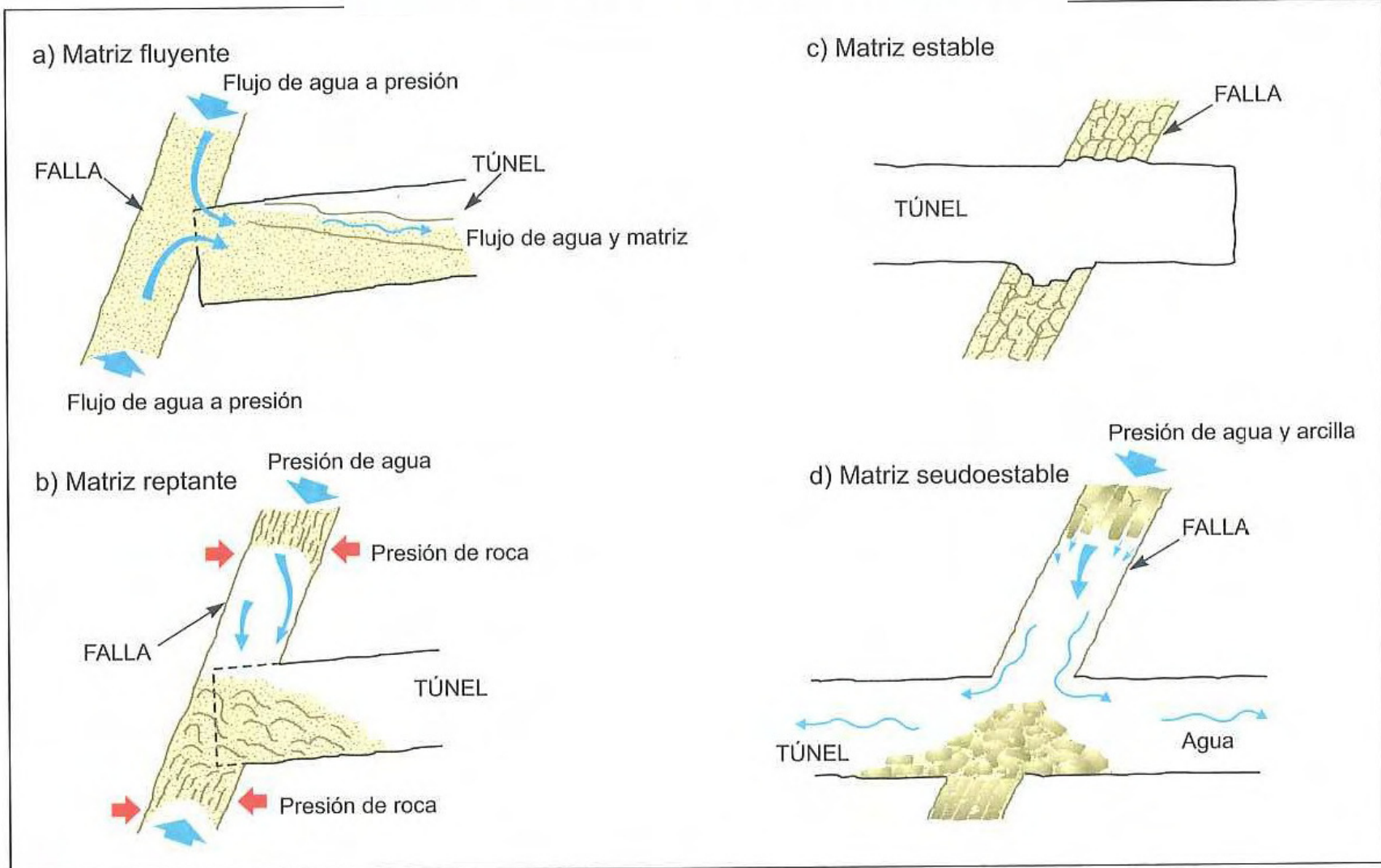


Representación en bloque diagrama

Representación y análisis de discontinuidades.



# Condiciones hidrogeológicas

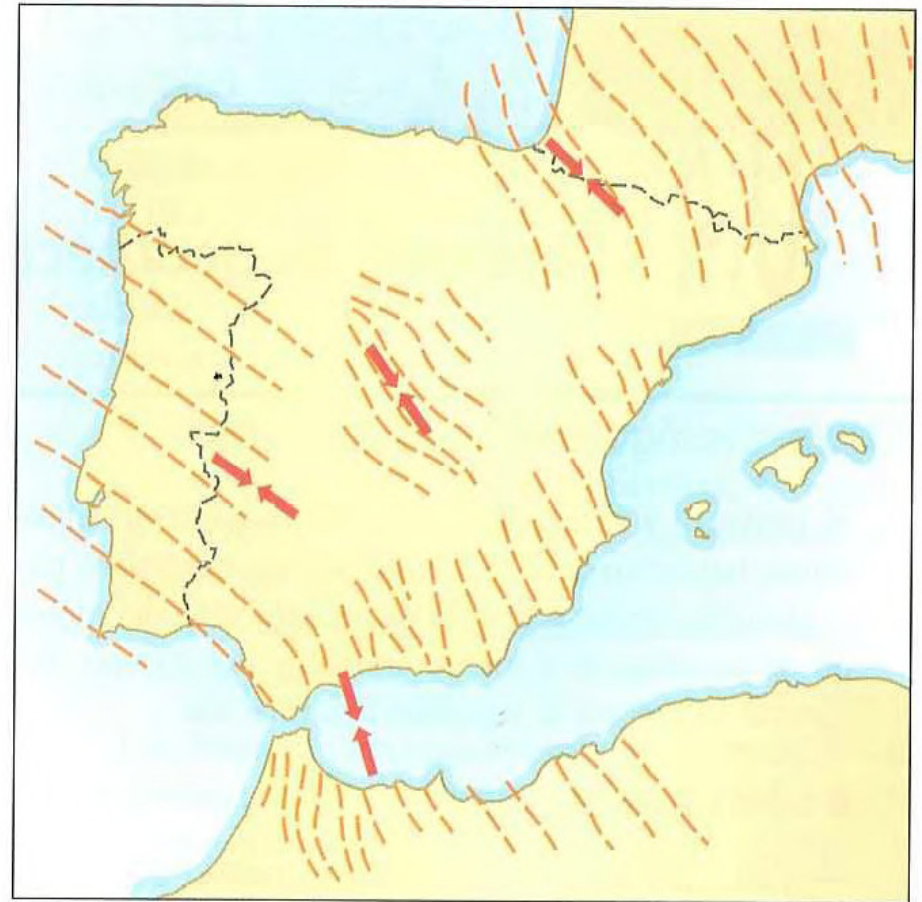


Estabilidad de las rocas de falla en un túnel (Hansen y Martna, 1988).

## Estado tensional

Las tensiones actuantes sobre una excavación subterránea son de dos tipos: **naturales e inducidas**. Las primeras corresponden al estado de esfuerzos naturales como consecuencia de los procesos tectónicos, gravitacionales, etc., y el segundo tipo responde a la redistribución de tensiones como consecuencia de la excavación.

Para diseñar una excavación subterránea se necesita conocer la magnitud y la dirección de las tensiones naturales, tanto para el cálculo de los sostenimientos como para analizar la sección y el proceso constructivo. Si las tensiones alcanzan valores muy altos, este factor constituye un riesgo que puede ocasionar fenómenos de explosión de roca o deformaciones importantes de costosa solución. El estudio de las tensiones y los métodos para su medida han sido descritos en el



Direcciones de los esfuerzos tectónicos principales en la Península Ibérica (modificado de Giner, 1996).

# Parámetros geomecánicos de diseño

Datos geológicos y geomecánicos

Resistencia y deformabilidad

Magnitud y dirección de las tensiones naturales

Caudales y presiones de agua



# Criterios de excavabilidad

La excavación de un túnel en roca depende de la facilidad o dificultad al arranque que presente el macizo rocoso frente a los distintos métodos de perforación (Apartado 10.8).

Las propiedades que definen la excavabilidad son las siguientes:

- Resistencia de la matriz rocosa.
- Dureza y abrasividad.
- Fracturación.
- Índices de calidad geomecánica.

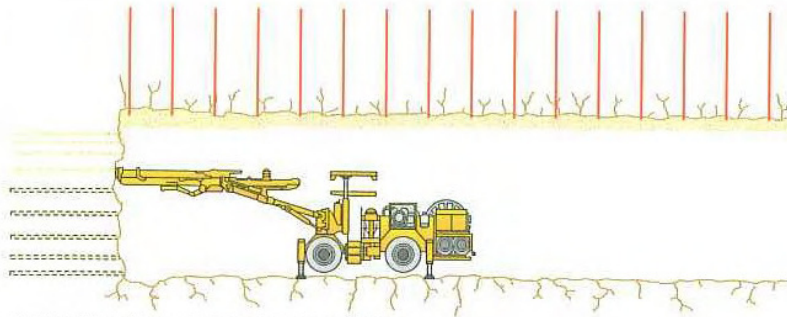


## Métodos de excavación

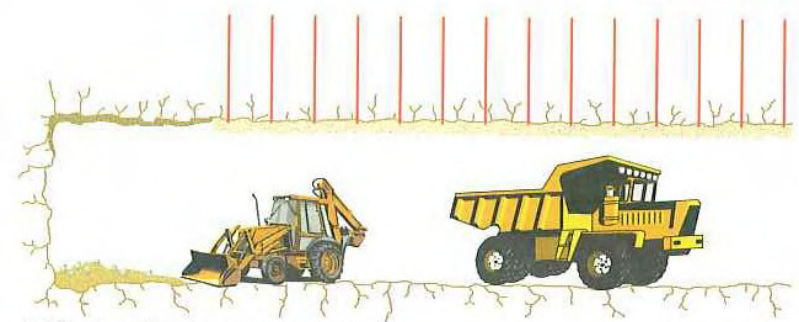
- **Perforación y voladura.** El arranque se efectúa con explosivos y se utiliza en rocas de alta resistencia, con velocidad sísmica del orden de  $V_p > 2.000 - 2.500$  m/s, según las condiciones del macizo o cuando las rocas sean muy abrasivas. Es el método más utilizado, y consiste en efectuar unos taladros en el frente de excavación, cargarlos con explosivos y hacerlos detonar. La perforación se efectúa por medio de «jumbos» o carros perforadores (Figura 10.18). En la Figura 10.19 se muestra la secuencia de excavación y los sostenimientos en avance según este método.

Uno de los objetivos principales en una buena voladura es evitar un excesivo deterioro en la roca circundante a la excavación. Una voladura inadecuada da lugar a sobreexcavaciones y caídas de bloques con problemas de estabilidad adicionales. Por ello es preciso efectuar **voladuras controladas** y técnicas como el precorte, voladuras suaves, etc., que minimicen el daño estructural al macizo.
- **Excavación mecanizada.** El arranque se efectúa por medios mecánicos mediante rozadoras o máquinas tuneladoras, además de otras máquinas de ataque puntual. Las **rozadoras** consisten en unas máquinas de ataque puntual dotadas de un brazo que puede recorrer el frente de excavación, y en cuyo extremo se aloja un cabezal rotatorio provisto de las herramientas de corte llamadas «picas» (Figura 10.20). Las rozadoras permiten la excavación de rocas de resistencia media, e incluso alta, dependiendo de su potencia, obteniéndose los mejores resultados cuando la roca presenta entre 20 y 60 MPa de resistencia a compresión simple. Los materiales con  $V_p$  entre 1.900 y 2.500 m/s son difícilmente ripables, y requieren maquinaria muy pesada. Entre 1.900 y 1.600 m/s la ripabilidad es media, y por debajo de 1.600 m/s son fácilmente ripables. Junto con estos criterios hay que tener en cuenta la abrasividad. Para mayores detalles sobre los criterios de excavabilidad para el uso de rozadoras, y otros métodos de excavación mecánica tipo TBM, se remite a Romana (1994).

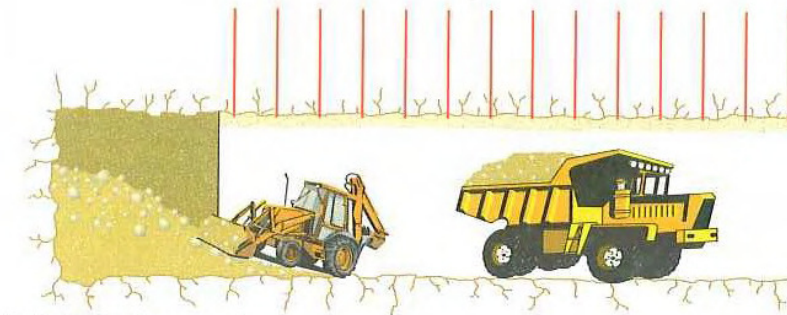




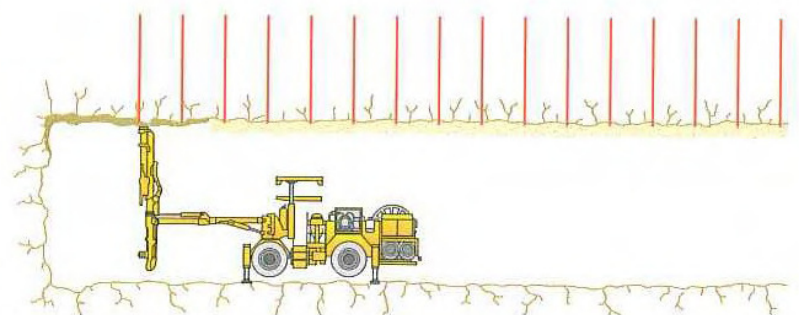
1. Perforación y carga de la voladura



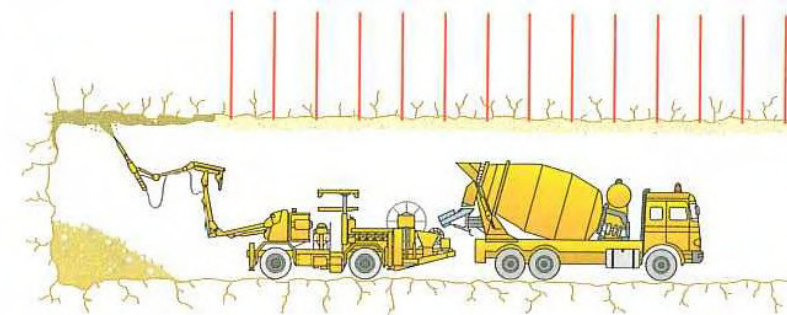
4. Finalización del desescombro



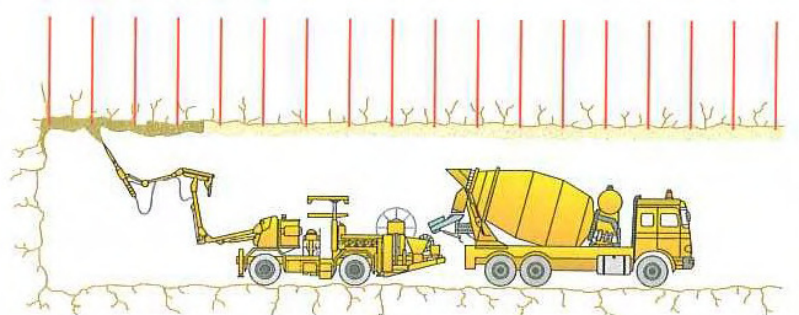
2. Saneo y desescombro



5. Sostenimiento mediante bulones



3. Sellado



6. Sostenimiento mediante hormigón proyectado

Secuencia de excavación y sostenimiento en avance por perforación y voladura

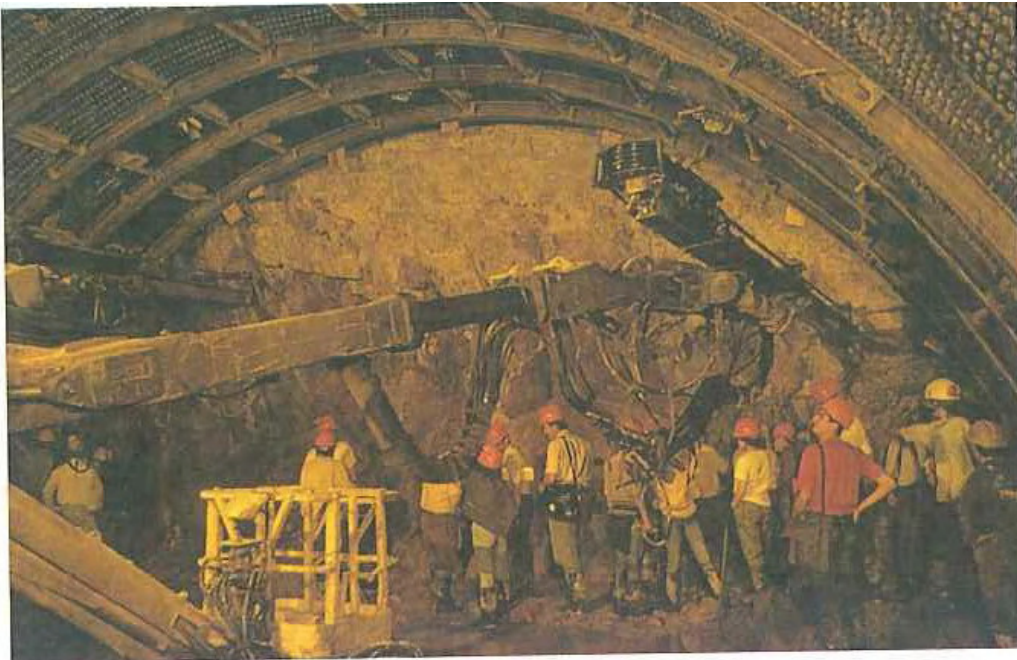


Rozadora de gran potencia

Tuneladora TBM «Robbins» para rocas

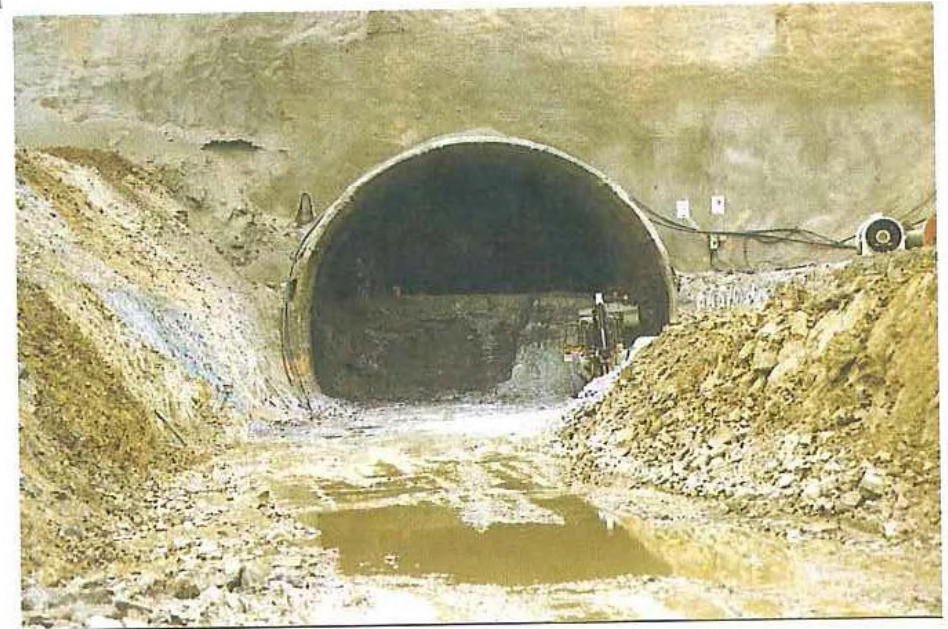






Excavación mediante martillo hidráulico y sostenimientos con cerchas y chapa Bernold (foto L. Gon-

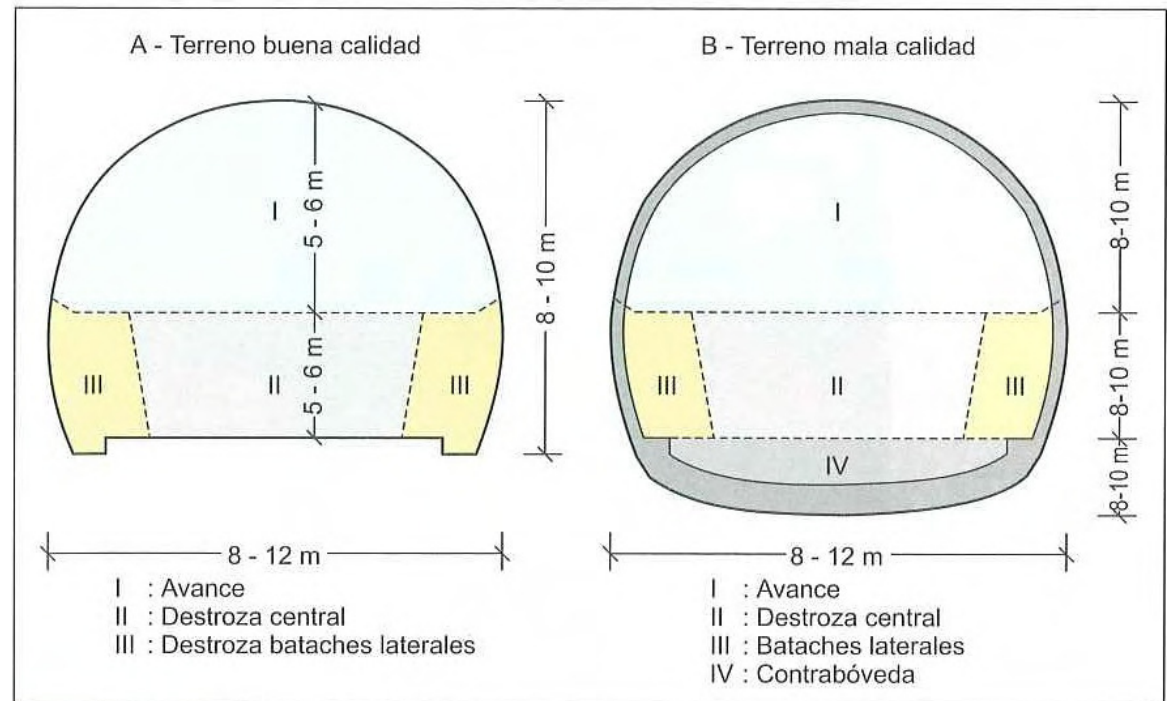
Excavación de la destroza



## Fases de excavación

Cuando la sección del túnel es mayor de un cierto valor, unos 40-50 m<sup>2</sup>, conviene realizar la excavación en varias fases, sobre todo si la calidad y estabilidad del terreno son bajas. A la primera fase de excavación se la denomina **avance** y a la siguiente **destroza** (Figura 10.23); la destroza puede excavarse a su vez en una única fase o en varias: banco central y bataches laterales (Figura 10.24). En terrenos de mala calidad puede excavarse en una tercera fase la **contrabóveda**, con objeto de cerrar un anillo de hormigón.

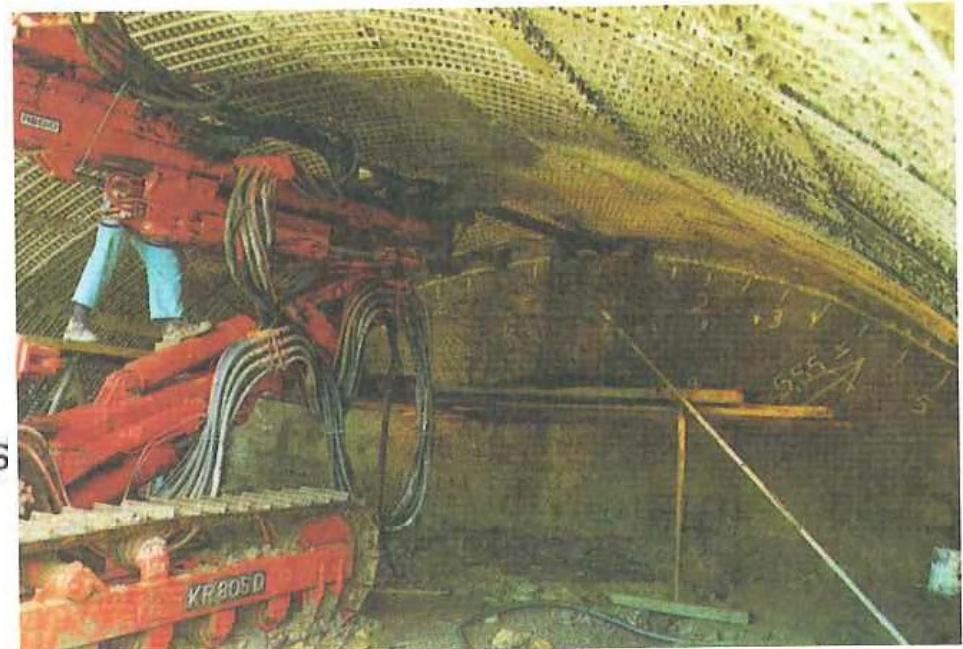
Fases de excavación en un túnel







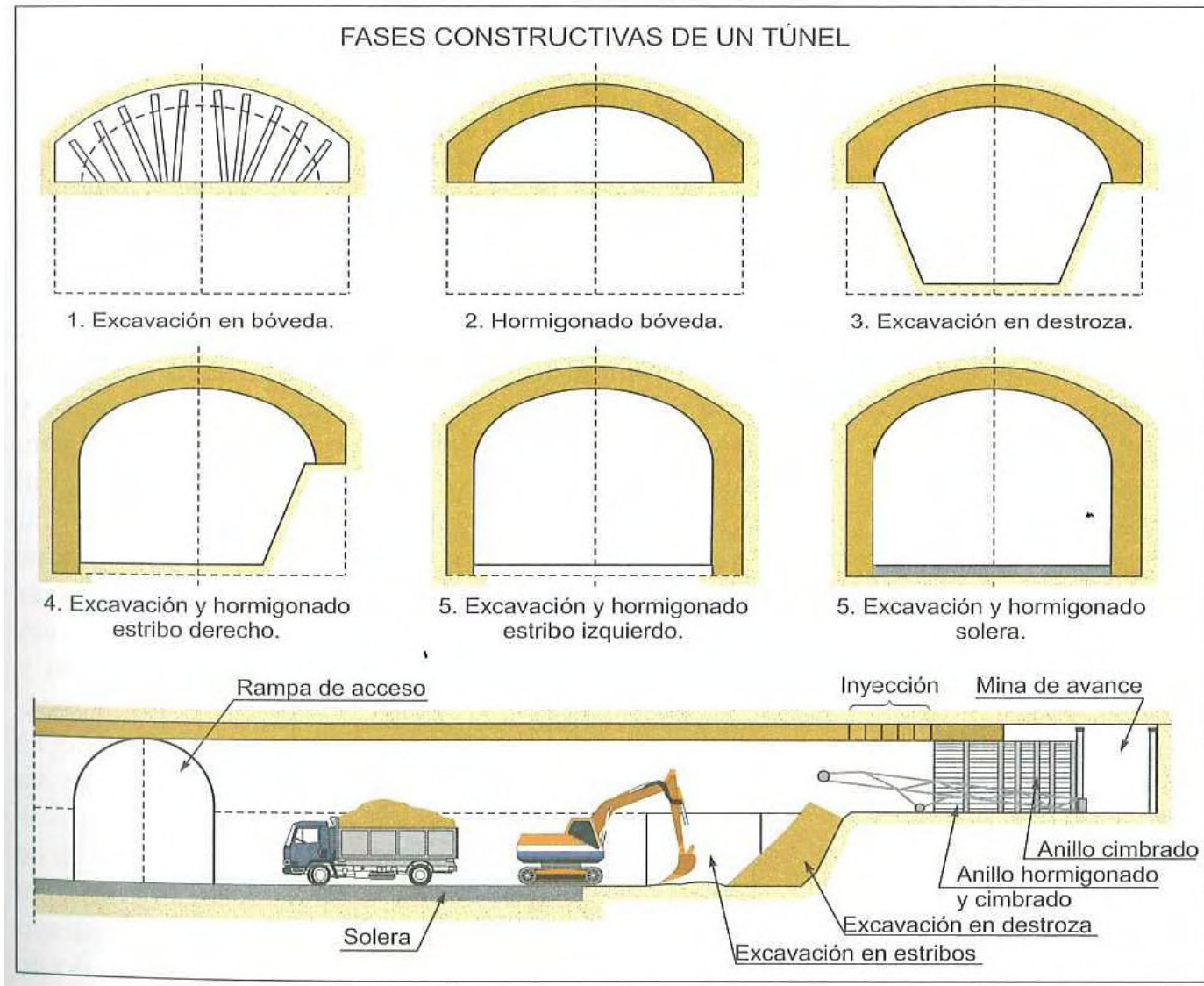
Instalación de bulones friccionales tipo «Swellex», con cerchas, mallazo y gunita (cortesía de M.



Ejecución de un paraguas de micropilotes

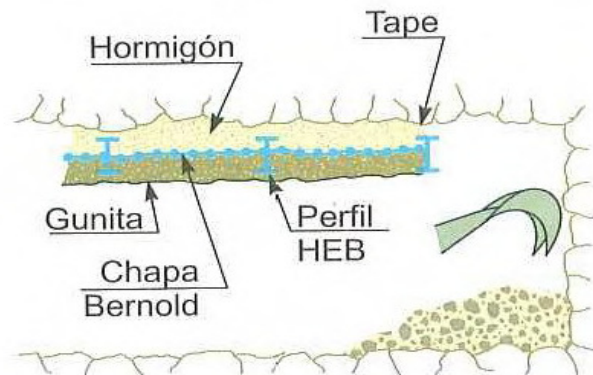
# Métodos de construcción de túneles en suelos

## Métodos no mecanizados

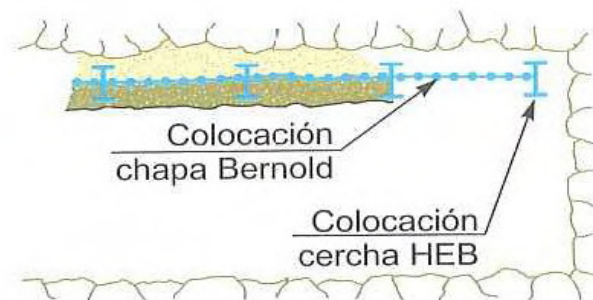




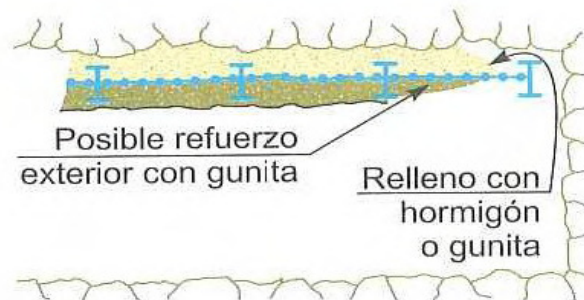
# Métodos semi-mecánicos



a) Excavación y avance.



b) Colocación encofrado resistente.

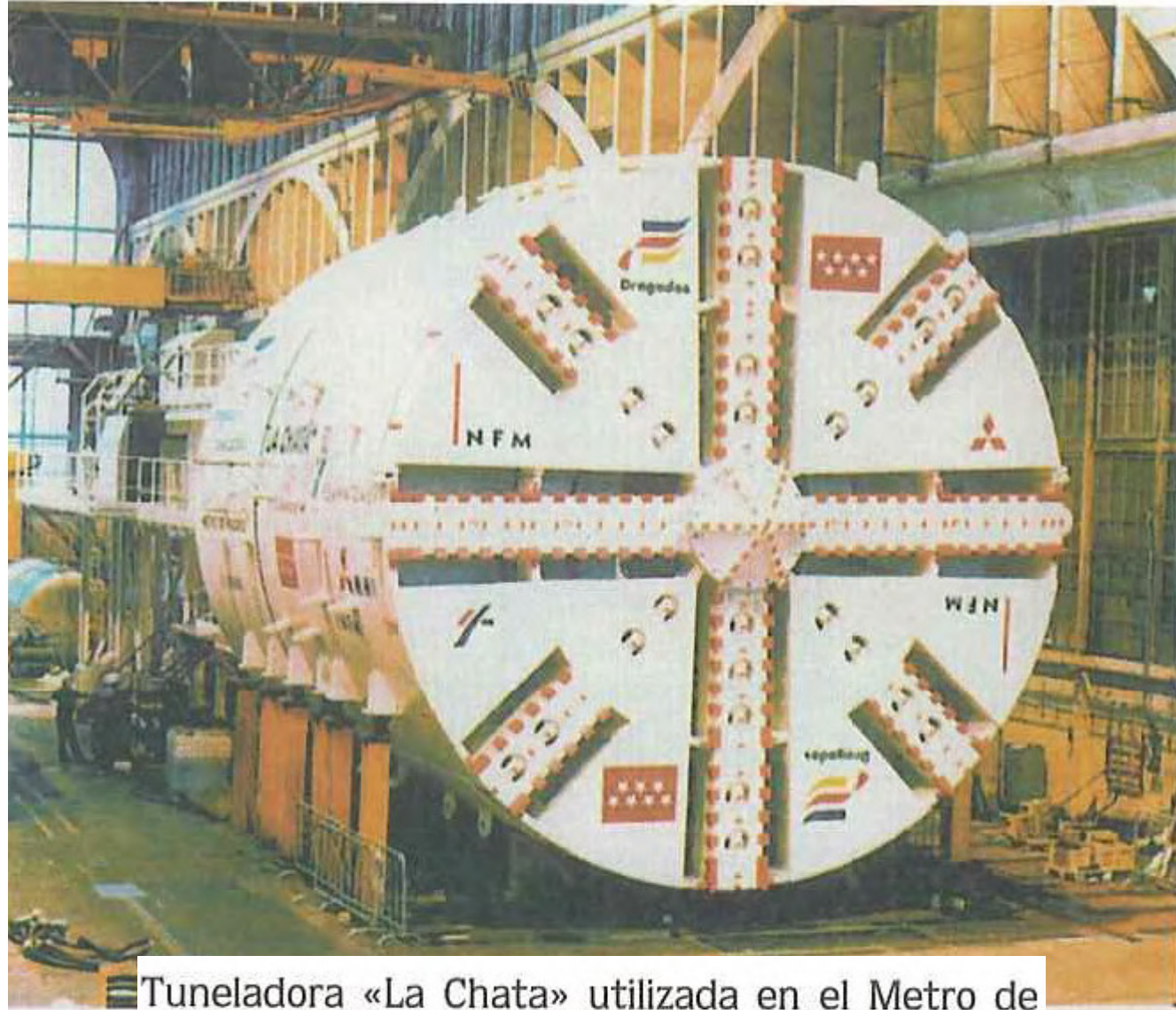


c) Hormigonado y refuerzo. **Método Bernold**



Excavación mediante precorte mecánico

## Métodos de excavación mecanizada



Tunneladora «La Chata» utilizada en el Metro de Madrid (cortesía de la Comunidad de Madrid).



# Consideraciones geológico-geotécnicas durante la construcción

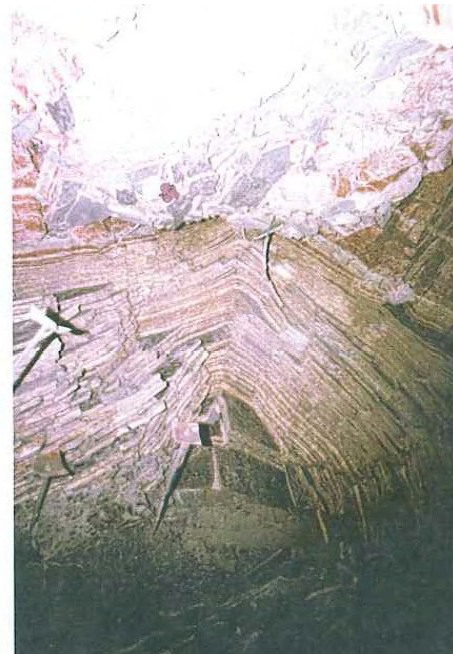
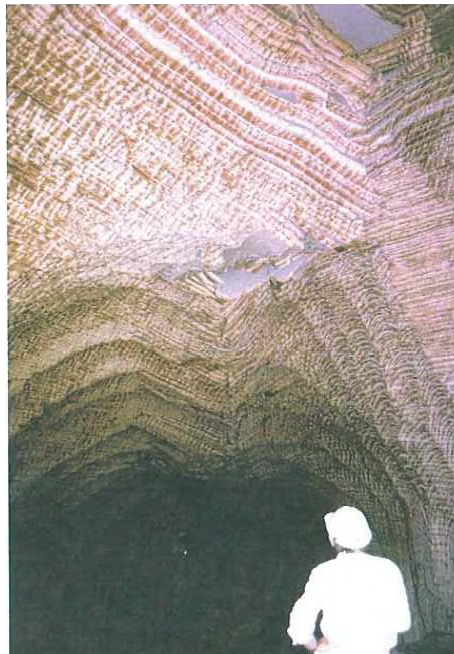
## Problemas geológico-geotécnicos

- Problemas derivados del cruce de fallas, cabalgamientos o zonas de fracturas importantes.
- Contactos entre rocas de muy diferente comportamiento hidráulico o mecánico.
- Descalce de grandes cuñas de roca o inestabilidad de terrenos blandos, sueltos o muy fracturados, especialmente bajo presiones de agua.
- Intersección de planos de cizalla de muy baja resistencia y zonas alteradas.
- Existencia de tensiones importantes que dan lugar a fuertes decompresiones y convergencias.
- Presencia de cavidades.
- Golpes de agua y filtraciones importantes.
- Suelos o rocas expansivas.
- Fenómenos de explosión de rocas o grandes deformaciones bajo cargas elevadas.
- Rocas agresivas (yesos, sulfuros, etc.), abrasivas, aguas ácidas, etc.
- Presencia de gases explosivos o tóxicos y altas temperaturas (de aguas o geotérmicas).





Fallas afectando al frente de excavación de un túnel en pizarras de clase IV (cortesía de M. Trimboli).



Grandes deformaciones en lutitas y sales: a) inicio de roturas en el techo; b) roturas generalizadas con grandes empujes en hastiales; c) cierre casi completo de la excavación con rotura de bulones (fotos L. González de Vallejo).



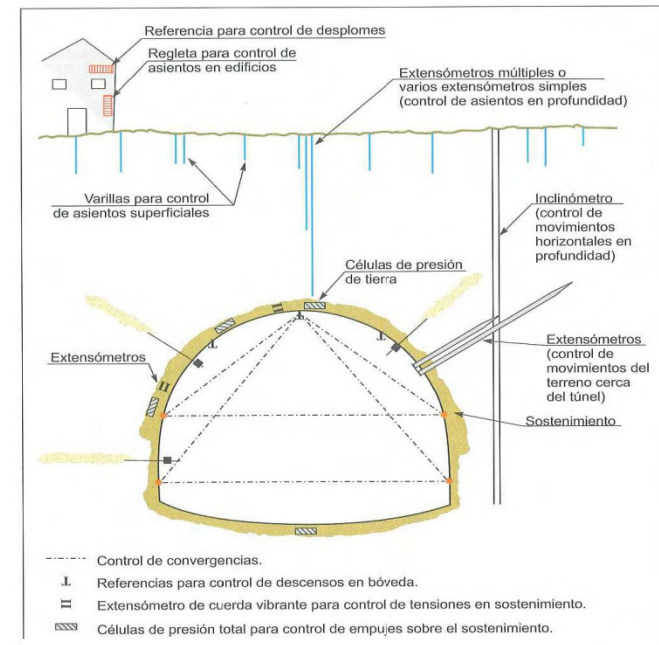
# Control geológico-geotécnico

- Comprobar los criterios y especificaciones del proyecto sobre los sostenimientos, excavaciones y tratamientos.
- Controlar los problemas de estabilidad, deformaciones y filtraciones.
- Adaptar los sostenimientos, avances y el sistema constructivo a las condiciones de obra.
- Prever y adoptar las medidas adecuadas para evitar desprendimientos, caídas de rocas, grandes filtraciones u otros posibles problemas del terreno.

- Auscultar la respuesta del terreno y de los acuíferos en relación a otras estructuras adyacentes o edificaciones, que puedan verse afectadas por la excavación.
- Control medioambiental: contaminación de ríos, suelos, vertidos de materiales de excavación no reutilizables, etc.
- Control de calidad y de seguridad en obra.

Los **datos geológico-geotécnicos a obtener** durante la excavación son los siguientes:

- Litología y estructura de los frentes y secciones de avance.
- Fallas y zonas de fracturas.
- Discontinuidades singulares.
- Datos para las clasificaciones geomecánicas.
- Filtraciones y gases.



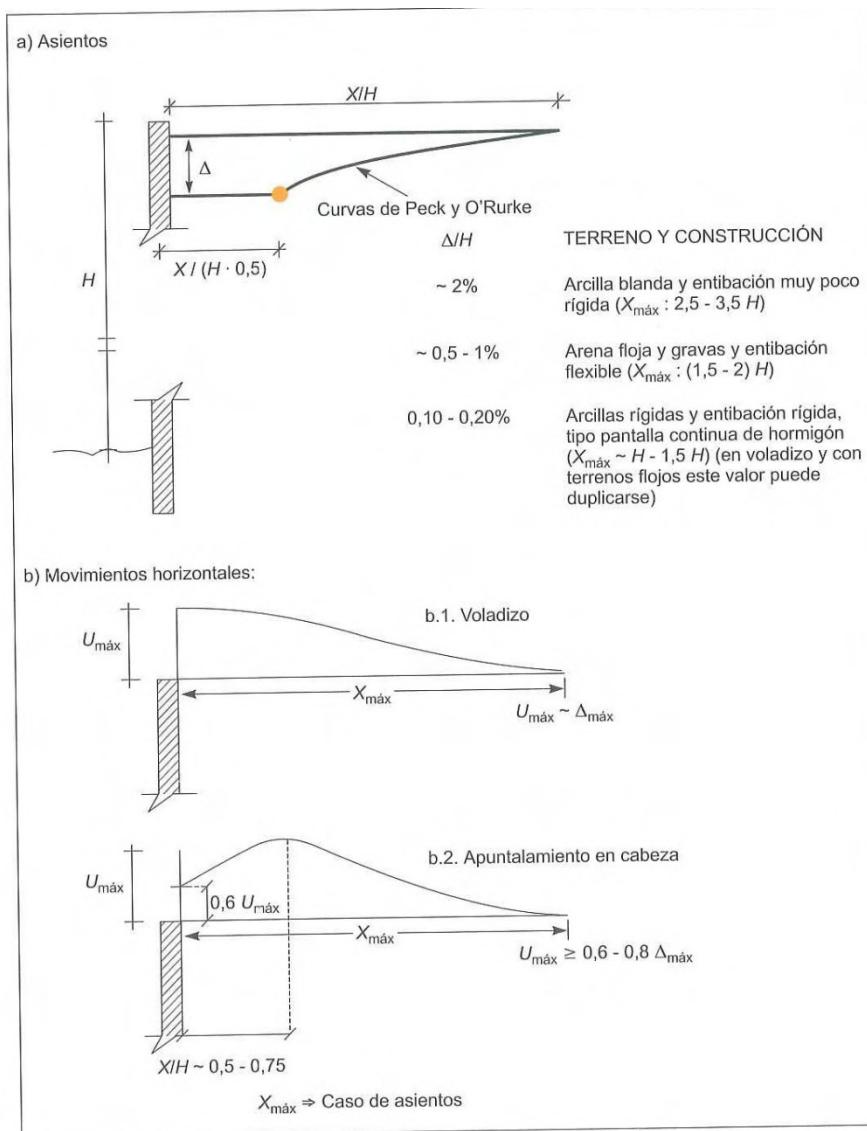
Sistemas de auscultación de un túnel.

# Influencia de la excavación en estructuras próximas

En el caso de túneles urbanos es preciso tener en cuenta sus repercusiones en edificios e instalaciones próximas, dado que los movimientos que inducen las excavaciones pueden oscilar entre algún milímetro y unos 200 mm, según la consistencia del terreno, proceso constructivo seguido, etc. Habitualmente, la ley de asientos superficiales, fruto de la decompresión que origina del túnel, se asimila a una ley de Gauss, la

Una vez confirmado si el movimiento deducido es capaz de dañar edificios próximos (estudiando su estado y rigidez relativa), puede decidirse:

- Expropiarlo (si está en muy mal estado).
- Recalzarlo, con los inconvenientes y molestias que ello supone a los usuarios.
- Utilización de barreras de inyecciones entre edificio y túnel para cortar asientos.
- Efectuar inyecciones de compensación para limitar y compensar los asientos que puede sufrir el edificio o instalación.



Rango de movimientos producidos en superficie por la excavación de pantallas



GRACIAS POR SU ATENCIÓN