

**AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA
AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES
JORNADA ACADÉMICA SOBRE TÚNELES EN COLOMBIA
Bogotá - 18 de diciembre de 2012**

**Procedimientos Constructivos, Soporte y
Revestimiento e Hidrogeología en Túneles**

Pedro Ramírez (Director del Departamento de Geotecnia. TYPESA)

Índice

- 1.- Procedimientos constructivos**
- 2.- Sistemas de soporte y revestimiento**
- 3.- Hidrogeología**



Índice

- 1.- Procedimientos constructivos**
- 2.- Sistema de soporte y revestimiento
- 3.- Hidrogeología



1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

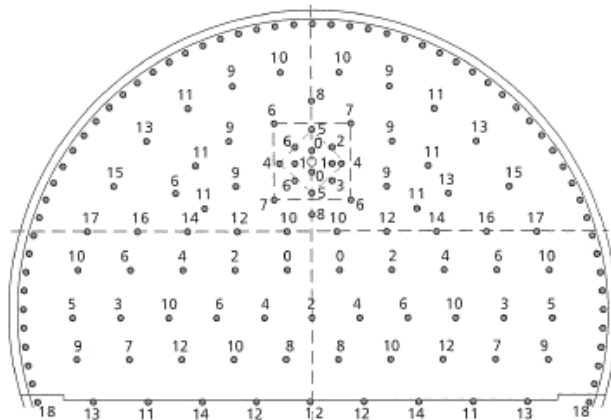
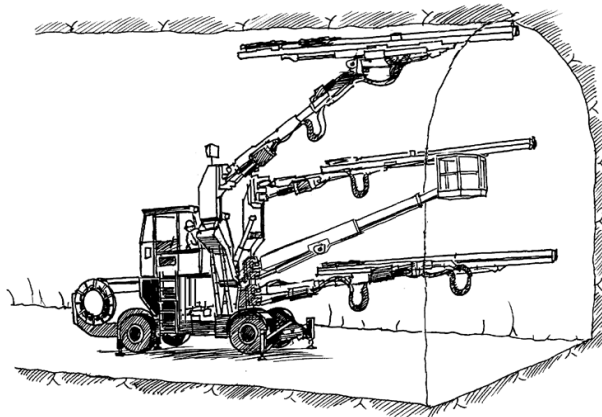
SISTEMAS DE EXCAVACIÓN

- Dependen del tipo de terreno a atravesar: roca o suelos
- La excavación en roca es lo más habitual en los túneles de carretera
- Los métodos de excavación de túneles en roca son:
 - Perforación y voladura, mediante la utilización de barrenos y explosivo
 - Excavación mecánica, mediante tuneladoras o topes (TBM), y máquinas de ataque puntual, rozadoras o martillos de impacto.



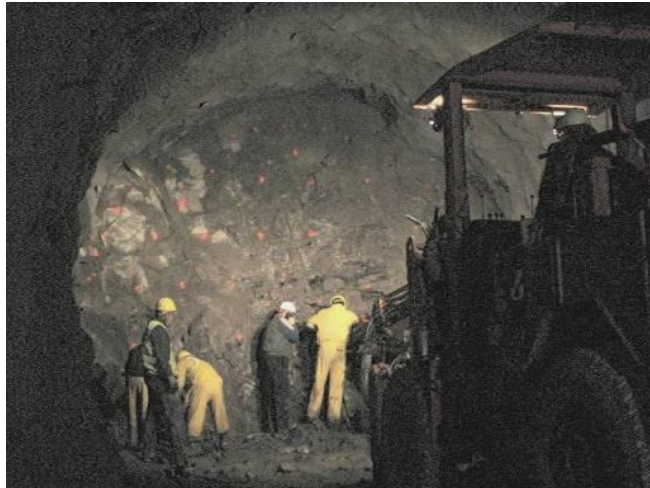
1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

PERFORACIÓN Y VOLADURA (D&B)



- Apto para todo tipo de rocas, excepto las muy blandas y fisuradas
- Es el sistema más utilizado por su versatilidad. Se puede emplear tanto a sección completa como partida (secuencial) en avance y destroza.
- Ciclo de trabajo:
 - Diseño del plan de tiro
 - Perforación de los barrenos
 - Carga del explosivo y detonadores
 - Voladura
 - Ventilación
 - Desescombro
 - Saneo
 - Instalación del soporte

1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

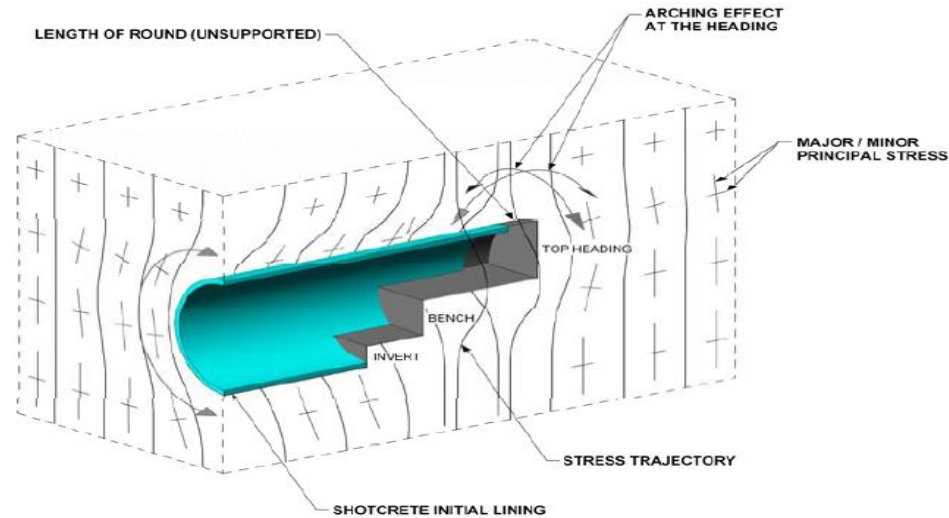


PERFORACIÓN Y VOLADURA (D&B)

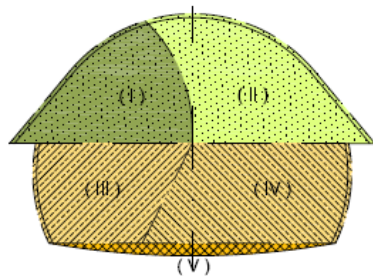
- Para realizar las perforaciones pueden emplearse martillos manuales de aire comprimido en túneles muy pequeños.
- Los martillos hidráulicos montados sobre maquinaria móvil, Jumbos multibrazo, se emplean para excavaciones de mayor tamaño con mejor rendimiento.
- Los Jumbos actuales disponen de sistemas electrónicos para controlar la dirección de los taladros, el impacto y la velocidad de rotación de los martillos, consiguiendo rendimientos elevados.

1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

EXCAVACIÓN POR FASES (METODO SECUENCIAL)

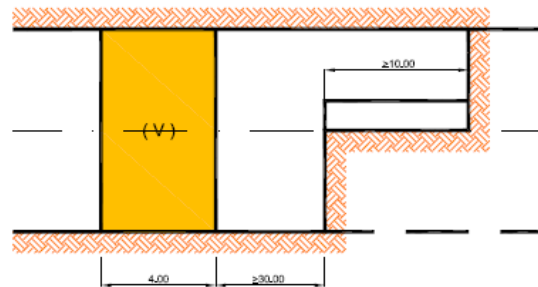


ETAPELE EXCAVARI
EXCAVATION STAGES

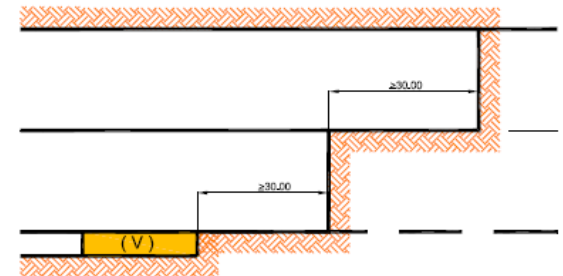


ETAPA A CINCEA: EXCAVAREA CONTABOLTEI
FIFTH STAGE: INVERT EXCAVATION (V)

VEDERE IN PLAN
PLAN VIEW



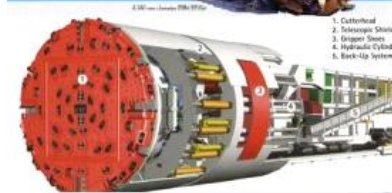
VEDERE FRONTALA
FRONT VIEW



1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

EXCAVACIÓN CON MEDIOS MECANIZADOS (TBMs)

TBM (Tunneling Boring Machine). Máquinas integrales de construcción de túneles que excavan, retiran el escomburo y aplican el sostenimiento.



**Tunneladora
Tunnel Boring Machines
(TBM)**



**Tunneladora de roca
Rock Tunneling
Machine**

**Tunneladora de suelos
Soft Ground Tunneling
Machine**

**Tunneladora no escudada (Topo)
Unshielded TBM**

Escudo simple Single Shield

Doble escudo Double Shield

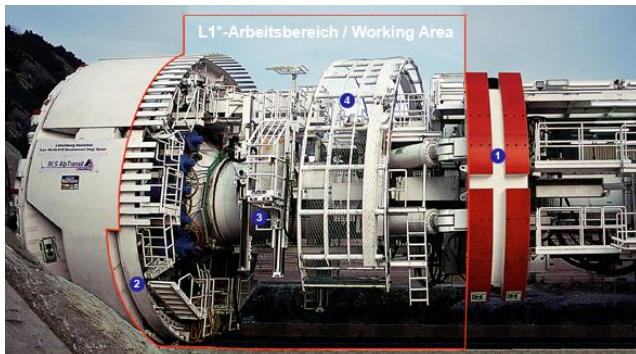
Escudo abierto - Open Shield

**Tunneladora de presión de tierras
EPB Earth pressure Balance Shield**

Hidroescudo - Slurry Shield

1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

EXCAVACIÓN CON MEDIOS MECANIZADOS (TBMs)

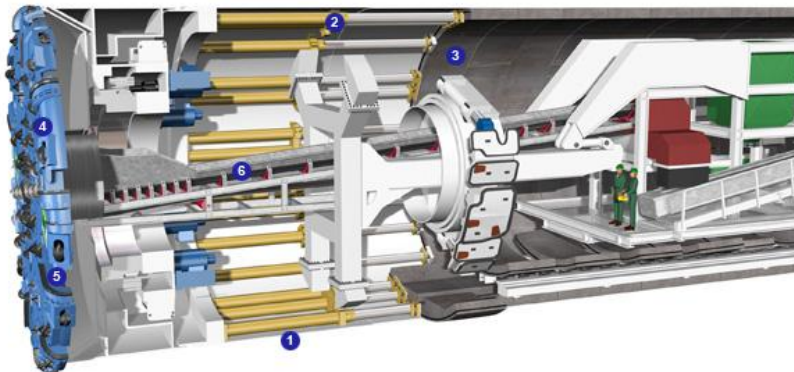


TOPO (Open Shield):

- Túneladora integral abierta, parcialmente escudada, cuya única protección viene dada por unos espadines en la cabeza que protegen al operador.
- Ámbito de aplicación: roca dura, ya que la reacción para el avance se obtiene mediante codales retráctiles “grippers” que apoyán sobre la roca
- Rendimiento medio: 15 m/día. Pueden incorporar o no equipos para instalar el sostenimiento.

1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

EXCAVACIÓN CON MEDIOS MECANIZADOS (TBMs)

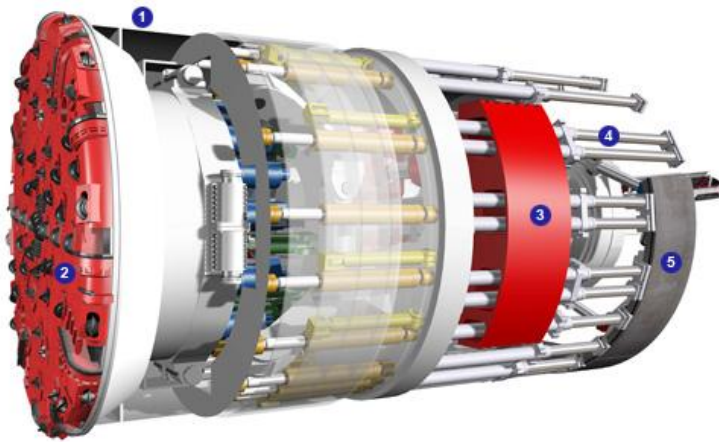


ESCUDO SIMPLE (Single Shield)

- La excavación con escudo va unida necesariamente a la colocación de un revestimiento prefabricado mediante dovelas prefabricadas de hormigón armado, que forman anillos que se ensamblan a la cola del escudo
- La máquina obtiene la reacción de avance apoyándose sobre los anillos de dovelas instalados

1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

EXCAVACIÓN CON MEDIOS MECANIZADOS (TBMs)



DOBLE ESCUDO. (Double Shield)

- Máquinas polivalentes que permiten actuar como escudo simple y, si el terreno lo permite, emplear codales (grippers) para simultanear el avance de la máquina con la instalación de dovelas.
- Muy versátil, pudiendo trabajar en terrenos heterogéneos, apoyándose en el anillo en terrenos muy blandos y con los grippers en roca dura.

1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

EXCAVACIÓN POR MEDIOS MECÁNICOS

ROZADORA (Roadheader)

- Cabeza rotatoria provista de picas de fricción
- La reacción viene dada por su peso
- Límites :Hasta RCS 40 MPa; contenido en sílice < 75%

MARTILLO HIDRAULICO

- Roca blanda y/o fracturada
- La pica puede penetrar separando fragmentos.
- Límites: RCS 20-30 MPa



1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

TUNELADORAS EN SUELOS PARA CARRETERAS



España: By-Pass Sur M-30 Madrid (15,20 m) (3,5 km)

1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

TUNELADORAS EN SUELOS PARA CARRETERAS



Italia: Bologna – Sicilia (15,55 m) (4,9 km)

1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

TUNELADORAS EN SUELOS PARA CARRETERAS



EEUU: Seattle (SR99) Alaskan Way (17,5 m) (2,7 km)

1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

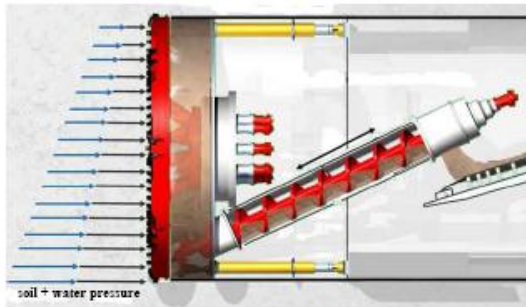
Tuneladoras de suelos: EPB o HIDROESCUDOS



Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine (EPB) (Lovat).



Slurry Face Tunnel Boring Machine (SFM) (courtesy of Herrenknecht).



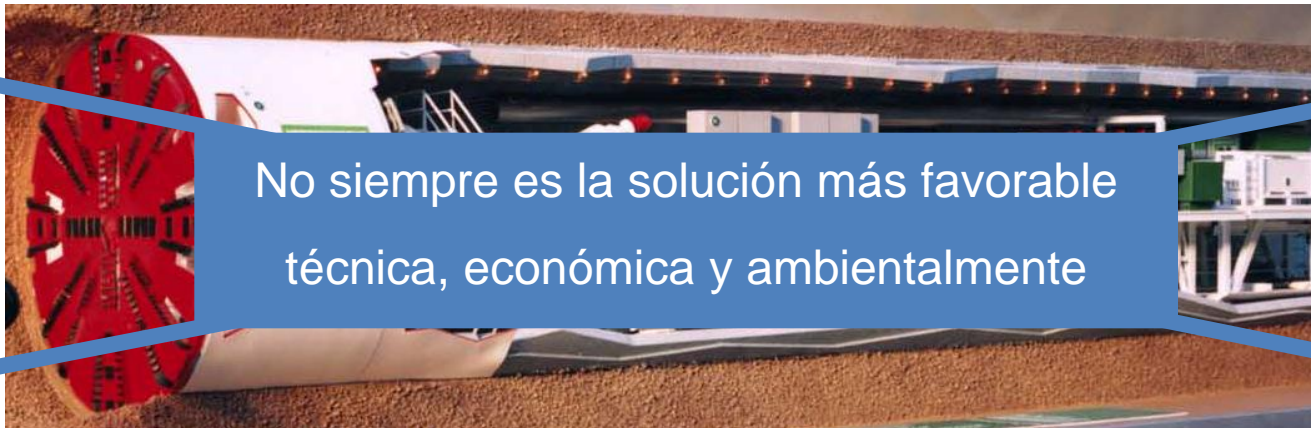
Simplified Cross-section of Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine (EPB)



Simplified Cross-section of Slurry Face Tunnel Boring Machine (SFM) (from Herrenknecht).

1. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

- Una TBM de roca no puede impedir la entrada de agua por el frente de la excavación. (Solo EPB o Hidroescudo en suelos)
- Una EPB o Hidro. NO es adecuada para excavar roca. La trituración de roca a suelos finos bombeables o extraídos a través del tornillo son inasumibles económicamente
- En el trasdós del anillo queda una holgura (GAP) que debe rellenarse o inyectarse. (Es un camino preferente para la circulación del agua)
- La inmensa mayoría de los túneles en roca se ejecutan con perforación y voladura



No siempre es la solución más favorable
técnica, económica y ambientalmente

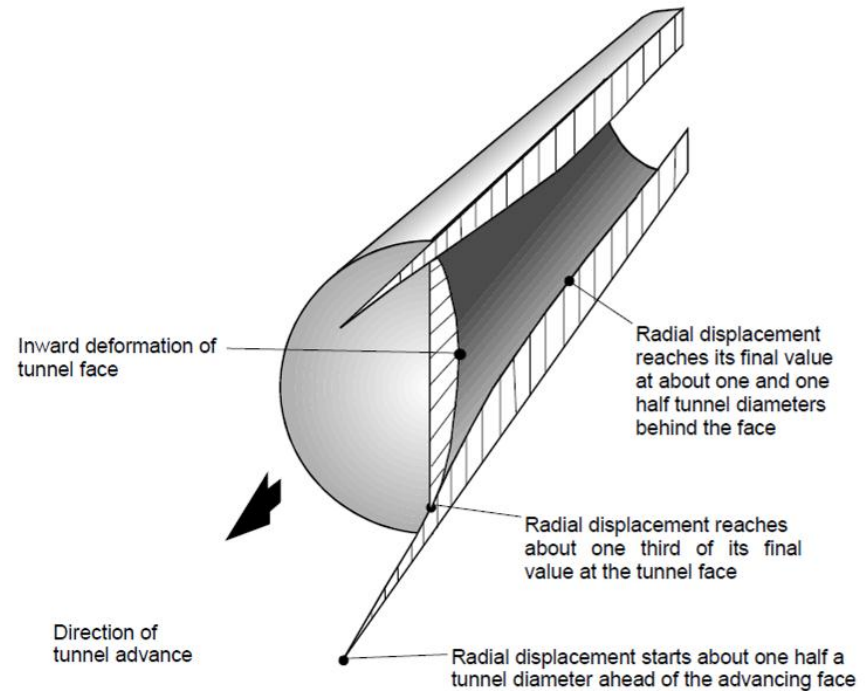
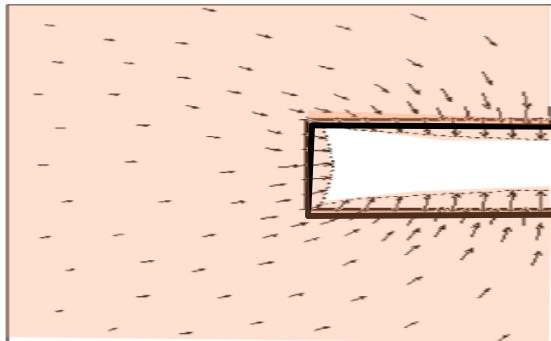
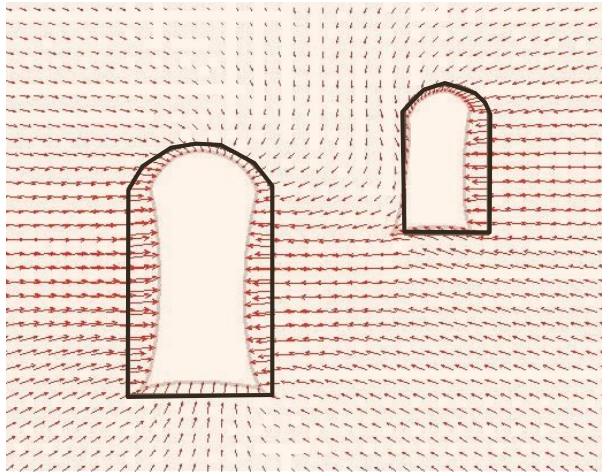
Índice

- 1.- Procedimientos constructivos
- 2.- Sistema de soporte y revestimiento**
- 3.- Hidrogeología



2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO

La excavación de un túnel origina una redistribución de tensiones (deformaciones) a partir del estado tensional inicial del terreno.



2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO

SISTEMAS DE SOPORTE

**NUEVO MÉTODO
AUSTRIACO (NATM)
MÉTODO
SECUENCIAL**



**ANILLO DE
DOVELAS DE
CONCRETO
PREFABRICADO**



**OTROS: CONCRETO
BOMBEADO, CHAPA
BERNOLD, PARAGUAS,
ENFILAJES ...**



2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO



EL SOPORTE

- La necesidad de soporte está condicionada por la capacidad del terreno de alcanzar una situación de equilibrio estable tras la excavación
- Puede ser total, como arco resistente, o parcial para sostenimiento de cuñas o bloques potencialmente inestables
- En general el soporte es un elemento drenante, a través de la masa o como consecuencia de la fisuración por entrada en carga

2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO

NUEVO MÉTODO AUSTRIACO (NATM)

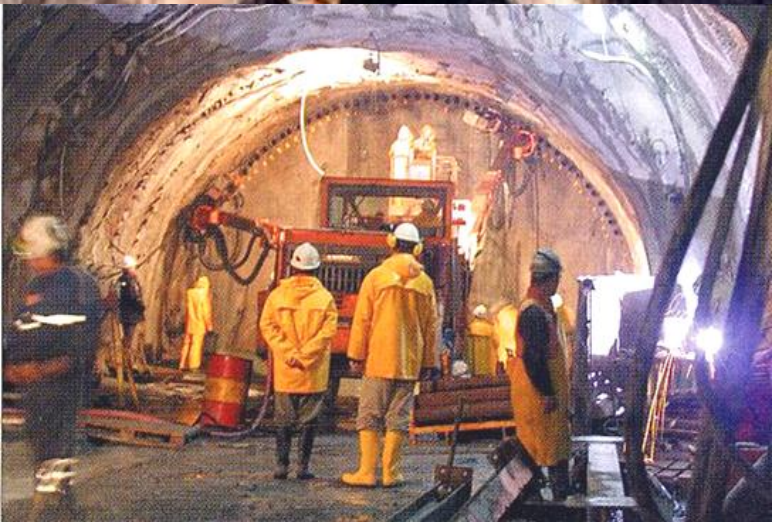
- Rabcewick (1948) y Müller (1969)
- Basado en permitir relajar el terreno para que disminuyan los empujes, de manera que colabore la corona de terreno que envuelve al túnel como elemento resistente junto con el sostenimiento
- El sostenimiento se realiza mediante concreto lanzado con refuerzo de malla metálica o fibras
- Como refuerzo se emplean bulones (pernos de anclaje) y cerchas
- Exige un exhaustivo control de desplazamientos (convergencias)



2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO

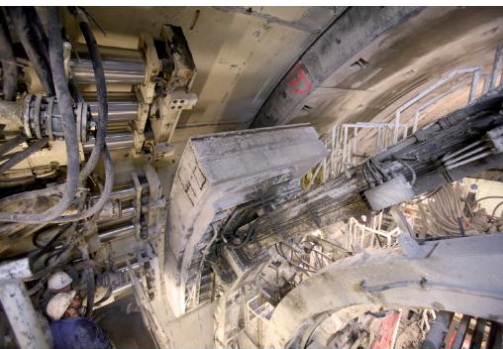
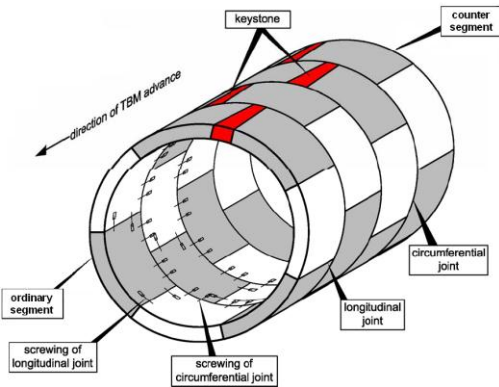
ELEMENTOS TÍPICOS DEL SOPORTE

- Concreto lanzado (en distintas capas, con o sin fibra metálica)
- Pernos (Bulones) (de acero corrugado con resina, de expansión, autoperforantes ...)
- Mallazo (electrosoldado)
- Cerchas (TH, reticulares) y elementos de sujeción
- Tresillones o separadores
- Chapa Bernold
- Paraguas mediante enfilajes o micropilotes



2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO

ANILLO DE DOVELAS



- Requiere el empleo de tuneladoras (TBM), de tipo escudado en las que el avance de la máquina se produce mediante el accionamiento de gatos hidráulicos que reaccionan, bien contra anillos prefabricados (hormigón armado o metálico) que constituyen el revestimiento, o bien mediante codales o grippers contra el terreno, en caso de roca competente.
- Debe diseñarse para soportar empujes del terreno y del agua
- Posteriormente (o concurrentemente) a la instalación se debe llevar a cabo una inyección o relleno del trasdós.

2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO

ANILLO DE DOVELAS

Ventajas:

- Rapidez en tramos largos de trabajo (mayores de 2-3 km, 200-500 m/mes).
- Gran seguridad para los trabajadores.
- Reducción de necesidad de tratar el terreno.
- En modo EPB disminuyen los problemas relacionados con las filtraciones de agua
- Limitación de la repercusión negativa en el macizo rocoso
- Control de la estabilidad del frente.



2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO

ANILLO DE DOVELAS

Inconvenientes:

- Fuerte inversión inicial. Difícil amortización en longitudes cortas (<5 km) y grandes diámetros (>12 m).
- Un solo frente de trabajo.
- Necesidad de gran ocupación de terreno, no solo para introducir la máquina, sino para fabricar y almacenar las dovelas.
- Problemas en frentes mixtos con las alternancias de materiales duros y blandos que obligan a diseñar la máquina para ambos casos.
- La geometría de excavación y el trazado no admite variaciones.
- El detritus puede requerir vertederos especiales



2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO

SOSTENIMIENTOS SEMIMANUALES

Método Tradicional de Madrid

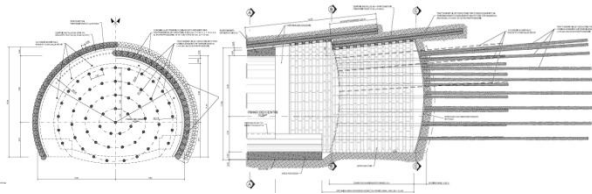
- Excavación por fases, que se caracteriza por un entibación y soporte con puntales de madera y longarinas de perfiles de acero
- El sistema soporte-revestimiento es mediante hormigón en masa

Método Alemán

- Como el anterior se trata de un método semimanual de excavación por fases. En este caso lo primero que se ejecuta son las galerías en hastiales, después la bóveda y, por último, se realiza la destroza y finalmente la solera, excavando al abrigo de la bóveda



2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO



OTROS MÉTODOS

Método Adeco-RS

- Para ello, se basa en actuar sobre el frente para asegurar y aprovechar el efecto de confinamiento

Método Bernold

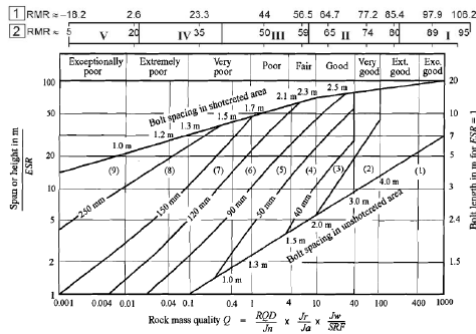
- Concreto bombeado para el sostenimiento empleando encofrado chapas tipo Bernold como encofrado perdido apoyadas en cerchas
- En la actualidad, este método apenas se usa debido a la puesta en obra del hormigón proyectado en grandes espesores y los riesgos que conlleva la ejecución del sostenimiento

2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO

SOPORTE – REVESTIMIENTO

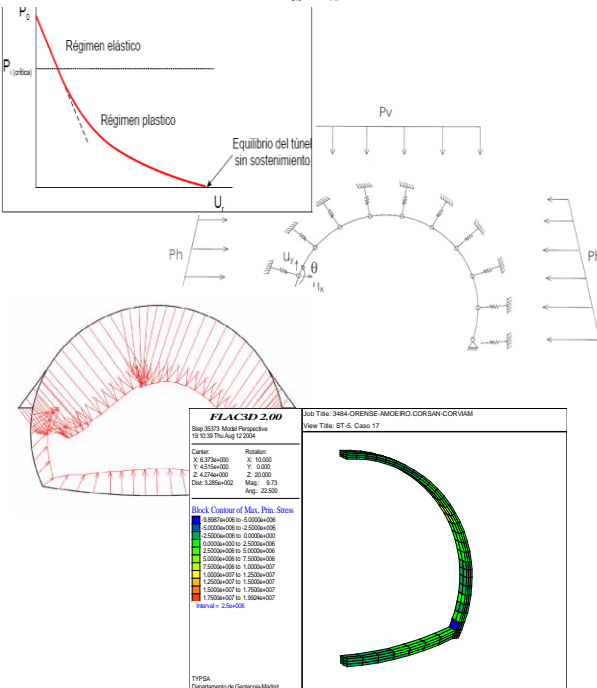


2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO



MÉTODOS DE CÁLCULO DE SOPORTE Y REVESTIMIENTO

- **Métodos analíticos** (Terzagui (1946) Protodyakonov (1952))
- **Métodos empíricos** (RMR Bieniawski (1979-1989), RMI Palmstrom (1996), Q Barton (1974-2003))
- **Método de convergencia-confinamiento** (Rabcewick (1948) y Müller (1969) NATM curvas características)
- **Métodos de las reacciones hiperestáticas** (módulo de balasto) Permiten considerar hip. de combinación de acciones y distintas rigideces (desactivar muelles. No tracciones)
- **Métodos de elementos o diferencias finitas**

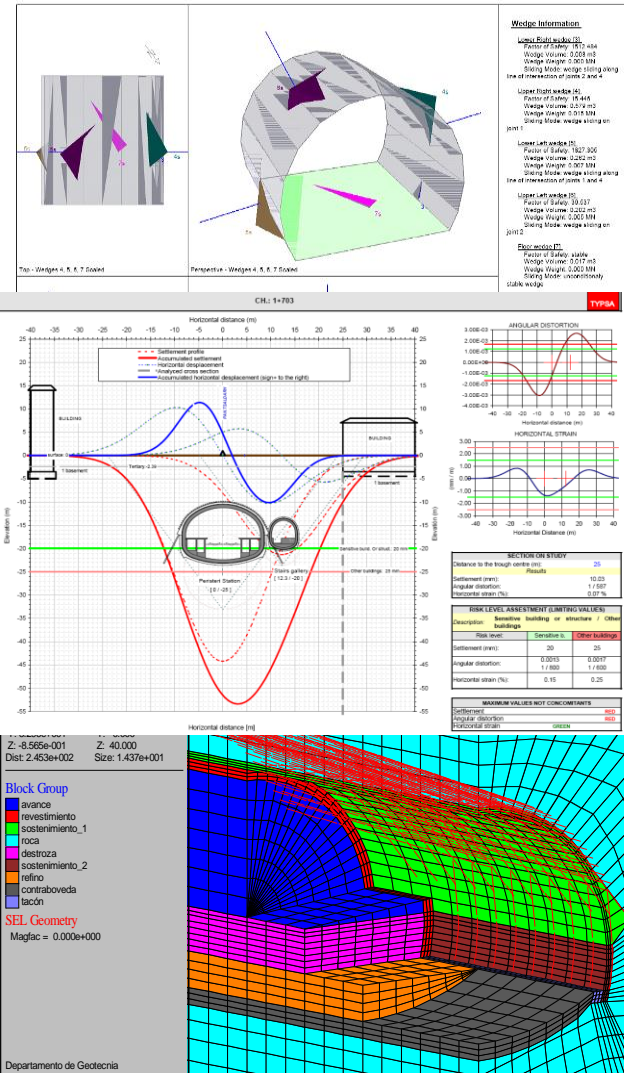


2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO

ANÁLISIS Y COMPROBACIÓN DE MODOS DE FALLO

Estabilidad de la sección para distintas acciones:

- Bloques y cuñas
- Equilibrio tenso-deformacional
- Subsidiencias
- Estabilidad del frente
- Filtraciones
- Estabilidad del soporte-revestimiento para distintas hipótesis de acciones (terreno-agua)
- Resistencia al fuego



2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO

EL REVESTIMIENTO:

- Constituye la capa más interna y por tanto está expuesta al espacio libre interior del túnel. Podrá tener función estructural o no dependiendo de las condiciones asumidas en el diseño
- Puede aplicarse o no (criterio de diseño)
- Puede ser completo (contrabóveda, hastiales y bóveda), o parcial cuando no tiene función estructural (paneles)
- En caso de necesidad por acciones externas debe ser continuo y estanco
- Puede requerirse por razones de seguridad (por ventilación, por resistencia al fuego, a impactos, por confort ,iluminación, etc.)



2. SISTEMA SOPORTE – REVESTIMIENTO

TENDENCIAS EN DISEÑO SOPORTE – REVESTIMIENTO



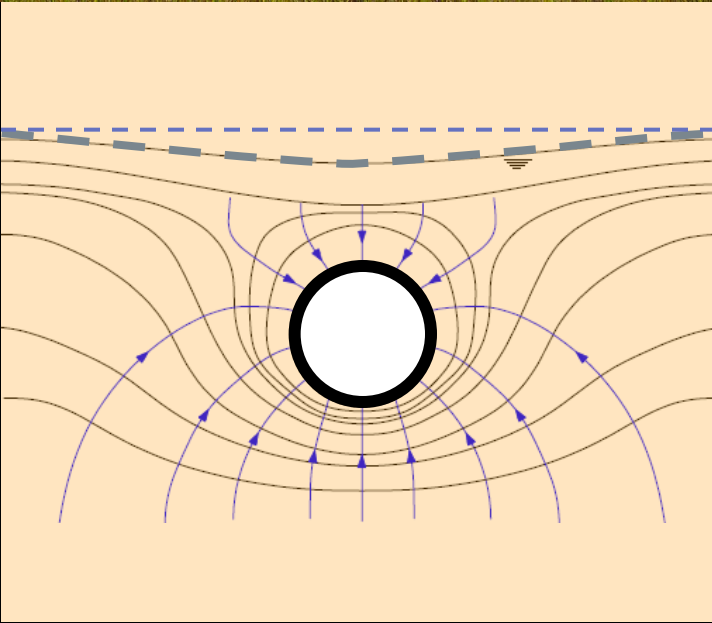
- Considerar el funcionamiento integrado del conjunto soporte-revestimiento-capas de impermeabilización-y de mejora de calidad (*Sistema Monolítico o Composhield*)
- Mayor atención a los aspectos ambientales e hidrogeológicos: láminas de PVC o de HPDE, membranas proyectables
- En Concreto Lanzado: Incorporación de fibras, acelerantes libres de álcali, considerar criterios de absorción de energía en la evaluación de las propiedades mecánicas, etc.
- Empleo de sistemas de protección pasiva contra incendios, de mayor adherencia, resistencia y durabilidad: Morteros inífungos (base ligante de yeso o cemento, árido perlítico, y vermiculita (mineral micáceo resistente al fuego)).

Índice

- 1.- Procedimientos constructivos
- 2.- Sistema de soporte y revestimiento
- 3.- Hidrogeología en túneles



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES



- En el interior del túnel la presión es la atmosférica (gradiente), por tanto un túnel supone una “llamada potencial” al agua del entorno
- ¿Puede ser drenado?
- ¿Tiene que ser necesariamente estanco?
- ¿De que depende esa decisión?
 - Del caudal de filtración admisible (riesgos al entorno y al propio túnel)
 - De las posibilidades operativas: sistema constructivo y de sus limitaciones técnicas y económicas

3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

EL AGUA ↔ EL TÚNEL

- Influencia en el medio ambiente: aguas superficiales y aguas subterráneas
- Influencia en el procedimiento constructivo
- Influencia en la estabilidad de la cavidad y en las presiones sobre el revestimiento
- Influye en la explotación del túnel



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

A partir de los 1960s, se empezó a tomar conciencia de los riesgos de daños potenciales, para la propia infraestructura y al entorno por:

- Afección al entorno (pozos, manantiales, vertidos)
- Arrastres de sólidos en suspensión
- Formación de hielo
- Corrosión de los elementos metálicos del sostenimiento
- Precipitación de sales
- Ataque químico a los hormigones
- Afección al pavimento
- Afección al tráfico rodado



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

**Dos situaciones diferenciadas para
control de filtraciones:**

Durante la excavación

Fase de explotación



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

Efectos en fase de construcción

- Disminución de la resistencia y estabilidad del macizo. Alteración y meteorización de las rocas por cambio de humedad. Lavado de diaclasas.
- Aumento de las presiones intersticiales sobre el sostenimiento y el revestimiento
- Presiones-deformaciones, hinchamientos y reblandecimientos en materiales arcillosos
- Cambios mineralógicos o disoluciones por evaporación o hidratación
- Inestabilidades en el avance de la excavación
- Problemas de estabilidad por incremento de peso de los materiales
- Afecciones temporales a manantiales, cauces, pozos, y otros impactos ambientales.



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

En fase de explotación

- Degradación del terreno encajante en la zona descomprimida
- Disolución de rocas evaporíticas
- Arrastre de finos en terrenos erosionables
- Formación de sales (hinchamiento y ataque químico al revestimiento): por cambios químicos, anhidrita, etringita, monosulfatos, taumasita,...
- Aumento de la presión intersticial tras el soporte - revestimiento
- Degradación de las plataformas y subbases por disminución de las características mecánicas en terrenos margosos y otros poco cementados como areniscas, lutitas (argilitas y limolitas)
- Afección a la explotación

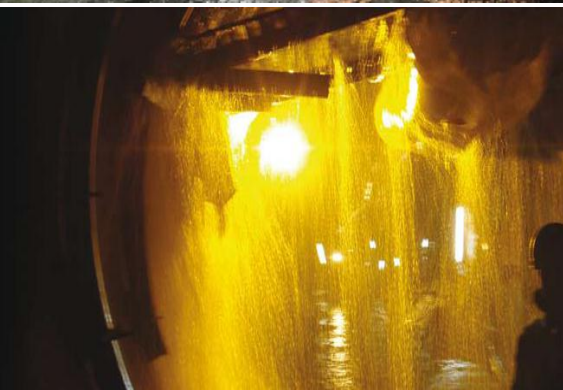


3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

CONTENDIO DE UN ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA UN TÚNEL:

- Recopilación de datos e información previa
- Cartografía e interpretación geológica
- Seguimiento de niveles de agua (piezómetros)
- Control de la pluviometría (diferenciar época de estiaje y de la de escorrentía)
- Inventario de puntos de agua, pozos, torrentes, surgencias. (en Colombia: Formulario Único Nacional de Inventario de Aguas Subterráneas (FUNIAS))
- Hidrología superficial, balance hidráulico, estimación de recargas, salidas, hidroquímica, etc.
- Elaboración de modelos hidrogeológicos analíticos y/o numéricos (hipótesis e interpretación)
- Supervisión y seguimiento de la medición de aforos en bocas de túnel
- Levantamientos geológicos de los frentes y seguimiento de la auscultación de túnel
- Revisión de los modelos hidrogeológicos

3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES



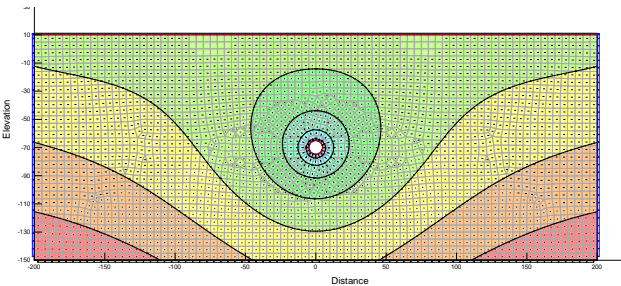
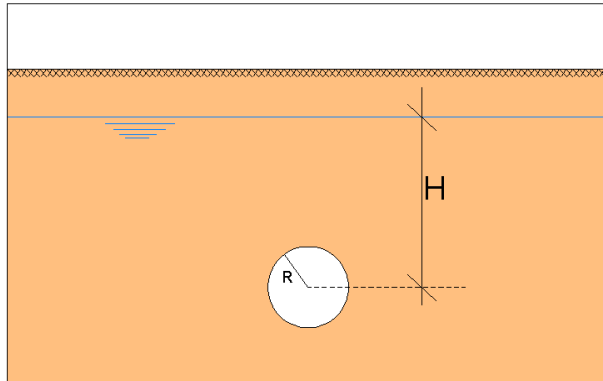
- El caudal máximo de filtración influye en la elección del procedimiento constructivo y drenaje e impermeabilización del túnel
- Debe ser el compatible con el adecuado balance hidrogeológico y con las presiones del entorno y a las que debe estar sometido el túnel
- La mayoría de los túneles carreteros son drenados
- Una limitación de caudal muy exigente puede suponer un coste elevado que debe ser proporcional al riesgo que se pretende mitigar

Debe efectuarse un balance entre la presión sobre el revestimiento-sostenimiento y el caudal de filtración que se esté dispuesto a asumir

3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

Modelos hidrogeológicos:

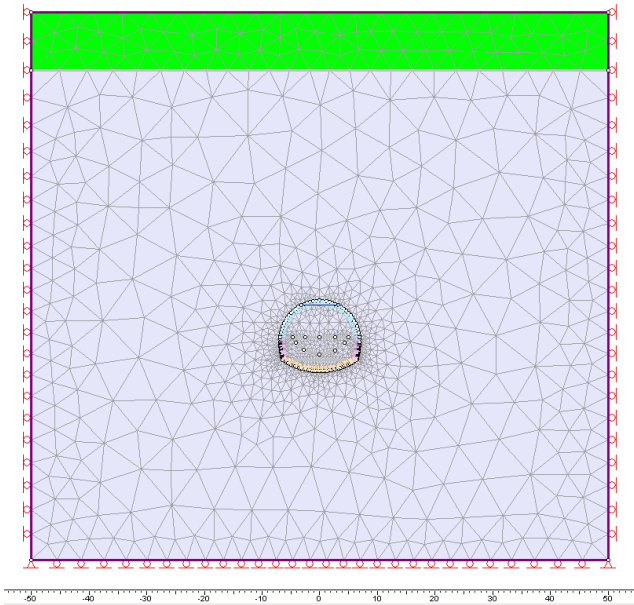
- Identificaciones de zonas problemáticas: fracturas, contactos litológicos, etc.
- Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico. Tipo de acuífero (libre, confinado, etc.), entradas y salidas, balance, zona de recarga...
- Parámetros hidrogeológicos
- Niveles piezométricos y su oscilación
- Modelo flujo (isopiezas)
- Estimación de los caudales y presiones previsibles
- Otros: Composición química y agresividad del agua



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

Modelos hidrogeológicos:

- Estimación de caudal de filtración:
 - Métodos analíticos (Goodman, Métodos de Goodman, Heuer, Domenico and Schwartz, El Tani...)
 - Métodos numéricos (FLAC, PLAXIS, MIDAS-GTS, FEFLOW, MODFLOW, SEEP,...)
Régimen transitorio y permanente
- Parámetros críticos: permeabilidad conductividad, transmisividad del entorno k [m/s], ...
- Los modelos hidrogeológicos pueden ser extraordinariamente complejos al depender de múltiples factores. Requieren un tiempo prolongado para la calibración



$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot H}{\ln\left(\frac{2H}{R}\right)}$$

Goodman, 1965

3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

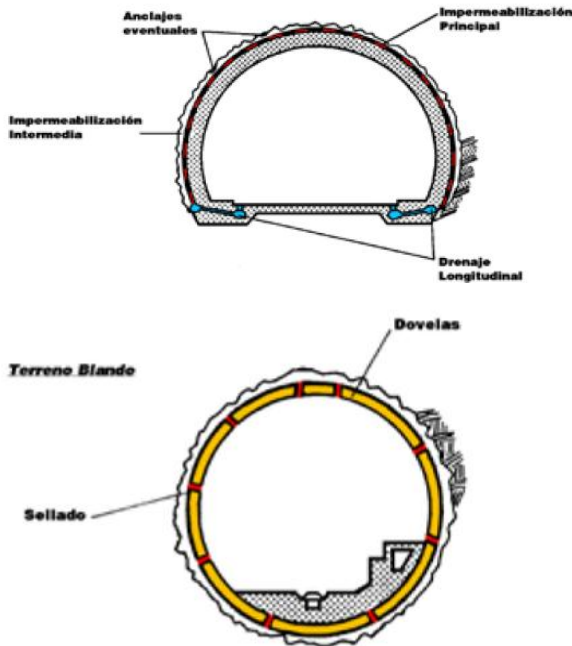
Estrategias para control de filtraciones durante la fase de explotación

- Revestimiento (concreto in situ bombeado o proyectado, concreto prefabricado (dovelas)),
- En caso necesario con capacidad de soportar presiones y prácticamente impermeable.
- Si la infiltración es admisible, con la incorporación de láminas y sistemas de drenaje
- En caso necesario: Tratamientos del terreno



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

SISTEMA DRENANTE

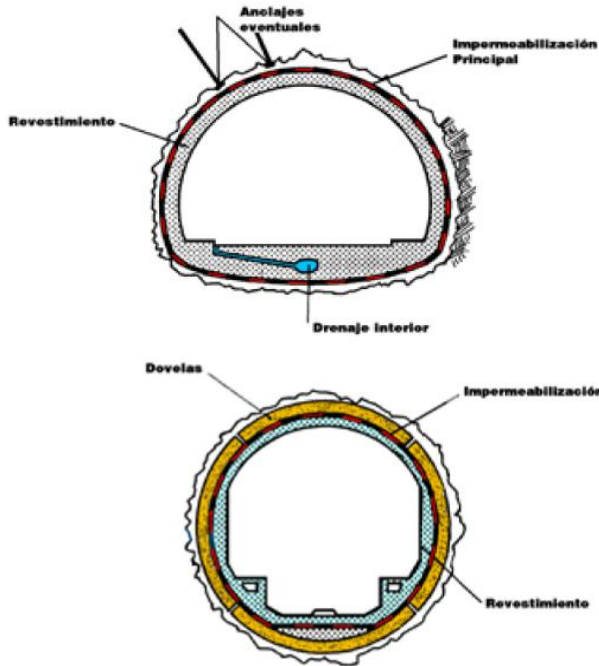


- Lámina de impermeabilización (paraguas) + geotextil
- La lamina impide el paso del agua al interior de la zona útil del túnel
- Funciones del geotextil:
 - Proteger la lámina del punzonamiento
 - Evacuar el aire – agua durante el hormigonado
 - Conducir el agua hacia el exterior mediante los sistemas de drenaje del túnel



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

SISTEMA ESTANCO



- Revestimientos con capacidad de soportar presiones de agua
- En NATM contrabóveda, en TBM anillos con juntas EPDM
- Juntas de estanqueidad
- Lámina de impermeabilización o membranas proyectables
- Tratamientos del terreno, localizados por zonas o sistemáticos (compartimentación)



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

CONTROL DE FILTRACIONES

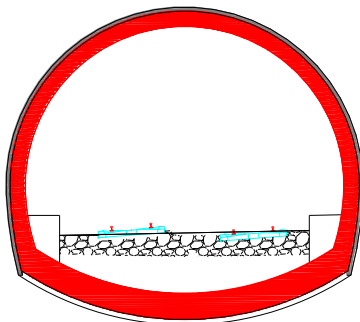
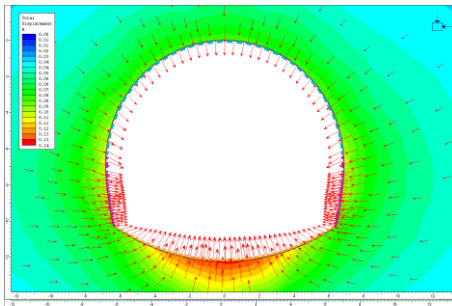
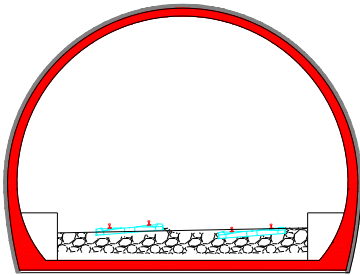
- Permitir que el agua entre desde el frente. Drenaje por gravedad a través de canales.
- Perforaciones por delante del frente para reconocimiento y favorecer el drenaje
- Taponamientos de filtraciones localizadas mediante morteros, concreto, etc...
- Inyecciones de consolidación con taladros de longitud variable
- Impermeabilización intermedia (soporte – revestimiento)
- Aplicación de concreto lanzado o mortero (gunita)
- Inyecciones de contacto entre el terreno y el sostenimiento mediante taladros cortos, a baja presión



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

DISEÑO DEL REVESTIMIENTO FRENTE AL AGUA

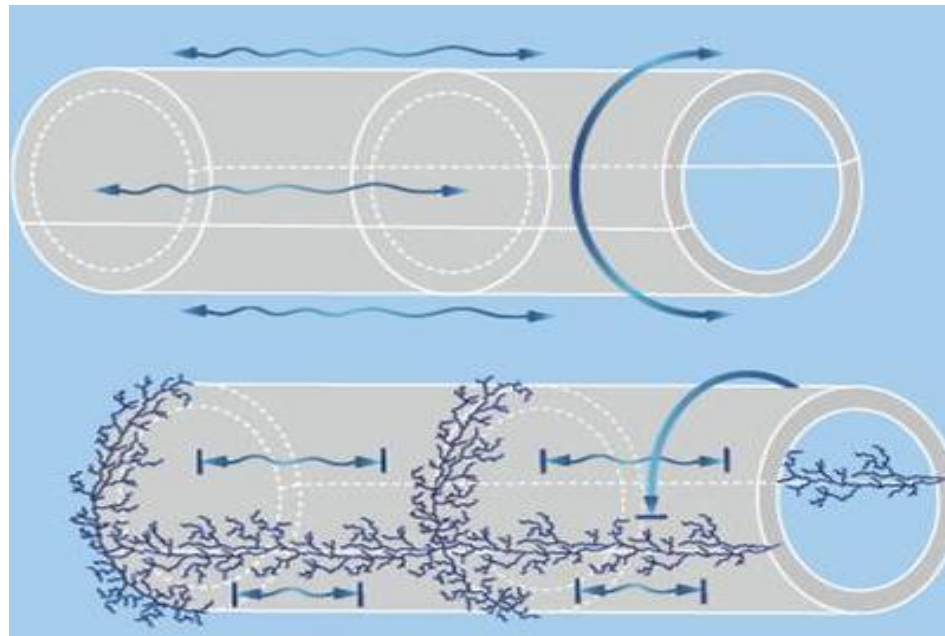
- Revestimiento (concreto in situ bombeado o proyectado, concreto prefabricado (dovelas), con capacidad de soportar presiones y prácticamente impermeable
- Las presiones del agua pueden ser variables y excéntricas (por anisotropías y fallas)
- Las situaciones temporales pueden ser más desfavorables que las definitivas
- La determinación precisa de la presión real del agua a la profundidad del túnel es muy difícil
- La necesidad de tener que soportar presiones de agua elevadas puede hacer incrementar las dimensiones de la excavación y del revestimiento, (coste) de forma muy significativa



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

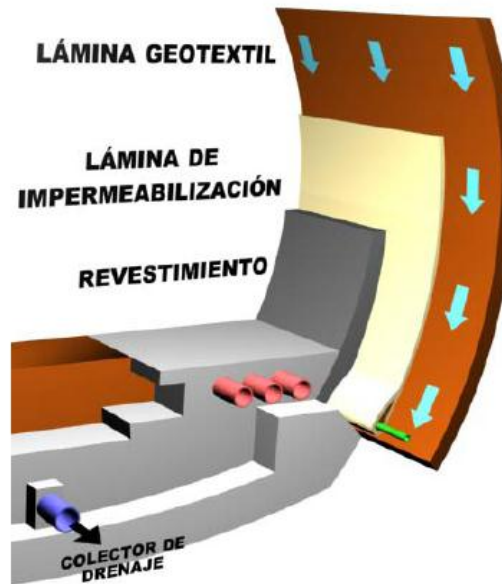
Sistemas drenados <> Sistemas estancos

- El agua puede fluir en cualquier dirección
- Estrategia: creación de barreras para confinar por tramos



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

Láminas de impermeabilización o membranas proyectables

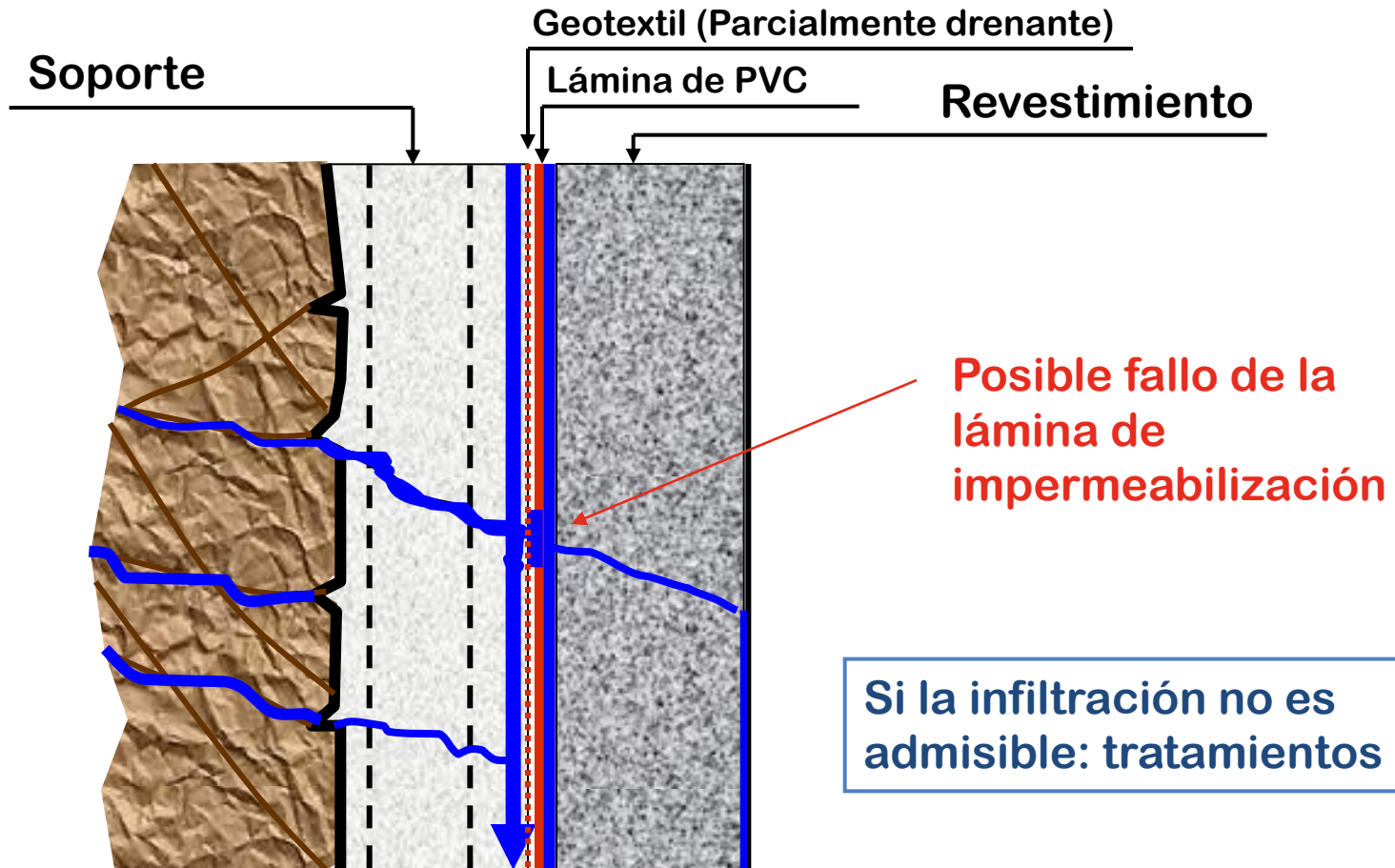


Sistemas drenados Sistemas estancos

- En la práctica habitual se disponen láminas de impermeabilización de PVC, combinadas con geosintéticos entre el sostenimiento y el revestimiento.
- Uniones mediante solape termosoldado



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES SISTEMA DRENADO CONVENCIONAL



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

Láminas de impermeabilización o membranas proyectables

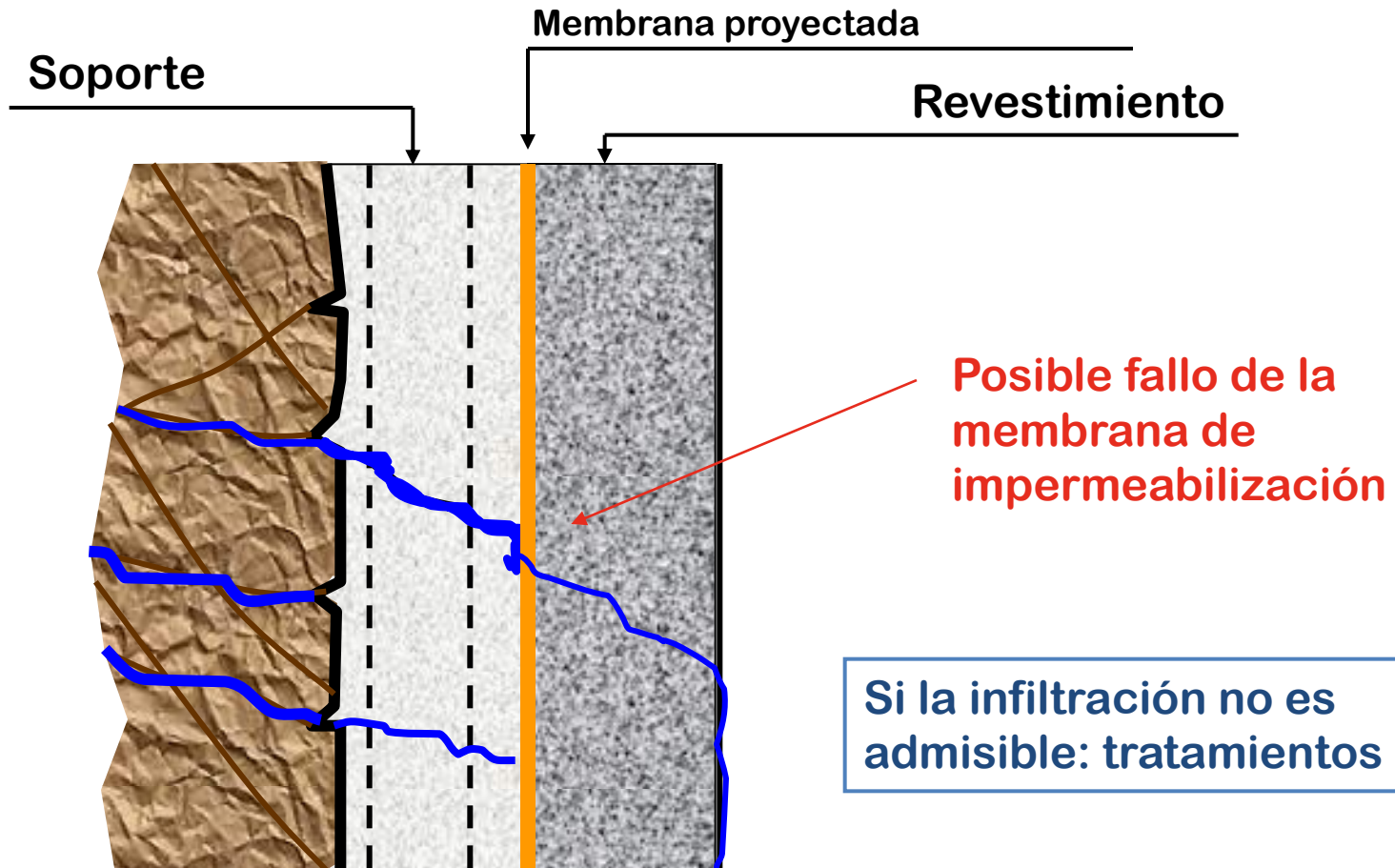
Sistemas drenados Sistemas estancos

- Actualmente se están desarrollando sistemas que permiten un mayor grado de estanqueidad como las láminas adherentes de HDPE, o las membranas de polímeros proyectables
- No son aplicables directamente con flujos de agua

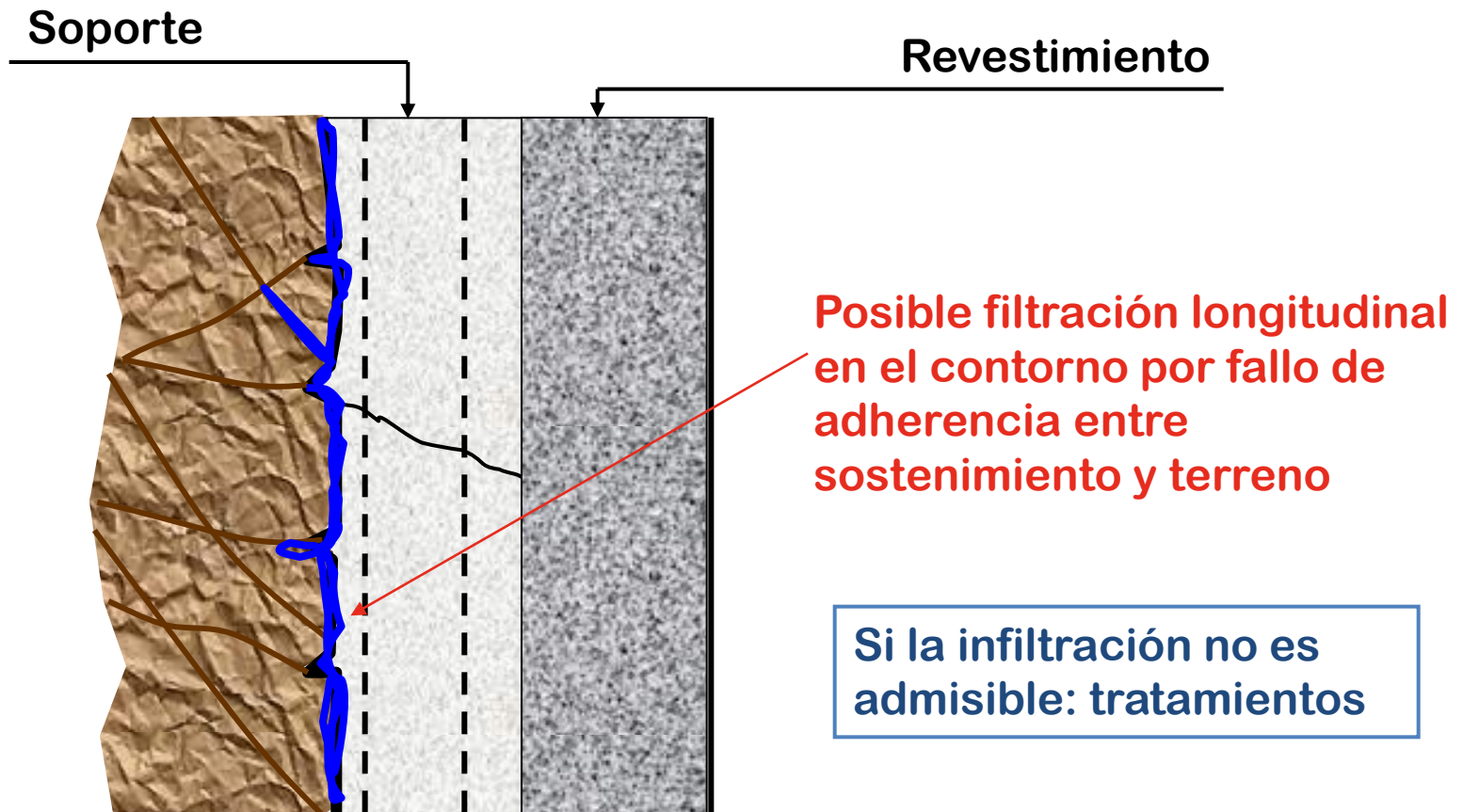


3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

SISTEMA MONOLÍTICO DE IMPERMEABILIZACIÓN



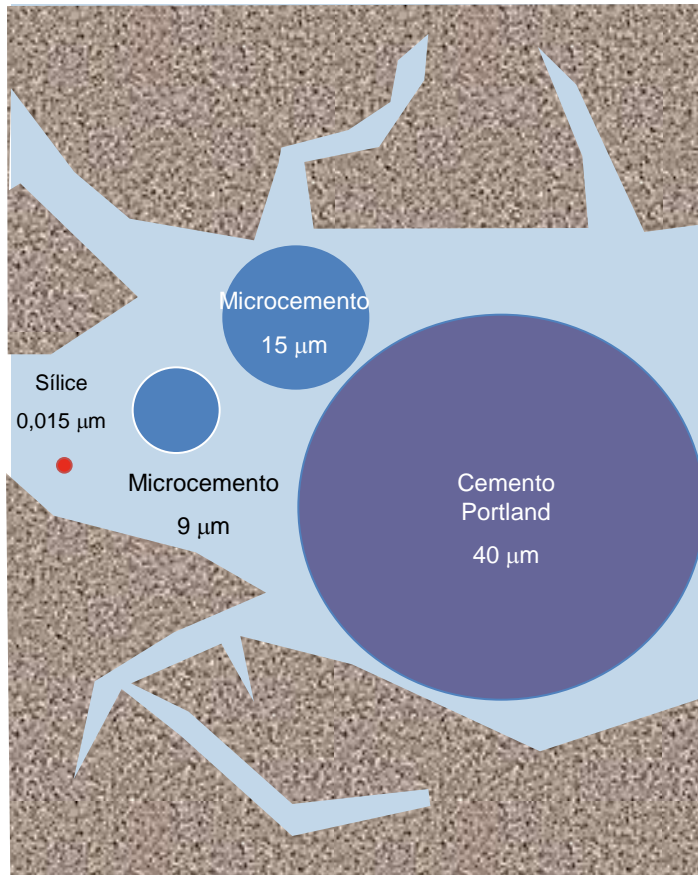
3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES GENERAL



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

TRATAMIENTOS DEL TERRENO

- Identificación de las zonas de mayor aporte
- Combinación de drenaje e impermeabilización
- Establecer la apertura de diaclasas o tamaño de cavidades a rellenar
- Estimación de la porosidad a rellenar
- Selección del tipo de inyección por objetivo de permeabilidad
- Diseño de taladros (separación, longitudes, secuencias de inyección)
- Control de parámetros: volumen de admisión, presiones y caudales



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

TRATAMIENTOS DEL TERRENO

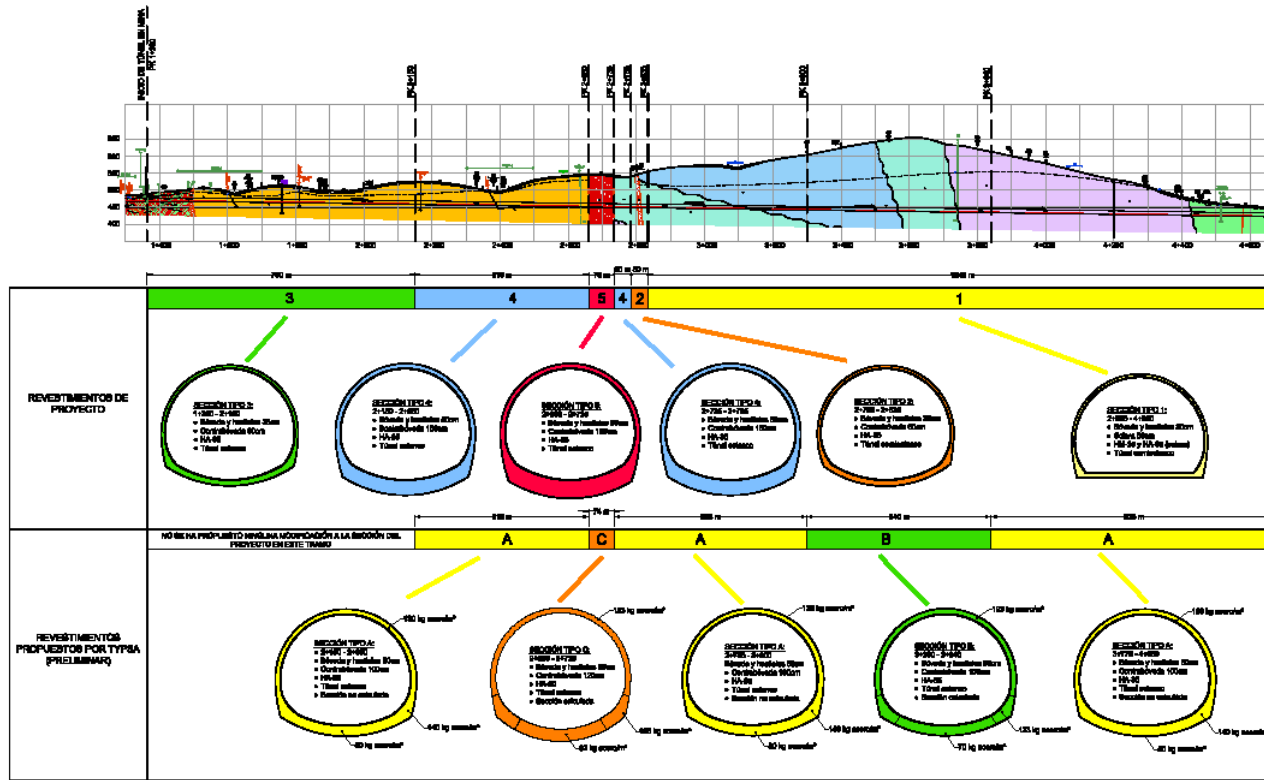
- Rellenos de mortero
- Lechadas de cemento
- Lechadas de microcemento de fraguado rápido
- Gel de Silicato
- Espuma de poliuretano
- Sílice coloidal
- Acrílatos

Productos certificados No tóxicos
(NO con base de acrilamida)



3. HIDROGEOLOGÍA EN TÚNELES

ESTRATEGIA PARA CONTROL DE FILTRACIONES



- Combinación de secciones drenadas, estancas y tratamientos del terreno
- Aplicar soluciones adecuadas a cada tramo particular: sectorización

NOTA:
LOS TRAMOS DE APLICACIÓN SON SOLO ORIENTATIVOS, DEBIÉNDOSE AJUSTAR
EN OBRA DE ACUERDO CON LAS CONDICIONES REALES DEL TERRENO.

RESUMEN Y RECOMENDACIONES



- Frente al auge creciente de las máquinas integrales TBM, el sistema más utilizado para túneles carreteros interurbanos en roca sigue siendo el NATM
- Se debe efectuar una evaluación de la interacción túnel-entorno y determinar el caudal asumible de filtración para el adecuado diseño de la sección y los sistemas de impermeabilización y drenaje
- La tendencia actual es mejorar los sistemas de protección frente a filtraciones con sistemas monolíticos multicapa, de mayor adherencia, resistencia y durabilidad, e incorporar mejoras en la calidad de revestimientos frente a las acciones externas
- Existen muchos sistemas de tratamientos del terreno, probados con éxito, para actuar de forma preventiva o posteriormente a la construcción, cuando sea precisa su aplicación



**Muchas gracias por
su atención**